

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

DIEISON MOROZOLI DA SILVA

ARENIZAÇÃO E USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
ARROIO TAQUARI-MIRACATU: UMA ANÁLISE SOB A ÓTICA DO
SENSORIAMENTO REMOTO

ORIENTADOR: PROF. DR. SIDNEI LUÍS BOHN GASS

Porto Alegre, RS

2023

DIEISON MOROZOLI DA SILVA

ARENIZAÇÃO E USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
ARROIO TAQUARI-MIRACATU: UMA ANÁLISE SOB A ÓTICA DO
SENSORIAMENTO REMOTO

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sidnei Luís Bohn Gass – POSGea / IGEO / UFRGS

Prof^a. Dr^a. Eliana Lima da Fonseca - POSGea / IGEO / UFRGS

Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer - POSGea / IGEO / UFRGS

Prof. Dr. Eloir Missio – UNIPAMPA Itaquí

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Geografia, pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: prof. Dr. Sidnei Luís Bohn Gass

Porto Alegre, RS

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Dieison Morozoli da
Arenização e Uso e Cobertura da Terra na Bacia
Hidrográfica do Arroio Taquari-Maracatu: Uma Análise
sob a Ótica do Sensoriamento Remoto / Dieison Morozoli
da Silva. -- 2023.
123 f.
Orientador: Sidnei Luís Bohn Gass.

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

1. Areais. 2. Campo. 3. Landsat. 4.
Geoprocessamento. 5. Diagrama de Sankey. I. Gass,
Sidnei Luís Bohn, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Há quem diga que somos resultado de nossas vivências, das situações que presenciamos, dos livros que lemos, daquilo que fazemos e também do que ignoramos. De fato, tudo aquilo que até aqui vivi contribuiu de alguma forma para este momento.

Agradeço à Universidade Federal do Pampa, na qual firmei os primeiros passos na caminhada acadêmica, passando por dois cursos de graduação e uma especialização. A esta, também sou grato pelo fornecimento de traslado à área de estudo.

Meu total reconhecimento ao orientador e professor Dr. Sidnei Luis Bohn Gass, que tive a honra de compartilhar experiências acadêmicas que se iniciaram em 2013 e permanecem até hoje, passando por resumos, congressos, capítulos de livros, livro, artigos e tutoriais. Mais do que isso, agradeço por sua orientação na medida certa, que ao mesmo tempo em que indicou o caminho, forneceu ferramentas e recomendou produções, também proporcionou um cenário no qual meu crescimento aconteceu de forma natural e com ritmo próprio.

Grato à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a qual através de uma bolsa do Programa de Excelência Acadêmica, tornou possível a dedicação à presente obra científica.

RESUMO

O solo detém alta importância para a vida. No entanto, alguns solos apresentam maior fragilidade, dentre os quais se destacam aqueles com áreas de arenização. Essas áreas consistem em aglomerados de areia, erroneamente associados à desertificação, pois se desenvolvem em ambientes que não são áridos ou semi-áridos. O sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado para estudos sobre a arenização e se mostrou uma ótima ferramenta para esse propósito. A bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu engloba tanto usos e coberturas da terra diversos como também áreas de arenização, e, portanto, merece apreciação científica. Com isso, esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de identificar e quantificar as oscilações das áreas de arenização e do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu entre os anos de 1985 e 2020 através da utilização de produtos do sensoriamento remoto. Para tanto, imagens Landsat prontas para o uso, com pixels de 30 x 30 metros, foram submetidas a classificações supervisionadas, que tiveram seus valores tabulados e organizados em diagramas de Sankey. Os resultados também foram comparados com registros de estiagens e totais pluviométricos anuais pertinentes ao recorte temporal da pesquisa. Foram obtidos oito mapas temáticos do uso e cobertura da terra na área de estudo entre 1985 e 2020. Se constatou que, dos 653390 pixels de área total, os areais apresentaram valores entre 12489 pixels de 900m² e 11940 pixels, que decresceram entre 1985 e 2005, além de valores entre 8709 pixels e 10939 pixels, que aumentaram gradativamente entre 2010 e 2020. Através das tabelas de transição e diagramas de Sankey foi percebida considerável estabilidade nas classes de floresta e silvicultura, contrastante com uma alternância de locais e áreas totais das classes ligadas à agricultura. As maiores interações dos areais com outras classes foram identificadas em locais de solo exposto e nos campos. Os dados obtidos indicam que a pluviosidade tem influência sobre as áreas de arenização, porém não foi possível estipular sua intensidade.

Palavras-chave: Areais, campo, Landsat, geoprocessamento, diagrama de Sankey.

ABSTRACT

Soil holds high importance for life. However, some soils have greater fragility, among which those with sandization areas stand out. These areas consist of sand clusters, erroneously associated with desertification, as they develop in environments that are not arid or semi-arid. Remote sensing has been widely used for studies on sandization and has proven to be a great tool for this purpose. The watershed of the Taquari-Miracatu stream encompasses both different land uses and land covers as well as areas of sandization, and therefore deserves scientific appraisal. With this, this work was developed with the objective of identifying and quantifying the oscillations of the areas of sandization and of the land use and cover in the watershed of the Taquari-Miracatu stream between the years 1985 and 2020 through the use of remote sensing products. For this purpose, ready-to-use Landsat images, with 30 x 30 meters pixels, were submitted to supervised classifications, whose values were tabulated and organized in Sankey diagrams. The results were also compared with rainfall records and annual totals relevant to the time frame of the research. Eight thematic maps of land use and land cover were obtained in the study area between 1985 and 2020. It was found that, of the 653390 pixels of total area, the sands presented values between 12489 pixels of 900m² and 11940 pixels, which decreased between 1985 and 2005, in addition to values between 8709 pixels and 10939 pixels, which gradually increased between 2010 and 2020. Through the transition tables and Sankey diagrams, considerable stability was perceived in the forest and forestry classes, contrasting with an alternation of locations and total areas of the classes transmitted to agriculture. The greater interactions from the sands with other classes were identified in exposed soil sites and in the fields. The data obtained indicate that rainfall has an influence on the sandization areas, but it was not possible to stipulate its intensity.

Keywords: Sands, field, Landsat, geoprocessing, Sankey diagram.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu e sua localização.	15
Figura 2 – Cursos d'água da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.	17
Figura 3 – Formações geológicas da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.	18
Figura 4 – Geomorfologia da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.	19
Figura 5 – Solos da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.	20
Figura 6 – Carta-imagem da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.	22
Figura 7 – Detalhamento fotográfico dos pontos da carta-imagem da área de estudo (parte 1).	23
Figura 8 - Detalhamento fotográfico dos pontos da carta-imagem da área de estudo (parte 2).	24
Figura 9 – A arenização na bacia hidrográfica do arroio Puitã.	30
Figura 10 – A formação dos areais em encostas.	31
Figura 11 – Visualização tridimensional de areais na bacia hidrográfica do arroio Puitã	32
Figura 12 – gafanhoto encontrado nos areais do município de Manoel Viana.	35
Figura 13 – Estiagens anuais registradas pela estação Ponte do Miracatu, em São Francisco de Assis, entre 1975 e 2015.	40
Figura 14 – total de estiagens anuais entre 1970 e 2015 em São Francisco de Assis.	41
Figura 15 – Assinaturas espectrais de alguns alvos de uma imagem de satélite.	44
Figura 16 – Coleta de amostras e obtenção de imagem classificada.	51
Figura 17 – Procedimentos metodológicos utilizados para a elaboração do trabalho.	62
Figura 18 – Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 1985.	64
Figura 19 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 1990.	67
Figura 20 – Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 1985 e 1990 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.	71
Figura 21 - Totais pluviométricos (em mm) anuais entre os anos de 1985 e 2020 na estação pluviométrica Ponte do Miracatu.	72

Figura 22 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 1995.	73
Figura 23 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 1990 e 1995 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	75
Figura 24 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2000.	77
Figura 25 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 1995 e 2000 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	79
Figura 26 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2005.	81
Figura 27 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 2000 e 2005 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	83
Figura 28 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2010.	85
Figura 29 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 2005 e 2010 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	87
Figura 30 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2015.	89
Figura 31 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 2010 e 2015 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	91
Figura 32 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2020.	94
Figura 33 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 2015 e 2020 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	96
Figura 34 – Precipitações anuais (em mm) na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu entre os anos de 1985 e 2020.	100

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – conceitos radiométricos importantes para o sensoriamento remoto.....	43
Quadro 2 – Fontes de dados utilizadas ao longo do trabalho.	58
Quadro 3 – Quantificação das mudanças na contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 1985 e 1990 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	69
Quadro 4 - Quantificação das mudanças na contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 1990 e 1995 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	74
Quadro 5 - Quantificação das mudanças na contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 1995 e 2000 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	78
Quadro 6 - Quantificação das mudanças de contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 2000 e 2005 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	82
Quadro 7 – Quantificação das mudanças de contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 2005 e 2010 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	86
Quadro 8 - Quantificação das mudanças de contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 2010 e 2015 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	90
Quadro 9 - Quantificação das mudanças de contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 2015 e 2020 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.....	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	14
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	15
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
4.1	A BACIA HIDROGRÁFICA COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISE AMBIENTAL.....	26
4.2	DESERTIFICAÇÃO X ARENIZAÇÃO	28
4.3	A ARENIZAÇÃO.....	29
4.4	A QUESTÃO HÍDRICA E A ARENIZAÇÃO	38
4.5	O SENSORIAMENTO REMOTO.....	41
4.6	IMAGENS PRONTAS PARA O USO	48
4.7	ASSINATURAS ESPECTRAIS E CLASSIFICAÇÕES DE IMAGENS.....	50
4.8	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DE CLASSIFICAÇÕES.....	54
4.9	REPRESENTANDO AS MODIFICAÇÕES NO USO E COBERTURA DA TERRA ATRAVÉS DE DIAGRAMAS DE SANKEY.....	55
5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	56
5.1	ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS.....	56
5.2	CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS	58
5.3	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DAS CLASSIFICAÇÕES	59
5.4	MENSURAÇÃO DE ÁREAS DO USO E COBERTURA DA TERRA.....	60
5.5	CONTEXTUALIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA.....	61
5.6	FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
6.1	AS TRANSFORMAÇÕES NO USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU E A ARENIZAÇÃO ..	63
7	CONCLUSÃO	102

8	REFERÊNCIAS.....	104
9	APÊNDICES.....	110
	APÊNDICE 1 — MATRIZES DE ERROS DAS CLASSIFICAÇÕES OBTIDAS.....	110
	APÊNDICE 2 — QUANTIFICAÇÃO DETALHADA E AGREGADA DOS USOS E COBERTURAS DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU ENTRE OS ANOS DE 1985 E 2020 (EM QUILOMETROS QUADRADOS).....	113
	APÊNDICE 3 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM ²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 1985 E 1990 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU.....	114
	APÊNDICE 4 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM ²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 1990 E 1995 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU.....	115
	APÊNDICE 5 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM ²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 1995 E 2000 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU.....	116
	APÊNDICE 6 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM ²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 2000 E 2005 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU.....	117
	APÊNDICE 7 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM ²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 2005 E 2010 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU.....	118
	APÊNDICE 8 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM ²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 2010 E 2015 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU.....	119
	APÊNDICE 9 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM ²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 2015 E 2020 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU.....	120
10	ANEXOS	121
	ANEXO 1 – DISTRIBUIÇÃO DE DATAS DAS IMAGENS LANDSAT AO LONGO DO ANO.	121
	ANEXO 2 – CALENDÁRIO DE IMAGENS DO CUBO DE DADOS GLAD ARD.....	122

1 INTRODUÇÃO

O solo é importante para a manutenção da vida na Terra, inclusive para as mais diversas atividades antrópicas. Sobre o mesmo, podem acontecer as relações sociais, econômicas e de subsistência, ou seja, provimento de recursos necessários à sobrevivência. No que concerne às suas características físicas, o solo pode se apresentar sob diferentes formas. Segundo Santos *et al.* (2018, p. 27), o solo é constituído de partes sólidas, líquidas e gasosas e ocupa a maior parte das extensões continentais do planeta, e pode ser limitado superiormente pela atmosfera ou por porções de água. Devido às diferentes composições e processos climáticos, alguns tipos de solo são mais suscetíveis a modificações, dentre as quais é notória a arenização.

“Arenização indica uma área de degradação, relacionada ao clima úmido, em que a diminuição do potencial biológico não desemboca, em definitivo, em condições de tipo deserto” (SUERTEGARAY *et al.*, 2001, p. 353). Oportunamente, ressalta-se que nas áreas de arenização também ocorrem períodos de estiagem e secas. Apesar disso, áreas com arenização, por contarem com a presença considerável de areia, comumente são atribuídas a fenômenos como a desertificação. Portanto, é pertinente que se dediquem esforços para reforçar a compreensão da arenização como parte de uma dinâmica natural que não está associada à ausência da água.

Por se tratar de uma temática que abarca elementos de diversas áreas do saber, para o estudo da arenização convém que sejam utilizadas metodologias capazes de combinar informações variadas e relacioná-las. Através das geociências é possível espacializar fenômenos diversos e, a partir da sobreposição e comparação de diferentes planos de informações, gerar novos conhecimentos. A elucidação de fenômenos sobre a superfície terrestre, além de poder ser multidisciplinar, pode ser realizada através da utilização do sensoriamento remoto e os sistemas de informações georreferenciadas (SIGs).

O sensoriamento remoto é uma poderosa e versátil forma de obtenção de informações, pois consiste em “uma tecnologia para coleta à distância de informações e dados da superfície terrestre, das condições climáticas, das mudanças urbanas, as manifestações terrestres etc” (IBRAHIN, 2014, p. 97). Além disso, viabiliza a análise de dados referentes a grandes períodos de tempo, bem como sobre áreas de grandes extensões, que por vezes podem ser de difícil acesso para trabalhos em campo.

De forma a se compreender a evolução de um fenômeno ao longo do tempo, se faz necessária a construção de series temporais, capazes de expressar seu comportamento, e por conseguinte, permitir a identificação de eventos que o intensifiquem, ou mesmo, atenuem. Com diferentes sensores e imagens é possível monitorar formações vegetais (VICTORIA; ANDRADE; PAZ, 2009), albedo (SILVA *et al.*, 2010), evapotranspiração (CUNHA; TSUYUGUCHI; RUFINO, 2011) e degradação ambiental (SALES *et al.*, 2013), entre outros.

Para que seja possível o tratamento adequado das informações georreferenciadas presentes em imagens orbitais é necessário o respaldo dos SIGs. Um SIG pode ser definido como “um sistema de hardware, software, dados e estrutura organizacional para coletar, armazenar, manipular e analisar espacialmente dados ‘georreferenciados’, exibindo informações resultantes desses processos” (GHILANI; WOLF, 2013, p. 655). Nesse rol de possibilidades, cabe ressaltar sua utilização para estudos relacionados ao meio ambiente e ao uso da terra, segundo Ibrahin (2014, p. 78), e, portanto, também as áreas de arenização.

Os estudos do fenômeno de arenização no estado do Rio Grande do Sul foram realizados sob diferentes óticas, dentre os quais é possível destacar aqueles com vistas a aspectos litológicos, pedológicos e tectônicos (DUMMER, 2019), drenagem e orientação do relevo (ANDRADES FILHO; SUERTEGARAY; GUASSELLI, 2006), morfometria (GASS; SILVA, 2017). Naturalmente, essas são apenas algumas das diversas formas possíveis para a análise dessa temática.

Com o constante avanço tecnológico e científico, novas formas de pesquisa tem tornado praticável a automação de procedimentos de análise, inclusive no que concerne à arenização. Se outrora a identificação de feições imageadas era realizada a partir da vetorização manual de feições, agora é possível usufruir da classificação de imagens, procedimento que viabiliza a produção de mapeamentos a partir da delimitação da amostragem de pixels em imagens de sensoriamento remoto.

Diante de uma vasta base de informações, no contexto do Rio Grande do Sul composta em grande parte pelos trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o presente estudo reúne conhecimentos e os toma como fonte de informações e inspiração para a continuidade da discussão acerca da arenização. Também torna possível somar à mesma a utilização de técnicas de processamento digital de imagens.

Em meados dos anos 1960, conforme Duarte e Pozza Filho (2005), as áreas de arenização do sul do Brasil eram divulgadas como desertos. Posteriormente, diversos trabalhos obtiveram sucesso em elucidar a discussão sobre o fenômeno, tal como esperado do método científico, que a partir de um conjunto de saberes, evolui e se reinventa, enquanto se move em direção a uma maior compreensão do universo.

A trajetória que inspira esse estudo acerca da temática da arenização é advinda da participação em trabalhos relacionados. Isso remonta ao trabalho de Gass e Silva (2017), que ao discorrer sobre a morfometria e arenização na bacia hidrográfica da Sanga da Areia, trouxe o primeiro contato do autor com a existência dos areais. A utilização de recursos de SIG, imagens orbitais, além da geração de produtos cartográficos, foram harmonicamente vinculados a uma formação em engenharia cartográfica e de agrimensura. Da afinidade com a cartografia somada à perspectiva de estudar um fenômeno natural e hodierno, foram dados os primeiros passos.

Apesar do volumoso conjunto de conhecimentos já produzidos sobre a arenização, ainda se perpetuam questionamentos sobre como se sucedem as transições de cobertura da terra decorrentes dos deslocamentos dos areais. Em outras palavras, ainda é preciso identificar quais classes de uso e cobertura da terra são suprimidas e originadas em consequência do avanço e recuo dos depósitos de areia.

Considerada a necessidade de elucidar a relação entre a movimentação das áreas de arenização, as mudanças no uso e cobertura da terra e suas relações mútuas, é preponderante que técnicas de obtenção de informações como as do sensoriamento remoto sejam utilizadas.

2 OBJETIVOS

Para a realização da presente pesquisa, se definiu como objetivo geral: identificar e quantificar as oscilações das áreas de arenização e do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu entre os anos de 1985 e 2020 através da utilização de produtos do sensoriamento remoto.

Foram determinados como objetivos específicos:

- Identificar as áreas de arenização existentes na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu entre 1985 e 2020;
- Quantificar os aumentos e reduções nas áreas de arenização em intervalos quinquenais e sua relação com as mudanças no uso e cobertura da terra;
- Identificar relações entre as movimentações dos areais e a pluviosidade na área de estudo.

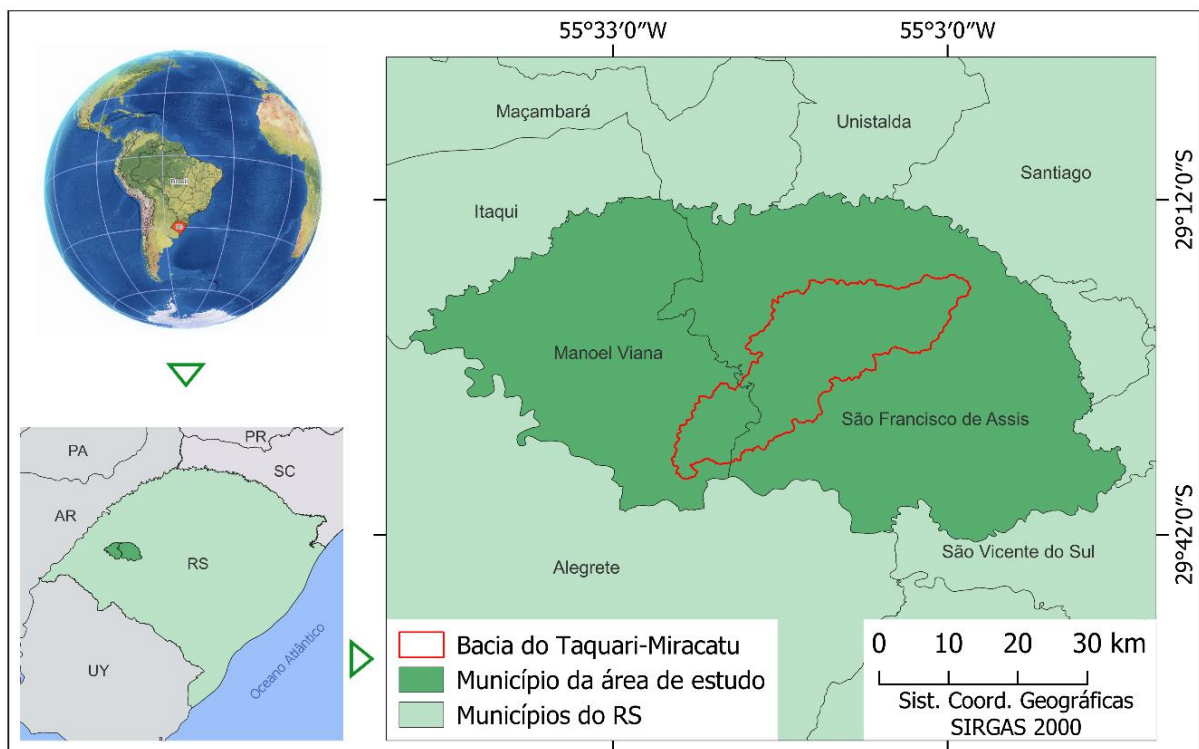
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo definida para este trabalho é a bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu, que está localizada nos municípios de Manoel Viana e São Francisco de Assis, conforme demonstrado na figura 1. A bacia, “com área de 588,05 km², está localizada no sudoeste do Rio Grande do Sul. É tributária do rio Ibicuí e banha terras dos municípios de São Francisco de Assis e Manoel Viana” (GASS; VERDUM, 2014, p. 3).

Manoel Viana, um dos municípios abrangidos pela área de estudo, está localizado na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. O município limita-se com Alegrete, Itaqui, Maçambará e São Francisco de Assis.

Por sua vez, São Francisco de Assis, o segundo município componente da área de estudo, limita-se com Maçambará, Unistalda, Santiago, Nova Esperança do Sul, Jaguari, Alegrete, São Vicente do Sul e Manoel Viana.

Figura 1 – Bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu e sua localização.

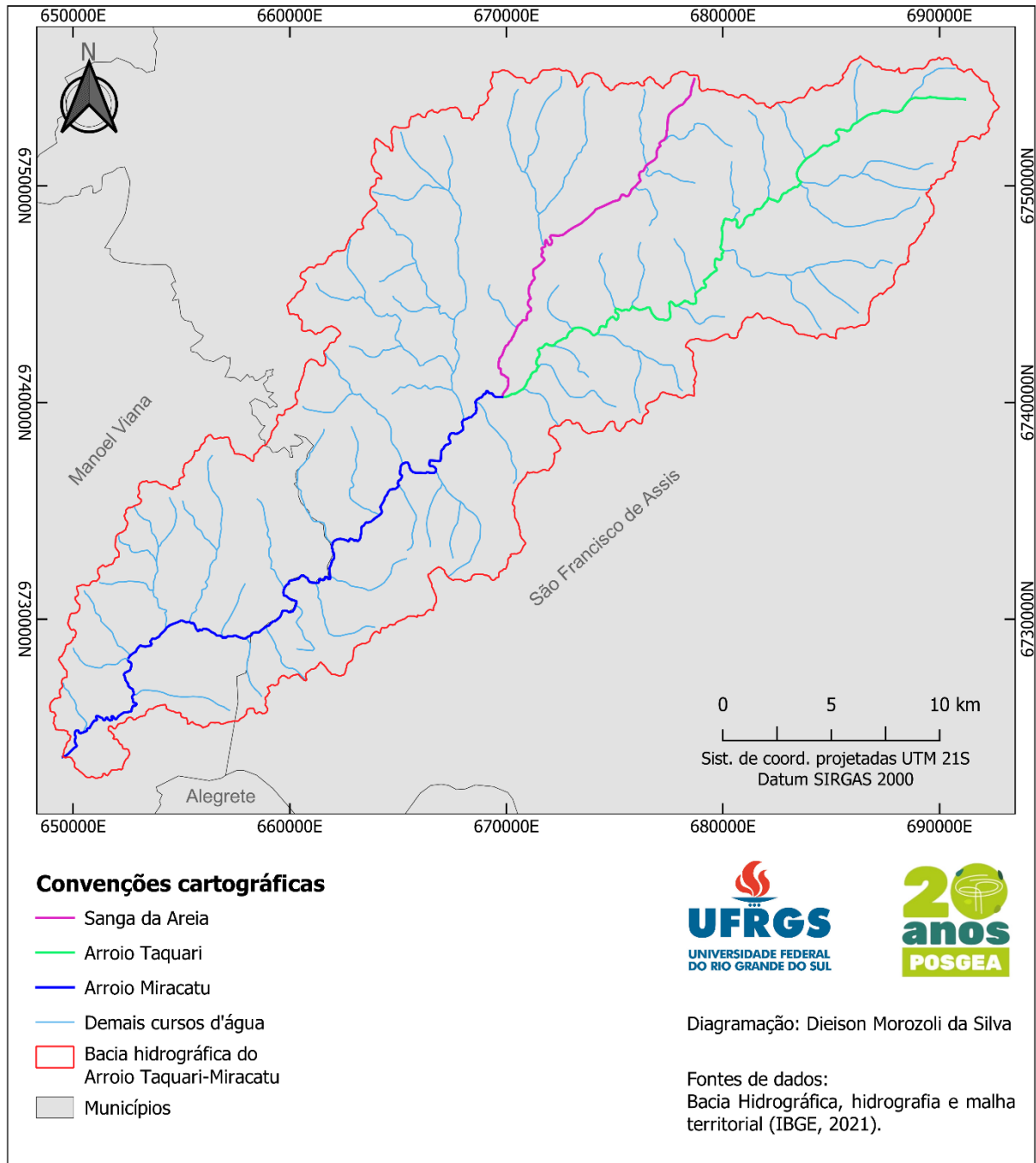


Como representado na Figura 2, a bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu tem sua origem atribuída a junção da sanga da Areia com o arroio Taquari, o qual é afluente do rio Ibicuí, de acordo com Gass (2015, p. 74).

Um comparativo entre a geologia (Figura 3) e a geomorfologia (Figura 4) permite perceber notáveis semelhanças entre ambos. As formações Serra Geral – Fácies Caxias possuem forma e localização condizentes com o Planalto dos Campos Gerais. Já a formação Paranapanema abriga os patamares da Serra Geral. Formações Botucatu e Rosário do Sul se encontram dispostos ao longo do Planalto da Campanha. Também ocorre a presença de depósitos aluvionares holocênicos, que nesse mapeamento, se mostram localizados principalmente ao longo de trechos da hidrografia. Essas formações geológicas coincidem com as planícies alúvio-coluvionares do mapa de geomorfologia na Figura 4. A presença de diferentes análises da área de estudo, que convergem para aspectos em comum, representam a possibilidade de visualizar a arenização como um fenômeno decorrente de fatores diversos e que atuam em conjunto.

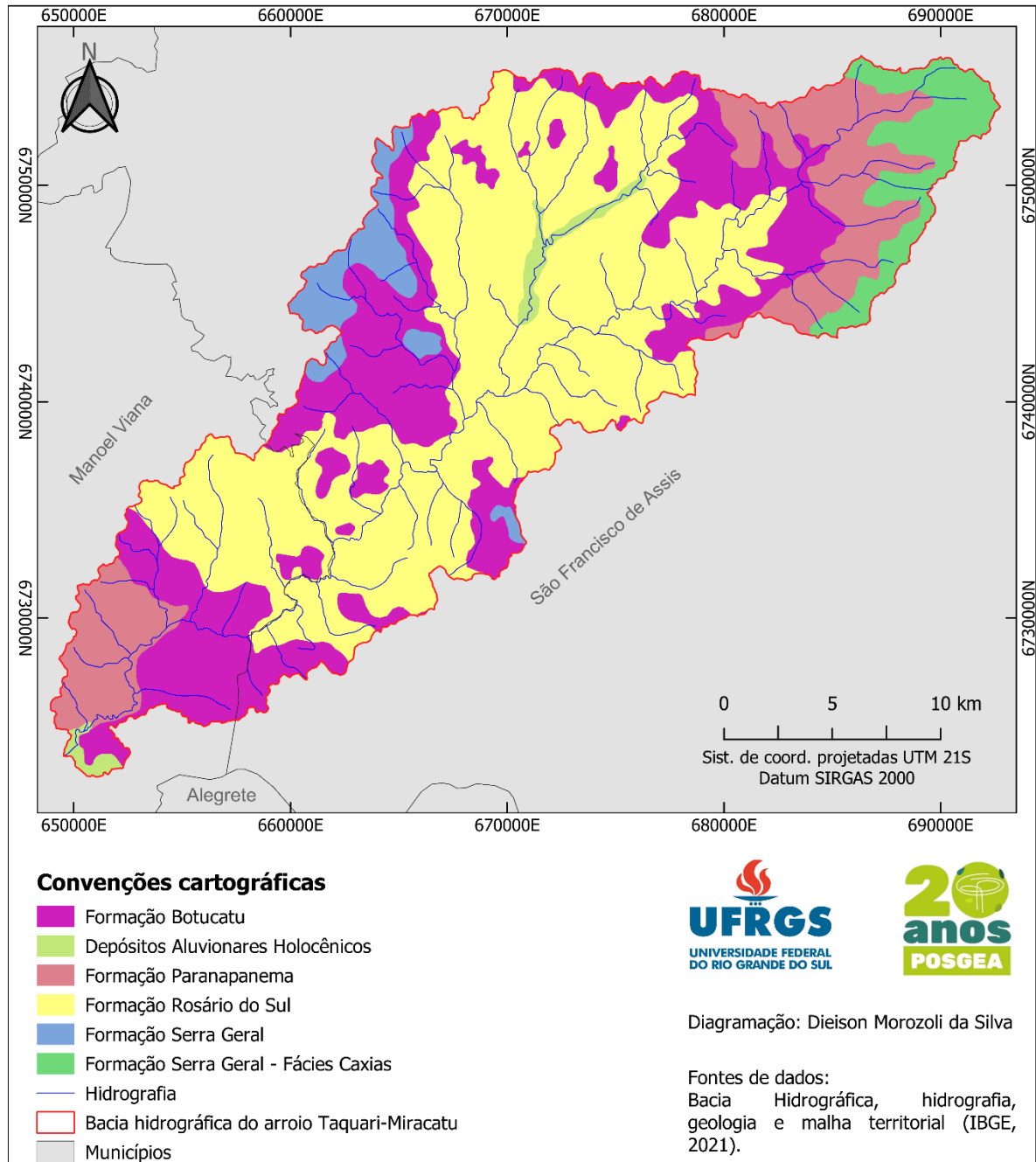
A semelhança entre mapeamentos também pode ser percebida na pedologia presente na bacia hidrográfica, representada na Figura 5. A conformação dos Neossolos nas maiores altitudes da bacia hidrográfica é similar às formações geológicas Serra Geral e Paranapanema, além de se assemelharem às formas das geomorfologias do Planalto dos Campos Gerais e dos Patamares da Serra Geral. Cabe destacar a presença de Neossolos Quartzarênicos órticos na área de estudo, comumente associados à áreas de arenização, como destacado por Silva (2009).

Figura 2 – Cursos d'água da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



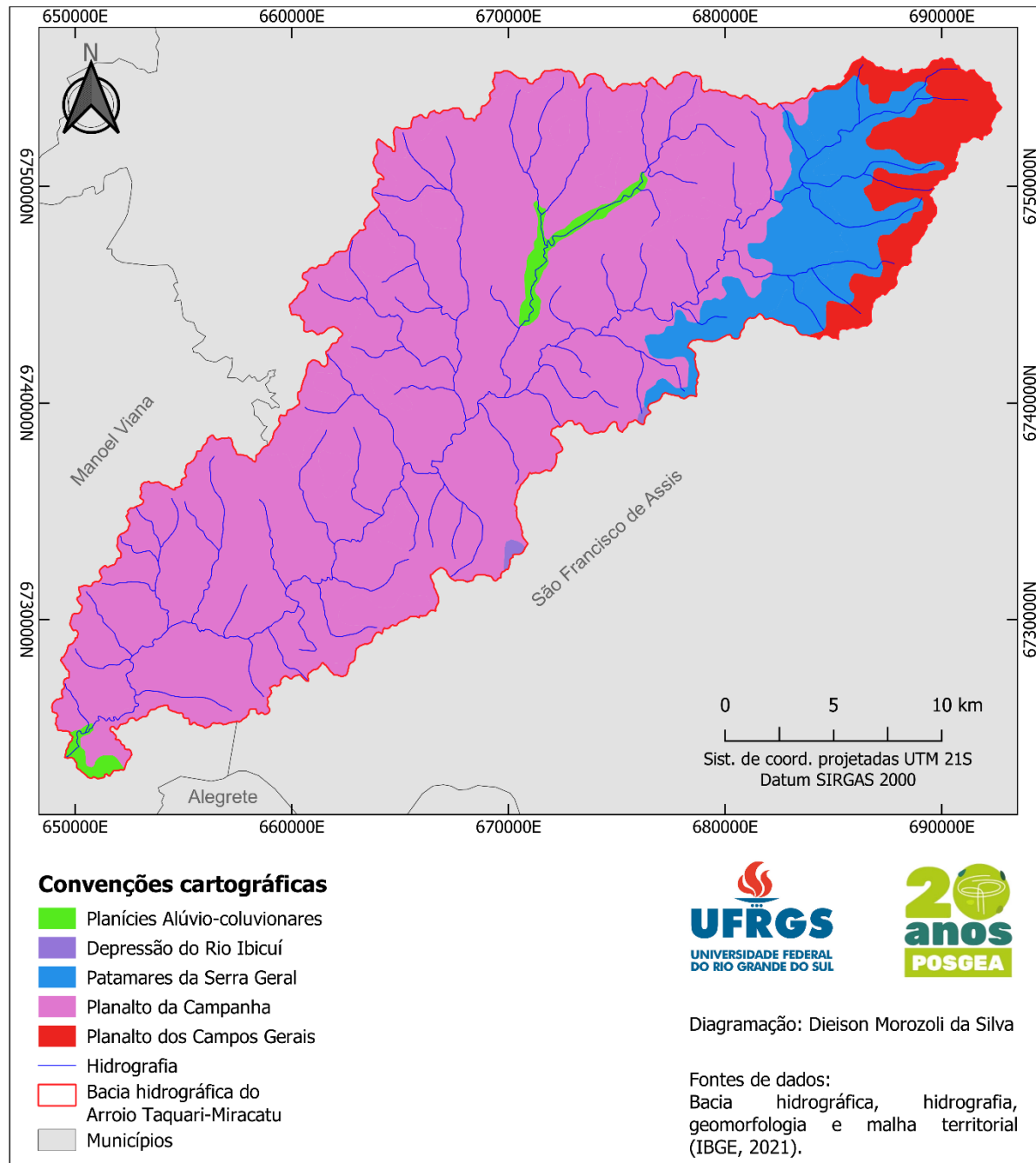
Fonte: o autor (2022).

Figura 3 – Formações geológicas da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



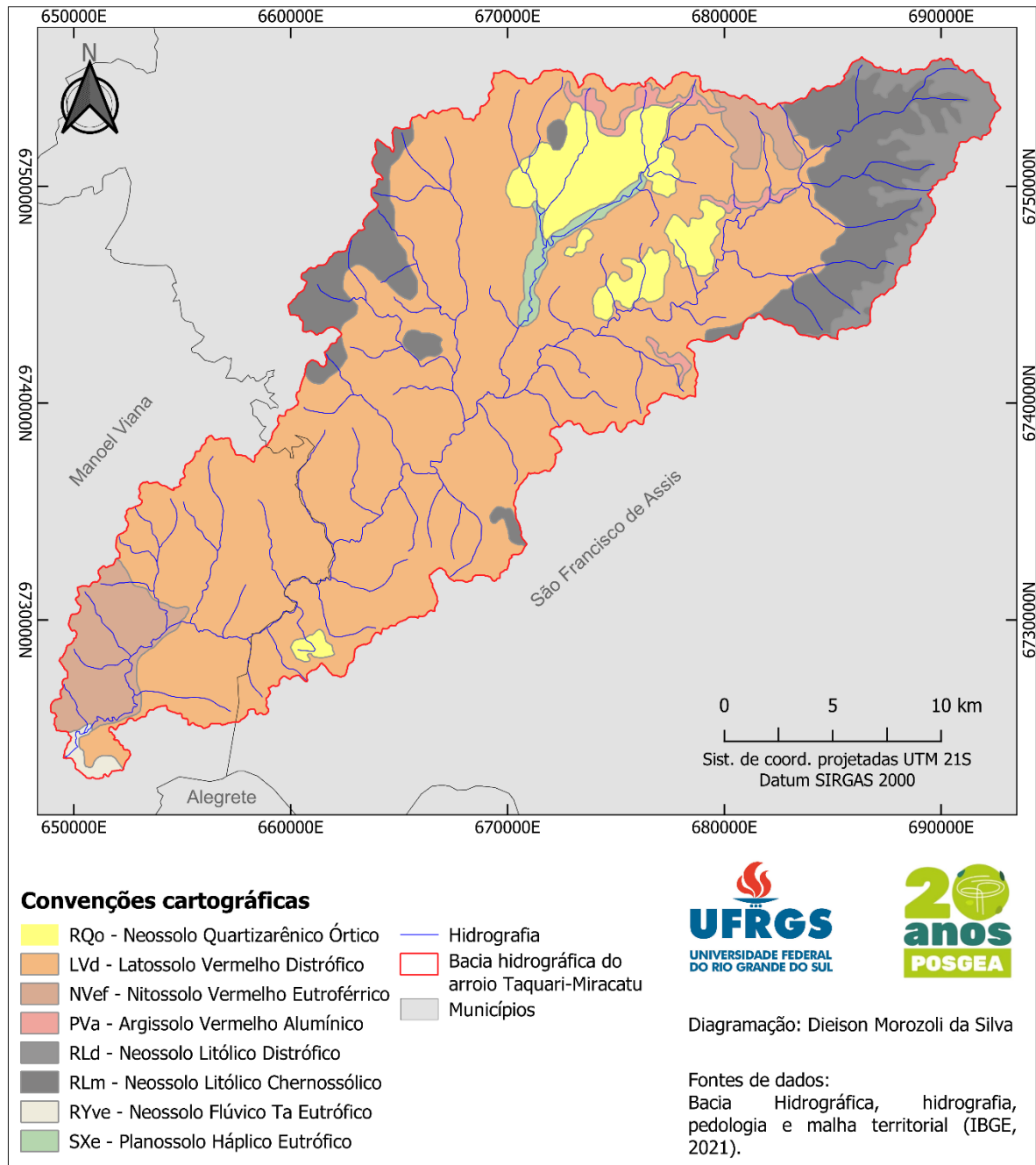
Fonte: o autor (2022).

