Paraonde!?
Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia - IGEO - UFRGS / ISSN 1982-0003

ISSN 1982-0003
DOI: https://doi.org/10.22456/1982-0003.128653

O PAPEL FUNCIONAL DAS CROSTAS BIOLÓGICAS DE SOLO NOS AREAIS DO RIO GRANDE DO SUL

The functional role of biological soil crusts on sandy areas of Rio Grande do Sul

El papel funcional de las costras biológicas del suelo en los arenales de Rio Grande do Sul

Carla Lisiane Webber*
Ulisses Franz Bremer**

*Doutora em Geografia pela UFRGS– carlawebbergeo@gmail.com
** Professor Associado do Departamento de Geografia da UFRGS– bremer@ufrgs.br

Recebido em 27/11/2022. Aceito para publicação em 28/08/2024.
Versão online publicada em 04/07/2025 (http://seer.ufrgs.br/paraonde)

Resumo:
Crostas Biológicas do Solo (CBS) são de profunda importância nas áreas de dunas, pois são reconhecidas como os primeiros colonizadores após perturbações ambientais. No bioma Pampa, processos geomorfológicos naturais e o mau uso do solo levaram à expansão das áreas de remobilização de sedimentos (Arenização), gerando um grave problema - a dificuldade de fixação da vegetação do campo e das culturas. Mas neste mesmo ambiente encontramos as CBS. Assim este estudo visa caracterizar os tipos de biocrostas de áreas que sofrem processos de arenização no Pampa e suas possíveis contribuições. Analisamos as biocrostas e as comparamos a alguns parâmetros: solo, geomorfologia e aspecto. As análises foram realizadas entre os anos 2014 e 2017 em três Areais, nos municípios de Alegrete e São Francisco de Assis. Os resultados mostram que as CBS são encontradas em maior presença compostas por cianobactéria (do tipo filamentosas) sobre o solo, seguido de líquens e musgos em grandes colônias. O aporte de nutrientes no solo é modificado com a presença delas e as mesmas encontram-se em feições específicas nesses Areais nas rampas e colinas. Constatamos que a presença dessas crostas como elemento fonte de nutrientes e geradora de equilíbrio leva à redução da erosão do solo e, portanto, é importante para a restauração do equilíbrio do bioma. Desta forma, o estudo compreende uma análise exploratória das CBS através do seu comportamento geoecológico, a fim de iniciar estudos sobre as CBS no Rio Grande do Sul, Brasil.
Palavras-chave: Biocrostas. Biodiversidade. Solos arenosos. Pampa. Arenização.

Abstract:
Biological Soil Crusts (BSC) are of extreme importance in dune areas, as they are recognized as the first colonizers after environmental disturbances. In the Pampa biome, natural geomorphological processes and poor soil use led to the expansion of sediment remobilization areas (Sandization), creating a serious problem - the difficulty of fixing field vegetation and crops. But in this same environment we can find BSC. Thus, this study aims to characterize the types of biocrusts in areas that undergo sandization processes in the Pampa and their possible contributions. We analysed the biocrusts and compared them according to some parameters: soil, geomorphology and aspect. The analyses were carried out between 2014 and 2017 in three sandy areas in the municipalities of Alegrete and São Francisco de Assis. The results show that the majority of BSC found was composed of cyanobacteria (of the filamentous type) on the soil, followed by lichens and mosses in large colonies. The contribution of nutrients to the soil is modified by their presence and they are found in specific features of these sandy areas: on the slopes and slopes of the hills. We found that the presence of these crusts as a source of nutrients and generator of balance leads to the reduction of soil erosion and, therefore, is important for restoring the balance of the biome. This way, the study comprises an exploratory analysis of the BSC through their geoecological behaviour, to initiate studies on the BSC in Rio Grande do Sul, Brazil.
Key-words: Biocrusts. Biodiversity. Sandy soils. Pampa. Sandization.

Resumen:
Resumen. Las Costras Biológicas del Suelo (CBS) son de gran importancia en las áreas de dunas, ya que se las reconoce como los primeros colonizadores después de las perturbaciones ambientales. En la pampa, los procesos geomorfológicos naturales y el mal uso del suelo provocaron la ampliación de las áreas de removilización de sedimentos (arenización), generando un grave problema: la dificultad de fijación de la vegetación campestre y de los cultivos. Pero en este mismo ambiente encontramos las CBS. Así, este estudio tiene como objetivo caracterizar los tipos de CBS en áreas que sufren procesos de arenización en la Pampa y sus posibles contribuciones. Analizamos las costras biológicas y las comparamos con algunos parámetros: suelo, geomorfología y aspecto. Los análisis se realizaron entre 2014 y 2017 en tres Arenal, En los condados de Alegrete y São Francisco de Assis. Los resultados muestran que las CBS se encuentran en mayor presencia compuestos por cianobacterias (del tipo filamentosas) en el suelo, seguidos de líquenes y musgos en grandes colonias. La contribución de nutrientes en el suelo se modifica con su presencia y se encuentran en características específicas en estes Arenal en las rampas y laderas de las coxilhas. Comprobamos que la presencia de estas costras como fuente de nutrientes y generadora de equilibrio conduce a la reducción de la erosión del suelo y, por lo tanto, es importante para restablecer el equilibrio del bioma. De esta manera, el estudio comprende un análisis exploratorio de las CBS mediante su comportamiento geoecológico, con la finalidad de empezar investigaciones sobre las CBS en Rio Grande do Sul, Brasil.
Palabras-clave: Costras biológicas. Biodiversidad. Suelos Arenosos. Pampa. Arenización