Figura 4 – Geomorfologia da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



Fonte: o autor (2022).

Figura 5 – Solos da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



Fonte: o autor (2022).

A carta-imagem da Figura 6, que foi produzida a partir de uma cena capturada no dia 29 de julho de 2022 sobre a área de estudo pelo satélite Sentinel-2, apresenta uma visualização geral do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu. A utilização de uma imagem Sentinel foi aplicada apenas à construção da carta imagem. A escolha dessa imagem se deu em virtude de sua proximidade da data de captura da imagem com a data da visita de campo, pois não foram encontradas imagens Landsat registradas em datas próximas.

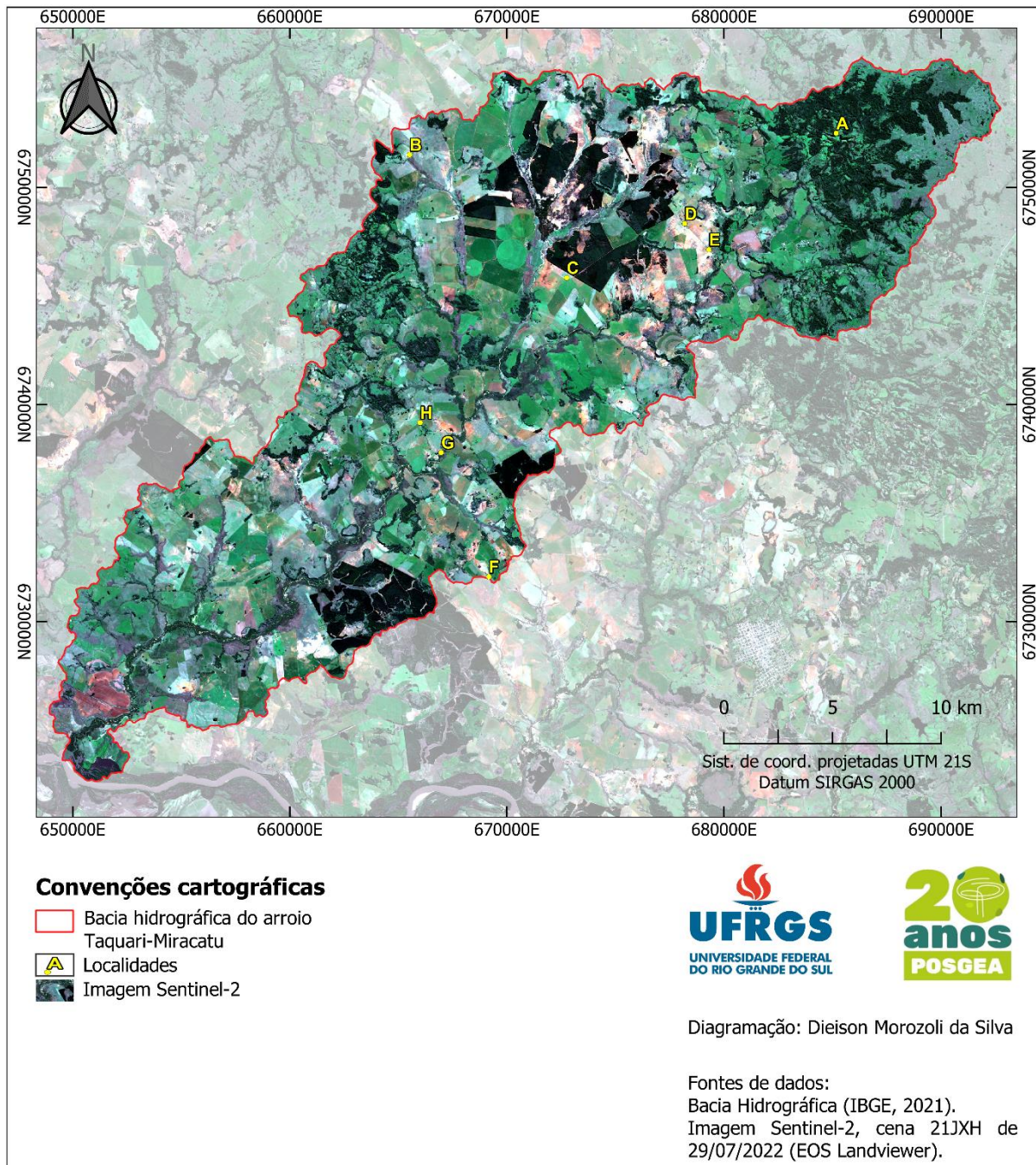
Se até então os mapeamentos de geologia, geomorfologia e pedologia apresentaram semelhanças entre si, essa tendência também se estende para a carta-imagem. Uma das similitudes se encontra nas feições florestais localizadas em áreas visualmente mais elevadas, que coincidem com a formação geológica Paranapanema e também apresentam notória similaridade com a presença de Neossolo Litólico Chernossólico daquela região. De forma semelhante, as formas de arenização visíveis na Figura 6 coincidem com as classes pedológicas de Neossolo Quartzarênico e com as formações geomorfológicas Botucatu e Serra Geral.

Para além do fornecimento de mais um ângulo de visualização acerca da arenização na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu, o mapa da Figura 6 também conta com uma distribuição de localidades, registradas fotograficamente durante a visita de campo. Esta, se deu entre os dias 19 e 20 de julho de 2022, objetivando a visualização do fenômeno em campo, bem como o registro fotográfico de suas manifestações.

Os pontos visitados estão representados pelos marcadores identificados com letras de “A” a “H”. O detalhamento dos pontos destacados pode ser visualizado nas Figuras 7 e 8.

A visitação à área de estudo permitiu identificar que nos locais visualmente mais elevados predominam a vegetação nativa. Nessas localidades, também se percebeu através da análise visual a presença de inclinações do terreno mais acentuadas, se comparadas às demais localidades da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu. Essa região, representada nos itens A1 e A2 da Figura 7, é marcada pela presença de moradias nas clareiras da vegetação, além de árvores frutíferas nas proximidades dessas residências. A vegetação densa ocupa as ondulações do terreno, enquanto campos e algumas estruturas viárias estão posicionados nos demais espaços.

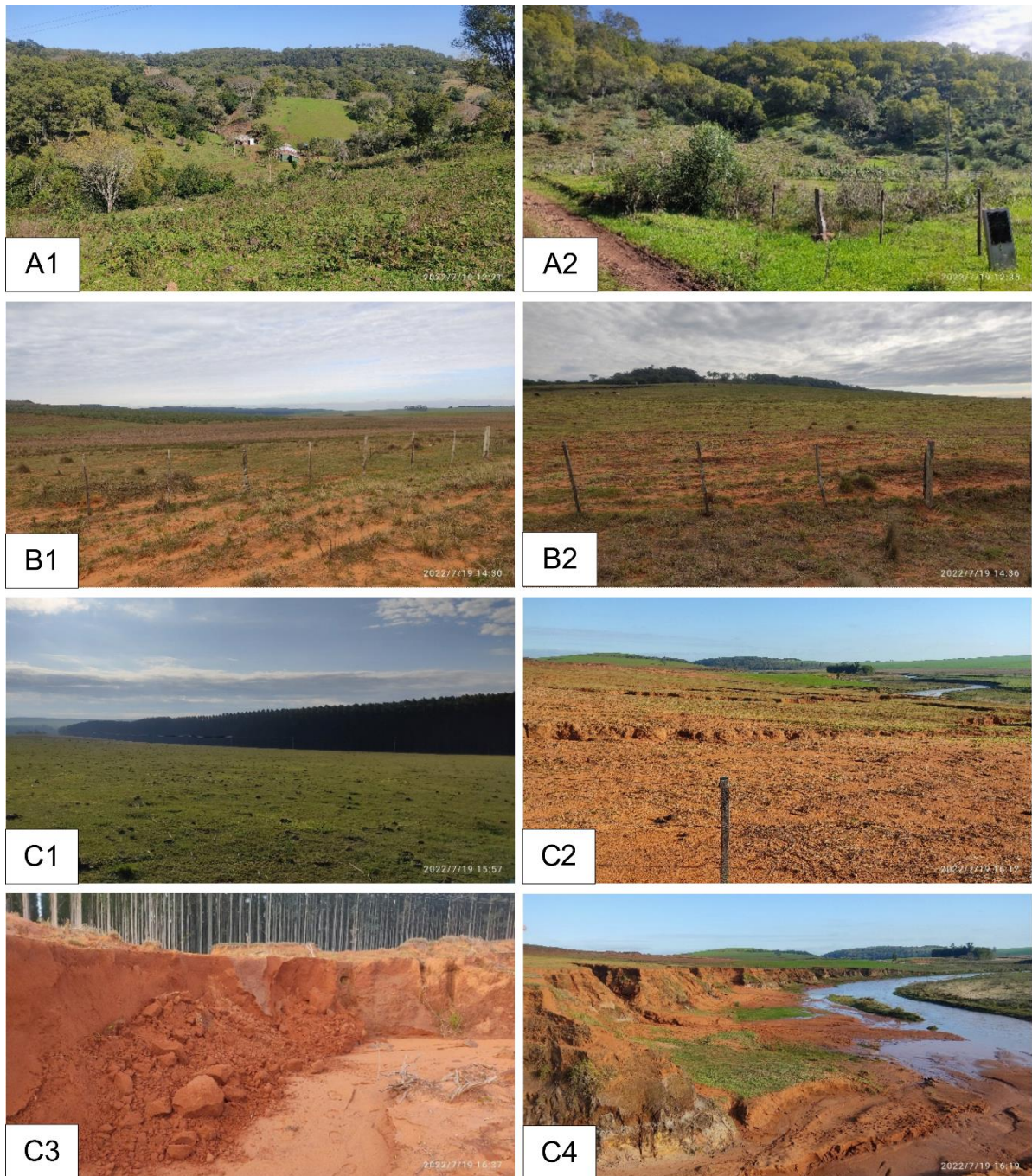
Figura 6 – Carta-imagem da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



Fonte: o autor (2022).

Nas proximidades do ponto B se mostram campos com declividades visualmente suaves, distribuição esparsa de gramíneas e aglomerados de areia. Os itens B1 e B2 da Figura 7 ilustram duas cercas próximas a uma estrada que passa pelo ponto B. Em ambos os registros fotográficos são percebidos o solo arenoso em primeiro plano. Ademais, no item B2 também se verifica a presença do gado, ao fundo da imagem.

Figura 7 – Detalhamento fotográfico dos pontos da carta-imagem da área de estudo (parte 1).



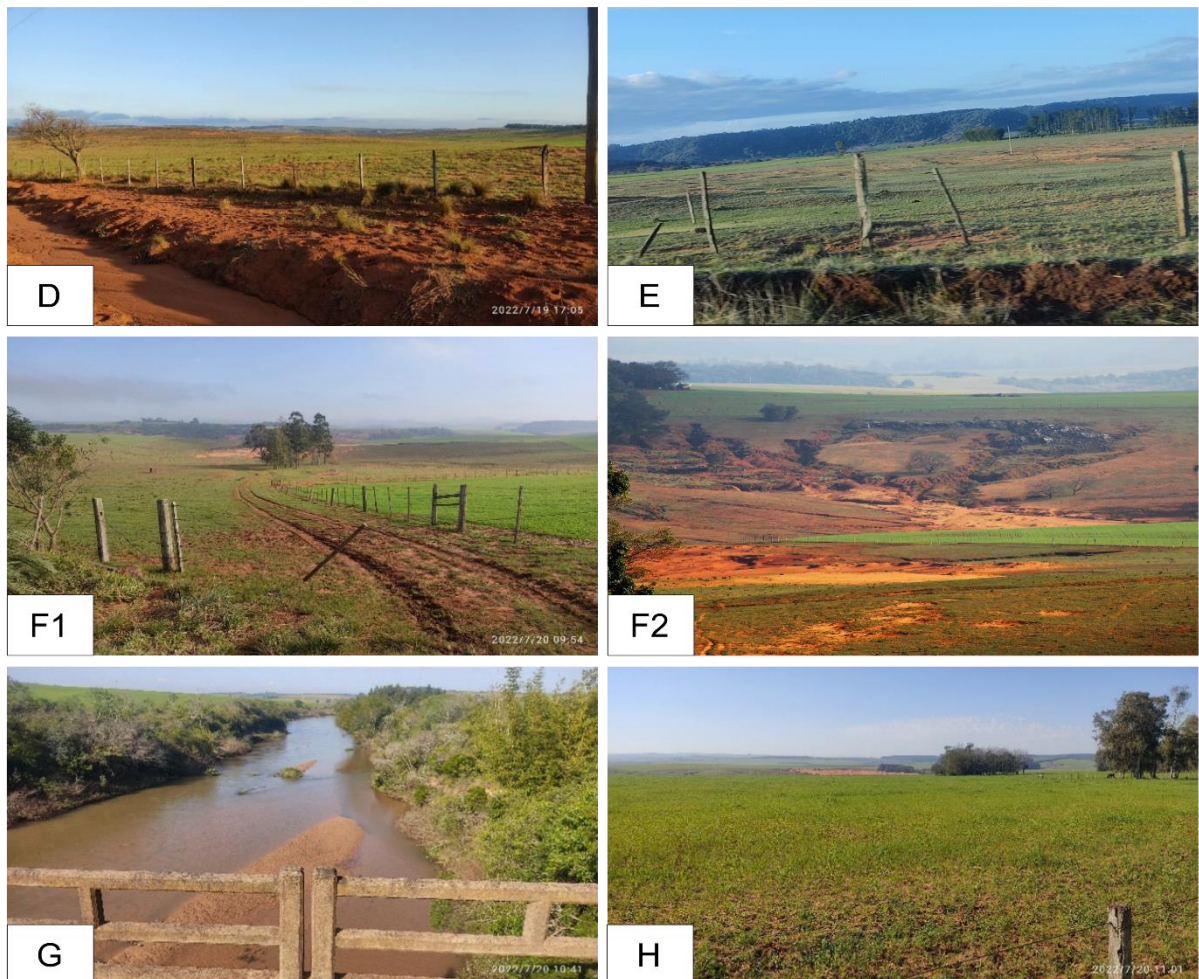
Fonte: o autor (2022).

O ponto C do mapa da Figura 6 é um dos locais em que mais se percebem diferentes facetas da manifestação da arenização na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu. Enquanto na Figura 6 é visível a disposição das plantações de eucalipto nas adjacências de focos de arenização, o item C1 da Figura 7 proporciona uma cena com campos verdes e com silvicultura ao fundo. No entanto, ao percorrer a

localidade em direção à sanga da areia, à noroeste do ponto C, sulcos decorrentes da ação hídrica crescem gradualmente (C2). À medida que se avança em direção ao curso d'água os sulcos atingem profundidade considerável e ocorrem desmoronamentos de massas de solo (C3). O aspecto do solo é arenoso e esse aparenta baixa coesão, com visíveis rastros de transporte hídrico. Nas proximidades da sanga da Areia (C4) o cenário impressiona pela intensidade do desgaste do solo, que formou de uma parede com alguns metros de altura. Também estão presentes rastros de gado, o que alerta para o agravamento das condições visivelmente frágeis do solo do local.

Na Figura 8, a fotografia que representa o ponto D exibe um solo com aparência arenosa, um rastro de passagem de água à beira da estrada, enquanto manchas de areia distantes compõe o plano de fundo da imagem.

Figura 8 - Detalhamento fotográfico dos pontos da carta-imagem da área de estudo (parte 2).



Fonte: o autor (2022). Imagem F2 registrada por Sidnei Luis Bohn Gass.

A imagem do ponto E na Figura 8 é composta majoritariamente por vegetação campestre, porém também exhibe ao fundo porções notáveis de solo arenoso.

O ponto F1 da Figura 8 foi registrado a partir do acesso a uma demarcação, que conta com algumas árvores, ao centro da imagem, e manchas de arenização ao fundo. Para além dos focos de arenização também foram percebidos ravinamentos, complementando o cenário de arenização, que foram detectados e apresentados na imagem F2. É possível perceber uma encosta, ao longo da qual se desenvolvem ravinamentos, ao passo que na base ocorrem deposições de areia.

Sobre a ponte do Miracatu, item G da Figura 8, foram feitos registros fotográficos que permitem um vislumbre de um dos arroios que dão nome à área de estudo. Não muito distante, no ponto H se destaca o plantio sobre o solo, enquanto ao fundo é perceptível uma extensa faixa com foco de arenização.

Os registros fotográficos de alguns pontos da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu evidenciam a proximidade entre os areais, os solos desgastados e o uso e cobertura da terra. Apesar desse levantamento representar apenas uma modesta amostra, frente às dimensões da área de estudo, serve como base para a interpretação dos resultados obtidos a partir dos produtos de sensoriamento remoto.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento de um trabalho pautado em técnicas de sensoriamento remoto é fortemente recomendável a compreensão dos conceitos abordados. Da mesma forma, é pertinente que se disponha de clareza nas definições acerca da origem e manutenção das áreas de arenização. Com isso, essa seção agrega fontes bibliográficas focadas na bacia hidrográfica como área de estudo, conceituação de desertificação e arenização, seus processos de formação e retrabalhamento e a contribuição hídrica para o fenômeno.

Também estão relacionadas definições sobre o sensoriamento remoto, o geoprocessamento, a classificação de imagens, bem como a extração de informações e validações a partir desses recursos. Também foram incluídas informações sobre a representação das transformações no uso e cobertura da terra através de diagramas de Sankey.

Embora esse trabalho não consista em um aprofundamento de conhecimentos de sensoriamento remoto e geoprocessamento, é pertinente que os conceitos e técnicas englobados na pesquisa sejam devidamente definidos e compreendidos, como se pretendeu ao longo dessa seção.

4.1 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISE AMBIENTAL

As investigações acerca de um determinado fenômeno requerem, dentre outros elementos, a definição de uma área de estudo, ou de abrangência. Em outras palavras, é preponderante a definição de um recorte do espaço geográfico, o qual “constitui o conceito balizador da Geografia” (SUERTEGARAY, 2005, p. 47).

De acordo com a obra de Suertegaray (2005), é possível observar as relações do homem com a natureza num espaço circunscrito, na qual podem persistir elementos naturais, embora transfigurados, ao que se atribui o nome de paisagem. Também é possível trabalhar sobre o conceito de território, no qual “tratamos o espaço geográfico a partir de uma concepção que privilegia o político ou a dominação/apropriação” (SUERTEGARAY, 2005, p. 52). O lugar é uma expressão do espaço geográfico em escala local, também podendo ser entendido como uma conjunção de relações objetivas e subjetivas no mundo, que abarquem nossas necessidades existenciais de localização, mobilidade e interação com objetos e pessoas, conforme Suertegaray (2005).

Se somam à Geografia os conceitos de região e ambiente. Região é um conceito de amplas definições. Na terminologia geográfica, foi cunhada inicialmente como “a localização e extensão de um determinado fenômeno” (SUERTEGARAY, 2005, p. 55). Mais detalhadamente:

A concepção de região, mais recentemente, adquire significados múltiplos, incluindo a dimensão cultural. Nos últimos anos pode-se observar a possibilidade de região ser compreendida como proposição política sob um espaço, pode ser compreendida como expressão de uma forma de espacialização do trabalho, como também ser compreendida como espaço identitário para um determinado grupo social, que se consolida nos regionalismos e que se expressa pelo hibridismo do político, do econômico e do cultural, enquanto construção de representações que fortaleçam a identidade. (SUERTEGARAY, 2005, p. 55)

Já o ambiente, geralmente marcado por interpretações ecológicas, pode ser interpretado, segundo Suertegaray (2005), tanto como algo externo ao homem, o qual teria de se ater ao estudo da natureza, quanto algo que inclui o homem como parte dos processos naturais. Ao diferenciar o conceito da definição puramente ecológica, é possível afirmar que no ambiente “o homem se inclui não como ser naturalizado, mas como um ser social produto e produtor de várias tensões ambientais.” (SUERTEGARAY, 2005, p. 57). Sobre isso, sintetizar o ambiente como o espaço geográfico transfigurado pelas relações humanas com a natureza (SUERTEGARAY, 2005, p. 58).

É altamente válido que se reforce que a síntese conceitual aqui elaborada não presume esgotar a discussão acerca das diferentes visualizações possíveis acerca do espaço geográfico. Outrossim, a própria Geografia e seus conceitos estiveram pautados pela discussão e evolução de definições ao longo do tempo, permeada por diferentes visões e contextos históricos. Certamente haverão de continuar mudando.

Ao assumir nesse trabalho uma investigação inserida na linha de pesquisa de análise ambiental, de antemão, com base nas definições anteriores, se demandou compreender que existe um espaço geográfico impregnado de influências antrópicas. Ainda assim, também é válido o entendimento de que a própria natureza traz consigo características herdadas de tempos anteriores a própria existência humana, os quais se tornam tão antigos que a existência da humanidade representa apenas um instante fugaz, apesar de sua forte influência na natureza hodierna.

Para que se instrumentalize de forma objetiva a delimitação de um recorte do espaço para as investigações de um trabalho de análise ambiental, a escolha de uma

bacia hidrográfica é uma possibilidade. Gomes, Medeiros e Pinto (2015) ressaltaram a importância das bacias hidrográficas para estudos ambientais, considerando que:

O dinamismo encontrado nos sistemas de bacias hidrográficas reflete de maneira extremamente simplificada as complexas interferências e correlações entre os elementos da paisagem, construídos, socioeconômicos e produtivos, e a crescente interferência do homem afetando esse equilíbrio (GOMES; MEDEIROS; PINTO, 2015, p. 50).

A bacia hidrográfica é importante para a análise ambiental por se tratar de um recorte espacial que se baseia na área de concentração de determinada rede de drenagem, sendo um sistema aberto que recebe energia através de agentes climáticos e perde através de deflúvio, e mesmo com interferência humana, se encontra em equilíbrio dinâmico, de acordo com Teodoro *et al.* (2007). Para Robaina *et al.* (2021), bacia hidrográfica corresponde ao conjunto de terras drenadas por um rio principal, seus afluentes e subafluentes, que são separados por divisores de águas.

É possível encontrar uma diversificada gama de estudos geográficos que utilizaram a bacia hidrográfica como recorte espacial. Binda e Verdum (2020) investigaram as estiagens e secas na bacia hidrográfica do Arroio Miracatu. Sobre a mesma área de estudo, Dummer (2019) investigou os aspectos litológicos, pedológicos e tectônicos associados a processos erosivos. Souza e Pires (2017) pesquisaram sobre a dinâmica da arenização na bacia hidrográfica do arroio Puitã, no oeste do Rio Grande do Sul. Gass e Silva (2017), ao discorrerem sobre a morfometria e arenização no sudoeste desse mesmo estado, adotaram a bacia hidrográfica da Sanga da Areia como unidade de estudo.

Posta a relação de proximidade entre a bacia hidrográfica e a análise ambiental, apesar dos trabalhos acima destacados representarem apenas uma parcela do universo de produções científicas acerca dessa temática, é coerente projetar que os ensaios pretendidos com essa pesquisa partem de um tipo de recorte do espaço geográfico consagrado pelo uso.

4.2 DESERTIFICAÇÃO X ARENIZAÇÃO

A existência dos processos de desertificação no Brasil começou a ser discutida mais intensamente a partir de 1977 (SOARES; MOTA FILHO; NÓBREGA, 2011, p. 175). Cabe ressaltar que a percepção da problemática já apresentava indícios desde 1940, como destacado por Verdum *et al.* (2009).

Após a passagem da década de 1970, a pesquisa acerca da desertificação entrara em fase de reformulação, postas em questionamento, a partir de 1980, as formas de caracterizar a desertificação, conforme Verdum *et al* (2009).

Os alertas sobre a desertificação ganharam espaço nos campos do conhecimento e se perpetuaram por um grande período, estando presentes até mesmo em livros didáticos, como na obra de Barros e Paulino (1999), na qual consta que:

“(...) o resultado final dos desmatamentos é a desertificação. É o que vem acontecendo em certas partes do estado do Rio Grande do Sul. No início da década de 1980, as áreas desertas somavam cerca de 470 mil hectares. Em Itaqui, naquele estado, hoje há uma grande formação desértica, chamada de deserto de Puitã. No município de Alegrete, a superexploração do solo faz crescer a área já conhecida como deserto dos pampas” (BARROS; PAULINO, 1999, pp. 78-79).

Apesar da aparente proximidade com a realidade, pois de fato ocorrem áreas com deposições de areia nesses locais, o processo de formação das mesmas não é análogo ao processo de formação dos desertos. Como mencionado anteriormente, segundo Verdum *et al* (2009), a partir da década de 1980 ocorreu uma fase de questionamento das definições de desertificação. Nesse contexto, merece destaque a obra desenvolvida por Suertegaray (1989), que teve como objeto de estudo os areais no município de Quaraí – RS. Desde então, diversos trabalhos foram desenvolvidos, dos quais merece destaque o “Atlas da arenização – sudoeste do Rio Grande do Sul” (SUERTEGARAY; GUASSELLI; VERDUM, 2001).

Por vários fatores, o estado do Rio Grande do Sul não conta com o fenômeno de desertificação, dentre os quais, Binda e Verdum (2015) destacam: o estado se encontra em um clima subtropical úmido, com precipitações anuais entre 1250 mm a 2000 mm, as quais mesmo em períodos de estiagem, ainda mantém valores entre 962 a 1218 mm/ano, não configurando condições para aridez, que são necessárias para a desertificação.

4.3 A ARENIZAÇÃO

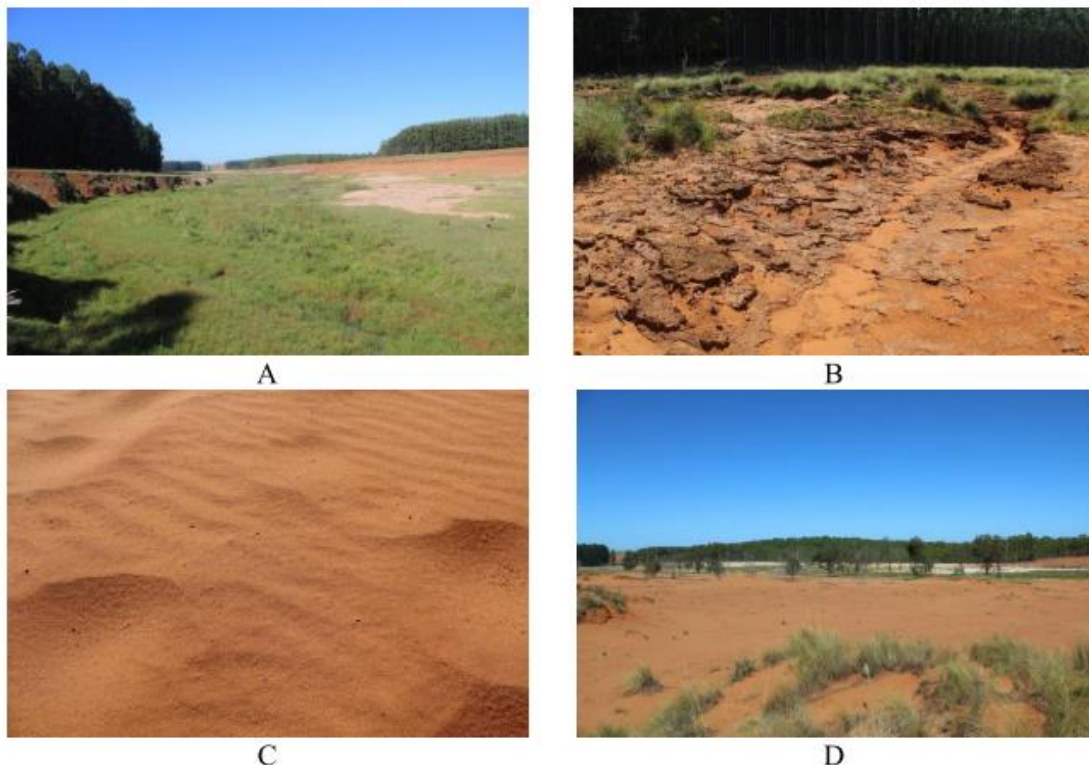
Os areais, para Suertegaray (2012), consistem em manchas de areia de pequeno, médio e grande porte que se individualizam em uma área de cobertura vegetal. Considerando que a arenização não está associada com a ausência de recursos hídricos, destarte, é pertinente ponderar a definição de Pedron e Dalmolin, (2019, p.44) sobre o fenômeno, a qual aponta que:

Os campos de areias, (...), são áreas formadas pelo retrabalhamento de areias derivadas dos arenitos Botucatu e Guará ou de sedimentos inconsolidados. Essas áreas se concentram na porção arenosa da região da Campanha gaúcha e sua gênese está associada ao retrabalhamento de sedimentos pela ação de fortes chuvas, provocando o transporte de areias em voçorocas e sua deposição de leques aluviais na base do relevo. Posteriormente, essas areias são movimentadas pela ação dos ventos, formando os areais. (PEDRON e DALMOLIN, 2019, p. 44)

Em consonância, Silva (2009) define os areais como manchas de pequeno, médio e grande porte que se individualizam ao longo de uma área de cobertura vegetal, apresentam areais desprovidas de vegetação e que sofrem constantemente com processos eólicos e com a chuva.

No trabalho de Silva (2021) é possível observar as características até então citadas sobre os areais. Na Figura 9-A está exposta a presença de uma pequena mancha de areia em meio a vegetação campestre. Já nas Figuras 9-B e 9-D estão presentes focos maiores de arenização, com alguma vegetação rasteira. A Figura 9-C evidencia a dinâmica de transporte de partículas de areia, sendo possível observar a formação de ondulações e até mesmo “microdunas”, provocadas pela ação eólica.

Figura 9 – A arenização na bacia hidrográfica do arroio Puitã.



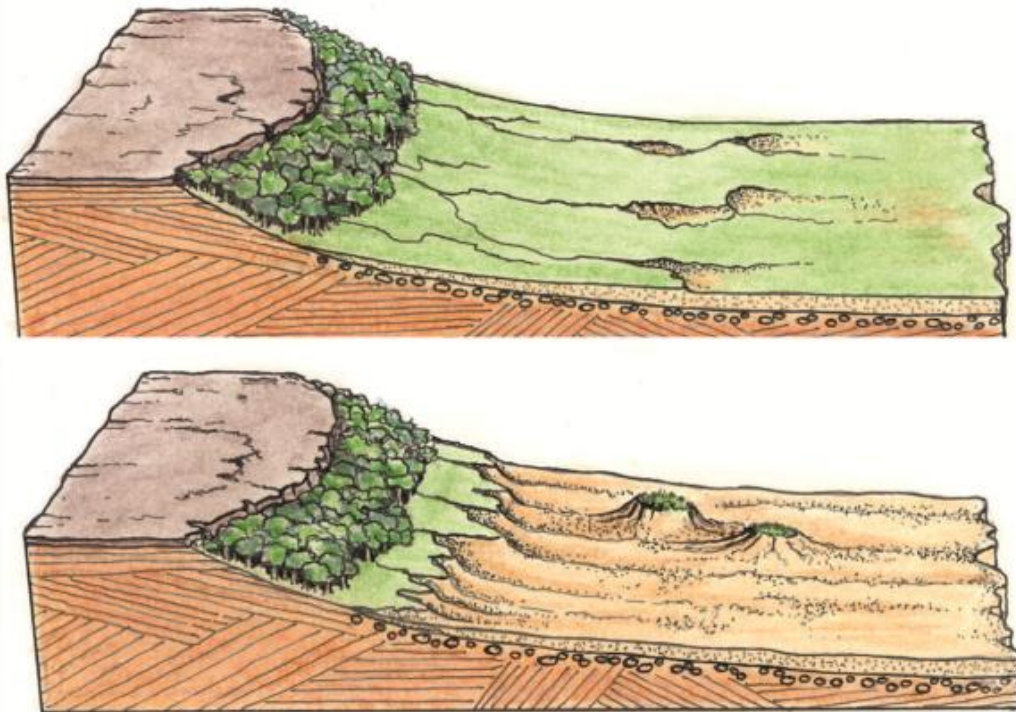
Fonte: Silva (2021).

Nesse ponto, é válido que se reforce o termo “arenização” como o fenômeno de retrabalhamento das areias, enquanto que o vocábulo “areal” indica o depósito de areia propriamente dito. Em concordância com Suertegaray e Bertê (1997), os areais são originados através de uma dinâmica natural:

(...) a origem dos areais está associada a processos naturais ligados fundamentalmente à ocorrência predominante do escoamento superficial concentrado em regiões pouco vegetadas, de clima úmido, principalmente em ambientes de média encosta, junto aos relevos de morros testemunhos. Estes fatores provocariam, então, o surgimento de ravinas e voçorocas com o conseqüente depósito de material à jusante, em forma de leques coalescentes, formando os areais. O efeito de processos eólicos também contribuem nesta dinâmica (SUERTEGARAY; BERTÊ, 1997).

A presença dos areais em encostas foi esquematizada por Suertegaray et al. (2001, p. 6) e pode ser verificada na Figura 10. Em um primeiro momento ocorre a remoção do terreno pela ação hídrica, dando lugar ao aparecimento de voçorocas, sendo formados depósitos arenosos em forma de leque. Com o decorrer do tempo, a remoção e transporte de partículas do solo acaba por resultar na formação de deposições expressivas de areia, sendo formados então os areais.

Figura 10 – A formação dos areais em encostas.

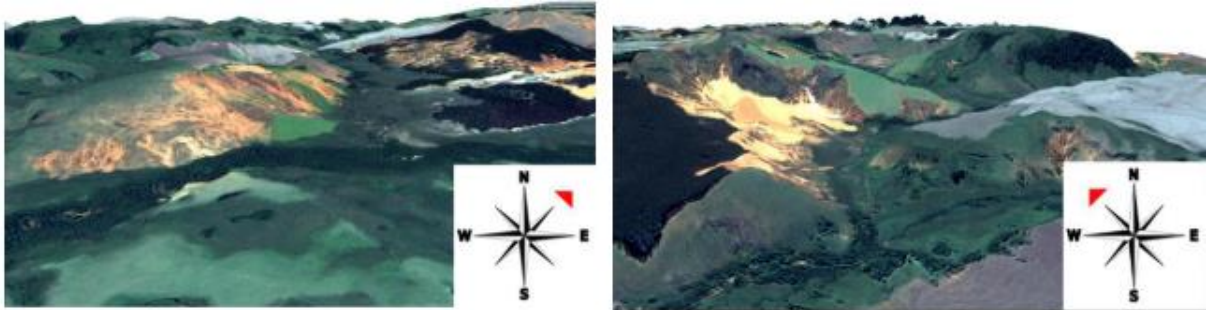


Fonte: Suertegaray et al (2001)

A disposição dos areais nas encostas também pode ser percebida na Figura 11, elaborada por Silva (2021), uma representação tridimensional do terreno da bacia

hidrográfica do arroio Puitã. Apesar do exagero vertical da imagem, é notória a predominância dos focos de arenização justamente nas médias encostas.

Figura 11 – Visualização tridimensional de areais na bacia hidrográfica do arroio Puitã



Fonte: Silva (2021).

Segundo os registros do Atlas da Arenização – Sudoeste do Rio Grande do Sul (SUERTEGARAY et al, 2001, p. 5), na referente unidade da federação é detectada a presença dos areais em uma larga faixa que abrange os municípios de Alegrete, Cacequi, Itaqui, Maçambará, Manoel Viana, Quaraí, Rosário do Sul, São Borja, São Francisco de Assis e Unistalda.

Acerca dos areais, também é pertinente a descrição de Suertegaray (2012):

Os areais no Rio Grande do Sul ocorrem no Bioma Pampa, esse Bioma é caracterizado por um substrato, em parte, de solos rasos. No caso específico dos areais, a ocorrência é em substrato arenoso. Esse é recoberto por vegetação de campo entremeado, nas áreas mais úmidas, vales de rios e encostas de morros, com vegetação de mata. A vegetação de campo é caracterizada como vegetação relicto, ou seja, é uma vegetação típica de ambientes mais secos. Atualmente sua persistência deve-se às adaptações feitas e aos solos característicos da região que favorecem a sua manutenção (SUERTEGARAY, 2012, p. 154)

Além disso, a presença dos focos de arenização comumente se encontra associada a determinadas características fisiográficas.

Os areais têm um padrão de localização característico, ou seja, localizam-se, predominantemente, em médias vertentes das colinas ou morros testemunhos, formas típicas do relevo da área. O substrato sobre os quais se desenvolve esse processo é arenoso, decorrente, na sua grande parte, da deposição eólica pretérita. A vegetação original é de campo (SUERTEGARAY, 2012, p. 136)

Com relação aos municípios da área de estudo desse trabalho, Manoel Viana e São Francisco de Assis, Gass et al (2019) apontam que os mesmos têm sua área basicamente composta pelas formações geológicas Botucatu, com arenitos finos e grosseiros, quartzosos e localmente feldspáticos, e formação Guará, com arenitos

beges e esbranquiçados, com granulometria média e fina. Os mesmos autores destacam que nesses municípios há “ocorrência das formações geológicas Guará e Botucatu, às quais estão associadas, em grande parte, os processos de arenização” (GASS *et al.*, 2019).

O conhecimento dos materiais de origem é expressivamente relevante, posto que, a partir da compreensão do passado geológico é possível identificar fenômenos no presente. Especificamente na área de estudo estão presentes as formações geológicas Guará e Botucatu, com maior predominância, além da presença esporádica de depósitos aluvionares e formação Gramado, conforme dados vetoriais do banco de dados GeoSGB (CPRM, 2004).

Carneiro (2007) descreveu a história da formação Botucatu em sua obra. Conforme o autor, o antigo e extenso deserto do Botucatu experimentou um longo período de estabilidade no continente de Gondwana. No entanto, essa estabilidade fora interrompida por atividades vulcânicas ocorridas a 133 milhões de anos. Além disso “durante milhões de anos, a movimentação incessante das dunas recobria os derrames e formava novas dunas” (CARNEIRO, 2007, p. 57). Essa movimentação, intercalada com sucessivos derramamentos, acabou por causar a formação de arenitos.

Uma vez que a deriva continental (FRANKEL, 1995) separou totalmente os continentes, tal fenômeno que levou a conformação da litosfera, “aos poucos, no sul do Brasil, as condições desérticas foram se tornando mais brandas (...). Os desertos acabaram desaparecendo” (CARNEIRO, 2007, p. 57).

A Formação Guará, conforme Scherer e Lavina (2006), é composta por arenitos de granulação fina a grossa, além de argilitos raros, depositados de forma fluvial e pluvial. Além disso, conforme os autores, a formação Guará tem seu afloramento dado no oeste do Rio Grande do Sul.

Enquanto a formação Botucatu resulta majoritariamente de estratos de dunas eólicas, a formação Guará decorre de uma relação entre processos fluviais e eólicos, de acordo com Scherer e Lavina (2006, p. 482).

A presença dessas duas formações geológicas no oeste do Rio Grande do Sul, e por conseguinte, na área de estudo, comportam um conjunto de fatores paleoclimáticos, descritos por Scherer e Lavina (2006).

Diferenças deposicionais entre as formações Guará e Botucatu apontam para grandes mudanças paleoclimáticas. O acúmulo da formação Guará foi controlado por oscilações entre condições áridas e semiáridas,

provavelmente atribuídas a ciclos orbitais, enquanto a formação Botucatu parece representar um período de estabilidade climática associado a condições hiper-áridas. (SCHERER; LAVINA, 2006)

Definida a origem dos materiais que compõem a geologia do local de estudo, é válido que se reforce a premissa de que a arenização é intrínseca a um processo resultante de condições naturais. Não obstante, Andrades Filho, Suertegaray e Guasseli *et al* (2006) destacaram que a origem dos areais é decorrente de diversos fatores geomorfológicos.

A análise da formação dos areais, interpretada por estudos geomorfológicos, associada à dinâmica hídrica e eólica, indica que os areais resultam, inicialmente, de processos hídricos. Estes, relacionados com topografia favorável, permitem, numa primeira fase, a formação de ravinas e voçorocas. Na continuidade do processo, desenvolvem-se por erosão lateral e regressiva, conseqüentemente alargando as suas bordas. Por outro lado, à jusante destas ravinas e voçorocas, em decorrência dos processos de transporte de sedimentos pela água durante episódios de chuvas torrenciais, formam-se depósitos arenosos em forma de leque. Com o tempo, esses leques agrupam-se e, em conjunto, originam um areal. O vento que atua sobre essas areias em todas as direções permite a ampliação desse processo. (ANDRADES FILHO; SUERTEGARAY; GUASSELLI, 2006, p. 3)

Até então, fica evidente que a arenização é a manifestação de um fenômeno de origem natural, haja visto que decorre de uma sucessão de eventos geológicos. Apesar disso, pode ser intensificada pela ação antrópica. Essa assertiva é reforçada pelo fato de que “dados provenientes da arqueologia indicam a existência de sítios arqueológico sobre estes areais” (SUERTEGARAY *et al.*, 2001). Apesar da existência desses sítios por si só não esgotar a discussão acerca da origem dos areais, reforça a proposta de que o despontar da arenização não é exclusivamente decorrido das relações antrópicas contemporâneas com a terra.

A relação das áreas de arenização com suas proximidades não se resume à história humana. Não para menos, nessas localidades existem flora e fauna característicos. De fato,

Ao buscar o entendimento do conjunto de organismos que se vale das manchas de areias, como parte do seu nicho ecológico, não se desvencilha da idéia dessa porção, unidade da paisagem do Bioma Pampa, como uma janela temporal. Ao olhar atentamente ao ortóptero (...), e buscar uma justificativa para uma camuflagem com tamanha afinidade com o substrato arenítico, fica impossível não relacionar essa façanha à evolução dessa espécie em congruência com o ambiente que vive num espaço temporal recente. Esse, entre outras manifestações de vida encontradas nos areais, nos aproxima de uma janela do tempo que pode reproduzir parte das condições ambientais dominantes nessa região há milhares de anos antes do presente. Ao procurar descrever as sensações primeiras mobilizadas pela paisagem dos areais e percorrendo a sua fisionomia, nos vemos diante de um recorte temporal das condições biotípicas reinantes em tempos pretéritos.

Somos espectadores privilegiados diante de uma janela, onde a paisagem se confunde no tempo. Materialmente ancorados no presente, nossa mente nos remete ao passado longínquo. Evidências no substrato da paisagem dos areais e os organismos vivos que a compõe, testemunham condições ambientais, singulares não sustentadas pelos dados climáticos atuais. (SUERTEGARAY; SILVA, 2009, p.119)

O ortóptero (Figura 12), mencionado acima, se trata de um gafanhoto que, ao conviver em um local composto pela aparência arenosa, desenvolveu morfologia corporal semelhante.

Figura 12 – gafanhoto encontrado nos areais do município de Manoel Viana.



Fonte: Suertegaray e Silva (2009).

Sobre a evolução de espécies, cabe ressaltar que essa não se dá de forma arbitrária ou deliberada. Não se trata de uma escolha ou mesmo instinto, que tomado pelos seres vivos, os levaria a assumir determinadas características. Entretanto, características latentes são selecionadas conforme estímulos recebidos ao longo do tempo, assim como descrito por Oleques et al (2011):

“A Teoria Evolutiva representa uma teoria científica que unifica todo o conhecimento biológico. O mérito de tal teoria é dado a Charles Darwin, que propõe duas teses enunciadas como: todos os organismos descendem com modificação a partir de ancestrais comuns, e que o principal agente de modificação é a ação da seleção natural sobre a variação individual” (OLEQUES; SANTOS; BOER, 2011, p. 244).

A partir do pressuposto da teoria evolutiva, é natural inferir que os areais foram um ambiente propício à perpetuação dos ortóptero, posto que sua camuflagem natural

o tenha protegido de predadores, e, com o passar do tempo, isso tenha favorecido a perpetuação da espécie. De forma análoga, estudos em São Francisco de Assis trazem como elemento instigador a presença de plantas adaptadas a condições climáticas de ausência de água, embora a região não apresente tal característica (SUERTEGARAY; SILVA, 2009). Esse adendo acerca da teoria evolutiva, que é um fenômeno que ocorre geralmente de forma lenta para a escala de tempo humana, reforça a proposta de que a existência dos areais é de longa data, pois foi o próprio cenário onde tal processo evolutivo se sucedeu.

Até então, se sustenta com argumentos convincentes o conceito de origem natural dos areais. Desde eventos geológicos até a ação eólica e hídrica, tem-se eventos de uma escala temporal bastante superior à atuação humana significativa na modificação do planeta, ainda que sejam considerados importantes capítulos da história, como a Revolução Industrial ou o avanço da utilização do território brasileiro do litoral em direção ao oeste (FIGUEIREDO, 2016). Entretanto, embora a origem do fenômeno de arenização não seja antrópica, isso não exime a ação humana de participação no processo, que causa o agravamento do quadro situacional.

Sobre a ação humana sobre os areais do Rio Grande do Sul é válido considerar que essa atua como “um dos fatores aceleradores, pois o uso do solo nestas áreas, sem métodos de conservação e recuperação adequados, tendem a intensificar os processos que lhe dão origem” (SUERTEGARAY; BERTÊ, 1997). Nesse ponto, apesar de não haver um agente originador da arenização por parte da ação antrópica, se tem uma ação potencialmente amplificadora. De fato, conforme Suertegaray e Bertê (1997), a atuação de atividades humanas sobre as áreas de arenização tende a intensificar o processo, ou mesmo, causar o surgimento de novas manchas de areia.

A relação do homem com a terra é de longa data. Em um país com economia fortemente ligada à atividades agropecuárias como o Brasil, essa relação está presente desde os tempos do descobrimento das terras dessa nação, passando pela colonização, períodos de produção de cana e café, até a chegada aos dias contemporâneos, assim como pode ser constatado na obra de Figueiredo (2016).

O Rio Grande do Sul conserva até os dias atuais forte produção agrícola e pecuária, com essa tendência vinda desde o início de seu processo de formação territorial. A forma de produção econômica desse estado, segundo Okido (2016), é capaz de contribuir para o crescimento do processo de arenização à medida que intensifica a erosão do solo.

Com relação ao Pampa Gaúcho, bioma no qual estão inseridos Manoel Viana e São Francisco de Assis, Pizzato (2013) aponta suas características de produção, destacando que

Esta área carrega um conjunto de características naturais e históricas que vem sofrendo mudanças econômicas, ligadas principalmente à produção agrícola. Assim, o Pampa sempre foi caracterizado pela produção pecuária de bovinos e ovinos que de certo modo auxiliou na manutenção das espécies herbáceas e arbustivas nativas da região (PIZZATO, 2013, p. 22)

Embora a arenização no estado não seja exclusivamente oriunda das atividades agropecuárias, é relevante que o manejo seja realizado de forma cuidadosamente planejada, pois

A fragilidade ambiental dessas áreas tende a aumentar significativamente quando incorporadas ao processo produtivo agrícola de forma mais intensiva. Tanto o superpastoreio pela pecuária extensiva, desenvolvida sem o manejo de pastos e adoção de técnicas de manutenção e conservação do solo para reduzir o impacto do pisoteio, como as lavouras intensivas de capital, caracterizadas pelo grande aporte de maquinário pesado e pela rotação das lavouras de inverno e verão, podem ter contribuído para a aceleração do processo de formação desses grandes areais. (...) Embora a área plantada com soja tenha sido bastante reduzida na década de 1990, os impactos por ela gerados evoluíram, em especial no que se refere ao favorecimento dos processos erosivos, e demandam ações de controle rigoroso para conter o avanço do processo de arenização no sudoeste do estado. (FIGUEIREDO, 2016, p. 250)

A produção econômica do Rio Grande do Sul, segundo Okido (2016), entre o final da década de 1960 e início da década de 1970 passou por transformações em seu modo de produção, se integrando a um contexto de economia global, ao passo que concomitantemente a soja se consolidou a ponto de ser tomada como pagamento para a dívida externa. Ao longo da década de 1970 se aceleraram as atividades produtivas e “isso resultou no Rio Grande do Sul a consolidação de um sistema de monoculturas extensivas mecanizadas, principalmente a produção de trigo e soja” (OKIDO, 2016, p. 77).

Em ambos os municípios em que a bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu está localizada, Manoel Viana e São Francisco de Assis, ocorre a prática de silvicultura. A esse cultivo se atribuiu uma forma de mitigar o avanço das manchas de areia. Além disso, “no Brasil é necessário reconhecer que o manejo das áreas florestadas não é adequado, tanto na escolha de espécie quanto na forma de se implantar” (DUARTE; POZZA FILHO, 2005, p. 6).

O cultivo de eucalipto, de acordo com Suertegaray e Bertê (1997), tem sua visibilidade emergida a partir de 1966, quando o governo federal estimulou o reflorestamento com espécies exóticas e no Rio Grande do Sul foi elaborado um plano de recuperação de áreas com “desertificação” mediante o cultivo de eucaliptos e acácias. Apesar disso, não se obteve sucesso expressivo devido “às técnicas de plantio empregadas e da constatação da não contenção dos processos erosivos e não fixação das areias”.

Acerca do plantio de eucalipto existem posicionamentos. Figueiredo (2016) enfatiza que alguns municípios enxergam a prática como alternativa para a obtenção de receitas, bem como vislumbram a constituição de um polo madeireiro e moveleiro, enquanto há municípios que alertam que o estado possa se tornar um “deserto verde”.

4.4 A QUESTÃO HÍDRICA E A ARENIZAÇÃO

A arenização, apesar de poder ser intensificada pela ação antrópica, tem sua origem de forma natural. Em realidade, “pode ser simplificada definida como a ação pluvio-erosiva numa região de elevada fragilidade ambiental, tendo, como elemento fundamental, as chuvas torrenciais” (BINDA; VERDUM, 2020, p. 132).

A dinâmica hídrica é importante para a arenização de tal forma que “se, por um lado, a ação hídrica é preponderante na mobilidade de sedimentos, durante os momentos com excesso de chuvas, por outro lado, a ausência destas por vários dias torna proeminente a expansão dos areais pela ação eólica” (BINDA; VERDUM, 2020).

A discussão acerca da arenização requer a compreensão climática. De antemão, é válido reiterar que não se trata de um fenômeno desertificação. Binda e Verdum (2015) destacam que áreas desérticas ocorrem em climas de aridez, os quais apresentam baixos índices pluviométricos, sendo de 200 a 500mm anuais para climas semiáridos e inferiores a 250mm em climas áridos. Além disso, conforme os autores, nessas condições, de severa escassez de água, a vida vegetal e animal se torna virtualmente inviável.

Assumida a eminência da pluviosidade no contexto dos areais, bem como a premissa de não estarem situados em condições desérticas, é relevante a investigação dos regimes pluviométricos nas áreas de arenização.

Diversos trabalhos focaram nas nuances do regime pluviométrico, sobretudo, no condicionante das chuvas e em sua relação com a arenização (...). Contudo, pouca ênfase tem sido atribuída aos períodos de ausência de

chuvas – ou na determinação de estiagens e secas – mesmo que estes sejam fundamentais para a compreensão da arenização em sua totalidade. (BINDA; VERDUM, 2020, p. 133)

Para além da simples ausência de água como elemento causal da arenização, é veemente recomendável considerar que, de acordo com Binda e Verdum (2020), a ação hídrica é responsável pelo movimento de sedimentos em períodos chuvosos, mas também a ausência da chuva em um período prolongado é acompanhada pela expansão dos areais devido a ação eólica. No caso das áreas de arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul, têm por característica predominante “períodos de longas secas atmosféricas, alternados com longos períodos de saturação hídrica” (ROSSATO, 2012, p. 410)

Em consideração à existência de períodos de volumosas precipitações, é válido então considerar a distribuição irregular das chuvas como fator potencializador da arenização, conforme Rossato (2012).

A região climática que abrange o sudoeste do RS, caracteriza-se, principalmente, pela má distribuição das precipitações, isto é, a chuva concentra-se em poucos dias, o que acaba por dar às precipitações um caráter de torrencialidade muitas vezes. Poucos dias de chuva intensa acabam por dinamizar os processos de escoamento concentrado do fluxo d'água, dando condições à formação de areais. (ROSSATO, 2012, p. 410)

Estabelecido que a arenização pode ser causada tanto em períodos de elevada e reduzida presença de pluviosidade, é válido acrescentar a discussão a temática das secas e estiagens. De acordo com Binda e Verdum (2020), bibliograficamente a definição de seca pode ser diversa, sendo algumas definições convergentes e outras divergentes, além da possibilidade das secas ocorrerem em qualquer condição climática. Tal definição, pelo menos em parte, pode ser relacionada aos períodos de ausência de chuva no oeste do Rio Grande do Sul, apesar dessa área não ser enquadrada em condições de clima árido ou semiárido.

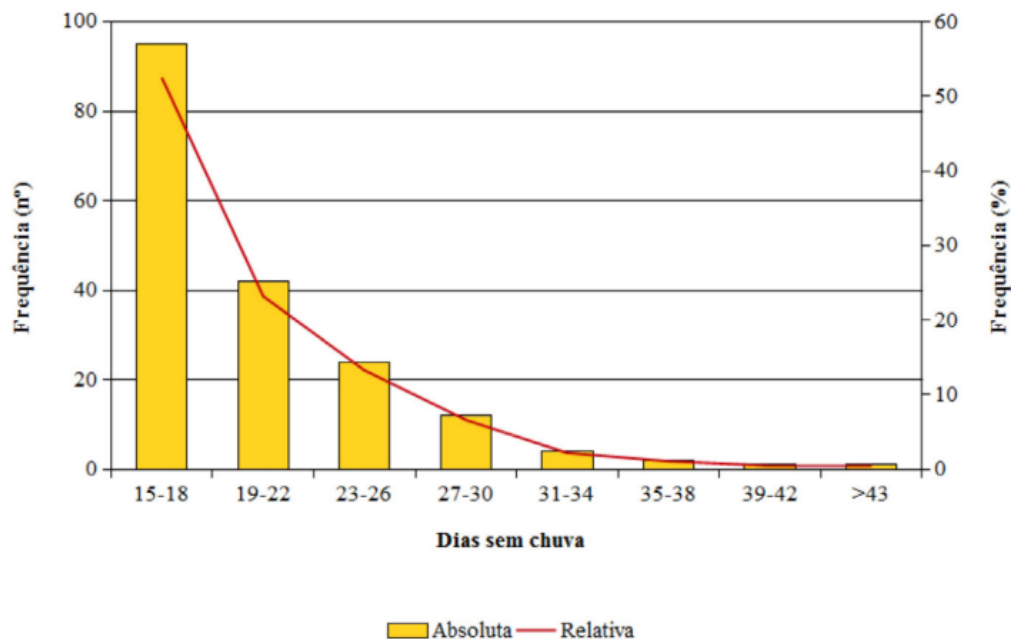
É possível utilizar “o termo estiagem para definir a ausência de chuvas em um curto prazo (na escala de dias) e o termo seca quando o enfoque é dado à redução/ à escassez de chuvas, considerando um período de longo prazo (meses/ano)” (BINDA; VERDUM, 2020, p. 136)

Ao explorar dados da estação meteorológica “Ponte do Miracatu”, Binda e Verdum (2020) constataram que entre 1970 e 2015, em todos os anos exceto 1987 ocorreu ao menos um caso de estiagem, de modo que a predominância foi de estiagens de 15 e 22 dias sem chuva, totalizando 75% dos casos quantificados,

conforme Figura 13. No gráfico apresentado na Figura 13 também é possível observar que à medida que os intervalos de dias sem chuva aumentam, a frequência de ocorrência diminui. De acordo com os autores, essa tendência é esperada, posto que quanto maior a classe, menor a probabilidade de ocorrência do evento.

Com relação ao total de estiagens ao longo dos anos, ao tratarem de dados da estação pluviométrica “Ponte do Miracatu”, localizada em São Francisco de Assis, Binda e Verdum (2020) elaboraram um gráfico com a contagem de estiagens anuais entre 1970 e 2015, como pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 13 – Estiagens anuais registradas pela estação Ponte do Miracatu, em São Francisco de Assis, entre 1975 e 2015.

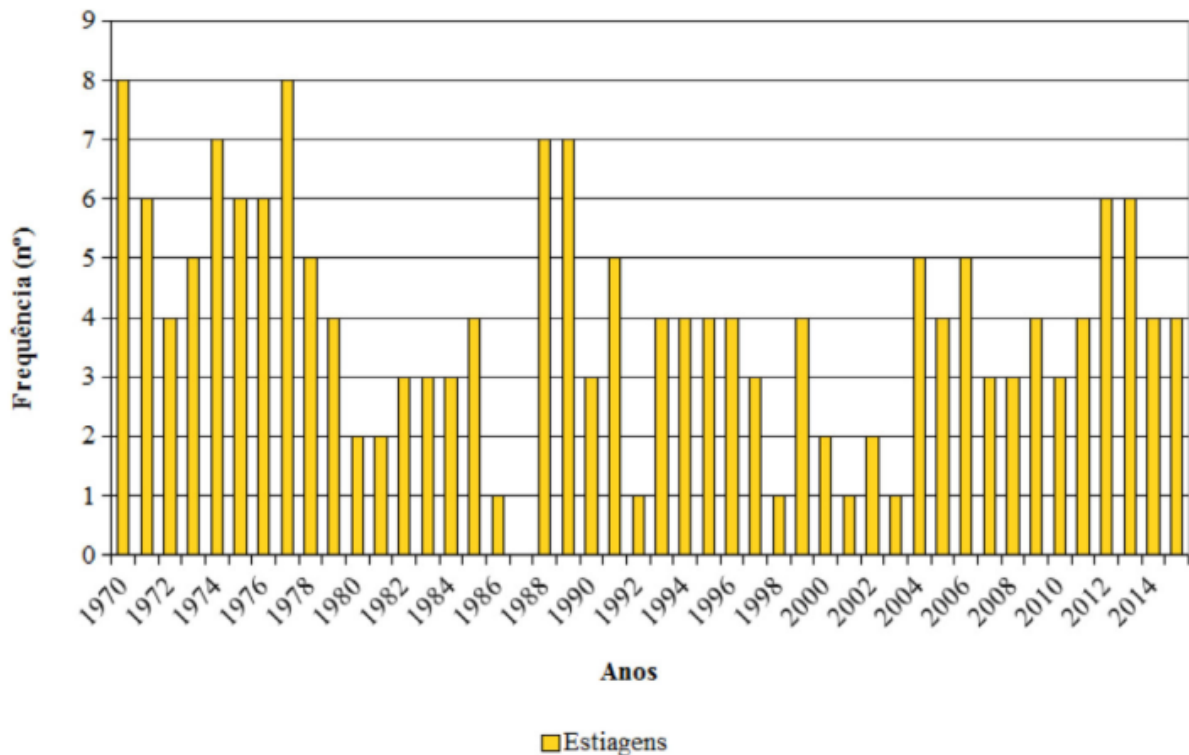


Fonte: Binda e Verdum (2020).

Como já mencionado, as estiagens podem contribuir para a arenização no que concerne constituir um cenário propício à ação eólica. Entretanto, de acordo com Verdum e Binda (2020), podem ocorrer volumes de chuva acima da média histórica em meses que também apresentem estiagem.

Um fato interessante é que muitos meses com volumes de chuva acima da média histórica apresentaram casos de estiagem. Isso indica que a pluviosidade deve ter se concentrado em poucos dias, atestando a ocorrência de chuvas torrenciais. Essas chuvas foram observadas tanto antecedendo como sucedendo o período de estiagem, um aspecto particular que traria implicações consideráveis aos processos de arenização. (BINDA; VERDUM, 2020, p. 141)

Figura 14 – total de estiagens anuais entre 1970 e 2015 em São Francisco de Assis.



Fonte: Binda e Verdum (2020).

A ação hídrica sobre a arenização também pode ser claramente visualizada na análise de Binda e Verdum (2015) sobre a pluviosidade.

(...) os aspectos pluviométricos do sudoeste do Rio Grande do Sul induzem uma ação morfogenética extremamente ativa. Isso deriva dos longos e constantes episódios de estiagem, que provocam o ressecamento do solo e a redução da biomassa, e da posterior ocorrência de eventos de chuva com alto potencial erosivo, que podem atingir valores de até 160 mm/dia. Essa característica promove fatores para que o meio seja altamente dinâmico, onde a produção e a mobilidade de sedimentos sejam também altas, inicialmente, pelos processos hídricos e, posteriormente, pelos eólicos.(BINDA; VERDUM, 2015, p. 284)

Diante do exposto, é evidente a contribuição do regime hídrico para a arenização, tanto no que diz respeito a eventos de estiagem quanto de abundância pluviométrica. Mais do que isso, também é possível ponderar que a ideia da origem natural da arenização é reforçada.

4.5 O SENSORIAMENTO REMOTO

Com o discorrido até então sobre a arenização, foi preponderante a existência de dados de diferentes fontes para a investigação do fenômeno em suas diversas facetas. Dados pluviométricos, registros fotográficos, mapas de uso e cobertura da

terra, representam diferentes planos de informações sobre a arenização e permitem a correlação entre si. Em alguns casos, como nos mapas de uso e cobertura da terra, é comum lançar mão de produtos de sensoriamento remoto.

A compreensão do sensoriamento remoto remonta a um passado não muito distante, porém abarca consideráveis saltos conceituais e tecnológicos. O sensoriamento remoto, de acordo com Melo *et al.* (2021), não pode ser conceituado de forma simples, porém pode ser definido como um conjunto de métodos de modelagens, medições espectrais e processamento digital para a obtenção de informações sobre locais com os quais não se estabeleça contato direto.

Para o manuseio de produtos e ferramentas do sensoriamento remoto é fortemente recomendável que se tenha em consideração que “a energia eletromagnética é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero grau absoluto (0 Kelvin)” (MORAES, 2002, p. 1-7). Como consequência, qualquer corpo que possua temperatura acima do zero absoluto conta com uma determinada energia eletromagnética e isso permite sua detecção através de sensores remotos, posto que

“Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres” (MENESES; ALMEIDA, p. 3.)

A partir de 1959 os Estados Unidos da América puseram em órbita satélites de reconhecimento territorial, que deram início ao registro fotográfico espacial (MELO *et al.*, 2021). Na década de 1970 fora lançado o *Earth Resource Technology Satellite*, que após a obtenção de notável sucesso foi renomeado como *Landsat*, apenas um dos numerosos satélites que seriam lançados posteriormente.

As vantagens dos sensores imageadores logo foram percebidas. De acordo com Meneses e Almeida (2012), a capacidade de obtenção de imagens periódicas do planeta possibilitou uma cobertura periódica de imagens do planeta, permitindo detectar e monitorar mudanças na superfície terrestre. Além disso, “outra importante diferença dos sensores imageadores foi a capacidade de obterem imagens simultâneas em várias faixas do espectro eletromagnético” (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 2).

A vida na Terra indubitavelmente se deve à existência de uma fonte de luz e calor, denominada Sol. Entretanto, “os gases presentes na atmosfera apresentam

capacidade de absorção muito variáveis em relação ao comprimento de onda da energia solar” (MORAES, 2002, p. 1-12). Ainda assim, algumas faixas de comprimento de onda, incluso o “ultravioleta e o visível (0,30 a 0,75 μm), infravermelha próxima (0,77 a 0,91 μm), infravermelha termal (8 a 9,2 μm e 10,2 a 12,4 μm) e microondas (7,5 a 11,5 mm e >20 mm), são chamadas de janelas atmosféricas” (LIU, 2006, p. 8).

A compreensão das janelas atmosféricas é relevante para o sensoriamento remoto pois essas são faixas do espectro eletromagnético em que “é possível usar o sensoriamento remoto” (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 14).

Acerca dos conceitos de energia em sensoriamento remoto, é pertinente considerar as definições de Novo e Ponzoni (2001), reunidas no Quadro 1.

Quadro 1 – conceitos radiométricos importantes para o sensoriamento remoto.

Conceito	Definição
Irradiância	A intensidade do fluxo radiante, proveniente de todas as direções, que atinge uma superfície e pode sofrer reflexão, transmissão e absorção.
Excitância	A intensidade da porção de radiação refletida pelo objeto em sentido oposto, porém na mesma direção, do emissor.
Radiância	Todo sensor possui uma abertura pela qual a radiação eletromagnética passa em direção ao “detetor”. Entre essa abertura e o ponto da superfície do objeto imageado se forma um cone por onde trafega a radiação. Esse cone é denominado <i>ângulo sólido</i> . A radiância é a intensidade do fluxo radiante por unidade de ângulo sólido. A radiância medida por um sensor pode ser determinada para um intervalo de onda específico (região ou banda espectral).
Reflectância	A relação entre a radiância refletida de um dado objeto pela irradiância.

Fonte: adaptado de Novo e Ponzoni (2001).

Conhecidas as propriedades radiométricas de interesse ao sensoriamento remoto, convém revisar o conceito de que todo objeto acima do zero absoluto possui uma energia eletromagnética intrínseca. No ambiente, e aqui se evoque a definição geográfica, na qual a natureza é também produto da interação com o homem, os

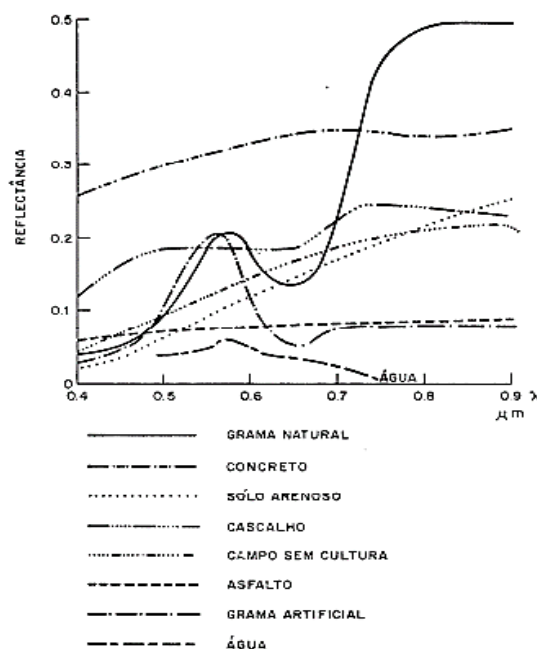
objetos são variados, e por conseguinte, possuem diferenças em suas composições físico-químicas e biológicas, de acordo com Moraes (2002).

Os objetos interagem de maneira diferenciada espectralmente com a energia eletromagnética incidente, pois os objetos apresentam diferentes propriedades físico-químicas e biológicas. Estas diferentes interações é que possibilitam a distinção e o reconhecimento dos diversos objetos terrestres sensoriados remotamente, pois são reconhecidos devido a variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda (MORAES, 2002, p. 1-16).

É de interesse primário para o sensoriamento remoto o conhecimento acerca das energias refletidas pelos objetos em cada comprimento de onda, pois através disso é possível determinar seu comportamento espectral. Em concordância com Novo e Ponzoni (2001), esse comportamento tem sido amplamente utilizado “no estudo dos recursos naturais, a partir da reflectância espectral desses recursos, sejam eles vegetação, solos, minerais, rochas, água, entre outros.

Na Figura 15 é possível observar o comportamento espectral de alguns alvos imageados. Novo e Ponzoni (2001) destacam que na região da radiação eletromagnética visível (0,4 a 0,7 μm) praticamente todas as curvas estão próximas entre si, enquanto na região do infravermelho próximo (0,7 a 0,9 μm) se afastam. Essas curvas são comportamentos médios e são denominadas assinaturas espectrais.

Figura 15 – Assinaturas espectrais de alguns alvos de uma imagem de satélite.



Fonte: Novo e Ponzoni (2001).

Em consideração às assinaturas espectrais, “o conhecimento sobre o comportamento espectral de alvos é, portanto, fundamental para a extração de informações a partir do sensoriamento remoto, quer sejam fotografias ou imagens” (NOVO; PONZONI, 2001, p. 42).

O gráfico de assinaturas espectrais, exibido na Figura 15, demonstra a reflectância¹ em diferentes faixas do espectro. Para isso ser possível no contexto do processamento de informações oriundas do sensoriamento remoto, é corriqueiro que se faça a leitura dos valores de uma feição em cada uma das camadas de uma imagem e então se efetua a exibição dos valores no formato de gráfico. As camadas de uma imagem de satélite são denominadas bandas, que podem variar em número e propriedade conforme suas resoluções, que serão abordadas a seguir.

Em dias atuais, é possível o acesso a dados oriundos de diferentes sensores remotos. A exemplo, a Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, [s. d.]) permite em seus catálogos de imagens a obtenção gratuita de dados dos satélites CBERS-2, CBERS-2B, GLS-Landsat, CBERS-4, CBERS-4A, Amazonia-1, Aqua, Deimos, Landsat-1, Landsat-2, Landsat-3, Landsat-5, Landsat-7 Landsat-8, NOAA-20, Resourcesat-1, Resourcesat-2, S-NPP, Terra e UK-DMC2. Esses dados estão disponíveis para todos os usuários, ao passo que outros níveis de acesso podem contar com uma coleção mais ampla de sensores e imagens.

Imagens de satélites possuem características que diferem entre si. Algumas apresentam maior detalhamento nas feições identificadas, outras podem detectar diferentes intervalos do espectro eletromagnético. Podem também diferir no intervalo de obtenção de imagens ou mesmo na quantidade de tons identificados a partir de um sinal detectado. No âmbito do sensoriamento remoto, essas características são denominadas resoluções, que podem ser: espectral, espacial, radiométrica e temporal.

A resolução espectral se refere “ao intervalo de comprimento de ondas do espectro eletromagnético amostrado” (PARANHOS FILHO *et al.*, 2021, p. 26). Além disso, conforme os autores, sensores que leem respostas espectrais em ao menos

¹ É necessário atentar para o fato de que os valores de pixel (digital numbers) presentes em uma imagem de satélite nem sempre dizem respeito a reflectância propriamente dita. Paranhos Filho *et al.* (2021) destacam que as imagens de satélite possuem valores atribuídos a seus pixels e esses valores decorrem de medições que podem ter sofrido interferências da própria atmosfera e distorções do próprio sensor. Tais distorções podem ser corrigidas por procedimentos como correção atmosférica para se obter a real reflectância.

quatro intervalos são chamados de multiespectrais, ao passo que também podem haver bandas pancromáticas, que englobam a radiação visível e o infravermelho próximo.

É válido ressaltar que cada camada, ou cada banda, de uma imagem de satélite se refere a uma medição dentro do espectro eletromagnético. “Quanto maior for o número de medidas num determinado intervalo de comprimento de onda melhor será a resolução espectral da coleta” (MORAES, 2002, p. 1-20). Ademais, existem sensores com uma resolução espectral tão fina que são denominados hiperespectrais, como por exemplo o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), com 36 bandas, de acordo com Paranhos et al (2021).

A resolução radiométrica diz respeito a capacidade de discretização dos sinais captados e pode ser compreendida pela definição de Moraes (2002).

A resolução radiométrica define a eficiência do sistema em detectar pequenos sinais, ou seja, refere-se à maior ou menor capacidade do sistema sensor em detectar e registrar diferenças na energia refletida e/ou emitida pelos elementos que compõem a cena (rochas, solos, vegetações, águas, etc). Por exemplo, o sistema sensor TM do Landsat 5 distingue até 256 tons distintos de sinais representando-os em 256 níveis de cinza (MORAES, 2002, p. 1-20)

Resolução espectral e radiométrica, por si, já podem ser decisivas para a escolha de uma imagem. Entretanto, também é necessário que se considere a resolução espacial. Resolução espacial diz respeito “a dimensão ao solo representada pelo *pixel* da imagem” (PARANHOS FILHO *et al.*, 2021, p. 28). Os autores destacam que a resolução espacial das bandas 1,2,3 (visível), 4,5 e 7(infravermelho) do Landsat-7 é de 30 metros, enquanto sua banda termal (banda 6) tem resolução espacial de 60 metros e sua banda pancromática (banda 8) é de 15 metros.

É válido perceber que o conceito de resolução espectral foi revisitado ao considerar as diferentes bandas, medições em diferentes faixas do espectro eletromagnético. Entretanto, essas apresentam diferentes detalhamentos espaciais entre si. Enquanto as bandas do visível e infravermelho podem detectar feições de no mínimo 30 metros, bandas termais detectam apenas objetos maiores que 60 metros e a banda pancromática chega a detectar objetos de 15 metros, porém não diferencia os sinais medidos em diferentes comprimentos de onda. Assim, trabalhar com sensoriamento remoto pode requer a escolha entre parâmetros que melhor atendam ao objetivo da utilização de uma imagem de satélite.

Até então, tem-se resolução espectral, radiométrica e espacial. A resolução espectral diz respeito aos intervalos imageados dentro do espectro eletromagnético. A resolução radiométrica se refere ao número de discretizações possíveis dentro de cada intervalo medido. Já a resolução espacial remonta as dimensões de cada pixel na imagem resultante dessas medições. No entanto, já foi mencionado nesse texto a capacidade de medições periódicas, que permitem o monitoramento de feições de interesse diversas. Para que isso seja possível, é válido atentar para a resolução espacial, definida por Moraes (2002), a qual destaca que

Uma outra qualidade importante é a resolução temporal do sensor, que está relacionada com a repetitividade com que o sistema sensor pode adquirir informações referentes ao objeto. Por exemplo, os sensores do Landsat 5 possuem uma repetitividade de 16 dias. (MORAES, 2002, p. 1-20)

As diferenças entre as resoluções de diferentes imagens de satélite não indicam necessariamente maior ou menor qualidade, mas sim são um requisito a ser considerado conforme a finalidade de utilização. Dessa forma, imagens de alta resolução espacial como do satélite Quickbird podem fornecer resoluções espaciais de 61 cm, porém não são capazes de detectar informações em intervalos do espectro eletromagnético que imagens Landsat são capazes, apesar de suas resoluções espaciais serem de 30 metros. Enquanto imagens de alta resolução espacial podem encontrar utilização em estudos urbanos, imagens de menor resolução espacial, porém maior resolução espectral, são comumente utilizadas em estudos ambientais com grandes áreas de abrangência.

Conforme estabelecido o produto de sensoriamento remoto mais adequado às finalidades de um estudo, é importante atentar para a qualidade dos dados utilizados. Por si, imagens de satélite em condições normais são majoritariamente adequadas para o uso. No entanto, a obtenção de dados a partir dessas imagens pode ser prejudicada pela ocorrência de fenômenos atmosféricos, como a presença de nuvens. Além disso, a utilização de imagens de diferentes datas ou diferentes sensores podem não ser totalmente compatíveis entre si.

Martins, Silva e Gass (2017) apontam para o fato de que as imagens de satélite não apresentam exclusivamente o brilho observado pelo sensor, mas sim uma mistura de sinal da superfície com os efeitos de sua passagem pela atmosfera. Posto que a atmosfera é dinâmica, que varia ao longo do tempo, é de se esperar que tais mudanças gerem distorções nos valores dos pixels de imagens de diferentes datas.

Ao aplicarem correções atmosféricas em imagens Landsat-5 e Landsat-8, de 1994 a 2016, verificaram a relevância desse processamento para a otimização de dados de sensoriamento remoto em séries temporais. De fato, em “um processo de mapeamento ao longo do tempo, a função da correção atmosférica é tornar os dados comparáveis dentro do período em análise” (MARTINS; SILVA; GASS, 2017, p. 3).

4.6 IMAGENS PRONTAS PARA O USO

Uma das formas de acesso a dados de sensoriamento remoto é através dos cubos de dados. O “cubo de dados canônico que a maioria de nós tem em mente é aquele em que duas dimensões representam dimensões raster espaciais e a terceira o tempo” (PEBESMA, 2021).

As imagens do cubo de dados “*Landsat Analysis Ready Data produced by the Global Land Analysis and Discovery team at the University of Maryland (GLAD ARD)*” (POTAPOV *et al.*, 2020), na data da publicação do trabalho referenciado, contavam com imagens prontas para o uso com cobertura temporal desde 1997 até 2019. As imagens disponibilizadas são do tipo “*Analysis Ready Data*” (ARD), que em tradução literal, significam “imagens prontas para análises”. Essa denominação indica que as imagens possuem as correções geométricas e atmosféricas pertinentes a um estudo científico de qualidade. Atualmente, seu repositório² contém imagens³ que se estendem desde a década de 1980 até o ano de 2021. Essas imagens tiveram seus números digitais convertidos para refletância no topo da atmosfera (TOA), que apesar de não se tratarem da refletância dos objetos imageados, já não trazem inerentes os erros de representação decorrentes da influência atmosférica.

As imagens GLAD ARD são compostas por agregados com uma janela temporal de dezesseis dias e que cobrem o planeta. Por usarem composições periódicas associadas ao calendário anual, permitem seu processamento e comparação de refletâncias (POTAPOV *et al.*, 2020)

É válido destacar que Potapov *et al.* (2020) selecionaram apenas imagens com os mais altos padrões radiométricos e geométricos para o processo de obtenção das

² As imagens do cubo de dados GLAD ARD, bem como as formas de obtenção das mesmas, podem ser consultados no endereço eletrônico <https://glad.umd.edu/index.php>.

³ As instruções para download de imagens podem ser encontradas nos endereços <https://glad.umd.edu/ard/software-download> e <https://glad.umd.edu/ard/user-manual>.

imagens ARD. Além disso, as imagens possuem balanceamento radiométrico, o que proporciona um mosaico formado por diferentes cenas porém coerente com a refletância esperada, estando maiores problemas de utilização atrelados à cobertura de nuvens (POTAPOV *et al.*, 2020, pp. 12-13).

As composições de dezesseis dias estão armazenadas em coordenadas geográficas e em *tiles* com resolução de 1 x 1 grau. Nesse ponto, se ressalta que a presença de diferentes cenas em um mesmo *tile* é solucionada pela correspondência espectral alcançada pelas imagens GLAD ARD.

Com relação às correções geométricas, enquanto imagens Landsat-7 e anteriores necessitavam passar por georreferenciamento, a partir do Landsat-8 esse procedimento deixou de ser necessário, pois as imagens já são disponibilizadas com a melhor qualidade geométrica possível. De fato, Duarte *et al.* (2015) comprovaram essa colocação em seu trabalho.

A correção geométrica feita pela USGS/NASA nas imagens Landsat 8 se mostrou surpreendente para a proposta e resolução do sensor. (...) Isso é muito importante para a compatibilização com imagens históricas do acervo Landsat, demonstrando haver um enorme potencial para estudos espaço-temporais em que se utilize a própria Landsat 8 como base para o georreferenciamento de imagens mais antigas, mantendo uma boa precisão na escala 1:100.000. (DUARTE *et al.*, 2015, p. 5222)

Uma vez que as imagens do cubo de dados GLAD ARD possuem seus georreferenciamentos padronizados, não são necessários procedimentos de correção do posicionamento, bastando ao usuário proceder com a elaboração de mosaicos e recortes conforme seus objetivos.

A adoção de cuidados como a correção atmosférica e geométrica é tomada com vistas à obtenção de informações da forma mais acurada possível, pois uma correta disposição de suas feições e colorações permitirá ao usuário identifica-las e delimitá-las corretamente.

Como anteriormente citado, a identificação de formações de interesse em produtos de sensoriamento remoto pode ser feita de forma manual, como também pode acontecer de forma automatizada. Na verdade, ao se trabalhar com áreas extensas, ou mesmo com ampla variedade de objetos a serem identificados, se torna pouco viável a utilização de técnicas manuais. Nesse cenário se destaca a classificação de imagens.

4.7 ASSINATURAS ESPECTRAIS E CLASSIFICAÇÕES DE IMAGENS

As imagens oriundas do sensoriamento remoto, por si, já permitem uma visualização da Terra a partir de uma perspectiva espacialmente abrangente e também econômica, pois em alguns casos permite o monitoramento de locais de difícil acesso. Porém, para além da simples identificação visual de objetos imageados, por conta das informações espectrais registradas ao longo de suas bandas, é possível a caracterização de feições a partir das assinaturas espectrais. Acerca dessa identificação de elementos imageados a partir de suas assinaturas espectrais são feitas as classificações de imagens.

Meneses e Almeida (2012) definiram classificação de imagens e suas formas de execução:

Se previamente sabemos que numa área existe um número de diferentes tipos de alvos, e que nas imagens são padrões espectralmente separáveis, pode-se estimar propriedades estatísticas que descrevem e medem cada um desses padrões, e então, cada pixel da imagem pode ser comparado a cada um dos padrões e ser rotulado como pertencente ao padrão que mais similaridade encontrar. O outro modo é não se ter conhecimento dos tipos de alvos (padrões) que possam estar presentes na imagem. Nesse caso, são definidos arbitrariamente alguns padrões básicos e o método usado é alocar e realocar os pixels da imagem a esses padrões. (...) Dá-se, respectivamente, a esses dois modos de alocar pixels as suas classes mais prováveis, o nome de classificação supervisionada e classificação não-supervisionada. (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 192)

Além disso, com relação à classificação de imagens, cabe destacar a colocação de Meneses e Almeida (2012).

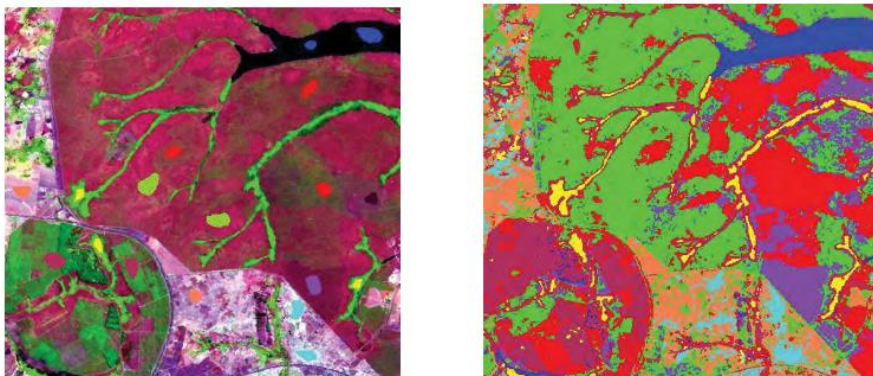
Classificação de imagens multiespectrais é o processo de associar os pixels da imagem a um número finito de classes individuais que representam os objetos no mundo real, com base nos seus valores digitais. Se um pixel satisfaz a um determinado conjunto de critérios, normalmente avaliados por medidas estatísticas, o pixel é atribuído à classe que melhor satisfaz os critérios estabelecidos. (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 191)

Seja a classificação de uma imagem feita de forma automatizada (não-supervisionada) ou sob um treinamento fornecido pelo usuário (supervisionada), nem sempre os resultados são obtidos dentro de um cenário ideal. De acordo com Meneses e Almeida (2012), vários fatores podem interferir, dentre os quais se destacam objetos distintos com assinaturas espectrais semelhantes, redução do contraste espectrais causada pela influência atmosférica, sombras, ruídos na imagem além de resolução espacial que cause a mistura de alvos em um mesmo pixel.

É válido considerar que ambas as metodologias são relevantes, porém é necessário considerar que pela natureza automatizada da classificação não-supervisionada essa somente “permite ao analista especificar alguns parâmetros que o computador irá usar para descobrir padrões inerentes aos dados” (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 195). Isso significa que o algoritmo classificador aplica critérios estatísticos e agrupa os pixels de uma imagem conforme suas características em comum, cabendo ao usuário, geralmente, apenas definir o número de classes a serem identificadas.

A classificação supervisionada, de acordo com Meneses e Almeida (2012), requer conhecimento prévio das classes dos objetos imageados. Cabe ao analista fornecer o treinamento através da delimitação de pequenas áreas amostrais, as quais sejam representantes das diferentes classes presentes na imagem. Se a amostragem for realizada de forma consistente, ou seja, “se o treinamento tiver uma boa precisão, as classes resultantes representam as categorias dos dados que o analista identificou originalmente” (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 198). Na Figura 16A se encontra a coleta de amostras em uma imagem de sensoriamento remoto, de forma que os polígonos que delimitam diferentes classes possuem colorações distintas. Na Figura 16B se verifica a obtenção de uma imagem na qual os pixels possuem colorações conforme a classe a que foram atribuídos. Cabe ressaltar que a atribuição de classes aos pixels da imagem foi feita em consideração às amostras previamente fornecidas, e, portanto, a quantidade de classes depende daquela fornecida durante o processo de amostragem.

Figura 16 – Coleta de amostras e obtenção de imagem classificada.



Fonte: adaptado de Meneses e Almeida (2012).

No que diz respeito a utilização de classificações supervisionadas no estudo das áreas de arenização, é válido destacar o “Atlas da arenização – sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul” (SUERTEGARAY et al, 2001), desenvolvido pelo Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O atlas disserta sobre a gênese dos areais, através da explicação dos processos naturais e humanos que compõem esse fenômeno. Com relação à obtenção de dados, além dos demais procedimentos de caracterização, no que diz respeito ao geoprocessamento e sensoriamento remoto, foi realizada a classificação de imagens oriundas de sensores remotos e a análise espacial a partir do cruzamento de informações temáticas de diferentes aspectos, como a direção das vertentes, cobertura vegetal e o Modelo Digital do Terreno (MDT).

A delimitação visual de feições em imagens de satélite, apesar de praticável, pode ser bastante onerosa se tratando de grandes extensões. Tomada então uma área de estudo composta por vários municípios, como na obra de Suertegaray et al (2001), tal esforço demandaria intensa aplicação de esforços. No entanto, a classificação de imagens utilizada, possibilitou que a caracterização do uso e cobertura da terra fosse realizada de forma automática. A obtenção desses produtos cartográficos de forma relativamente simples é de grande valia, haja visto que, uma vez obtidas as informações, cabe ao avaliador estabelecer as relações e postulados a partir do cruzamento de diferentes planos de informação.

Nogueira et al (2018) fizeram uso de uma biblioteca de imagens Landsat no seu trabalho intitulado “Análise multitemporal da arenização na bacia hidrográfica do córrego Guanabara, reserva do Cabaçal – MT”. Nessa obra, foram utilizadas imagens Landsat-5 e Landsat-8. Considerando a disponibilidade de imagens sem interferências geradas pela cobertura de nuvens, foram selecionadas cenas das datas: 12/10/2005, 18/09/2008, 08/09/2010, 27/09/2011 e 22/09/2015. A identificação de feições imageadas se deu mediante a execução de classificações supervisionadas. O mesmo trabalho também destaca que o ano de 2010 apresentou a maior área arenizada. Além dos possíveis erros de classificação, também é válido considerar que, de forma análoga ao sugerido por Verdum et al (2009) com relação ao Rio Grande do Sul, ocorre a capacidade de recuperação do meio. Ainda na obra de Nogueira et al (2018), é possível observar que o ano de 2010 apresentou uma das menores precipitações acumuladas.

No trabalho intitulado “Dinâmica da arenização na bacia hidrográfica do arroio Puitã, oeste do RS, através do mapeamento multitemporal no período de 1984 a 2014”, Souza e Pires (2017) lançaram mão de imagens Landsat-5 e Landsat-8 para a construção de um mapeamento histórico. Com procedimentos semelhantes aos demais trabalhos destacados até então, no que diz respeito a obtenção de mapeamentos a partir de classificações de imagens, esse trabalho trouxe como diferencial a testagem de diferentes algoritmos classificadores, sendo esses, Mínima Distância ou Distância Euclidiana; Paralelepípedo; Máxima Verossimilhança (MAXVER), Mahalanobis e Spectral Angle Mapper (SAM)” (SOUZA; PIRES, 2017, p. 189). Todos os classificadores obtiveram boas classificações, tendo o algoritmo MAXVER se sobressaído, com maior acurácia global e coeficiente Kappa.

Além da constatação do método mais acurado no estudo, a obra de Souza e Pires (2017) permitiu validar a ideia da variabilidade na área ocupada pelas manchas de areia ao longo do tempo. Foi observado que entre 1984 e 1994 ocorreu uma expansão de 1,78 km², seguida de um aumento de 4,33 km² entre 1994 e 2004. Já entre 2004 e 2014 ocorrera uma redução de 4,24 km². De forma geral, entre 1984 e 2014, Souza e Pires (2017) constataram um aumento de 1,87 km².

Em posse dessas informações, é importante que se considere que foram utilizadas imagens de recortes pontuais do intervalo de tempo, o que não exclui a possibilidade de movimentações não detectadas entre as datas. Ainda, conforme os autores, apenas os areais com superfície exposta foram mapeados e a prática de silvicultura em áreas arenosas incorre na impossibilidade de identificação de arenização cobertas por esse plantio.

Com relação à classificação de imagens, tão importante quanto a eficácia de um algoritmo classificador é a diligência do operador da classificação. A correta identificação dos alvos compõe o treinamento do algoritmo, que se baseia nas amostras delimitadas para a análise das imagens como um todo. Além disso, apesar da resolução espacial dos satélites Landsat ser consideravelmente boa, 30 metros, a interpretação errônea de um pixel, seja por parte do usuário ou do algoritmo, pode resultar na classificação errônea de uma porção de 900m² (30m x 30m). Esse erro, se acumulado para vários pixels, é capaz de distorcer os resultados. Dessa forma, a busca por métodos de classificação mais verossímeis colabora grandemente para a melhoria nos estudos da arenização.

Em tempo, também se ressalta a intervenção do operador na identificação de amostras através da avaliação de formas, cores e texturas. Metodologias de classificação de imagens tem sido otimizadas ao empregar, além da resposta espectral dos alvos, elementos de interpretação visual, sejam estas forma, textura e tamanho (TOMBEZI, 2019).

4.8 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DE CLASSIFICAÇÕES

Até então, foram ressaltadas algumas aplicações da classificação de imagens para o estudo de áreas de arenização, com bons resultados obtidos. A mensuração da acurácia em classificações de imagens usualmente se dá pela validação cruzada, que resulta em uma matriz de confusão ou matriz de erros. Para que isso aconteça, são comparados “os dados da classificação com os dados da verdade do campo, dados levantados à campo ou amostras tomadas como puras e que não foram usadas no processo de classificação” (SOUZA; PIRES, 2017). Para tanto, um conjunto de amostras, que não tenham sido utilizadas para o processamento e que tenham sua verdade de campo conhecida, são testadas quanto ao valor obtido após a classificação.

Em uma matriz de erros, de acordo com Meneses e Almeida (2012), as colunas se referem à verdade de campo, enquanto as linhas indicam o resultado da classificação. Além disso, os valores da diagonal principal correspondem aos pixels classificados corretamente, ao passo que os demais valores equivalem aos erros de omissão e de comissão. Souza e Pires (2017) indicam que um erro de comissão acontece quando um pixel é classificado em uma classe, porém pertence a uma outra, e seu valor é exibido nas colunas de uma matriz de erros. De acordo com os mesmos autores, quando um pixel é excluído de sua classe correta e atribuído a outra classe, ocorre um erro de omissão, que é representado nas linhas da matriz.

A validação de erros em ambientes SIG também pode incluir termos como a acurácia global é obtida “pela divisão entre a soma das entradas que formam a diagonal principal (ou seja, o número de classificações corretas) pelo número total de amostras colhidas” (STORY; CONGALTON, 1986, p. 397).

Um dos coeficientes mais utilizados para o controle de qualidade de imagens classificadas é o kappa, destacado por Rodrigues *et al* (2019).

O índice Kappa é o mais recomendado por utilizar todas as células da matriz ao invés de somente os elementos diagonais, diferentemente de métodos que fazem uso apenas da Exatidão Global, utilizando dados derivados dos cruzamentos das classes, onde os mesmos se situam na diagonal principal da matriz de confusão, o que garante ao índice Kappa uma maior precisão da acurácia em relação aos outros métodos devido à medição de um pixel estar corretamente classificado, em relação à probabilidade de estar incorretamente classificado, avaliando a acurácia temática por ser mais sensível as variações de erros de omissão e comissão, também conhecido na literatura como erro de inclusão. (RODRIGUES *et al.*, 2019, p. 2447)

Sobre a qualidade de uma classificação expressa através do índice kappa, é usual considerar: “0 – 0,2 = ruim; 0,2 – 0,4 = razoável; 0,4 – 0,6 = boa; 0,6 – 0,8 = muito boa; e 0,8 – 1,0 = excelente.” (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 208).

A observância dos valores de acurácia, além de conferir confiabilidade aos resultados obtidos, também permite identificar eventuais erros que interfiram na correta coleta de amostras e interpretação dos resultados.

4.9 REPRESENTANDO AS MODIFICAÇÕES NO USO E COBERTURA DA TERRA ATRAVÉS DE DIAGRAMAS DE SANKEY

Uma vez que sejam obtidas imagens acuradas, boas representantes da realidade, cabe ao usuário realizar o trabalho de interpretação das modificações ocorridas ao longo do tempo. Essa inspeção pode ocorrer através de tabelas de tabulação cruzada, nas quais cada linha é uma categoria de uso da terra em um instante de tempo t_0 , cada coluna é uma categoria em um tempo subsequente t_1 e cada entrada é uma área experimentando mudança ou permanência durante o intervalo, segundo Cuba (2015). O autor também destaca a dificuldade para manusear e interpretar essas tabelas. “Os diagramas de Sankey dão ênfase ao tamanho e direção de fluxos dentro de um sistema, e devido à sua ampla utilidade têm sido aplicado em muitos contextos de pesquisa geográfica ou humano-ambiente” (CUBA, 2015, p. 164).

Os diagramas de Sankey descrevem fluxos entre elementos de uma rede, na qual setas ou linhas direcionais representam a relação entre seus elementos e a espessura das mesmas representa a magnitude do fluxo (CUBA, 2015). Dessa forma, dados que seriam relacionados em uma tabela, que por vezes pode não ser de interpretação facilitada, são conectados segundo suas relações e essas conexões são dimensionadas conforme a intensidade com que ocorrem.

Tabelas de mudanças no uso e cobertura da terra, combinadas com a clareza visual dos diagramas de Sankey, tornam possíveis a análise quantitativa e visualmente facilitada, colaborando assim para a melhor compreensão dos fenômenos ocorridos no espaço.

5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Ao longo deste tópico serão apresentadas as ferramentas e técnicas utilizadas para a produção e processamento de informações sobre o uso e cobertura da terra e a arenização na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu. Os procedimentos estão relacionados de forma descritiva, porém também é possível consultá-los em sua organização visual, incluída no final desta seção.

5.1 ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS

De forma a estruturar a base para os processamentos de dados do trabalho, foi obtido o arquivo vetorial com as bacias hidrográficas do Brasil, disponível na base de dados do IBGE (IBGE, 2021). Desse conjunto de dados foram selecionadas as bacias hidrográficas em seu sexto nível de detalhamento. A partir desse plano de informações foi individualizado o polígono correspondente à área de interesse, a bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.

Para a caracterização do contexto de ocorrência da arenização na bacia hidrográfica foram selecionados os dados de geologia, geomorfologia e pedologia, também extraídos do portal de downloads de dados de geociências do IBGE (IBGE, 2021)

As imagens de sensoriamento remoto foram obtidas a partir da base de dados GLAD ARD (POTAPOV *et al.*, 2020). Se procedeu com o download de todas as imagens disponíveis entre 1980 e 2020 para o *tile* 055W29S, pois os limites da bacia hidrográfica foram englobados totalmente pelo mesmo.

As imagens disponíveis no cubo de dados GLAD ARD são relacionadas com a resolução temporal dos satélites Landsat. Devido a isso, estão organizadas numericamente, em ciclos de 16 dias, que totalizam 23 ao longo de um ano. O calendário com a nomenclatura das imagens pode ser observado no Anexo 1. A partir desse critério, as imagens são nomeadas na base de dados, com data inicial para a primeira semana do mês de janeiro de 1980 e o número identificador de cada imagem

é acrescido em uma unidade a cada ciclo de 16 dias, conforme exibido no calendário de imagens do Anexo 2.

Apesar do trabalho de correção das imagens, promovido pelos desenvolvedores da base de dados, produtos de sensoriamento gerados por sensores passivos podem sofrer interferência de fenômenos atmosféricos, dentre os quais a nebulosidade se sobressai. Também podem acontecer erros na obtenção da imagem, bem como aqueles causados por mau-funcionamento do próprio sensor imageador. Devido a isso, não foi possível aproveitar parte considerável das imagens obtidas. O controle de qualidade das cenas extraídas do cubo de dados pode ser verificado no Anexo 2, no qual a coloração indicada na legenda indica a qualidade das imagens em cada data.

Com o intuito de se manter um padrão comparativo entre imagens de diferentes anos, ao passo que imagens de boa qualidade visual tenham sido selecionadas, foram definidas como objeto de análise as cenas 136, 251, 365, 480, 595, 711, 826 e 943. A escolha dessas datas primou por suas datas de obtenção, nos ciclos⁴ 20 ou 21 de seus respectivos anos. Ao mesmo tempo, essa contagem também foi a única ocorrida em intervalos regulares quinquenais. A exceção aconteceu para a imagem do ano de 2020, no qual a imagem com boa qualidade e mais próxima do período definido estava no vigésimo terceiro⁵ ciclo daquele ano.

Uma vez definidas as imagens de interesse, se procedeu com o recorte das mesmas através do software QGIS (QGIS, 2021), em sua versão 3.22.5 (Białowieża). As imagens recortadas foram reprojctadas para o sistema de coordenadas UTM 21S, associadas ao *datum* SIRGAS 2000.

Também se procedeu com o recorte dos planos de informações de geologia, pedologia e geomorfologia, os quais foram reprojctados para UTM 21S. Com vistas a amparar o processo de classificação, foram obtidas imagens do Mapbiomas (MAPBIOMAS, 2022), nos respectivos anos das imagens ARD selecionadas.

Uma relação dos dados utilizados ao longo deste trabalho pode ser visualizada no Quadro 2. Alguns dados, como os de IBGE (2021), estão disponíveis em um mesmo endereço eletrônico, porém organizados em estruturas de pastas. Para esses casos, também foi incluído o caminho do diretório logo após o endereço eletrônico, com o intuito de facilitar a localização dos planos de informações em questão.

⁴ De acordo com o calendário do anexo 1, entre 31 de outubro e 01 de dezembro de cada ano.

⁵ Corresponde a imagens obtidas entre 18 e 31 de dezembro.

Quadro 2 – Fontes de dados utilizadas ao longo do trabalho.

Dado	Escala	Fonte
Imagem natural earth	1:10.000.000	https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-raster-data/10m-natural-earth-2/
Malha territorial 2021	1:250.000	https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html Caminho: organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_municipais/municipio_2021/UFs/RS
Bacia hidrográfica	1:250.000	https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html Caminho: 2021/Bacias_Hidrograficas_do_Brasil_BHB250/vetores/bacias_nivel_6.zip
Rede hidrográfica	1:25.000	http://ww2.fepam.rs.gov.br/bcrs25/
Geologia	1:250.000	https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html Caminho: informacoes_ambientais/geologia/levantamento_geologico/vetores
Geomorfologia	1:250.000	https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html Caminho: informacoes_ambientais/geomorfologia/vetores/escala_250_mil_versao_2021
Solos (pedologia)	1:250.000	https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html Caminho: informacoes_ambientais/pedologia/vetores
Carta imagem (Imagem Sentinel-2)	10 metros	https://eos.com/landviewer/ Composição colorida das bandas 4,3 e 2 da cena 21JXH de 29/07/2022
Imagens GLAD ARD (Landsat)	30 metros	https://glad.umd.edu/dataset Cenas 136, 251, 365, 480, 595, 711, 826 e 943 para o tile 055W29S
Dados pluviométricos	Dados diários	https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas Dados CSV da estação 2955006 (Ponte do Miracatu)

Fonte: o autor (2022).

5.2 CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS

A classificação de imagens foi feita de forma individual. Os procedimentos de classificação também foram executados no software QGIS, através do complemento Semi-Automatic Classification Plugin (CONGEDO, 2021).

Em cada procedimento de classificação foi criado um arquivo de treinamento, designado para armazenar as amostras delimitadas. Foram delimitadas as classes: floresta, silvicultura, campo, solo exposto seco, solo exposto úmido, soja, lavouras, pastagens e areal. A identificação de amostras do uso e cobertura da terra foi baseada no mapeamento do projeto MapBiomias. Contudo, cabe ressaltar que o mapeamento foi considerado apenas como informação preliminar. Em posse das informações preliminares, se procedeu com a delimitação de amostras a partir de suas formas, cores e texturas. Devido a isso, embora a indicação do MapBiomias em alguns casos

indicar um determinado uso e cobertura da terra, a verdade de campo foi informada conforme a imagem, posto que por vezes não houve correspondência entre a realidade imageada e aquela presente no mapeamento.

Oportunamente, se destaca que não foi possível estabelecer uma verdade de campo baseada na visita presencial à área de estudo, posto que todas as imagens utilizadas correspondem a instantes de tempo diferentes daquele em que se deu o desenvolvimento da pesquisa.

Com relação às áreas de arenização, sua identificação também considerou cores, formas e texturas para a delimitação. Em diversos casos, a presença de solo exposto e manchas de areia apresentou confusão em sua diferenciação. Para o refinamento da informação foram consideradas formações de sulcos e ravinamento aparentes na imagem para a confirmação de áreas de arenização, bem como a identificação de áreas com outros usos e cobertura da terra no mapeamento do MapBiomas para a negação da hipótese de uma área de arenização.

Em todos os procedimentos de inspeção e delimitação de amostras foram utilizadas composições coloridas em cores naturais e em falsa-cor, a fim de se obter a melhor diferenciação possível entre os alvos identificados. Para a solução de eventuais erros de classificação, foram delimitadas novas amostras no local, sendo informado ao *plugin* classificador a classe de feição correta.

Para as classificações foram utilizadas amostras no formato de polígono e o algoritmo de classificação foi o de distância mínima (*Minimum Distance*), definição padrão do *plugin* SCP. Com base nas informações espectrais coletadas a partir das amostras delimitadas, se deu o processo de classificação do *plugin*.

Ao final de cada classificação foi realizada uma inspeção visual a fim de identificar erros na identificação do uso e cobertura da terra, sendo feitos ajustes das amostras quando necessário.

5.3 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DAS CLASSIFICAÇÕES

Uma vez concluída a comparação visual entre as imagens e os mapas temáticos obtidos, foi feita a testagem de acurácia das classificações. Para isso foi utilizado o *plugin* A&cATaMa (LLANO, 2019), que gerou sobre cada imagem 396 pontos com distribuição espacial aleatória. Os pontos foram gerados visando realizar uma análise aleatória estratificada com um erro-padrão esperado de 0,5%, de forma

que o plugin os posicionou em quantidades proporcionais à área ocupada por cada classe de feição em relação à área total.

Através do assistente de comparações do plugin foram inspecionados individualmente os pontos. A cada ponto, mediante análise visual da imagem ARD em composição colorida de cores naturais e falsa-cor, além da imagem MapBiomas, foi informado ao plugin a informação a ser considerada como "verdade de campo". Após a conclusão da atribuição de informações a todos os pontos, o A&cATaMa procedeu com a comparação entre os dados informados pelo usuário e aqueles constantes na classificação.

Ao final do procedimento foi obtida uma matriz de erros e acurácia global da classificação. De posse da matriz de erros, foi calculado o índice *kappa* de cada imagem através de um editor de planilhas eletrônicas

5.4 MENSURAÇÃO DE ÁREAS DO USO E COBERTURA DA TERRA

Com a obtenção das classificações com boa acurácia, foi empreendida a quantificação da área ocupada por cada classe de feição. Para tanto, se lançou mão do Semi-Automatic Classification Plugin. Como resultado, foram obtidos relatórios individuais, um por imagem, com a identificação da área ocupada por cada classe temática. A quantificação de áreas foi expressa através da contagem de pixels associados a cada uma das classes e esses valores foram reunidos em uma tabela. Cabe destacar que cada um dos pixels da imagem corresponde a uma porção de 30 metros por 30 metros, que totaliza 900 m². Também foi feita a conversão de cada uma das tabelas e quadros para metros quadrados, cujas as quais foram elencadas nos apêndices desse trabalho.

De posse das áreas ocupadas pelas classes de uso e cobertura da terra nas diferentes imagens classificadas, foi realizada a quantificação das mudanças nessas áreas entre as diferentes datas analisadas. Para tanto, se fez uso da ferramenta de comparação de classificações de imagens, disponível no *Semi-Automatic Classification Plugin*. Cada imagem classificada foi comparada com sua imagem subsequente (ex: 1985 e 1990, 1990 e 1995). Ao final foi obtido um relatório com os pixels inalterados, bem como daqueles que assumiram um novo valor. Os resultados foram organizados automaticamente em uma matriz quadrada correspondente ao número de classes.

Para melhor visualização das modificações ocorridas, os dados das tabelas de transição foram organizados em diagramas de Sankey (CUBA, 2015). Nos diagramas, as classes de feições presentes em cada uma das imagens foram dispostas em lados opostos. O direcionamento dos fluxos foi realizado conforme o comportamento dos pixels entre uma imagem e outra, de modo que se um determinado conjunto de pixels apresentou o mesmo valor em ambas as imagens, uma classe de feição estabeleceu uma ligação com sua correspondente. Caso um conjunto de pixels tenha sido convertido em um novo valor na segunda imagem, o direcionamento do fluxo foi estabelecido com a nova classe. O dimensionamento das ligações se deu conforme a quantidade de pixels em cada relação.

Em tempo, nos diagramas de Sankey deste trabalho, as representações à esquerda das figuras sempre representam a imagem mais antiga, enquanto os itens à direita se tratam da imagem mais recente.

5.5 CONTEXTUALIZAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

As áreas de arenização, por definição, estão relacionadas com a dinâmica hídrica. Diante disso, também foi realizada a comparação entre os resultados obtidos nas classificações e os valores de pluviosidade da área de estudo.

Foi utilizada como fonte de dados a obra de Binda e Verdum (2020), intitulada “Estiagens, secas e os processos de arenização na bacia hidrográfica do Arroio Miracatu, sudoeste do estado do Rio Grande do Sul”. A produção conta com dados pluviométricos da estação Ponte do Miracatu, inserida no contexto da área de estudo do presente trabalho. A escolha do artigo foi motivada pela presença de dados desde 1970 até o ano de 2020, tratados estatisticamente para a solução de eventuais ausências de registros pluviométricos.

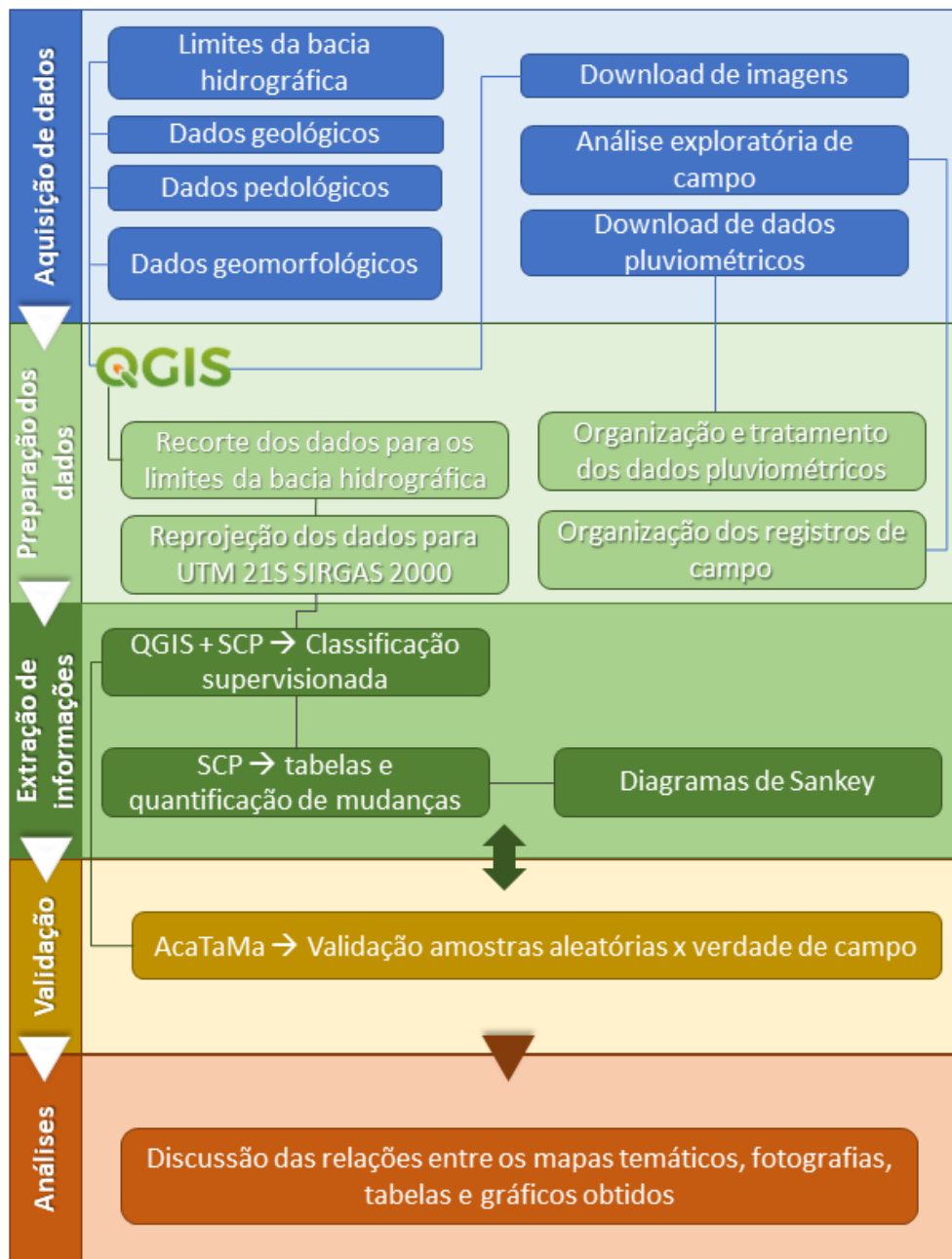
As mudanças ocorridas nas áreas de arenização foram comparadas com os números presentes no trabalho de Binda e Verdum (2020), com o objetivo de agregar informações aos cenários identificados.

Também foram observados dados da estação pluviométrica Ponte do Miracatu, de código 2955006 no banco de dados das séries históricas de estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2022), que foram organizados de forma a se obter os aglomerados pluviométricos anuais entre 1985 e 2020.

5.6 FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Ao longo dessa seção foram descritos os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa. De modo a organizar a metodologia aplicada em uma representação visual, de interpretação facilitada, seus pontos-chave foram esquematizados no fluxograma que pode ser verificado na Figura 17.

Figura 17 – Procedimentos metodológicos utilizados para a elaboração do trabalho.



Fonte: o autor (2022).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao lançar mão de imagens de satélite para o estudo da arenização foi necessário, além da apropriação de conhecimentos acerca da gênese e comportamento dos areais, também englobar conceitos como o sensoriamento remoto e o geoprocessamento.

Ao longo desse capítulo serão apontadas análises individuais de cada instante de tempo, como também observações das mudanças ocorridas entre cada par de momentos registrados pela classificação de imagens. As análises individuais serão expostas mediante tabelas de quantificação absoluta das áreas ocupadas por cada classe de feição. As comparações entre diferentes classificações foram expostas através das tabelas de alterações para uma compreensão quantitativa de tais modificações, enquanto também foram representadas em diagramas de Sankey, com o intuito de apresentar visualmente as movimentações ocorridas. Posta a relevância da dinâmica hídrica para os areais, também se discorreu acerca dos índices pluviométricos nos anos das imagens utilizadas.

6.1 AS TRANSFORMAÇÕES NO USO E COBERTURA DA TERRA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU E A ARENIZAÇÃO

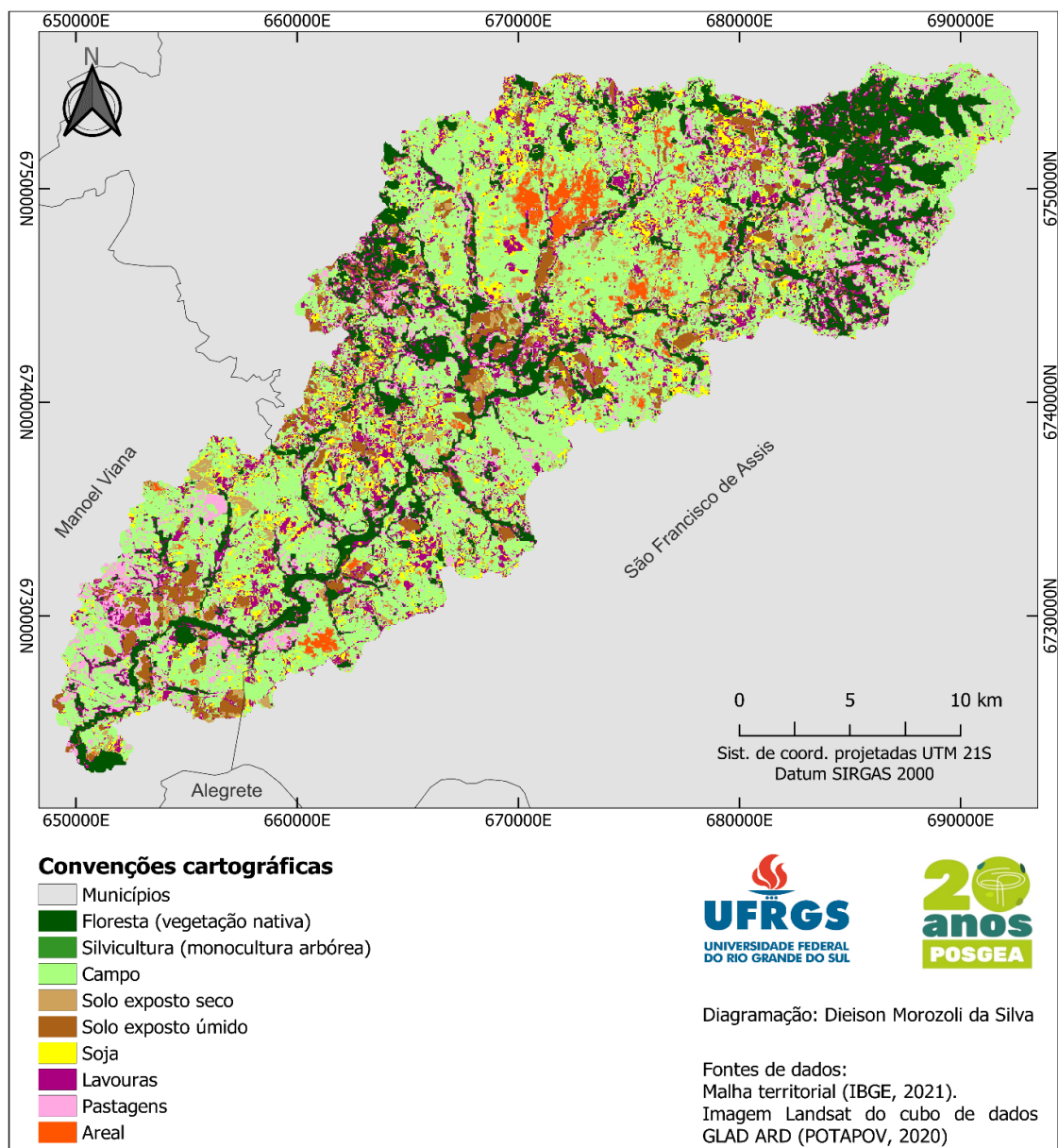
Os dados da família de satélites Landsat permitiram a obtenção de informações desde 1985 até o ano de 2020. Apesar da interferência de fenômenos atmosféricos, erros na captura das imagens ou mesmo na inexistência de imagens em diversos instantes, como pode ser verificado no Anexo 1, foi possível a representação do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu ao longo do recorte temporal.

De antemão, é válido reiterar que as imagens de satélite permitem visitar áreas que por vezes são de difícil acesso, bem como resgatar um registo histórico dessas localidades. Em contrapartida, limitações da resolução espacial impõem certa restrição à visualização da realidade em detalhes. Também se soma a isso a existência de pixels cuja composição se confunde entre diferentes classes. Assim, podem ocorrer erros na classificação de imagens, apesar dos esforços para a coleta de amostras de qualidade e posterior testagem de suas acurácias.

Ao longo desta seção serão apresentados tabelas e quadros sobre a quantificação de áreas do uso e cobertura do solo na área de estudo. Essas quantificações são feitas pela contagem de pixels atribuídos a cada classe. Em tempo, todas as imagens possuem uma área de 653390 pixels (588,051 km²).

A primeira classificação, representando o ano de 1985, revelou uma bacia hidrográfica permeada por atividades agrícolas, que coexistem com vegetação nativa e os areais. Na Figura 18 é possível observar a distribuição espacial desses usos e coberturas da terra.

Figura 18 – Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 1985.



Fonte: o autor (2022).

Uma análise visual em um primeiro momento evidencia a predominância do campo. De fato, as áreas identificadas como formação campestre foram as que totalizaram o maior valor, de acordo com a Tabela 1, com 289786 pixels. Com relação às formações florestais, também preponderantes, ocupam 104150 pixels da área de estudo, distribuídas principalmente na porção superior da bacia hidrográfica, porém também se ramificando ao longo dos caminhos de drenagem hídrica.

As formas de trabalho antrópico sobre o solo devem ser observadas com atenção. Apesar da adoção de padrões visuais ao longo do processo de classificação, bem como a comparação com dados de uso da terra oriundos do MapBiomas (2022), por vezes diferentes tipos de plantio podem ter aparência bastante semelhante. Ao se tratar de um resgate de informações históricas, também se torna inviável a verificação em campo dos dados classificados.

A classificação obtida para o ano de 1985 revela que dentre os usos agrícolas da terra naquele ano se sobressaem as lavouras, e dentre elas a soja, dispostas ao longo da bacia hidrográfica. Entretanto, também ocorre forte presença de solo exposto, tanto úmido quanto seco. Essas porções de terra, devido a suas formas geométricas e localização, podem ser associadas também a atividades agrárias. Além disso, áreas sobre as quais o processo de semeadura ou colheita seja recente, sem que tenha sido possível a detecção de plantios, é provável sua identificação como solo exposto. Ademais, áreas com solo exposto úmido podem indicar a cultivos que receberam irrigação, porém ainda não serem detectáveis em uma imagem de satélite com 30 metros de resolução espacial.

Se áreas identificadas diretamente como direcionadas para a atividades agrícolas e áreas delimitadas de forma indireta forem analisadas em conjunto, se verifica que essas ocupam expressiva porção da área de estudo. Com efeito, na Tabela 2, na qual as formas associadas a agricultura tanto por identificação direta quanto indireta foram estratificadas, é notória a parcela de uso da terra para fins de plantio, equiparável a área ocupada pelas formações campestres.

Com relação às áreas de arenização, apesar de sua prevalência na porção superior da bacia hidrográfica, também ocorrem de forma esporádica ao longo de sua extensão. Seus 12489 pixels representam 1,91% da área total e, tal como descrito por Suertegaray et al (2012, p. 136), ocupam principalmente as médias vertentes. Ao se observar as vegetações ciliares, que acompanham as formas da drenagem é facilmente constatada a rede pela qual se dá o escoamento da água na bacia

hidrográfica. Essa mesma rede evidencia não somente os locais de drenagem como também os divisores de águas existentes em seus entremeios. Entre os caminhos hídricos e seus divisores de águas é observável a presença de areais, o que mais uma vez demonstra a presença dos mesmos nas áreas de médias encostas.

Tabela 1 – Quantificação do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 1985⁶.

<i>Superfícies anuais do uso e cobertura da terra (em unidades de pixel⁷)</i>								
Feição	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Floresta	104150	113911	94851	91483	126538	144046	147543	119062
Silvicultura	0	0	0	0	0	31210	37362	32307
Campo	289786	263880	293997	331988	233994	259433	217811	219293
Solo exposto seco	25384	12953	2714	28740	9697	11669	8843	70727
Solo exposto úmido	34041	46056	17162	70213	85829	152536	109426	83892
Soja	46484	33929	54406	21756	53147	10403	27964	8312
Lavouras	89883	126400	134901	67580	54094	8298	22013	23958
Pastagens	51173	44077	43510	30433	78151	27086	72561	84900
Areal	12489	12184	11849	11197	11940	8709	9867	10939
Totais	653390	653390	653390	653390	653390	653390	653390	653390

Fonte: o autor (2022).

Tabela 2 - Quantificação estratificada do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 1985⁸.

<i>Superfícies anuais do uso e cobertura da terra (em unidades de pixel)</i>								
Feição	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Floresta	104150	113911	94851	91483	126538	144046	147543	119062
Silvicultura	0	0	0	0	0	31210	37362	32307
Campo	289786	263880	293997	331988	233994	259433	217811	219293
Agricultura	246965	263415	252693	218722	280918	209992	240807	271789
Areal	12489	12184	11849	11197	11940	8709	9867	10939
Totais	653390	653390	653390	653390	653390	653390	653390	653390

Fonte: o autor (2022).

Já no ano de 1990 (Figura 19) se observa um acréscimo das áreas de vegetação nativa (floresta). Apesar dessa mudança ser pouco perceptível

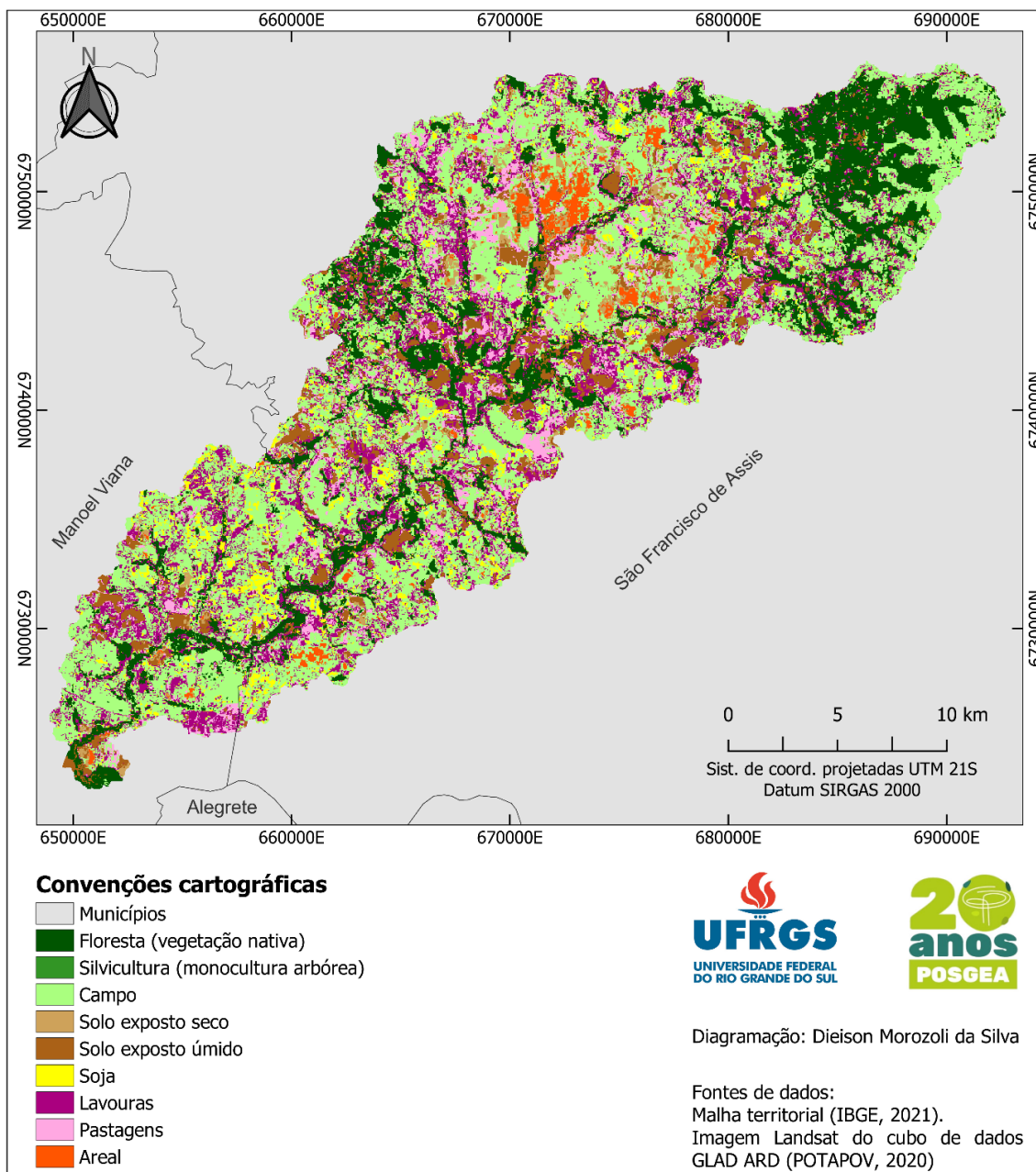
⁶ A tabela com os valores em unidades métricas de área se encontra no Apêndice 2.

⁷ Cada unidade de pixel corresponde a uma porção da superfície terrestre de 30 metros por 30 metros, totalizando 900 m², 0,09 hectares ou 9x10⁻⁴ km²

⁸ A tabela com os valores em unidades métricas de área se encontra no Apêndice 2.

visualmente, por ter se sucedido gradualmente ao longo de toda a distribuição espacial, pode ser observada quantitativamente na Tabela 1, de forma que passou de 104150 pixels em 1985 para 113911 pixels em 1990. Apesar de eventuais erros de classificação, a inspeção das imagens não-classificadas demonstrou densificação da vegetação, o que justifica em parte o acréscimo de área.

Figura 19 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 1990.



Fonte: o autor (2022).

A expansão das áreas de floresta entre 1985 e 1990 pode ser melhor compreendida a partir da análise dos dados que constam no Quadro 3. Convém ressaltar que esse quadro não representa a quantificação absoluta das áreas ocupadas por cada classe de uso e cobertura da terra nas datas analisadas, mas sim, os acréscimos e decréscimos ocorridos nas mesmas. Para se visualizar corretamente os dados do Quadro 3 é pertinente iniciar pelos totais da data mais antiga. Os totais de uma linha indicam a área ocupada pela classe de feição. Na mesma linha se encontram as perdas, ou seja, o quanto que a classe de feição analisada foi sobreposta por outras classes. Os valores que compõem a diagonal principal se referem às áreas que se mantiveram constantes. Já os valores dispostos na vertical indicam os valores que a feição de interesse avançou sobre outras classes.

Conforme o Quadro 3, a classe de floresta, que totalizava uma superfície de 104150 pixels em 1985, passou a ocupar uma área de 113911 pixels em 1990. Nesse processo, 14245 pixels foram perdidos, dos quais 91 deram lugar a pastagens, 6920 foram sobrepostos por lavouras, 1342 pelo cultivo de soja, 2608 se tornaram solo exposto úmido e 3274 pixels de floresta cederam espaço para o campo. Permaneceram constantes 89905 pixels de floresta, ao passo que a mesma avançou sobre 4297 pixels de campo, 2651 pixels de solo exposto úmido, 1275 de soja, 13492 de lavouras e 2241 pixels de pastagens.

De forma análoga ao disposto sobre as modificações detectadas nas áreas de vegetação nativa (floresta), a mesma análise de avanços e recuos pode ser feita para as demais classes temáticas presentes nos mapeamentos de 1985 e 1990.

Ocorre expressiva rotatividade de valores entre as classes ligadas à agricultura, expressa tanto por acréscimos quanto decréscimos, que não necessariamente indicam a mudança das práticas agrícolas da área de estudo, mas sim que demonstram a prática de intercalar os espaços destinados ao plantio. Com efeito, enquanto na Figura 18, correspondente ao ano de 1985, ocorre maior concentração de áreas de plantio de soja (em amarelo) na porção superior da área de estudo e em seu centro se concentram áreas de solo exposto úmido. Já em 1990, representado na Figura 19, a região superior do mapa é ocupada por áreas de lavoura e pastagem, assim como ocorre também no centro da classificação correspondente a esse mesmo ano.

Como já ressaltado, tanto áreas com solo exposto quanto com lavoura propriamente detectada podem se referir a porções do terreno dedicadas ao plantio,

porém com diferentes estágios de germinação, de forma que a alternância entre os valores ocupados por essas classes ocorreu conforme o esperado.

Direcionado o olhar para as áreas de arenização, entre 1985 e 1990 se observou interação dessa classe de feição de forma expressiva apenas com áreas de campo e solo exposto seco. De um total de 12489 pixels em 1985, passou para 12184 pixels de areais em 1990. Para tanto, houve um recuo de 4458 pixels dos areais com relação a outras classes temáticas, enquanto ocorreu um avanço de 4153 dos areais sobre as mesmas. Os recuos mais expressivos se deram sobre o solo exposto seco (2035 pixels) e sobre o campo (1834 pixels). Com relação aos avanços dos areais, se sucedeu sobre 2035 pixels de solo exposto seco e 1834 pixels identificados como campo.

Quadro 3 – Quantificação⁹ das mudanças na contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 1985 e 1990 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu¹⁰.

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (1985)
Floresta	89905	0	3274	8	2608	1342	6920	91	2	14245	104150
Silvicultura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campo	4297	0	166601	6050	15298	15506	53525	26675	1834	123185	289786
Solo exp. seco	36	0	10540	2748	2860	772	3941	2452	2035	22636	25384
Solo exp. úmido	2651	0	5620	356	11634	716	9911	3144	9	22407	34041
Soja	1275	0	25288	848	2493	4335	7975	4197	73	42149	46484
Lavouras	13492	0	29921	628	7050	8914	25488	4232	158	64395	89883
Pastagens	2241	0	20706	288	3834	2338	18517	3207	42	47966	51173
Areal	14	0	1930	2027	279	6	123	79	8031	4458	12489
Avanços	24006	0	97279	10205	34422	29594	100912	40870	4153		
Total (1990)	113911	0	263880	12953	46056	33929	126400	44077	12184		

Fonte: o autor (2022).

Apesar dos números aparentemente simétricos, especialmente as mudanças indicam a alternância de alguns locais com focos de areais, de modo que enquanto

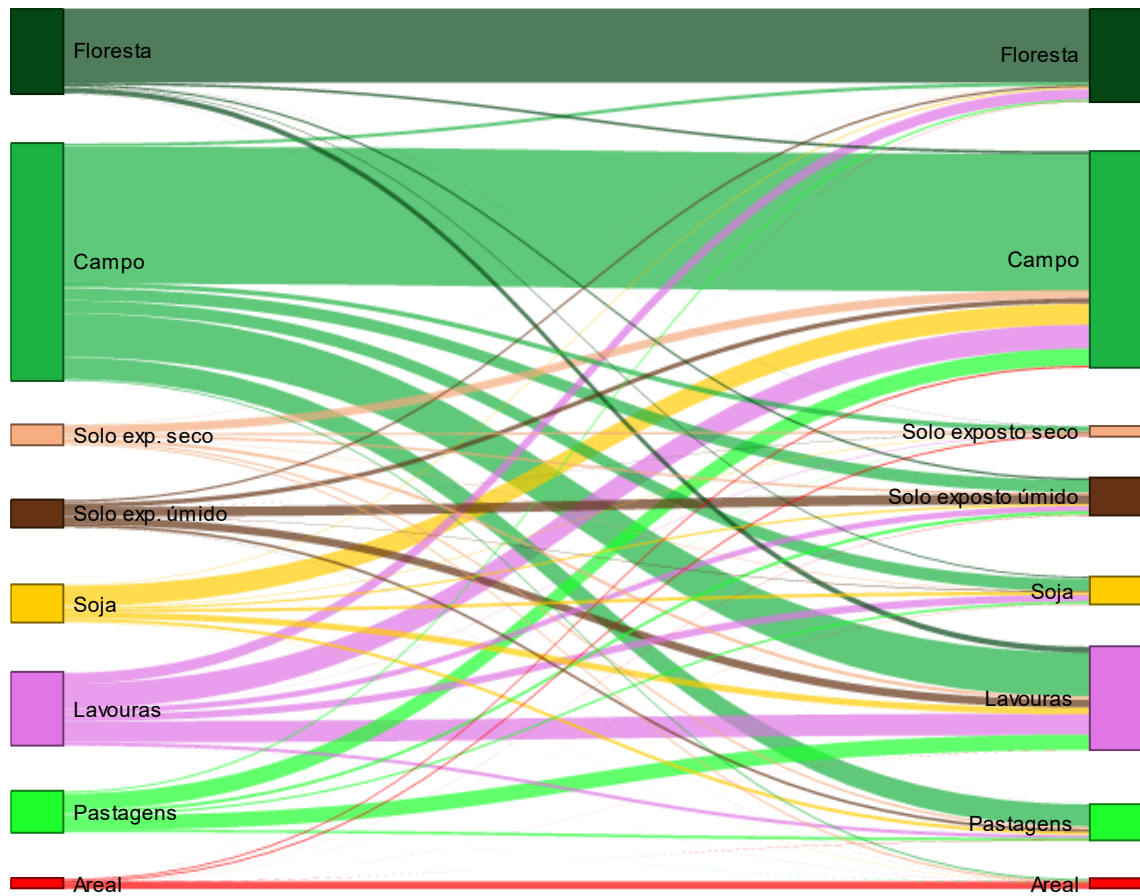
⁹ Nota: Os valores da diagonal principal (em negrito) correspondem as áreas que permaneceram constantes entre os dois instantes de tempo. Os valores das linhas se referem às áreas da classe de feição que foram transformadas em outra(s) (recuos). Os valores das colunas expressam a quantidade de área que uma classe de feição avançou sobre cada uma das outras classes (avanços).

¹⁰ O quadro com os valores de áreas em unidades métricas se encontra no Apêndice 3.

em 1985 algumas áreas de arenização se encontram próximos à região sul da bacia hidrográfica, enquanto que em 1990 essas manchas se mostram em menor intensidade. Concomitantemente, novos locais com focos de arenização foram detectados no norte da bacia, próximos às lavouras e florestas. Os areas que permanecem constantes entre ambas as classificações manifestam sua predominância tanto de forma visual entre as classificações quanto pelos 8031 pixels que permaneceram inalterados conforme o Quadro 3. Cabe reiterar a coleta de amostras feita em locais similares em ambas imagens, bem como a delimitação de pixels puros, que forneceram cenários de detecção semelhantes entre si, com o intuito de uma análise de ambas as imagens em equidade.

A comparação entre as classificações de 1985 e 1990, que resultou no Quadro 3, também pode ser estabelecida de forma visual, ainda que não tão detalhada numericamente, através de um diagrama de Sankey, como demonstrado na Figura 20. Os itens à esquerda representam os valores de partida (1985), enquanto os valores à direita se referem aos valores de área medidos posteriormente (1990).

Figura 20 – Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 1985 e 1990 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



Fonte: o autor (2022).

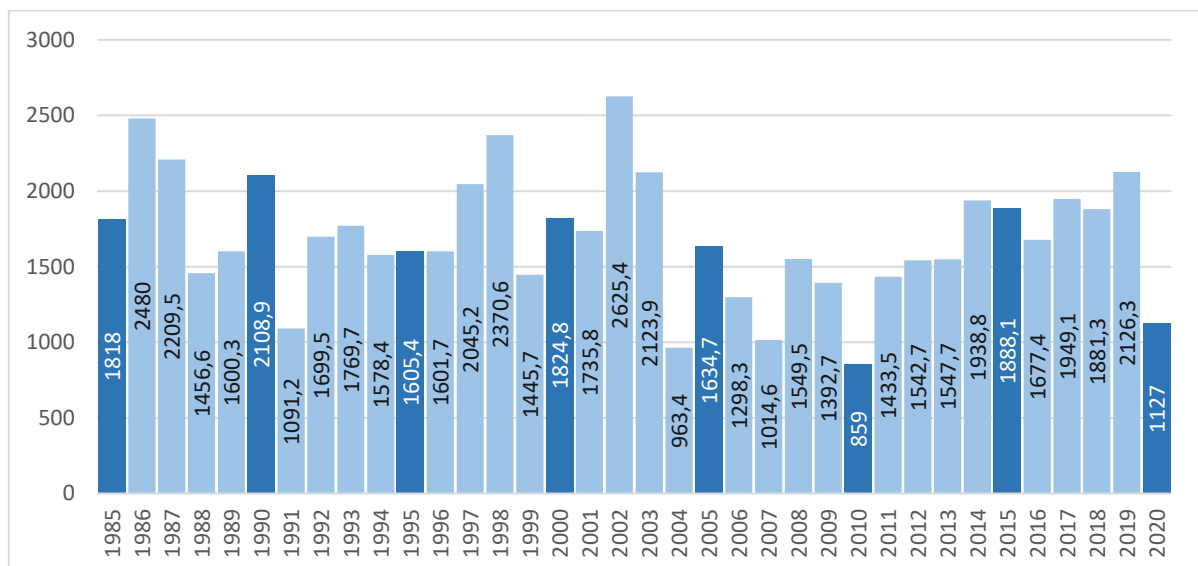
A representação gráfica da Figura 20 tornou ainda mais perceptível a transformação moderada das áreas de floresta e de arenização. Em contraparte, áreas de campo, lavouras, plantios de soja, pastagens e solo exposto demonstram expressiva alternância de áreas entre si. Em tempo, se destacaram as interações mais expressivas dos areais, ocorridas com o solo exposto seco e com o campo, chamando atenção para seu avanço sobre as áreas com pouca vegetação ou com vegetação campestre.

Acerca dos avanços dos areais sobre as áreas de campo e solo exposto seco, ocorridas entre 1985 e 1990, merece destaque que, apesar de essas áreas não estarem dedicadas exclusivamente ao cultivo, ainda podem contar com a presença de problemáticas como uso indevido do solo, pisoteio do gado, entre outras atividades com potencial amplificador do fenômeno de arenização.

Ao se analisar o gráfico da Figura 14, de acordo com Binda e Verdum (2020), enquanto o ano de 1985 apresentou quatro casos de estiagem, no ano de 1990 ocorreram 3 episódios de estiagem. Apesar disso, em 1988 e 1989 houve sete registros de estiagem. A partir desses indicadores é possível inferir que as estiagens, por si, não explicam toda gênese e manutenção das áreas de arenização.

Por outro lado, é pertinente trazer à discussão o fato de que apesar da redução das manchas de areia em alguns locais, também ocorreu sua ampliação em outros. Posto que o carreamento das partículas de areia é realizado em grande parte por via hídrica, é de se esperar que a maior precipitação pluviométrica de 1990, de acordo com a Figura 21, tenha contribuído para a ampliação de alguns focos de arenização.

Figura 21 - Totais pluviométricos (em mm) anuais entre os anos de 1985 e 2020 na estação pluviométrica Ponte do Miracatu.



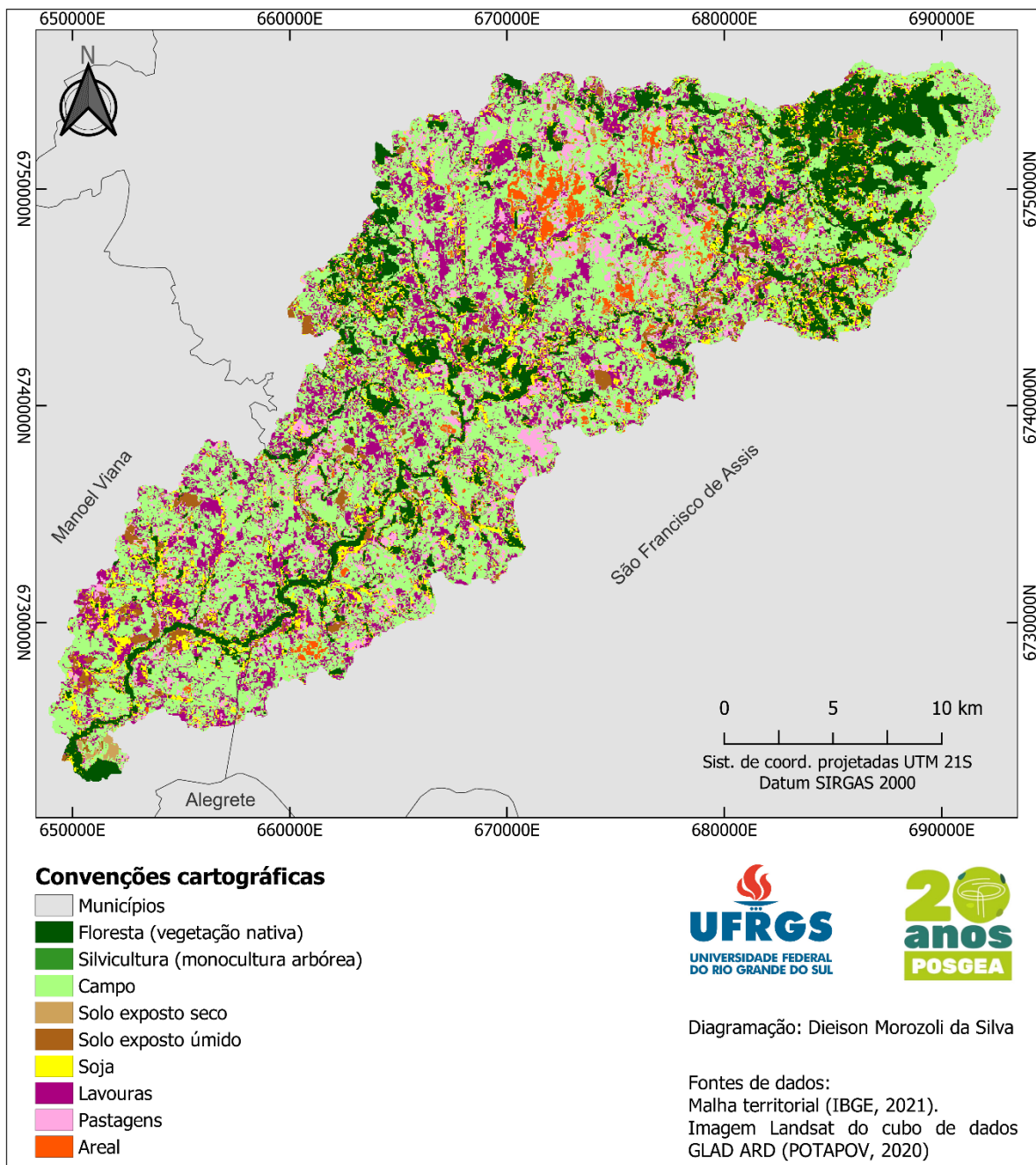
Fonte: adaptado de ANA (2022)

Direcionada a discussão para o ano de 1995, representado na Figura 22, é perceptível uma retração nas formas florestais, que passou a apresentar a presença de áreas de soja (em amarelo). Ao mesmo tempo, também ocorreu maior presença das áreas de lavoura ao longo da bacia hidrográfica. Com relação às áreas de arenização, não ocorreram alterações expressivas, se considerada a análise visual.

Ao se considerar os dados presentes na Tabela 1, fica evidente a redução das áreas de floresta, que partiu de 113911 pixels em 1990 para 94851 em 1995. O campo, por sua vez, passou de 263880 para 293997 pixels de superfície. Porções do terreno ocupadas por solo exposto tiveram substancial redução, em oposição às áreas

de lavoura e soja. A proliferação das manchas de soja e lavoura, acompanhada da redução das áreas de solo exposto pode indicar tanto o direcionamento de algumas áreas para as práticas agrícolas quanto áreas já direcionadas para essa finalidade, porém nesse momento histórico, em um estágio de desenvolvimento superior ao detectado em 1990.

Figura 22 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 1995.



Fonte: o autor (2022).

Das transformações ocorridas sobre a classe temática de florestas entre 1990 e 1995, os recuos mais expressivos se deram em favor das áreas com cultivo de soja (15230 pixels) e lavouras (6238 pixels), conforme dados apresentados pelo Quadro 4.

Quadro 4 - Quantificação das mudanças na contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 1990 e 1995 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu¹¹.

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (1990)
Floresta	86207	0	4150	1	1791	15230	6238	292	2	27704	113911
Silvicultura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campo	3160	0	178321	599	3331	8915	55752	12162	1640	85559	263880
Solo exposto seco	12	0	6831	637	143	262	2034	1133	1901	12316	12953
Solo exposto úmido	1758	0	12329	127	7847	4530	11902	7287	276	38209	46056
Soja	752	0	15337	14	325	3678	13129	635	59	30251	33929
Lavouras	2947	0	54343	62	2837	19968	36315	9712	216	90085	126400
Pastagens	15	0	19646	393	873	1801	9144	12036	169	32041	44077
Areal	0	0	3040	881	15	22	387	253	7586	4598	12184
Avanços	8644	0	115676	2077	9315	50728	98586	31474	4263		
Totais (1995)	94851	0	293997	2714	17162	54406	134901	43510	11849		

Fonte: o autor (2022).

Com relação às áreas com provável utilização agrícola, ocorreram modestas alternâncias entre si. Apesar disso, interações consideráveis se deram entre as lavouras e o campo, com um recuo da lavoura em relação ao campo da ordem de 54343 pixels, ao passo que também ocorreu um avanço de 55752 pixels das lavouras sobre o campo. Novamente, as diferenças na distribuição espacial dos cultivos entre as datas podem indicar a alternância de usos do solo, o que também pode ser detectado na inspeção visual das imagens.

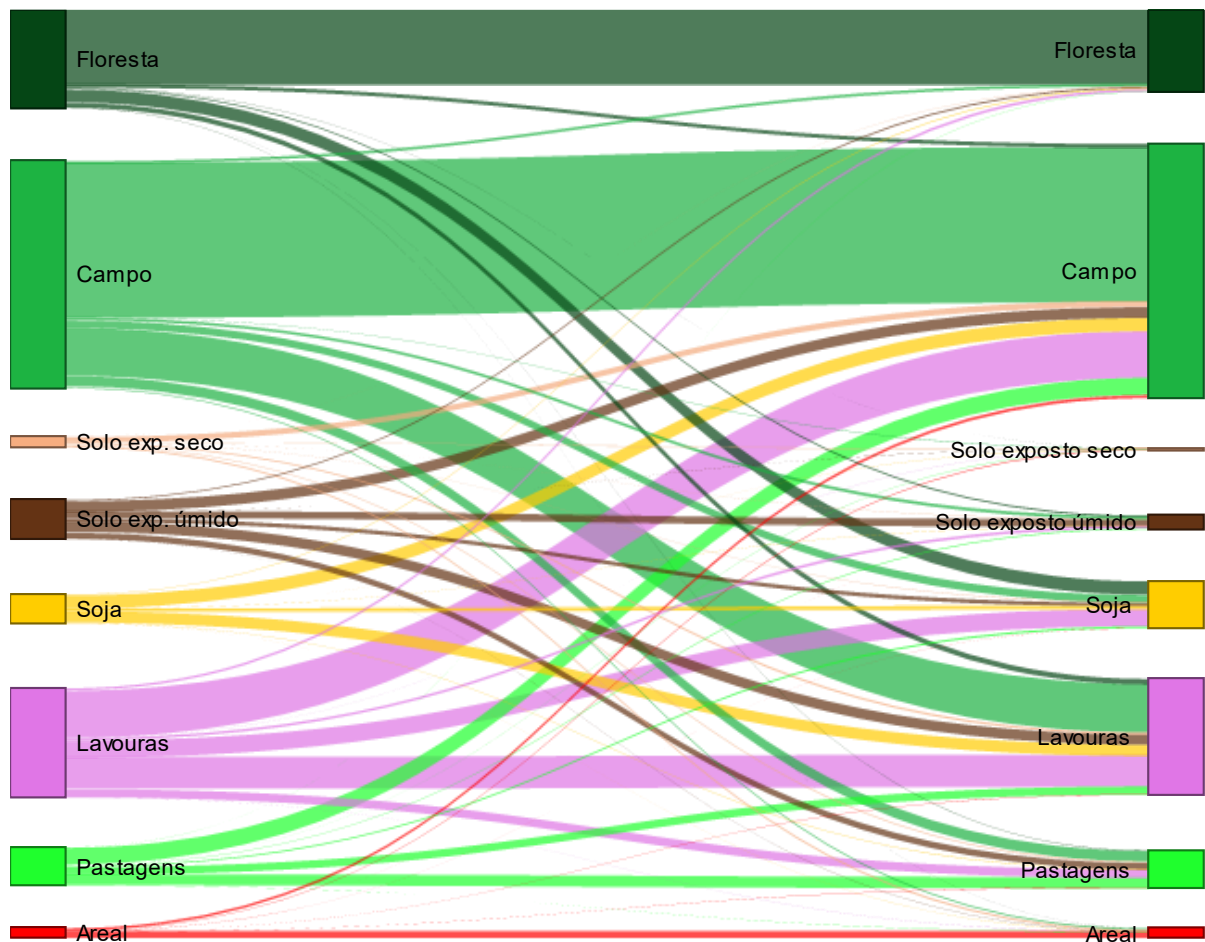
Com relação aos areais, que ocupavam uma área de 12184 pixels em 1990 e passaram a 11849 pixels em 1995, também ocorreram transformações modestas. Da transformação dos focos de arenização em outras classes de uso do solo se sobressaíram 3040 pixels de areais incorporados pelo campo e 881 pixels de areais

¹¹ O quadro com os valores de áreas em unidades métricas se encontra no Apêndice 4.

que deram lugar a solo exposto seco. Os avanços dos areais se deram principalmente sobre áreas de campo (1640 pixels) e solo exposto seco (1901 pixels).

A alternância de áreas ocupadas por cada classe de uso e cobertura da terra entre 1990 e 1995 pode ser melhor visualizada no diagrama de Sankey, na Figura 23. Apesar das reduções ocorridas nas áreas de floresta e de arenização, parte considerável das mesmas se manteve constante. Por outro lado, as feições relacionadas com a agricultura (campo, lavouras, solo exposto, pastagens e soja) ainda que mantenham valores semelhantes nos dois momentos históricos, se caracterizam pelas trocas de áreas entre si, o que reforça a ideia de uma alternância nos usos do solo em diferentes safras.

Figura 23 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 1990 e 1995 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



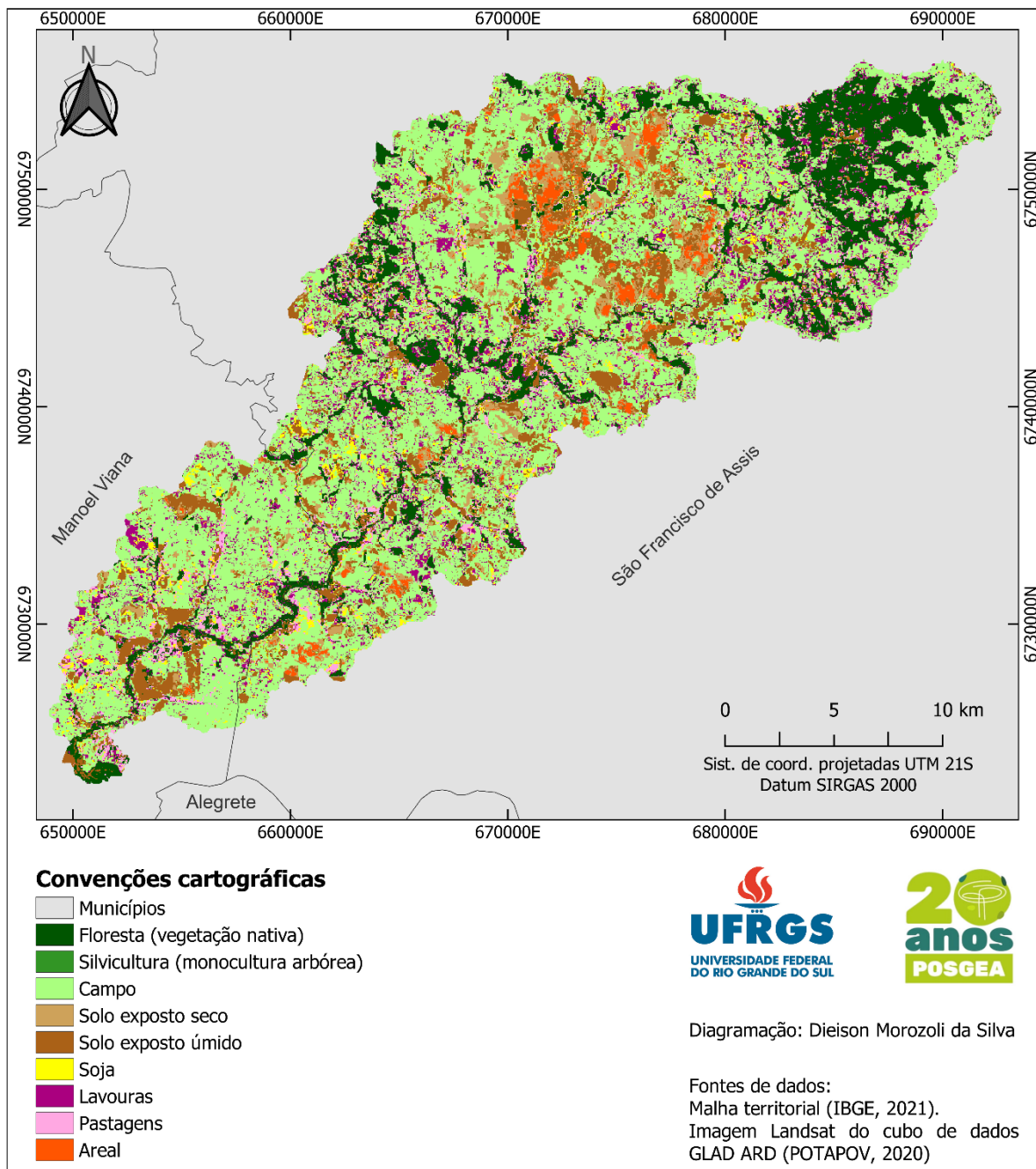
Fonte: o autor (2022)

O ano de 1995, de acordo com Binda e Verdum (2020), foi marcado pela ocorrência de quatro eventos de estiagem, assim como nos dois anos anteriores, de

acordo com a Figura 14. Além dos episódios de estiagem, de acordo com a Figura 21, também foi menor a precipitação de 1995, um acumulado anual de 1605,4mm contra os 2108,9mm precipitados no ano de 1990. A retração aparente das áreas de arenização pode estar atrelada a menor intensidade da atividade hídrica nesse período. Em tempo, é válido destacar a possibilidade de existência de pixels classificados incorretamente, confusão na identificação de pixels com feições misturadas (impuros) e da resolução espacial das imagens Landsat, que detectam objetos com dimensões iguais ou superiores a 30 metros.

Para o ano de 2000 (Figura 24) foi mantido o aparente ritmo de decréscimo das áreas de vegetação nativa, que passou a totalizar 91483 pixels, contra 94851 pixels em 1995. Apesar do crescimento das áreas identificadas como solo exposto seco e solo exposto úmido, ocorreu notável decréscimo nas áreas de plantio como um todo. Simultaneamente, foi detectada uma expansão dos campos.

Figura 24 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2000.



Fonte: o autor (2022).

O Quadro 5 apresenta de forma mais detalhada as transformações ocorridas. A redução nas áreas de floresta (vegetação nativa) se sucedeu de forma mais expressiva em virtude do aumento das áreas de lavoura (9724 pixels) e solo exposto úmido (3202 pixels). Ao mesmo tempo, áreas com formação florestal avançaram sobre 7718 pixels de soja, 2388 pixels de lavouras e 2140 pixels de campo. Tanto

visualmente (Figura 22) quanto numericamente (Quadro 5) é perceptível o aumento das feições de solo exposto úmido. De fato, essa classe passou de uma superfície de 17162 pixels em 1995 para 70213 pixels em 2000. Os maiores avanços do solo exposto úmido aconteceram nas áreas de campo (25408 pixels), pastagens (13415 pixels) e lavouras (12548 pixels).

Quadro 5 - Quantificação das mudanças na contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 1995 e 2000 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu¹².

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (1995)
Floresta	77885	0	1644	3	3202	405	9724	1988	0	16966	94851
Silvicultura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campo	2140	0	206050	20770	25408	6256	24384	6361	2628	87947	293997
Solo exposto seco	81	0	346	415	264	55	173	239	1141	2299	2714
Solo exposto úmido	599	0	3545	500	8967	1027	1153	1316	55	8195	17162
Soja	7718	0	14391	110	5702	3632	11357	11478	18	50774	54406
Lavouras	2388	0	80906	2969	12548	8724	19258	7836	272	115643	134901
Pastagens	607	0	24185	1052	13415	1531	1448	1183	89	42327	43510
Areal	65	0	921	2921	707	126	83	32	6994	4855	11849
Avanços	13598	0	125938	28325	61246	18124	48322	29250	4203		
Totais (2000)	91483	0	331988	28740	70213	21756	67580	30433	11197		

Fonte: o autor (2022).

Uma revisita às Figuras 22 e 24 demonstra que algumas áreas de solo exposto seco em 1995 se mostraram como solo exposto úmido em 2000. A alternância constatada até então para solos e áreas de plantio é observada nessas localidades. Com isso, é de se esperar que essas áreas de solo exposto estejam relacionadas com práticas agrícolas. E essa constatação chama atenção para a proximidade dessas áreas com os focos de arenização da área de estudo.

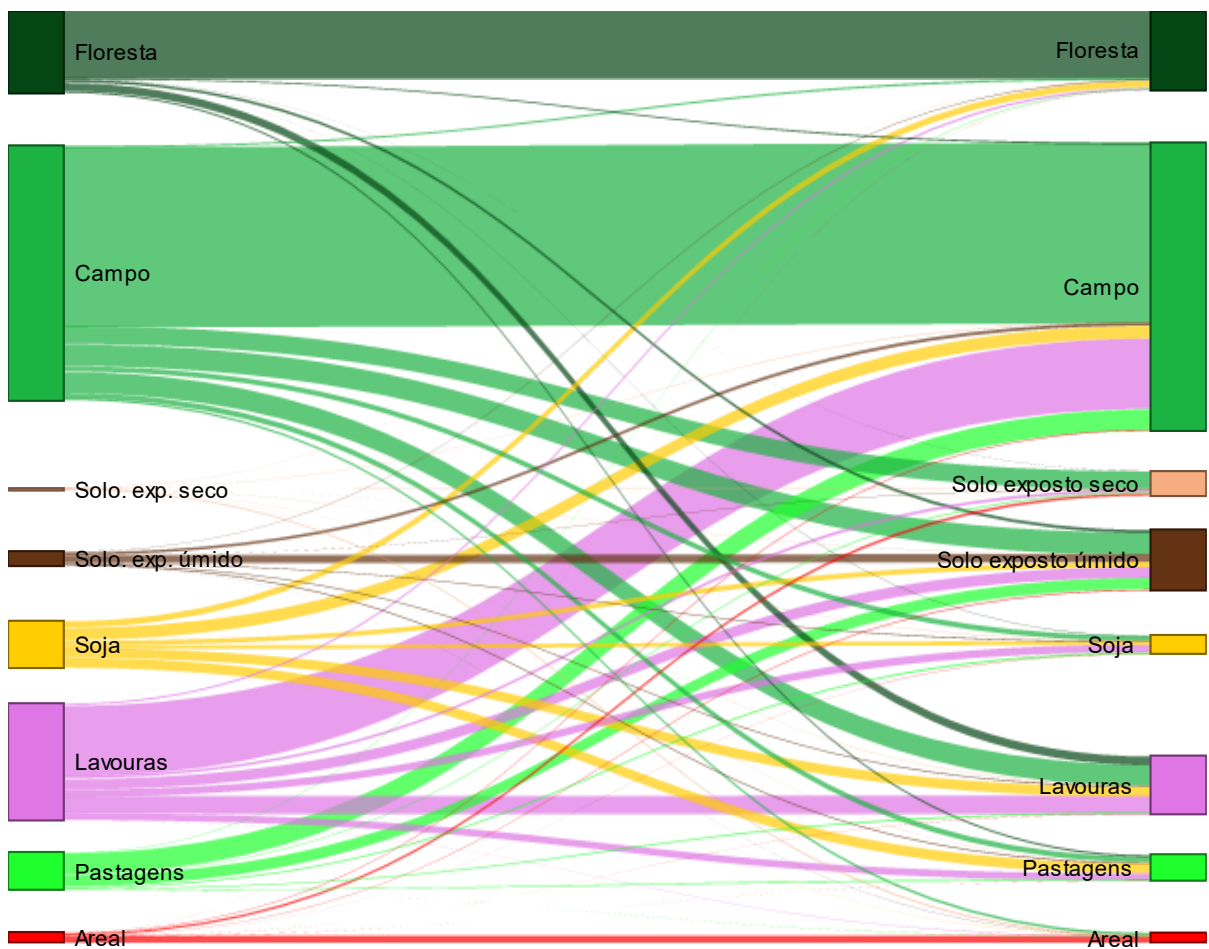
Com relação às manchas de areia detectadas, se observou majoritária constância na distribuição espacial, com alterações pontuais, manifestadas na redução de áreas na porção inferior da bacia hidrográfica e sutil ampliação na porção superior da área de estudo. Em números, se manifestou pela leve redução da área total, passando de 11849 pixels em 1995 para 11197 pixels em 2000. As reduções

¹² O quadro com os valores de áreas em unidades métricas se encontra no Apêndice 5.

mais expressivas deram lugar a solo exposto seco (2921 pixels), solo exposto úmido (707 pixels) e campo (921 pixels).

No diagrama de Sankey da Figura 25 se encontra a representação gráfica das modificações no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu entre os anos de 1995 e 2000. A redução das áreas de plantio pode ser percebida pelo direcionamento dos feixes que indicam a realocação das atividades praticadas. Enquanto as áreas de plantio apresentam números consideráveis no primeiro momento, seus feixes no diagrama se distribuem generosamente, principalmente para o campo, solo exposto seco e solo exposto úmido. As mesmas classes de plantio receberam contribuições menores no segundo momento, ou seja, poucas áreas deram lugar a esses locais de plantio.

Figura 25 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 1995 e 2000 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



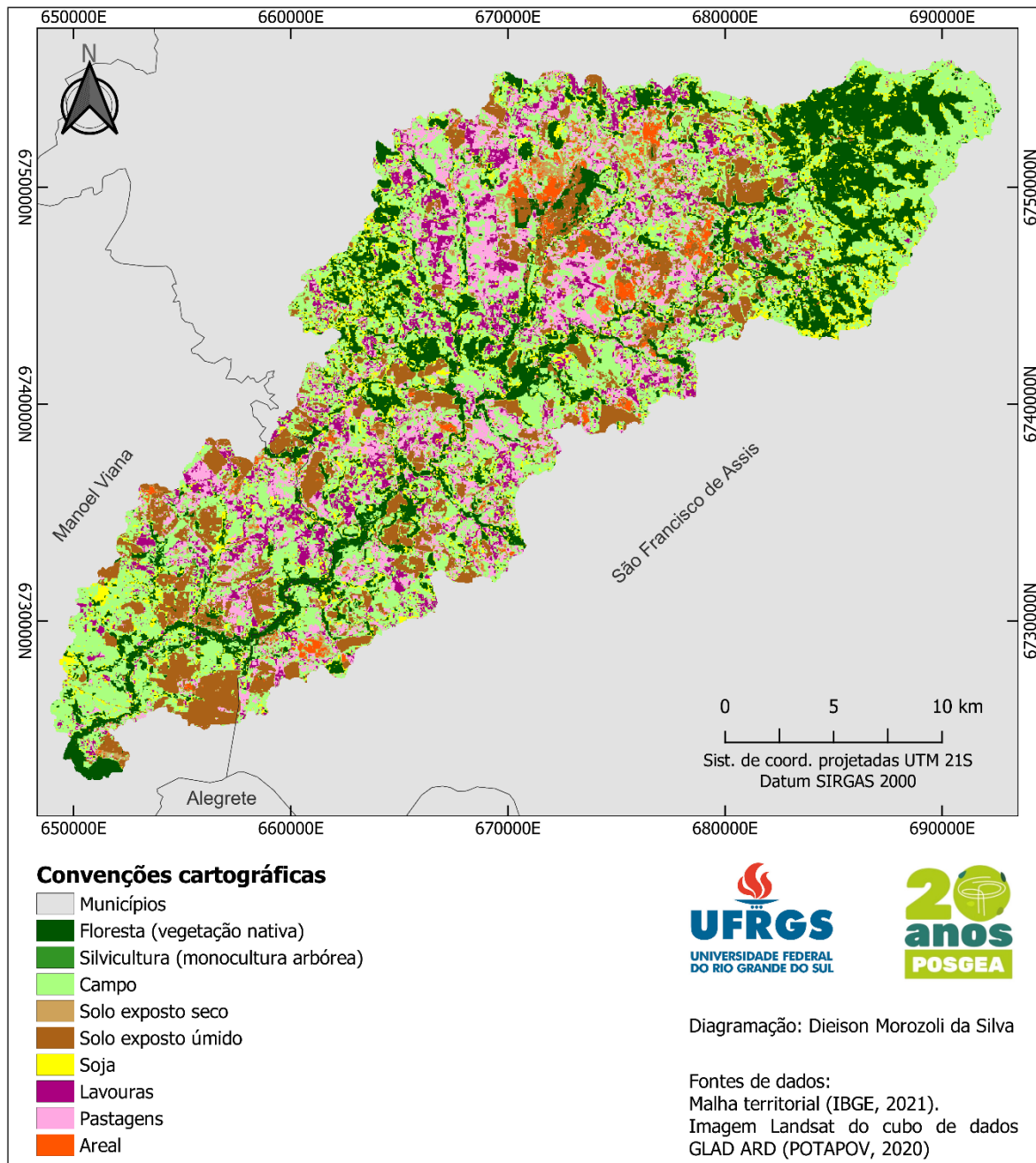
Fonte: o autor (2022)

Assim como demonstrado pelos dados do Quadro 5, as interações mais expressivas dos areais se deram com as áreas de solo exposto seco e campo. Analisada a representação gráfica do diagrama de Sankey, posto que os feixes partem da classe areal no primeiro momento, porém apenas um feixe de campo alimenta a classe de areais no segundo instante, é de se supor que a conversão das áreas de arenização em outras (recoo dos areais) foi maior que a transformação das mesmas em areais (avanço). Sendo o recoo dos areais superior ao avanço nesse intervalo de tempo, em números gerais, se manifestou a redução dos areais em 652 pixels.

De acordo com a Figura 14, o número de estiagens no ano de 2000 totalizou dois. Com relação à precipitação total anual, demonstrada na Figura 21, também se mantiveram valores semelhantes aos encontrados nos anos referentes às classificações de imagem anteriores, inclusive por um acumulado menor no ano anterior a cada uma dessas datas.

Entre os anos de 2000 e 2005 foram percebidos avanços nas áreas de vegetação nativa e aquelas dedicadas ao uso agrícola. Os 91483 pixels de floresta delimitados na classificação referente ao ano de 2000 foram ampliados para 126538 pixels no mapa temático produzido para o ano de 2005, representado pelo mapa da Figura 26. Nessa mesma representação é possível verificar a ampliação das áreas com cultivo de soja. A ampliação das áreas em amarelo no mapa justifica os dados apresentados na Tabela 1, que indicam uma área de plantio de soja igual a 53147 pixels em 2005, contra 21756 pixels em 2000. Em tempo, é altamente válido que se considere os números como representantes da realidade em meados de novembro e dezembro daqueles anos, sendo possível a existência de números divergentes, caso analisados os totais anuais.

Figura 26 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2005.



Fonte: o autor (2022).

Apesar de não serem facilmente perceptíveis através da análise visual dos mapas de 2000 e 2005, as modificações desse meio tempo nas áreas de arenização se deram pelo crescimento de 743 pixels. De acordo com os dados apresentados no Quadro 6, os recuos mais expressivos se deram em detrimento das áreas de solo exposto seco (2206 pixels), solo exposto úmido (990 pixels), campo (464 pixels) e

pastagem (420 pixels). Em contrapartida, também ocorreram sobre essas áreas os avanços mais significativos, com 3479 pixel sobre solo exposto seco, 958 pixels sobre o campo, 600 pixels sobre solo exposto úmido e 76 pixels sobre lavouras.

Chama a atenção a forte manifestação do cultivo de soja ao longo da área de estudo, expresso pelas manchas em amarelo. Não para menos, sua área de abrangência foi ampliada de 21756 pixels em 2000 para 53147 pixels em 2005. Nesse processo, de acordo com o Quadro 6, seu avanço ocorreu principalmente sobre as áreas de campo (25992 pixels) e de lavouras (11914 pixels).

Quadro 6 - Quantificação das mudanças de contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 2000 e 2005 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu¹³.

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (2000)
Floresta	84726	0	1730	45	804	4048	44	85	1	6757	91483
Silvicultura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campo	3840	0	159780	2039	42945	25992	37355	59079	958	172208	331988
Solo exposto seco	14	0	11597	4517	4224	73	1247	3589	3479	24223	28740
Solo exposto úmido	9286	0	18328	567	25928	2395	2752	10357	600	44285	70213
Soja	2203	0	9646	37	3050	2770	2807	1233	10	18986	21756
Lavouras	15430	0	21860	191	5829	11914	9427	2853	76	58153	67580
Pastagens	11026	0	10589	95	2059	5950	163	535	16	29898	30433
Areal	13	0	464	2206	990	5	299	420	6800	4397	11197
Avanços	41812	0	74214	5180	59901	50377	44667	77616	5140		
Totais (2005)	126538	0	233994	9697	85829	53147	54094	78151	11940		

Fonte: o autor (2022)

O campo, que cedeu espaço para as áreas de cultivo, foi substituído principalmente pelas áreas com pastagens (59079 pixels), solo exposto úmido (42945 pixels), lavouras (37355 pixels) e soja (25992 pixels).

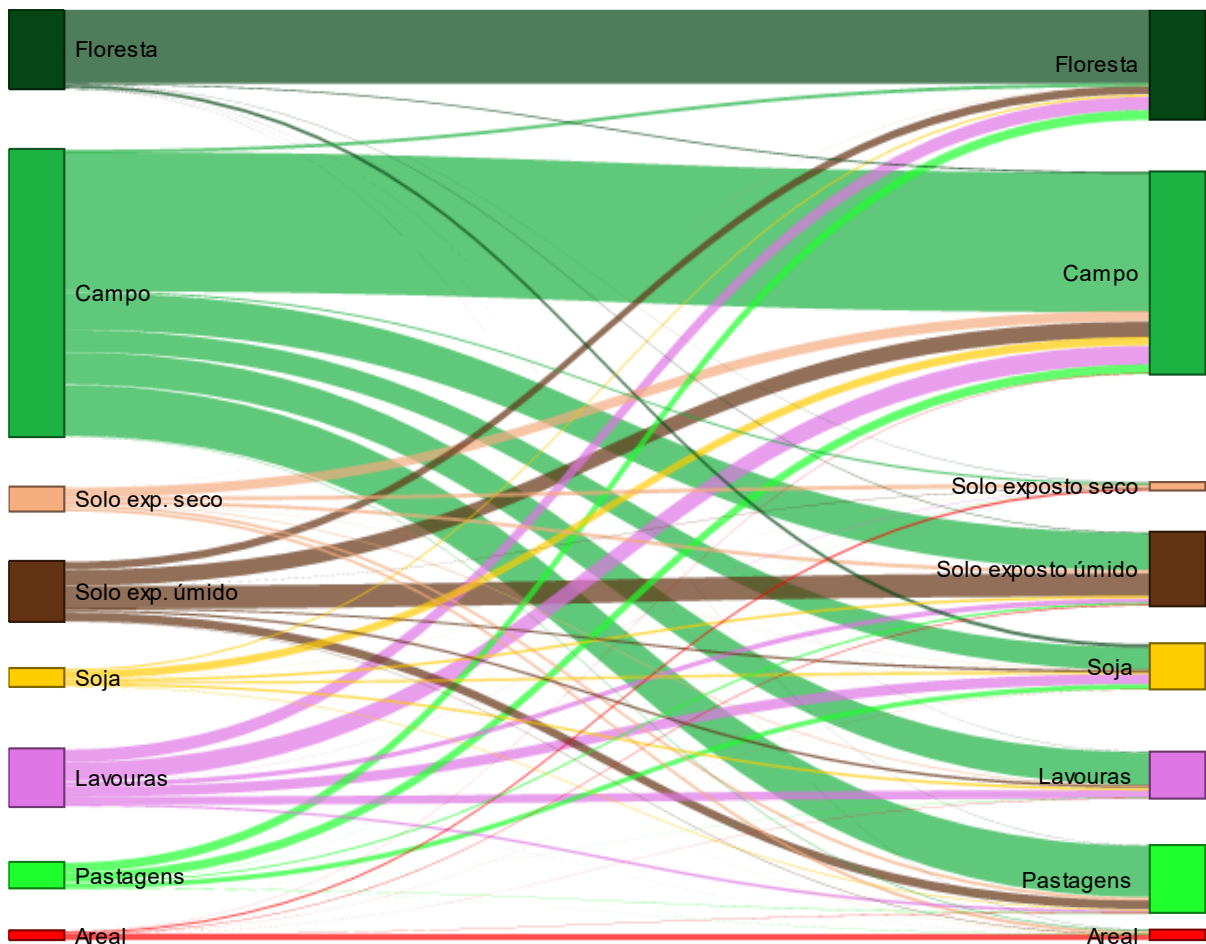
É possível que áreas com solo exposto tenham sido utilizadas para o plantio ao longo do ano, e, portanto, deve-se observar esses dados como representante apenas do instante do registro da imagem pelo sensor imageador. De todos os modos, esse recorte da realidade de 2005, bem como sua relação com a classificação progressiva

¹³ O quadro com os valores de áreas em unidades métricas se encontra no Apêndice 6.

(2000), apontam o comportamento de troca entre classes, evidenciado através do diagrama da Figura 27.

De acordo com o diagrama de Sankey da Figura 27, é possível observar uma tendência inversa àquela detectada entre os anos de 1995 e 2000. Agora, entre 2000 e 2005, ocorreu um crescimento das áreas com vegetação nativa (floresta), sucedida pelo avanço sobre áreas de pastagens, soja e solo exposto úmido. O campo foi semelhantemente incorporado por essas áreas. No entanto, a conversão do campo em outras áreas, demonstrada no diagrama pelos feixes de campo que se associam a outras classes e superam aqueles que o compõem, resultou na redução dessa classe de feijão, partindo de 331988 pixels em 2000 para 233994 pixels em 2005.

Figura 27 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 2000 e 2005 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



Fonte: o autor (2022)

O cenário diferente ao ocorrido em 2000 também pôde ser observado na constituição das áreas de lavouras, pastagens, soja e solo exposto úmido. O mesmo

fenômeno causador da redução das áreas de campo foi o ampliador dessas áreas, justificado pela inserção dos feixes oriundos da classe campo em 2000 para essas classes no ano de 2005.

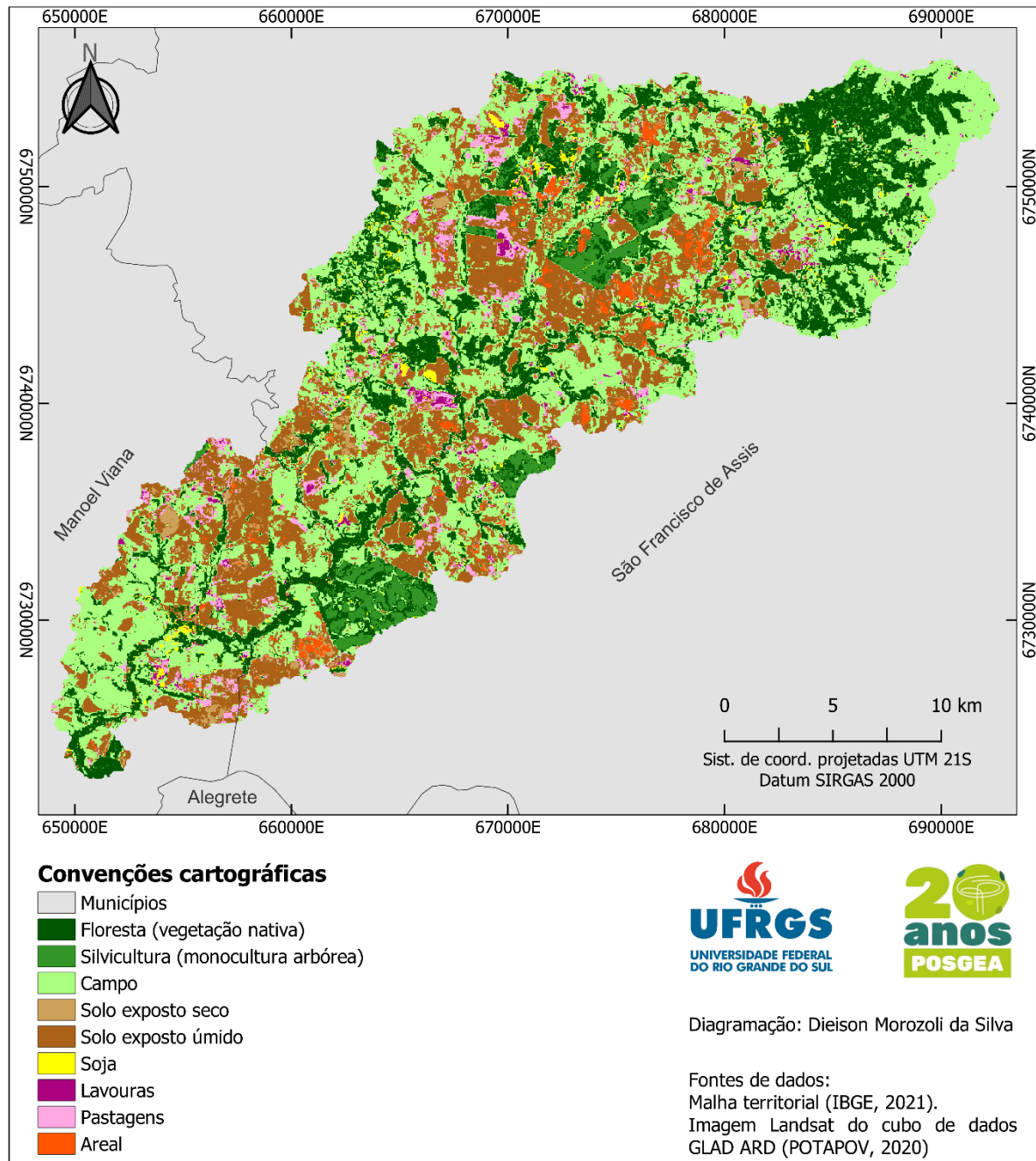
As modificações das áreas de arenização ficam evidentes no diagrama da Figura 27 por sua cessão de áreas para solo exposto seco e solo exposto úmido em maior grau, enquanto as áreas de 2005 apresentaram um total sutilmente maior, alimentado por áreas de campo, solo exposto seco e solo exposto úmido.

O total de eventos de estiagem em 2005 totalizou quatro eventos (BINDA; VERDUM, 2020). O acumulado pluviométrico anual também manteve valores semelhantes àqueles encontrados nos anos das classificações anteriores, de acordo com a Figura 21. O crescimento moderado das áreas de arenização entre 2000 e 2005 pode então ser considerado dentro do esperado, dadas as circunstâncias até então semelhantes às de momentos anteriores.

O mapa temático obtido para o ano de 2010 (Figura 28) revelou um novo crescimento da superfície total das áreas de floresta, que passou de 126538 pixels em 2005 para 144046 pixels em 2010. Na mesma tendência, o campo também apresentou ampliação, passando de 233994 pixels para 259433 pixels em 2010. Os valores apresentados podem ser visualizados com melhor detalhamento nas Tabelas 1 e 2. As áreas de arenização, em número total de área, apresentaram considerável redução. Em 2005 as áreas de arenização totalizavam 11940 pixels, passando para 8709 pixels em 2010.

Compete destacar a inserção de uma nova classe de feição, até então ausente nos mapeamentos temáticos desse trabalho, que é a silvicultura. As áreas de silvicultura, majoritariamente compostas por eucaliptos na delimitação de amostras, foram dispostas nas proximidades dos focos de arenização da porção superior central da bacia hidrográfica e também de um considerável foco de arenização presente na região inferior da mesma área de estudo.

Figura 28 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2010.



Fonte: o autor (2022).

A ampliação das florestas e campos foi acompanhada do decréscimo das áreas de agricultura, que conforme a Tabela 2, passaram de 280918 pixels em 2005 para 209992 pixels em 2010. As reduções mais intensas se deram nas áreas de soja, lavouras e pastagens, ao passo que áreas de solo exposto tiveram crescimento.

A inserção da silvicultura na bacia hidrográfica se deu em maior intensidade nas áreas de floresta (9542 pixels), campo (8607 pixels), pastagens (5696 pixels) e lavouras (3448 pixels). Posto que essa classe de feição temática aparece pela primeira vez na série histórica de imagens, não houve recuos registrados em favor de outras classes, como representado no Quadro 7.

Quadro 7 – Quantificação das mudanças de contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 2005 e 2010 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu¹⁴.

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (2005)
Floresta	101996	9542	12000	82	1248	1414	117	117	22	24542	126538
Silvicultura	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campo	13840	8607	149280	2843	45460	3279	3122	6965	598	84714	233994
Solo exposto seco	1413	264	754	1694	3217	413	121	327	1494	8003	9697
Solo exposto úmido	3207	2715	21606	3260	44091	782	2380	7129	659	41738	85829
Soja	17081	791	27385	164	3206	3538	471	506	5	49609	53147
Lavouras	1490	3448	24427	772	17658	194	894	5140	71	53200	54094
Pastagens	4289	5696	23381	1447	35053	499	1029	6450	307	71701	78151
Areal	730	147	600	1407	2603	284	164	452	5553	6387	11940
Avanços	42050	31210	110153	9975	108445	6865	7404	20636	3156		
Totais (2010)	144046	31210	259433	11669	152536	10403	8298	27086	8709		

Fonte: o autor (2022).

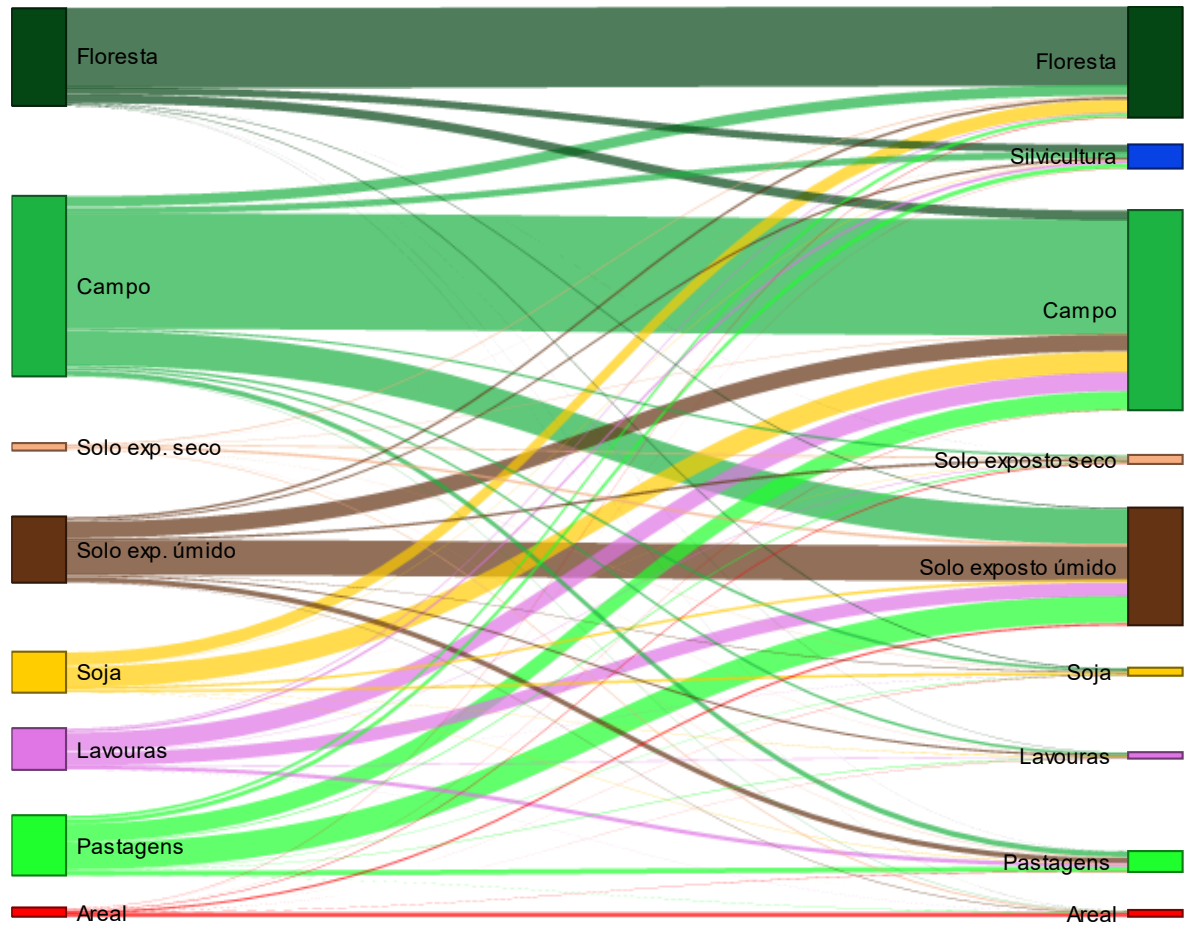
A redução nas áreas de arenização resultou de um avanço de 3156 pixels, que foi superado por um recuo de 6387 pixels. Os maiores avanços se deram sobre áreas de solo exposto seco (1494 pixels) e solo exposto úmido (659 pixels). Já os recuos ocorreram pela expansão de 2603 pixels de solo exposto úmido sobre os areais e 1407 pixels de solo exposto seco.

Apesar do descréscimo de áreas de plantio como a soja, pastagens e lavouras, as áreas de solo exposto apresentaram considerável crescimento, principalmente o solo exposto úmido, que passou de 85829 pixels em 2005 para 152536 pixels em 2010. Para tanto, apesar de ter dado espaço para 21606 pixels de campo, incorporou 45460 pixels dessa mesma classe, além de 35053 pixels de pastagens, 17658 pixels de lavouras, além de outras interações em menor intensidade com outras classes.

¹⁴ O quadro com os valores de áreas em unidades métricas se encontra no Apêndice 7.

Os eventos até então descritos podem ser também visualizados no diagrama de Sankey da Figura 29. De acordo com a representação gráfica, o crescimento das áreas de floresta se deu em favor de seu avanço sobre as áreas de campo, soja e pastagens, principalmente.

Figura 29 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 2005 e 2010 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



Fonte: o autor (2022).

A silvicultura, que aparece pela primeira vez, está posicionada somente ao lado direito do diagrama e recebe contribuições das classes floresta, campo, pastagens, soja e solo exposto úmido.

Reduções causadas nas áreas de pastagem, lavoura e soja resultaram da sua conversão em floresta, solo exposto úmido e campo, que não foram acompanhadas em mesma intensidade por seus avanços. Com isso, no ano de 2010 (lado direito do diagrama), se encontram desenhadas com dimensões menores.

Com relação à redução de área dos areais, essa se sucedeu de forma semelhante ao ocorrido para as classes de plantio, com recuos maiores que os avanços. Os areais de 2005 foram em parte associados a solo exposto seco e solo exposto úmido com maior intensidade, além de campo, floresta e pastagem em menor intensidade.

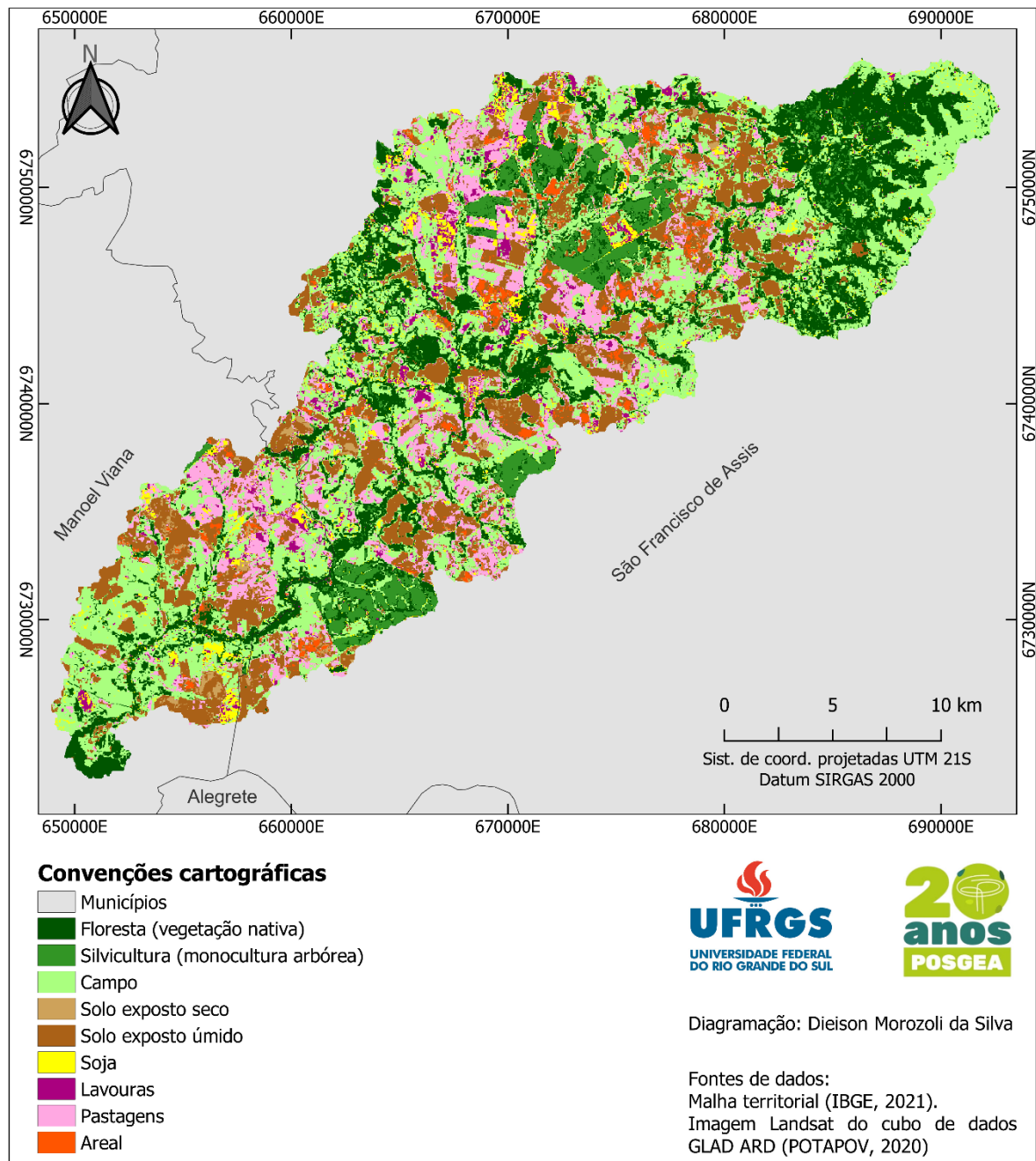
O ano de 2010 apresentou apenas três eventos de estiagem (BINDA; VERDUM, 2020). Além disso, o ano de 2010 totalizou uma precipitação de 859 mm. É importante salientar a estiagem como a ocorrência de uma quantidade considerável de dias sem chuva, de modo que apesar do baixo acumulado pluviométrico em 2010, a distribuição de dias com chuva pode ter contribuído para o baixo número de estiagens. A atividade hídrica em menor intensidade nesse ano, precedida por valores pluviométricos enquadrados na média anual, pode ser associada em parte à redução das áreas de arenização em 2010.

A classificação de imagem resultante para o ano de 2015 trouxe consigo um novo crescimento da classe de floresta. Esse crescimento é visualmente sutil e pode ser visualizado principalmente nas ramificações de mata ciliar presentes na porção inferior da bacia hidrográfica, representada na Figura 30.

Entre os anos de 2010 e 2015 também é observável que nas áreas de silvicultura há substancial redução de fragmentos de floresta. A detecção de florestas em meio à silvicultura provavelmente se deu em virtude do seu estágio de florescimento, com copas ainda em desenvolvimento. Cabe recordar que a atribuição de valores aos pixels de uma imagem classificada é feita mediante a leitura de suas curvas espectrais, e, portanto, eventuais curvas espectrais de uma área de silvicultura que tenham apresentado comportamento semelhante ao de uma área de floresta podem ter influenciado nos resultados obtidos.

O refinamento na representação das áreas de silvicultura, em parte, contribuiu para o crescimento dos valores totais dessa classe, que passaram de 31210 pixels em 2010 para 37362 pixels em 2015. O mesmo aprimoramento na diferenciação das áreas de silvicultura também contribuiu para a melhor detecção das áreas de floresta, que tiveram em sua área a redução de eventuais pixels classificados como silvicultura. O ocorrido também pode ter contribuído em parte para a ampliação dos valores detectados para a classe temática de floresta, que passou de 144046 pixels em 2010 para 147543 pixels em 2015.

Figura 30 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2015.



Fonte: o autor (2022).

As áreas de solo exposto passaram por uma redução em suas áreas totais, enquanto houve crescimento nas áreas de pastagem. A comparação entre as classificações dos anos 2010 e 2015 pactua com essa afirmação, de tal forma que em diversos locais de anterior presença de solo exposto no segundo momento são observáveis áreas com pastagem.

Diante dos dados apresentados pelo Quadro 8 se valida a afirmação do refinamento de classificação para as classes de silvicultura e floresta. As florestas apresentaram um avanço que se deu de forma pouco expressiva sobre outras classes, se sobressaindo apenas o avanço das florestas sobre 4040 pixels de soja. Entretanto, 15475 pixels de floresta foram convertidos em silvicultura, provavelmente resultantes da maior homogeneidade de pixels em ambas as classes.

As mesmas modificações percebidas na classe de floresta também foram identificadas na silvicultura, de tal forma que suas perdas ocorreram de forma significativa apenas para a classe floresta, 9755 pixels contra valores pequenos para as demais classes de feições.

Quadro 8 - Quantificação das mudanças de contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 2010 e 2015 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu¹⁵.

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (2010)
Floresta	109802	15475	13177	6	1145	3284	913	234	10	34244	144046
Silvicultura	9755	21047	256	0	66	67	9	9	1	10163	31210
Campo	21866	328	162744	1077	32102	13174	7695	19251	1196	96689	259433
Solo exposto seco	86	0	425	1772	5786	566	160	2263	611	9897	11669
Solo exposto úmido	1514	16	27842	4320	59091	6471	7841	42172	3269	93445	152536
Soja	4040	468	2898	35	821	1243	636	259	3	9160	10403
Lavouras	317	20	3491	102	1386	640	1322	964	56	6976	8298
Pastagens	150	8	6844	550	6337	2434	3387	6954	422	20132	27086
Areal	13	0	134	981	2692	85	50	455	4299	4410	8709
Avanços	37741	16315	55067	7071	50335	26721	20691	65607	5568		
Totais (2015)	147543	37362	217811	8843	109426	27964	22013	72561	9867		

Fonte: o autor (2022).

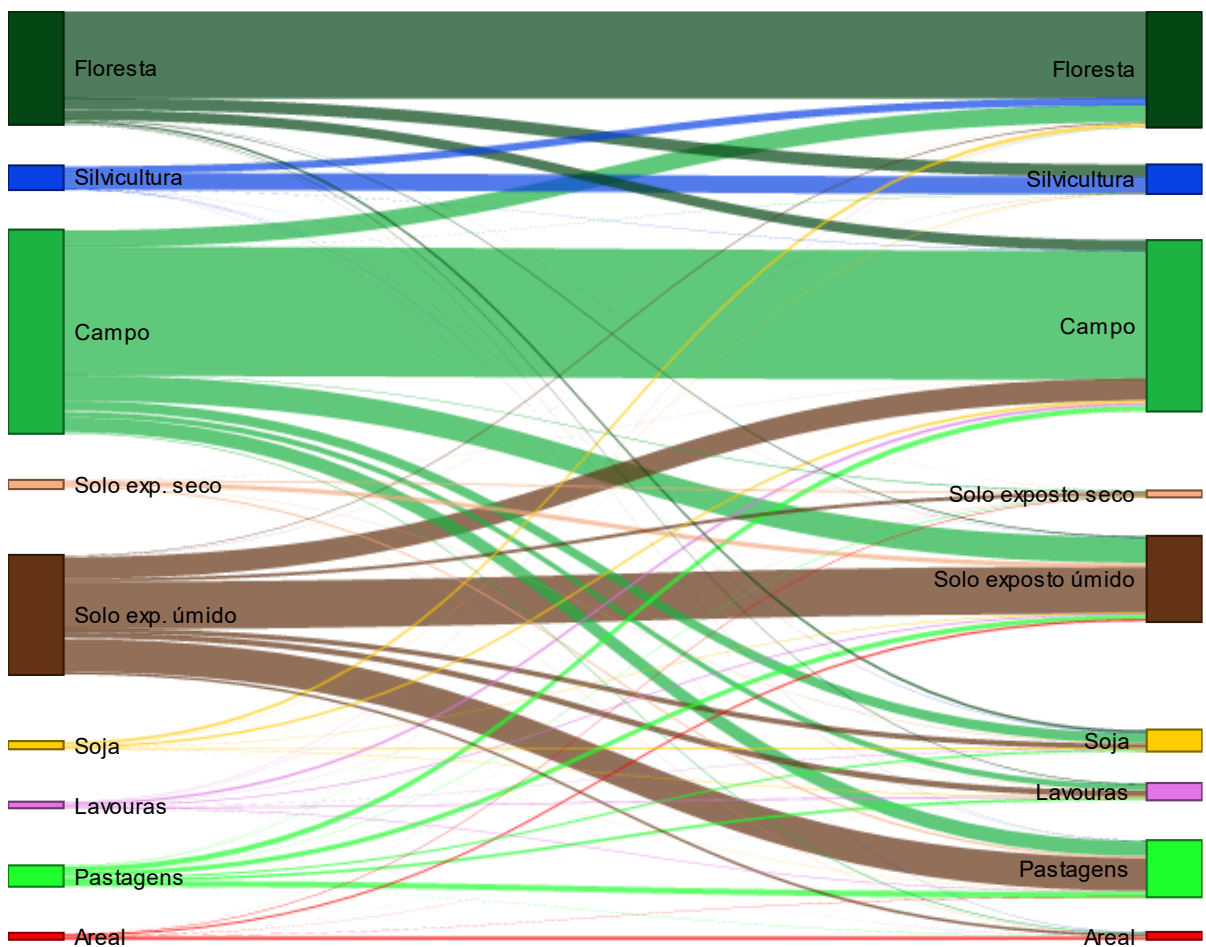
As áreas com arenização tiveram um crescimento de 1158 pixels, passando de 8709 pixels em 2010 para 9867 pixels em 2015. A maior parte dos avanços de outras classes sobre os areais se deu pelo solo exposto úmido, que englobou 2692 pixels das áreas. Entretanto, também ocorreu um avanço dos areais sobre 3269 pixels de solo exposto úmido, além de também ter sido manifestada sobre 1196 pixels de campo, 611 pixels de solo exposto seco e 422 pixels de pastagens.

¹⁵ O quadro com os valores de áreas em unidades métricas se encontra no Apêndice 8.

Através do diagrama de Sankey da Figura 31 são observáveis as mudanças no uso e cobertura da terra entre 2010 e 2015. A classe temática correspondente às florestas conserva boa parte de seus pixels originais, porém também recebe contribuições do campo e da silvicultura. Enquanto o crescimento sobre o campo provavelmente se deu nas áreas mais ao sul da área de estudo, materializada no aparecimento de ramificações da mata ciliar, o acréscimo de área total, decorrente da melhoria de identificação dos pixels de silvicultura da porção central do mapa, causou o deslocamento de áreas de silvicultura para a classe floresta em 2015.

Assim como ocorrido com a classe floresta, também ocorreu a transformação a incorporação de alguns pixels da classe floresta pela silvicultura. A silvicultura também apresentou traços de floresta no mapa temático de 2010, porém esse fenômeno foi atenuado na classificação de 2015, o que indica a troca de valores entre ambas classes.

Figura 31 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 2010 e 2015 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



Fonte: o autor (2022).

A redução na área ocupada pelos campos entre 2010 e 2015 pode ser percebida como consequente da transformação do campo em outras classes, manifestada no diagrama por feixes de média espessura. A contrapartidaa proporcional aconteceu apenas pela transformação do solo exposto úmido em campo, representada pelo feixe em coloração marrom. As demais áreas agregadas ao campo em 2015 foram bem menores, incorrendo em um somatório de áreas de campo inferior àquele de 2010.

As áreas de soja, lavoura, pastagens e solo exposto úmido, que avançaram sobre as áreas de campo, foram ampliadas no ano de 2015, pois foram sobrepostas em menor grau pelas outras classes, enquanto avançaram generosamente sobre o campo.

O solo exposto úmido, apesar de ter ganhado espaço sobre o campo, apresentou redução na área total entre 2010 e 2015, decorrente de suas contribuições para as áreas de campo e pastagens no mesmo período, que foram menores que a transformação do campo em solo exposto úmido.

Com relação às áreas de arenização, o aumento da área total pode ser atribuído à sua conversão em solo exposto úmido e solo exposto seco, que foi superada por seus avanços sobre o solo exposto úmido, campo e pastagens.

De acordo com Binda e Verdum (2020), o ano de 2015 foi marcado pela ocorrência de quatro estiagens. O valor se encontra bastante próximo àqueles observados nos anos de referência dos mapas temáticos anteriores. O ano de 2015 também contou com um acumulado pluviométrico de 1888,1 mm. As chuvas em intensidade considerável podem ter sido potencializadoras da amplificação das áreas de arenização entre os anos de 2010 e 2015.

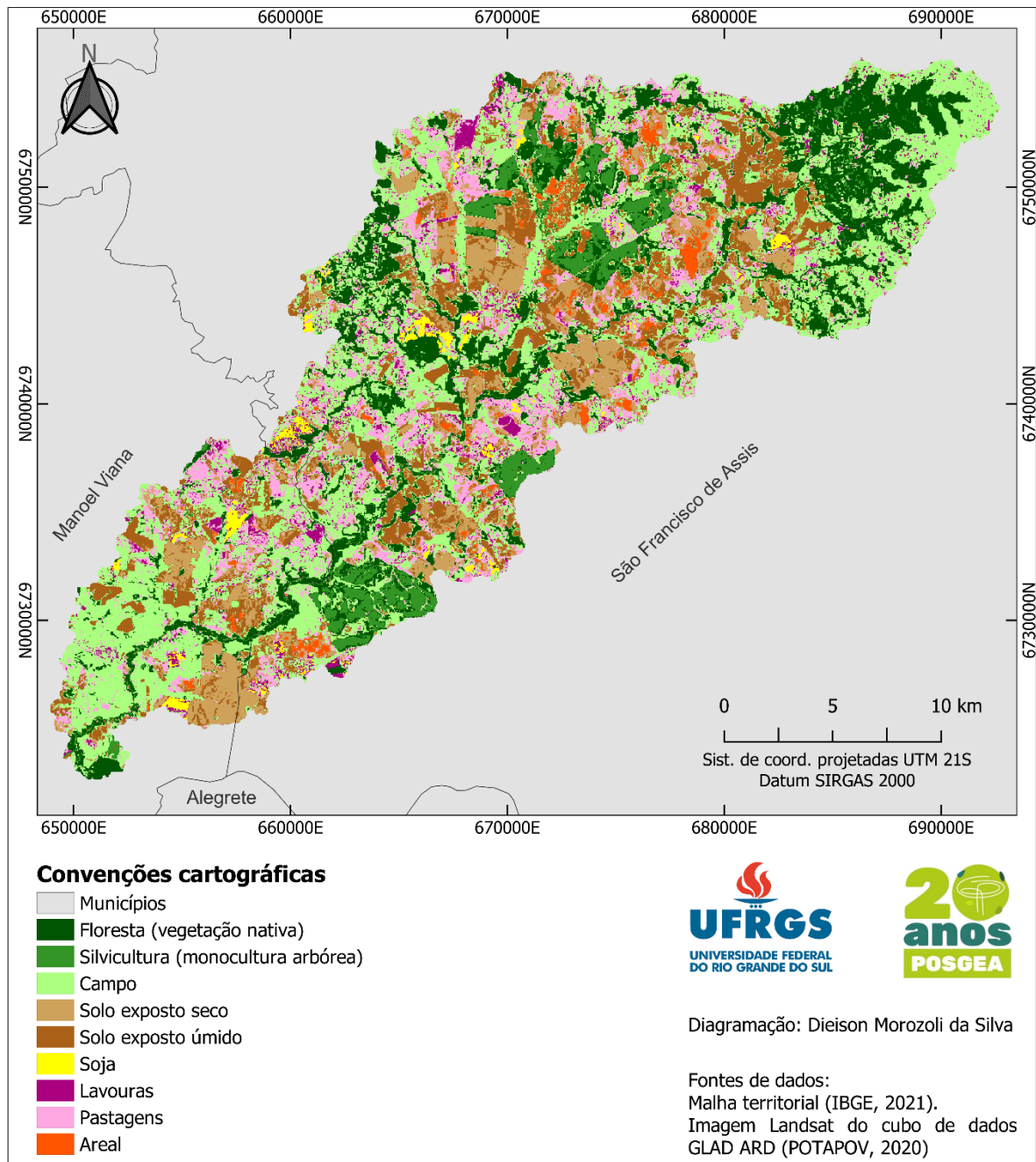
O uso e cobertura da terra em 2020 (Figura 32), último ano do recorte temporal definido para esse trabalho, foi marcado pela redução considerável das áreas de floresta, que pode ser percebido visualmente em uma comparação entre as Figuras 30 e 32. A mesma redução aparente também pode ser constatada ao longo das matas ciliares que percorrem a bacia hidrográfica. A valer, entre 2015 e 2020 as áreas de vegetação nativa tiveram uma redução de 147543 pixels para 119062 pixels.

A redução de área se estendeu às feições de silvicultura, que tiveram uma redução em sua superfície de 37362 pixels para 32307 pixels. A redução de áreas também pode ser percebida visualmente nas áreas de solo exposto úmido, que em

2020 tiveram reduzida a sua predominância detectada no ano de 2015. Em oposição, as áreas de solo exposto seco passaram por uma ampliação, passando de 8843 pixels em 2015 para 70727 pixels no ano de 2020.

Focos de arenização, que em 2015 perfaziam um total de 9867 pixels de área, passaram a totalizar 10939 pixels em 2020. Essa ampliação se manifesta no mapa principalmente pela ampliação das áreas de arenização já existentes, ao passo que não foram percebidas novas manchas de arenização com grandes dimensões.

Figura 32 - Uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu no ano de 2020.



Fonte: o autor (2022).

As modificações ocorridas entre 2015 e 2020, sendo esse último representado pela Figura 32, podem ser acompanhadas numericamente pelos dados do Quadro 9. A classe temática floresta contou com um crescimento de 18105 pixels, que foi superado por seu recuo de 46586 pixels. Os avanços mais intensos da floresta foram detectados sobre a silvicultura (9975 pixels), campo (4240 pixels) e soja (2541 pixels).

Os recuos de maior proporção se deram em favor de 34179 pixels de campo, 5497 pixels de silvicultura, 3023 pixels de solo exposto úmido e 2742 pixels de pastagem.

O solo exposto seco, que passou de 8843 pixels em 2015 para 70727 pixels em 2020 teve suas ampliações mais intensas sobre as áreas de solo exposto úmido (28102 pixels), pastagens (17874 pixels) e campo (11928 pixels). Suas perdas mais significativas se deram em função das pastagens (1240 pixels) e areais (1165 pixels).

Um novo crescimento das áreas de arenização foi encontrado entre os anos de 2015 e 2020. Na classificação anterior os areais totalizavam 9867 pixels e passaram a abranger 10939 pixels em 2020. O crescimento de 1072 pixels foi reflexo da conversão de 3337 pixels de solo exposto úmido, 1153 pixels de pastagem, 621 pixels de campo, além de outras conversões de outras áreas em areal, manifestadas de forma menos expressiva. Os areais perderam suas áreas de forma mais intensa para o solo exposto seco (2041 pixels), pastagem (1637 pixels), solo exposto úmido (915 pixels) e campo (642 pixels), sendo ressaltado que a perda de área dos areais significa sua retração, o avanço de outras classes sobre os focos de arenização.

Quadro 9 - Quantificação das mudanças de contagem de pixels em diferentes classes de feições entre 2015 e 2020 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu¹⁶.

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (2015)
Floresta	100957	5497	34179	271	3023	194	640	2742	40	46586	147543
Silvicultura	9975	26595	617	8	116	0	14	37	0	10767	37362
Campo	4240	166	135446	11928	22594	2916	8810	31090	621	82365	217811
Solo exposto seco	2	0	650	4006	715	596	469	1240	1165	4837	8843
Solo exposto úmido	326	40	16230	28102	39129	2712	5888	13662	3337	70297	109426
Soja	2541	3	10520	3970	2423	816	1766	5715	210	27148	27964
Lavouras	938	2	7800	2527	1997	319	1932	6342	156	20081	22013
Pastagens	79	4	13209	17874	12980	754	4073	22435	1153	50126	72561
Areal	4	0	642	2041	915	5	366	1637	4257	5610	9867
Avanços	18105	5712	83847	66721	44763	7496	22026	62465	6682		
Totais (2020)	119062	32307	219293	70727	83892	8312	23958	84900	10939		

Fonte: o autor (2022).

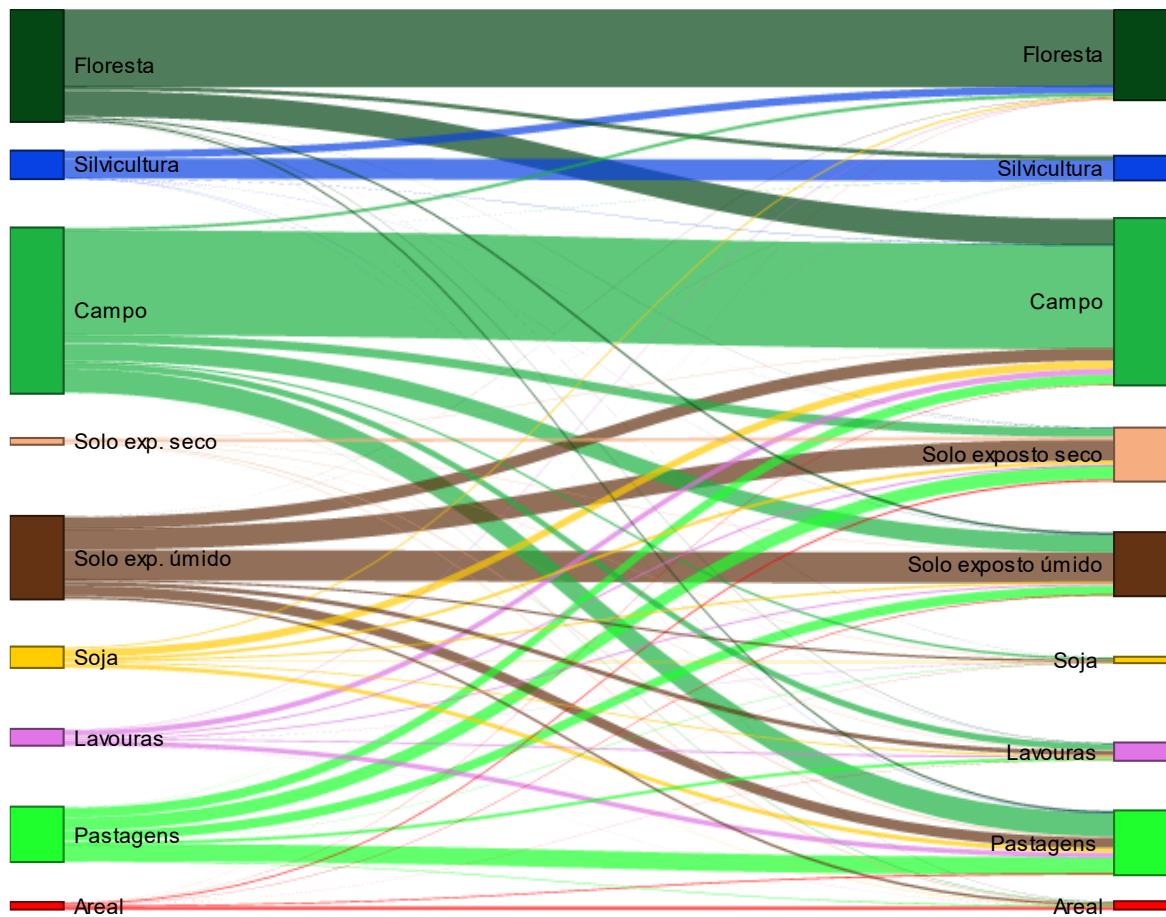
As mudanças explicitadas no mapa de uso e cobertura da terra em 2020 e pelo Quadro 9 podem ser apreciadas no diagrama de Sankey da Figura 33. Merece

¹⁶ O quadro com os valores de áreas em unidades métricas se encontra no Apêndice 9.

atenção a inclusão de áreas de silvicultura na floresta. A classe floresta, apesar de ter sido alimentada por áreas de silvicultura, passou por perdas de superfície para outras classes, em grande maioria para o campo, além de migrações em menor escala para a silvicultura, pastagens, soja e solo exposto úmido.

Com relação às formações campestres, tanto o número de avanços quanto recuos foi semelhante, de modo que no balanço geral, ocorreu a ampliação da superfície de abrangência em apenas 1482 pixels.

Figura 33 - Diagrama de Sankey para as mudanças no uso e cobertura da terra entre os anos de 2015 e 2020 na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.



Fonte: o autor (2022).

Os areais tiveram suas recessões mais expressivas em favor das pastagens, solo exposto seco e solo exposto úmido. Seu crescimento se deu com maiores índices a partir do solo exposto úmido, solo exposto seco e pastagem.

Em 2020 houve uma precipitação acumulada de 1127 mm ao longo do ano. O crescimento dos areais, acompanhado da redução das áreas de floresta, silvicultura, aumento expressivo do solo exposto seco e diminuição das áreas de solo exposto úmido podem sugerir os efeitos da menor precipitação tanto na retração da vegetação quanto na ampliação dos solos expostos secos e as áreas de arenização

Ao longo das análises par-a-par feitas para o período de 1985 a 2020 foi possível detectar alternâncias, tanto nas representações cartográficas quanto nos quadros de mudanças e nos diagramas de Sankey que as áreas de floresta e silvicultura, apesar de suas oscilações, se mantiveram majoritariamente estáveis, com algumas interações estabelecidas principalmente com as formações campestres. Já o solo exposto seco e exposto úmido foram marcados por volumosas alternâncias com as classes de plantio (soja, lavoura, pastagens). Como mencionado durante a discussão dos resultados, essa alternância em parte provavelmente se deve à diferenças nas datas de obtenção das imagens, bem como alternância de culturas. Áreas com solo exposto também podem ter sido áreas de plantio ao longo do ano, ou ainda contar com cultivares ainda em estágio de germinação. Apesar disso, as formações campestres e a agricultura mantiveram valores próximos, intermitentes entre si na ocupação da classe de maior superfície da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu, reforçando a relevância das atividades agrárias para a área de estudo.

A introdução da silvicultura na bacia hidrográfica, detectada a partir do ano de 2010, conforme os dados obtidos nessa pesquisa, não apresentou efeito aparente na mitigação da dinâmica de arenização. Entretanto, cabe destacar que o crescimento dos areais, conforme as análises apresentadas nos quadros comparativos, se manifestou de forma mais acentuada sobre áreas de solo exposto seco e de campo. Ainda assim, se mantém o alerta para a adoção e perpetuação de boas práticas de manejo no campo, principalmente no que concerne a circulação do gado e perdas de vegetação sobre o solo.

Para além dos números, também é válido trazer à discussão as alterações causadas sobre a paisagem. Enquanto a análise de dados puramente numéricos por vezes pode indicar a estabilidade na área ocupada por uma determinada classe de uso e cobertura da terra, por outro lado, a identificação do balanço de interações ocorridas com as demais formas de uso da terra revela novas realidades. Nesse contexto, também se revela a dinâmica da paisagem, ao passo que são detectadas

as diferentes organizações visuais do espaço ao longo do tempo, resgatando-se assim a sua memória histórica.

A praticidade conferida pelos recursos de sensoriamento remoto se mostrou capaz de agregar valor à análise ambiental, pois permitiu não somente o estudo dos areais propriamente ditos, como também a realidade na qual estão inseridos como componentes da bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu.

Um olhar sobre os dados históricos das precipitações anuais entre 1985 e 2020 (Figura 34) permite identificar um comportamento oscilatório desses valores. Também é possível comparar esses valores aos movimentos das áreas de arenização. Destarte, a análise do gráfico da figura 34 demonstra uma aparente variabilidade entre os valores precipitados anuais entre os anos de 1985 e 2010. Já a partir de 2010 os valores se apresentam de forma crescente até o ano de 2020, com apenas algumas flutuações dos valores para cima ou para baixo.

As precipitações entre 1985 e 2000 se mostraram volumosas e com valores bastante variáveis, ao passo que nesse período os areais apresentaram uma tendência ao decréscimo em suas áreas totais. Já entre os anos de 2000 e 2005 é possível observar, de acordo com a figura 34, a ocorrência de três anos com grandes volumes precipitados, seguidos por um ano de pouca precipitação (apenas 936,4 mm) e então uma precipitação de 1634,7 mm em 2005. O período que abrangiu uma volumosa precipitação, seguida por uma precipitação acumulada menor, parece ter resultado no modesto crescimento dos areais entre 2000 e 2005.

O período entre 2005 e 2010 contou com alguns dos menores valores precipitados da série temporal representada na figura 34. À despeito dos demais intervalos de cinco anos, praticamente todos os precipitados anuais desse recorte de tempo ficaram abaixo de 1500 mm. Ao mesmo tempo, entre 2005 e 2010 foi detectada uma abrupta redução na área ocupada pelos areais. Em parte, é possível associar essa redução aos menores acumulados de precipitação. Por outro lado, somente a precipitação não é responsável pela arenização, cabendo ainda destacar o surgimento das áreas de monocultura arbórea nesse período.

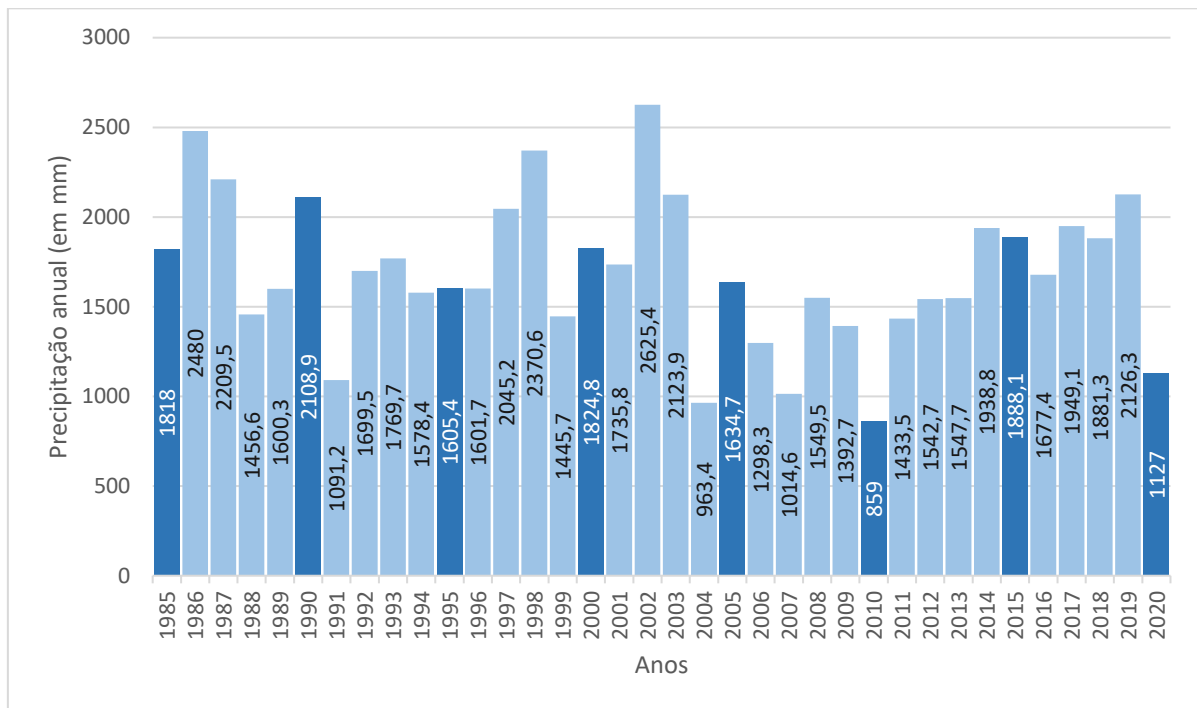
Já durante os anos de 2010 e 2015 é possível observar uma tendência crescente nos valores precipitados anuais, ao passo que se sucederam crescimentos nas áreas totais dos areais, o que permite inferir que a expansão dessas áreas decorreu, ao menos em parte, das precipitações volumosas e cada vez maiores.

Considerando os pontos relatados até então sobre as precipitações anuais no período de 1985 a 2020 e as movimentações nas áreas de arenização, é possível afirmar que as chuvas influenciam nessas movimentações, porém não as explicam em sua totalidade, sendo também possível associar o fenômeno às movimentações causadas pelo vento, além da ação antrópica.

É veementemente necessário destacar que não esse trabalho não pressupôs explicar as movimentações das áreas de arenização unicamente pela análise das precipitações anuais. Por um lado, a dinâmica hídrica por si, não é o único elemento causador da arenização. Por outro lado, é pertinente compreender que, para além da variabilidade nos valores anuais, também é possível que esses totais estejam distribuídos ora de forma concentrada, ora em chuvas esporádicas. Em tempo, Binda e Verdum (2020) demonstraram que mesmo meses com volumes precipitados acima da média tiveram concentração das chuvas em poucos dias, indicando chuvas torrenciais. Os autores também indicam que a arenização está mais fortemente associada a ação da distribuição das chuvas do que aos totais precipitados. Dessa forma, é possível afirmar que as chuvas demonstraram relação com as alterações nas áreas de arenização, porém é necessário investigar esse fenômeno mais detalhadamente, englobando diferentes escalas de tempo.

A relação das áreas de arenização também pode não ter apresentado relação direta com os volumes precipitados também pelo que enquanto a ação hídrica atua na mobilização de sedimentos em períodos de abundância de chuvas, durante períodos de ausência pluviométrica a expansão dos areais pode se dar pela ação eólica, de acordo com Binda e Verdum (2020).

Figura 34 – Precipitações anuais (em mm) na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu entre os anos de 1985 e 2020.



Fonte: o autor (2022).

Outro importante elemento para a discussão acerca da aparente redução das áreas de arenização é a conhecida proposição de que sua manifestação se tratava de desertificação, o que foi gradativamente sanado, principalmente após o trabalho de Suertegaray (1989) e outras obras posteriores que vieram a elucidar essa realidade. Essa redução culmina com o surgimento de feições de silvicultura (monocultura arbórea de eucalipto), porém logo cede espaço ao surgimento de novas manchas de areia.

Com base nos conhecimentos visitados ao longo da pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, assim como naqueles alcançados pelas consultas bibliográficas, é de se esperar que a análise ambiental seja capaz de identificar cenários, descrevê-los em suas potencialidades e fragilidades, bem como fornecer propostas para a utilização responsável de um determinado espaço. Em consideração a isso, convém ressaltar que a produção científica da geografia com enfoque na análise ambiental ganha, com esta obra, um novo ponto de vista.

Permanecem como desafios para futuras produções científicas a aquisição de amostras “verdade de campo” e o refinamento das classificações. A coleta de

amostras também se mostrou desafiadora, em especial para a distinção entre áreas de solo exposto e arenização. Nesse cenário, foi necessário recorrer à identificação de formas, cores e texturas. A obtenção de mapas temáticos com maior acurácia certamente tende a ilustrar de forma fidedigna o fenômeno da arenização, e, portanto, sobre este ponto também se mostra uma senda a ser percorrida nos estudos sobre os areais.

Investigar o fenômeno de arenização em uma área de proporções consideráveis, que conta com formas de relevo e vegetação variados pode ser desafiador. Isso se intensifica quando são considerados diferentes momentos históricos. Por um lado, a utilização das imagens Landsat ARD contribuíram grandemente para tornar isso possível. Entretanto, essa gama de vantagens encontra limitações, principalmente com respeito à sua resolução espacial. Por mais acurada que uma classificação possa ser, é virtualmente impossível a representação das áreas de transição entre o campo e áreas em processo de arenização, como aquelas identificadas nos registros fotográficos tomados em visita à área e estudo.

Com relação aos índices pluviométricos e as estiagens, ocorridos de forma regular no período analisado, não demonstraram uma relação direta de causa e efeito, de modo que um aumento ou redução tenham implicado obrigatoriamente em um aumento ou redução nas áreas de arenização. Por outro lado, foi perceptível o crescimento das áreas de arenização nos anos em que a precipitação total ocorreu aquém do habitual. Em tempo, para além do total precipitado, também se soma ao cenário a intensidade das chuvas ou sua distribuição durante o ano.

7 CONCLUSÃO

Através da utilização de produtos de sensoriamento remoto foi possível atender ao objetivo de identificar e quantificar as áreas de arenização na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu entre os anos de 1985 e 2020. Para tanto, a classificação supervisionada de imagens se mostrou uma poderosa ferramenta para a obtenção de informações acerca do uso e cobertura da terra.

Para além das mensurações quinquenais, também foram elaborados diagnósticos acerca dos avanços e recuos entre as diferentes classes de uso e cobertura da terra. A organização dessas transições em quadros informativos possibilitou a análise quantitativa detalhada desses movimentos. Por outro lado, a síntese das mudanças através dos diagramas de Sankey proporcionou a percepção facilitada da proporcionalidade das modificações de uso e cobertura da terra ocorridas na área de estudo.

Foi identificado que as áreas de arenização na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu apresentaram tendência a redução de sua superfície entre os anos de 1985 e 2005. A partir do ano de 2010 se observou uma tendência ao crescimento. Os mapas temáticos obtidos indicaram que essas mudanças se deram tanto pelo avanço e recuo dos focos de arenização quanto o seu surgimento e esmaecimento desses focos em diferentes pontos da área de estudo.

As representações qualitativas e quantitativas indicaram que as interações dos focos de arenização com outras classes de feição se deram majoritariamente entre os areais, o campo e solos expostos.

Também foi possível, com o respaldo dos produtos numéricos e visuais produzidos, identificar relativa estabilidade das áreas de silvicultura e floresta, com algumas trocas de áreas entre si e também com outras classes de feição, em menor intensidade. Paralelamente, foi percebida intensa rotatividade na conformação espacial e nas áreas ocupadas pelas classes temáticas relacionadas com usos agrícolas, certamente devido ao plantio intercalado.

Foram observados indícios entre as movimentações dos areais, as estiagens e os totais pluviométricos anuais, sendo os movimentos mais estimulados pelos maiores volumes de precipitação do que pela ausência dos mesmos.

Permanecem os questionamentos, e estímulos, para novas pesquisas acerca da dinâmica da arenização e as técnicas que traduzam esse fenômeno, inclusive o

sensoriamento remoto. Também figuram áreas ativas para a pesquisa o detalhamento das atividades hídricas e seus reflexos sobre os areais.

8 REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas. **Séries Históricas das Estações**. 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 5 maio 2022.

ANDRADES FILHO, Clódis de Oliveira; SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; GUASSELLI, Laurindo Antônio. Arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul: investigação sobre a relação entre areais, drenagem e orientação do relevo. *In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia*. Goiânia: 2006. p. 1–12.

BARROS, Carlos; PAULINO, Wilson Roberto. **Ciência: o meio ambiente**. 67. ed. São Paulo: Ática, 1999.

BERTÊ, Ana Maria Avelina. Problemas ambientais no Rio Grande do Sul: uma tentativa de aproximação. *In: VERDUM, Roberto; BASSO, Luis Alberto; SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes (org.). Rio grande do Sul: Paisagens e territórios em transformação*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012. p. 71–86.

BINDA, Andrey Luis; VERDUM, Roberto. Estiagens, secas e os processos de arenização na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, sudoeste do estado do Rio Grande do Sul. **GeoTextos**, v. 16, n. 2, p. 131–150, 2020.

BINDA, Andrey Luis; VERDUM, Roberto. Reflexões Interpretativas Sobre As Manchas De Areia Do Sudoeste Do Rio Grande Do Sul, Brasil: Da Desertificação À Arenização. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 2, p. 273–288, 2015.

CARNEIRO, Celso Dal Ré. Viagem virtual ao Aquífero Guarani em Botucatu (SP): Formações Pirambóia e Botucatu, Bacia do Paraná. **Terrae Didática**, v. 3, n. 1, p. 50–73, 2007.

CONGEDO, Luca. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 64, p. 3172, 2021.

CPRM. **Cartografia Geológica - Cartas Geológicas do Brasil ao milionésimo**. 2004. Disponível em: <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em: 28 dez. 2021.

CUBA, Nicholas. Research note: Sankey diagrams for visualizing land cover dynamics. **Landscape and Urban Planning**, v. 139, p. 163–167, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.03.010>.

CUNHA, John Elton de Brito Leite; TSUYUGUCHI, Bárbara Barbosa; RUFINO, Iana Alexandra Alves. Utilização da detecção remota para estimar a distribuição espacial da evapotranspiração de região semiárida e série temporal MODIS. *In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*. Curitiba: INPE, 2011. p. 5262–5269. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/06.28.13.29.57/doc/p0801.pdf>.

DUARTE, Gabriel dos Santos *et al.* O uso da geometria do Landsat 8 como base para georreferenciamento semiautomático visando estudos espaço-temporais. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil**, n. 1, p. 5216–5223, 2015.

DUARTE, Adriano Couto; POZZA FILHO, Ernani Antonio. A intensificação da arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul: ações antrópicas e políticas educacionais. *In:* , 2005, Presidente Prudente. **III Simpósio Nacional de Geografia Agrária – II Simpósio Internacional de Geografia Agrária - Jornada Ariovaldo Umbelino de Oliveira**. Presidente Prudente: 2005. Disponível em: [http://docs.fct.unesp.br/nera/publicacoes/singa2005/Trabalhos/Artigos/Adriano Couto Duarte.pdf](http://docs.fct.unesp.br/nera/publicacoes/singa2005/Trabalhos/Artigos/Adriano%20Couto%20Duarte.pdf).

DUMMER, Juliana. **Aspectos litológicos, pedológicos e tectônicos, associados aos processos erosivos, na bacia hidrográfica do arroio Miracatu - Rio Grande do Sul**. 2019. 306 f. - Embrapa, Brasília, DF, 2019.

FIGUEIREDO, Adma Haman de. **Brasil: uma visão geográfica e ambiental no início do século XXI**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. *E-book*. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv97884.pdf>.

FRANKEL, Kevin. De la deriva de los continentes a la tectónica de placas. **Enseñanza de las Ciencias de la Tierra**, v. 3, n. 3, p. 130–136, 1995. Disponível em: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/download/88243/114410>.

GASS, Sidnei Luis Bohn *et al.* Os areais do sudoeste do Rio Grande do Sul , Brasil , como patrimônio geomorfológico. **Physis Terrae**, v. 1, n. 2, p. 101–119, 2019.

GASS, Sidnei Luís Bohn. **Zoneamento ambiental como subsídio para a definição das Áreas de Preservação Permanente**. 2015. 1–15 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/130551>.

GASS, Sidnei Luis Bohn; SILVA, Dieison Morozoli da. Morfometria e arenização: subsídios ao planejamento da bacia hidrográfica da Sanga da Areia, sudoeste do Rio Grande do Sul, Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 18, n. 64, p. 21–33, 2017. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia>.

GASS, Sidnei Luís Bohn; VERDUM, Roberto. Avaliação da cobertura vegetal e uso da terra na bacia hidrográfica do arroio Taquari-Miracatu, sudoeste do Rio Grande do Sul, Brasil, utilizando dados de sensoriamento remoto. *In:* **XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento, XXV Expositiva**. 2014. p. 1–11.

GHILANI, Charles D; WOLF, Paul R. **Geomática**. 13. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

GOMES, Weslen Manari; MEDEIROS, Rafael Brugnolli; PINTO, André Luiz. Análise Da Fragilidade Ambiental Da Bacia Hidrográfica Do Córrego Moeda, Três Lagoas/Ms. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 11, n. 5, p. 48–63, 2015.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística -. **Geociências - Downloads**, 2021. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/>. Acesso em: 14 jan. 2022.

IBRAHIM, Francini Imene. **Introdução ao geoprocessamento ambiental**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

INPE. **Divisão de Geração de Imagens**. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br>.

LIU, William Tse Horng. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

LLANO, Xavier Corredor. **AcATaMa - QGIS plugin for Accuracy Assessment of Thematic Maps, version XX.XX**. 2019. Disponível em: <https://plugins.qgis.org/plugins/AcATaMa/>.

LUIS BINDA, Andrey; VERDUM, Roberto. Reflexões Interpretativas Sobre As Manchas De Areia Do Sudoeste Do Rio Grande Do Sul, Brasil: Da Desertificação À Arenização. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 2, p. 273–288, 2015.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas - Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**, 2022. *E-book*. Disponível em: <https://mapbiomas.org>.

MARTINS, Vinícius Emmel; SILVA, Dieison Morozoli Da; GASS, Sidnei Luís Bohn. Correção Atmosférica De Imagens De Satélite Para Fins De Mapeamento Temporal De Uso E Cobertura Do Solo. *In: , 2017, Ijuí. XXV Seminário de Iniciação Científica*. Ijuí: Unijuí, 2017. p. 1–5. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/8047>.

MELO, Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto *et al.* Evolução da observação da terra por Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 024, n. 2, p. 2–24, 2021.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de. **Introdução Ao Processamento De Imagens De Sensoriamento Remoto**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.

MORAES, Elisabete Caria. Fundamentos de sensoriamento remoto. *In: MORAES, Elisabete Caria; ÁVILA, João (org.). Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente*. São José dos Campos: 2002. v. Capítulo 1, p. 1–1; 1–22.

NOGUEIRA, Adivane Moraes; TOCANTINS, Nely; ZEILHOFER, Peter. Análise multitemporal da arenização na bacia hidrográfica do córrego Guanabara, Reserva do Cabaçal – MT. **Revista GeoPantanal**, n. 25, p. 9–23, 2018.

OKIDO, Ricardo Hirokyuki. **Paisagens em transformação: da técnica à percepção. Estudo sobre o avanço da lavoura de grãos nos municípios de São Francisco de Assis e Manoel Viana**. 2016. 162 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/153330/001015413.pdf?sequence=1&is>

Allowed=y.

OLEQUES, Luciane Carvalho; SANTOS, Marlise Ladvoat Bartholomei -; BOER, Noemi. Evolução biológica: percepções de professores de biologia. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 10, n. 2, p. 243–263, 2011.

PARANHOS FILHO, Antônio Conceição *et al.* Resolução. *In*: PARANHOS FILHO, Antonio Conceição *et al.* (org.). **Geotecnologias para aplicações ambientais**. Maringá: Uniedusul, 2021.

PEBESMA, Edzer. **Spatiotemporal Arrays: Raster and Vector Datacubes**. 2021. Disponível em: <https://r-spatial.github.io/stars/index.html>.

PEDRON, Fabrício de Araújo; DALMOLIN, Ricardo Simão Diniz (Org). **Solos arenosos do bioma pampa brasileiro**. Santa Maria: Ed. UFSM, 2019.

PIZZATO, Fernanda. **Pampa gaúcho: causas e consequências do expressivo aumento das áreas de soja**. 2013. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

POTAPOV, Peter *et al.* Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, 2020.

QGIS DEVELOPMENT TEAM QGIS. **QGIS Development Team**. 2021. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/.

ROBAINA, Luís Eduardo de Souza *et al.* **Série Atlas Municipais: Atlas Geoambiental de São Francisco de Assis**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2021.

RODRIGUES, Mikael Timóteo *et al.* Comportamento de softwares SIG na classificação supervisionada. *In*: **XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Santos: INPE, 2019. p. 2446–2449. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/09.13.18.01/doc/97517.pdf>.

ROSSATO, Maíra Suertegaray. O clima no sudoeste do Rio Grande do Sul. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; BASSO, Luís Alberto; GUASSELLI, Laurindo Antonio (org.). **Arenização - Natureza socializada**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura: Imprensa Livre, 2012. p. 385–410.

SALES, Gracielle de Brito *et al.* Uso de séries temporais de imagens Landsat/TM para estudo do processo de degradação ambiental de áreas de várzeas no semiárido mineiro. *In*: , 2013, Foz do Iguaçu. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 6596–6603. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.28.23.36.33/doc/p0567.pdf>.

SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. *E-book*. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>.

SCHERER, Claiton M.S.; LAVINA, Ernesto L.C. Stratigraphic evolution of a fluvial-eolian succession: The example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guará and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil. **Gondwana Research**, v. 9, n. 4, p. 475–484, 2006.

SILVA, Ana Paula Nunes da *et al.* Albedo De Superfície Estimado a Partir De Imagens Landsat 5 – Tm No Semiárido Brasileiro. **Revista de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 154–168, 2010.

SILVA, Dakir Larara Machado da. **Microclima E Bioindicadores Paleoclimticos Em Paisagens Com Ocorrência De Areais Em São Francisco De Assis, Rs, Brasil.** 2009. 164 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/17407>.

SILVA, Dieison Morozoli da. **Sensoriamento remoto e machine learning no estudo das áreas de arenizao na bacia hidrográfica do Arroio Puit - RS, entre os anos de 2000 e 2018.** 2021. 42 f. - Universidade Federal do Pampa, 2021.

SOARES, Deivide Benicio; MOTA FILHO, Fernando de Oliveira Mota; NÓBREGA, Ranyre Silva. Revista Brasileira de Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, p. 174–188, 2011.

SOUZA, Angélica Cargnin de; PIRES, Carlos Alberto da Fonseca. Dinâmica da arenizao na bacia hidrográfica do Arroio Puit, oeste do RS, através do mapeamento multitemporal no período de 1984 a 2014. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, p. 185–196, 2017.

STORY, M.; CONGALTON, R. G. Remote Sensing Brief Accuracy Assessment: A User’s Perspective. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 3, p. 397–399, 1986. Disponível em: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1986journal/mar/1986_mar_397-399.pdf.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. A trajetória da natureza: um estudo geomorfológico sobre os areais em Quaraí – RS. Uma síntese. **Boletim gaúcho de geografia**, v. 17, 1989. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/bgg/article/view/38002/24484>.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. Arenizao: análise morfogenética. *In*: SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Luis Alberto Pires da; GUASSELLI, Laurindo Antnio (org.). **Arenizao - Natureza socializada**. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura: Imprensa Livre, 2012. p. 127–172.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes. Notas sobre a Epistemologia da Geografia. **Cadernos Geográficos**, n. 12, p. 63, 2005. Disponível em: <https://cadernosgeograficos.ufsc.br/files/2016/02/CadernosGeogrficos-UFSC-N-12-Notas-sobre-a-Epistemologia-daGeografia.-Maio-de-2005.pdf>.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes *et al.* Projeto Arenizao no Rio Grande do Sul, Brasil: gênese, dinâmica e espacializao. *In*: **X SBSR**. Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 349–356.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; BERTÊ, Ana Maria de Aveline. Políticas de Florestamento em Áreas Degradadas: areas do Sudoeste do Rio Grande do Sul. **Geosul Revista do Departamento de Geociências CFH**, v. 12, n. 26, p. 1–9, 1997. Disponível em: <http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal6/Procesosambientales/Impactoambiental/51.pdf>.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; GUASSELLI, Laurindo Antônio; VERDUM, Roberto. **Atlas da arenização - Sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Coordenação e Planejamento do Governo do estado do Rio Grande do Sul, 2001.

SUERTEGARAY, Dirce Maria Antunes; SILVA, Luis Alberto Pires da. Sobre a gênese dos areas (SW/RS): uma contribuição de interface biologia - geomorfologia. **Terra Livre**, v. 2, n. 33, p. 115–124, 2009.

TEODORO, Valter Luiz Iost *et al.* O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 137–156, 2007.

TOMBEZI, Gabriela. **Classificação orientada a objeto de imagens de nanossatélites para o Cadastro Ambiental Rural**. 2019. 74 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/205574/001111271.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

VERDUM, Roberto *et al.* Desertificação: Questionando as Bases Conceituais, Escalas de Análise e Consequências. **GEOgraphia**, v. 3, n. 6, p. 83–91, 2009.

VICTORIA, Daniel de Castro; ANDRADE, Ricardo Guimarães; PAZ, Adriano Rolim da. Série temporal de imagens evi/modis para discriminação de formações vegetais do pantanal. **Geografia (Rio Claro, Brazil)**, v. 34, n. Especial, p. 721–729, 2009.

9 APÊNDICES

APÊNDICE 1 — MATRIZES DE ERROS DAS CLASSIFICAÇÕES OBTIDAS.

Matriz de erros para a classificação da imagem de 1985.

	Floresta	Campo	Solo seco	Solo úmido	Soja	Lavouras	Pastagem	Areal	Total	User accuracy
Floresta	63	0	0	0	0	0	0	0	63	100,00%
Campo	0	174	0	2	0	0	0	0	176	98,86%
Solo seco	0	0	14	1	0	0	0	0	15	93,33%
Solo úmido	0	0	0	21	0	0	0	0	21	100,00%
Soja	0	0	0	0	28	0	0	0	28	100,00%
Lavouras	3	1	0	0	0	50	0	0	54	92,59%
Pastagem	1	1	0	0	0	0	29	0	31	93,55%
Areal	0	0	0	0	0	0	0	8	8	100,00%
Total	67	176	14	24	28	50	29	8	396	
Producer accuracy	94,03%	98,86%	100,00%	87,50%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%		

Acurácia global	97,71%	Kappa	0,9694	Kappa (%)	96,94%
-----------------	--------	-------	--------	-----------	--------

Matriz de erros para a classificação da imagem de 1990.

	Floresta	Campo	Solo seco	Solo úmido	Soja	Lavouras	Pastagem	Areal	Total	User accuracy
Floresta	69	0	0	0	0	0	0	0	69	100,00%
Campo	0	160	0	0	0	0	0	0	160	100,00%
Solo seco	0	0	8	0	0	0	0	0	8	100,00%
Solo úmido	0	0	0	28	0	0	0	0	28	100,00%
Soja	2	0	0	0	19	0	0	0	21	90,48%
Lavouras	3	2	0	0	0	72	0	0	77	93,51%
Pastagem	0	1	0	0	0	0	26	0	27	96,30%
Areal	0	0	0	0	0	0	0	7	7	100,00%
Total	74	163	8	28	19	72	26	7	397	
Producer accuracy	93,24%	98,16%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%		

Acurácia global	98,00%	Kappa	0,9733	Kappa (%)	97,33%
-----------------	--------	-------	--------	-----------	--------

Matriz de erros para a classificação da imagem de 1995.

	Floresta	Campo	Solo seco	Solo úmido	Soja	Lavouras	Pastagem	Areal	Total	User accuracy
Floresta	58	0	0	0	0	0	0	0	58	100,00%
Campo	0	177	0	0	0	1	0	0	178	99,44%
Solo seco	0	0	2	0	0	0	0	0	2	100,00%
Solo úmido	0	0	0	9	0	0	1	0	10	90,00%
Soja	2	0	0	0	29	1	1	0	33	87,88%
Lavouras	2	3	0	0	1	76	0	0	82	92,68%
Pastagem	0	2	0	0	0	0	24	0	26	92,31%
Areal	0	0	0	0	0	0	0	7	7	100,00%
Total	62	182	2	9	30	78	26	7	396	
Producer accuracy	93,55%	97,25%	100,00%	100,00%	96,67%	97,44%	92,31%	100,00%		

Acurácia global	96,46%	Kappa	0,9508	Kappa (%)	95,08%
-----------------	--------	-------	--------	-----------	--------

Matriz de erros para a classificação da imagem de 2000

	Floresta	Campo	Solo seco	Solo úmido	Soja	Lavouras	Pastagem	Areal	Total	User accuracy
Floresta	54	0	0	1	0	0	0	0	55	98,18%
Campo	0	200	0	0	0	1	0	0	201	99,50%
Solo seco	0	0	17	0	0	0	0	0	17	100,00%
Solo úmido	0	0	0	43	0	0	0	0	43	100,00%
Soja	0	0	0	0	13	0	0	0	13	100,00%
Lavouras	1	3	0	0	0	37	0	0	41	90,24%
Pastagem	0	0	0	0	0	1	17	0	18	94,44%
Areal	0	0	0	0	0	0	0	7	7	100,00%
Total	55	203	17	44	13	39	17	7	395	
Producer accuracy	98,18%	98,52%	100,00%	97,73%	100,00%	94,87%	100,00%	100,00%		

Acurácia global	98,23%	Kappa	0,9744	Kappa (%)	97,44%
-----------------	--------	-------	--------	-----------	--------

Matriz de erros para a classificação da imagem de 2005

	Floresta	Campo	Solo seco	Solo úmido	Soja	Lavouras	Pastagem	Areal	Total	User accuracy
Floresta	77	0	0	0	0	0	0	0	77	100,00%
Campo	0	142	0	0	0	0	0	0	142	100,00%
Solo seco	0	0	5	0	0	0	0	1	6	83,33%
Solo úmido	0	0	0	52	0	0	0	0	52	100,00%
Soja	3	0	0	0	29	0	0	0	32	90,63%
Lavouras	0	1	0	0	0	32	0	0	33	96,97%
Pastagem	0	1	0	0	0	0	46	0	47	97,87%
Areal	0	0	0	0	0	0	0	7	7	100,00%
Total	80	144	5	52	29	32	46	8	396	
Producer accuracy	96,25%	98,61%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	87,50%		

Acurácia global	98,49%	Kappa	0,9807	Kappa (%)	98,07%
-----------------	--------	-------	--------	-----------	--------

Matriz de erros para a classificação da imagem de 2010

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo seco	Solo úmido	Soja	Lavouras	Pastagem	Areal	Total	User accuracy
Floresta	82	4	0	0	1	0	0	0	0	87	94,25%
Silvicultura	6	13	0	0	0	0	0	0	0	19	68,42%
Campo	0	1	157	0	0	0	0	0	0	158	99,37%
Solo seco	0	0	0	7	0	0	0	0	0	7	100,00%
Solo úmido	0	0	0	2	90	0	0	0	0	92	97,83%
Soja	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6	100,00%
Lavouras	0	0	0	0	0	0	4	1	0	5	80,00%
Pastagem	0	0	0	0	0	0	0	16	0	16	100,00%
Areal	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	100,00%
Total	88	18	157	9	91	6	4	17	5	395	
Producer accuracy	93,18%	72,22%	100,00%	77,78%	98,90%	100,00%	100,00%	94,12%	100,00%		

Acurácia global	96,22%	Kappa	0,9482	Kappa (%)	94,82%
-----------------	--------	-------	--------	-----------	--------

Matriz de erros para a classificação da imagem de 2015

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo seco	Solo úmido	Soja	Lavouras	Pastagem	Areal	Total	User accuracy
Floresta	83	3	3	0	0	0	0	0	0	89	93,26%
Silvicultura	4	19	0	0	0	0	0	0	0	23	82,61%
Campo	0	0	132	0	0	0	0	0	0	132	100,00%
Solo seco	0	0	0	5	0	0	0	0	0	5	100,00%
Solo úmido	0	0	0	0	66	0	0	0	0	66	100,00%
Soja	2	0	2	0	0	13	0	0	0	17	76,47%
Lavouras	1	0	0	0	0	0	12	0	0	13	92,31%
Pastagem	0	0	0	0	0	0	0	44	0	44	100,00%
Areal	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	100,00%
Total	90	22	137	5	66	13	12	44	6	395	
Producer accuracy	92,22%	86,36%	96,35%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%		

Acurácia global	96,22%	Kappa	0,9517	Kappa (%)	95,17%
-----------------	--------	-------	--------	-----------	--------

Matriz de erros para a classificação da imagem de 2020

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo seco	Solo úmido	Soja	Lavouras	Pastagem	Areal	Total	User accuracy
Floresta	68	4	0	0	0	0	0	0	0	72	94,44%
Silvicultura	1	17	1	0	0	0	0	1	0	20	85,00%
Campo	0	0	132	0	0	0	0	1	0	133	99,25%
Solo seco	0	0	0	42	1	0	0	0	0	43	97,67%
Solo úmido	1	0	0	0	50	0	0	0	0	51	98,04%
Soja	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	100,00%
Lavouras	0	0	1	0	0	0	13	0	0	14	92,86%
Pastagem	1	0	3	0	0	0	0	47	0	51	92,16%
Areal	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	100,00%
Total	71	21	137	42	51	5	13	49	7	396	
Producer accuracy	95,78%	80,95%	96,35%	100,00%	98,04%	100,00%	100,00%	95,92%	100,00%		

Acurácia global	96,21%	Kappa	0,9528	Kappa (%)	95,28%
-----------------	--------	-------	--------	-----------	--------

APÊNDICE 3 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 1985 E 1990 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Total (1985)
Floresta	80,9145	0,0000	2,9466	0,0072	2,3472	1,2078	6,2280	0,0819	0,0018	12,8205	93,7350
Silvicultura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Campo	3,8673	0,0000	149,9409	5,4450	13,7682	13,9554	48,1725	24,0075	1,6506	110,8665	260,8074
Solo exp. seco	0,0324	0,0000	9,4860	2,4732	2,5740	0,6948	3,5469	2,2068	1,8315	20,3724	22,8456
Solo exp. úmido	2,3859	0,0000	5,0580	0,3204	10,4706	0,6444	8,9199	2,8296	0,0081	20,1663	30,6369
Soja	1,1475	0,0000	22,7592	0,7632	2,2437	3,9015	7,1775	3,7773	0,0657	37,9341	41,8356
Lavouras	12,1428	0,0000	26,9289	0,5652	6,3450	8,0226	22,9392	3,8088	0,1422	57,9555	80,8947
Pastagens	2,0169	0,0000	18,6354	0,2592	3,4506	2,1042	16,6653	2,8863	0,0378	43,1694	46,0557
Areal	0,0126	0,0000	1,7370	1,8243	0,2511	0,0054	0,1107	0,0711	7,2279	4,0122	11,2401
Avanços	21,6054	0,0000	87,5511	9,1845	30,9798	26,6346	90,8208	36,7830	3,7377		
Total (1990)	102,5199	0,0000	237,4920	11,6577	41,4504	30,5361	113,7600	39,6693	10,9656		

APÊNDICE 4 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 1990 E 1995 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (1990)
Floresta	77,5863	0,0000	3,7350	0,0009	1,6119	13,7070	5,6142	0,2628	0,0018	24,9336	102,5199
Silvicultura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Campo	2,8440	0,0000	160,4889	0,5391	2,9979	8,0235	50,1768	10,9458	1,4760	77,0031	237,4920
Solo exposto seco	0,0108	0,0000	6,1479	0,5733	0,1287	0,2358	1,8306	1,0197	1,7109	11,0844	11,6577
Solo exposto úmido	1,5822	0,0000	11,0961	0,1143	7,0623	4,0770	10,7118	6,5583	0,2484	34,3881	41,4504
Soja	0,6768	0,0000	13,8033	0,0126	0,2925	3,3102	11,8161	0,5715	0,0531	27,2259	30,5361
Lavouras	2,6523	0,0000	48,9087	0,0558	2,5533	17,9712	32,6835	8,7408	0,1944	81,0765	113,7600
Pastagens	0,0135	0,0000	17,6814	0,3537	0,7857	1,6209	8,2296	10,8324	0,1521	28,8369	39,6693
Areal	0,0000	0,0000	2,7360	0,7929	0,0135	0,0198	0,3483	0,2277	6,8274	4,1382	10,9656
Avanços	7,7796	0,0000	104,1084	1,8693	8,3835	45,6552	88,7274	28,3266	3,8367		
Totais (1995)	85,3659	0,0000	264,5973	2,4426	15,4458	48,9654	121,4109	39,1590	10,6641		

APÊNDICE 5 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 1995 E 2000 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (1995)
Floresta	70,0965	0,0000	1,4796	0,0027	2,8818	0,3645	8,7516	1,7892	0,0000	15,2694	85,3659
Silvicultura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Campo	1,9260	0,0000	185,4450	18,6930	22,8672	5,6304	21,9456	5,7249	2,3652	79,1523	264,5973
Solo exposto seco	0,0729	0,0000	0,3114	0,3735	0,2376	0,0495	0,1557	0,2151	1,0269	2,0691	2,4426
Solo exposto úmido	0,5391	0,0000	3,1905	0,4500	8,0703	0,9243	1,0377	1,1844	0,0495	7,3755	15,4458
Soja	6,9462	0,0000	12,9519	0,0990	5,1318	3,2688	10,2213	10,3302	0,0162	45,6966	48,9654
Lavouras	2,1492	0,0000	72,8154	2,6721	11,2932	7,8516	17,3322	7,0524	0,2448	104,0787	121,4109
Pastagens	0,5463	0,0000	21,7665	0,9468	12,0735	1,3779	1,3032	1,0647	0,0801	38,0943	39,1590
Areal	0,0585	0,0000	0,8289	2,6289	0,6363	0,1134	0,0747	0,0288	6,2946	4,3695	10,6641
Avanços	12,2382	0,0000	113,3442	25,4925	55,1214	16,3116	43,4898	26,3250	3,7827		
Totais (2000)	82,3347	0,0000	298,7892	25,8660	63,1917	19,5804	60,8220	27,3897	10,0773		

APÊNDICE 6 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 2000 E 2005 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (2000)
Floresta	76,2534	0,0000	1,5570	0,0405	0,7236	3,6432	0,0396	0,0765	0,0009	6,0813	82,3347
Silvicultura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Campo	3,4560	0,0000	143,8020	1,8351	38,6505	23,3928	33,6195	53,1711	0,8622	154,9872	298,7892
Solo exposto seco	0,0126	0,0000	10,4373	4,0653	3,8016	0,0657	1,1223	3,2301	3,1311	21,8007	25,8660
Solo exposto úmido	8,3574	0,0000	16,4952	0,5103	23,3352	2,1555	2,4768	9,3213	0,5400	39,8565	63,1917
Soja	1,9827	0,0000	8,6814	0,0333	2,7450	2,4930	2,5263	1,1097	0,0090	17,0874	19,5804
Lavouras	13,8870	0,0000	19,6740	0,1719	5,2461	10,7226	8,4843	2,5677	0,0684	52,3377	60,8220
Pastagens	9,9234	0,0000	9,5301	0,0855	1,8531	5,3550	0,1467	0,4815	0,0144	26,9082	27,3897
Areal	0,0117	0,0000	0,4176	1,9854	0,8910	0,0045	0,2691	0,3780	6,1200	3,9573	10,0773
Avanços	37,6308	0,0000	66,7926	4,6620	53,9109	45,3393	40,2003	69,8544	4,6260		
Totais (2005)	113,8842	0,0000	210,5946	8,7273	77,2461	47,8323	48,6846	70,3359	10,7460		

APÊNDICE 7 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 2005 E 2010 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (2005)
Floresta	91,7964	8,5878	10,8000	0,0738	1,1232	1,2726	0,1053	0,1053	0,0198	22,0878	113,8842
Silvicultura	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Campo	12,4560	7,7463	134,3520	2,5587	40,9140	2,9511	2,8098	6,2685	0,5382	76,2426	210,5946
Solo exposto seco	1,2717	0,2376	0,6786	1,5246	2,8953	0,3717	0,1089	0,2943	1,3446	7,2027	8,7273
Solo exposto úmido	2,8863	2,4435	19,4454	2,9340	39,6819	0,7038	2,1420	6,4161	0,5931	37,5642	77,2461
Soja	15,3729	0,7119	24,6465	0,1476	2,8854	3,1842	0,4239	0,4554	0,0045	44,6481	47,8323
Lavouras	1,3410	3,1032	21,9843	0,6948	15,8922	0,1746	0,8046	4,6260	0,0639	47,8800	48,6846
Pastagens	3,8601	5,1264	21,0429	1,3023	31,5477	0,4491	0,9261	5,8050	0,2763	64,5309	70,3359
Areal	0,6570	0,1323	0,5400	1,2663	2,3427	0,2556	0,1476	0,4068	4,9977	5,7483	10,7460
Avanços	37,8450	28,0890	99,1377	8,9775	97,6005	6,1785	6,6636	18,5724	2,8404		
Totais (2010)	129,6414	28,0890	233,4897	10,5021	137,2824	9,3627	7,4682	24,3774	7,8381		

APÊNDICE 8 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 2010 E 2015 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (2010)
Floresta	98,8218	13,9275	11,8593	0,0054	1,0305	2,9556	0,8217	0,2106	0,0090	30,8196	129,6414
Silvicultura	8,7795	18,9423	0,2304	0,0000	0,0594	0,0603	0,0081	0,0081	0,0009	9,1467	28,0890
Campo	19,6794	0,2952	146,4696	0,9693	28,8918	11,8566	6,9255	17,3259	1,0764	87,0201	233,4897
Solo exposto seco	0,0774	0,0000	0,3825	1,5948	5,2074	0,5094	0,1440	2,0367	0,5499	8,9073	10,5021
Solo exposto úmido	1,3626	0,0144	25,0578	3,8880	53,1819	5,8239	7,0569	37,9548	2,9421	84,1005	137,2824
Soja	3,6360	0,4212	2,6082	0,0315	0,7389	1,1187	0,5724	0,2331	0,0027	8,2440	9,3627
Lavouras	0,2853	0,0180	3,1419	0,0918	1,2474	0,5760	1,1898	0,8676	0,0504	6,2784	7,4682
Pastagens	0,1350	0,0072	6,1596	0,4950	5,7033	2,1906	3,0483	6,2586	0,3798	18,1188	24,3774
Areal	0,0117	0,0000	0,1206	0,8829	2,4228	0,0765	0,0450	0,4095	3,8691	3,9690	7,8381
Avanços	33,9669	14,6835	49,5603	6,3639	45,3015	24,0489	18,6219	59,0463	5,0112		
Totais (2015)	132,7887	33,6258	196,0299	7,9587	98,4834	25,1676	19,8117	65,3049	8,8803		

APÊNDICE 9 — QUANTIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS NAS ÁREAS (EM KM²) OCUPADAS POR DIFERENTES CLASSES DE FEIÇÕES ENTRE 2015 E 2020 NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO TAQUARI-MIRACATU

	Floresta	Silvicultura	Campo	Solo exposto seco	Solo exposto úmido	Soja	Lavouras	Pastagens	Areal	Recuos	Totais (2015)
Floresta	90,8613	4,9473	30,7611	0,2439	2,7207	0,1746	0,5760	2,4678	0,0360	41,9274	132,7887
Silvicultura	8,9775	23,9355	0,5553	0,0072	0,1044	0,0000	0,0126	0,0333	0,0000	9,6903	33,6258
Campo	3,8160	0,1494	121,9014	10,7352	20,3346	2,6244	7,9290	27,9810	0,5589	74,1285	196,0299
Solo exposto seco	0,0018	0,0000	0,5850	3,6054	0,6435	0,5364	0,4221	1,1160	1,0485	4,3533	7,9587
Solo exposto úmido	0,2934	0,0360	14,6070	25,2918	35,2161	2,4408	5,2992	12,2958	3,0033	63,2673	98,4834
Soja	2,2869	0,0027	9,4680	3,5730	2,1807	0,7344	1,5894	5,1435	0,1890	24,4332	25,1676
Lavouras	0,8442	0,0018	7,0200	2,2743	1,7973	0,2871	1,7388	5,7078	0,1404	18,0729	19,8117
Pastagens	0,0711	0,0036	11,8881	16,0866	11,6820	0,6786	3,6657	20,1915	1,0377	45,1134	65,3049
Areal	0,0036	0,0000	0,5778	1,8369	0,8235	0,0045	0,3294	1,4733	3,8313	5,0490	8,8803
Avanços	16,2945	5,1408	75,4623	60,0489	40,2867	6,7464	19,8234	56,2185	6,0138		
Totais (2020)	107,1558	29,0763	197,3637	63,6543	75,5028	7,4808	21,5622	76,4100	9,8451		

10 ANEXOS

ANEXO 1 – DISTRIBUIÇÃO DE DATAS DAS IMAGENS LANDSAT AO LONGO DO ANO.

Interval ID	start	end	start	end
1	1	16	1-Jan	16-Jan
4	49	64	18-Feb	4-Mar
5	65	80	5-Mar	20-Mar
6	81	96	21-Mar	5-Apr
7	97	112	6-Apr	21-Apr
8	113	128	22-Apr	7-May
9	129	144	8-May	23-May
10	145	160	24-May	8-Jun
11	161	176	9-Jun	24-Jun
12	177	192	25-Jun	10-Jul
13	193	208	11-Jul	26-Jul
14	209	224	27-Jul	11-Aug
15	225	240	12-Aug	27-Aug
16	241	256	28-Aug	12-Sep
17	257	272	13-Sep	28-Sep
18	273	288	29-Sep	14-Oct
19	289	304	15-Oct	30-Oct
20	305	320	31-Oct	15-Nov
21	321	336	16-Nov	1-Dec
22	337	352	2-Dec	17-Dec
23	353	366	18-Dec	31-Dec

Fonte: adaptado de (POTAPOV *et al.*, 2020)

ANEXO 2 – CALENDÁRIO DE IMAGENS DO CUBO DE DADOS GLAD ARD.

	16=day interval # within a year																						
Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1980	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1981	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
1982	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
1983	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
1984	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115
1985	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138
1986	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161
1987	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184
1988	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207
1989	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230
1990	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253
1991	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276
1992	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299
1993	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322
1994	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345
1995	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368
1996	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391
1997	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414
1998	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437
1999	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460
2000	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483
2001	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506
2002	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529
2003	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552
2004	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575
2005	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598
2006	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621
2007	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644
2008	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667
2009	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
2010	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713
2011	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736
2012	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759
2013	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782
2014	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805
2015	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828
2016	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851
2017	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874
2018	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897
2019	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920
2020	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943

Imagem nítida Imagem com alta nebulosidade Imagem com cortes (sem dados) Arquivo de imagem sem dados

Fonte: adaptado de (POTAPOV *et al.*, 2020)