1. Introdução

As comunidades de microrganismos sobre o solo vêm sendo estudadas no mundo por muitos grupos de pesquisa nos últimos 100 anos (Belnap et al., 2016). Estes estudos perpetuam por várias áreas do conhecimento e vêm aumentando consideravelmente ano após ano. Essas comunidades complexas de microrganismos denominadas de crostas biológicas de solo (CBS) são comumente encontradas em solos nos mais diversos ecossistemas, principalmente em regiões áridas e semiáridas onde a vegetação é esparsa com solo descoberto entre as vegetações de maior porte.

Trabalhos palinológicos sobre os campos da Campanha, perto da cidade de São Francisco de Assis, descrevem que a região esteve naturalmente coberta por campos durante todo o período Glacial e Holoceno, sob condições frias e relativamente secas e condições quentes e secas, respectivamente (Behling et al. 2005). Ocorreu uma mudança no clima para condições mais úmidas a partir da expansão inicial das matas de galeria, o que reflete um período mais úmido registrado, entretanto a região se manteve predominantemente campestre.

Ao longo do perímetro desta área, vários registros de bioindicadores como cactáceas e animais mimetizados típicos de ambientes áridos e outros relictos do passado, especialmente material arqueológico (Bellanca, 2002; Silva, 2009). Os Areais do bioma Pampa se localizam sobre o antigo deserto de Botucatu que existiu na América do Sul durante os períodos Jurássico e Cretáceo, quando América e África ainda estavam juntas (Ab´Saber, 1995, Gomes et al., 2022). Essas manchas de areia que aparecem na paisagem da campanha gaúcha foram denominadas por Suertegaray (1987) de Areais e o processo de Arenização. Pois, trata de um processo de retrabalhamento de depósitos arenosos pouco ou não consolidados, que dificulta a fixação de cobertura vegetal, devido à intensa mobilidade de partículas pela ação da água e dos ventos (Suertegaray, 1987).A exposição do solo em manchas (Areais) na paisagem do Pampa brasileiro expõe os depósitos eólicos estáveis e instáveis que representam a herança de um clima mais seco do que o atual e fornecem evidências paleoclimáticas importantes para a compreensão dessa paisagem (Gomes, et al., 2022).

As CBS são o resultado de uma associação íntima entre as partículas do solo e cianobactérias, algas, micro fungos, líquens e briófitas (em diferentes proporções), como um organismo vivo imediatamente na superfície do solo ou entre os primeiros milímetros de solo (Belnap *et al.* 2003, Webber et al., 2022). Sendo as partículas de solo agregadas, através da presença e atividade desta biota viva, o que resulta numa cobertura vegetal ativa, viva sobre a superfície do solo que cresce como uma camada orgânica coesa.

Cianobactérias, algas, fungos, musgos e líquens são considerados microrganismos pioneiros e, portanto, os primeiros organismos que colonizam o substrato do solo (Evans, 1999). As biocrostas igualmente são os primeiros organismos a aparecer após a perturbação do solo, por exemplo, após o desmatamento (Gall et al., 2022; Seitz et al., 2017) ou ainda mais proeminentemente após incêndios ou pisoteio em áreas áridas (Zaady et al., 2016 ; Mccann et al., 2021).

Além disso, CBS estruturalmente são ásperas, irregulares e com cobertura de baixa estatura (1 a 10 cm de altura), desempenham um papel importante no sistema funcional dos solos sendo são excepcionalmente eficazes na estabilização de solos contra a erosão (Chaudhary et al. 2009, Chamizo et al., 2017; Gao et al., 2020; Rodriguez-Caballero et al., 2022), modificam o sistema de infiltração (Thielen et al., 2021) e de ciclagem dos nutrientes: nitrogênio e carbono (Weber et al., 2015; Barger et al., 2016; Tucker et al. 2020), e modificam a capacidade de germinação e estabilidade de plantas vasculares. (Eldridge & Greene, 1994).

Desta forma, este estudo procura fazer uma breve análise sobre as características das CBS que ocorrem em locais de ocorrência de arenização, associando aos fatores pedológicos, geomorfológicos e climáticos que podem contribuem para a existência e permanência desses organismos no bioma Pampa do Rio Grande do Sul, Brasil.

2. Material e Métodos

Área de Estudo

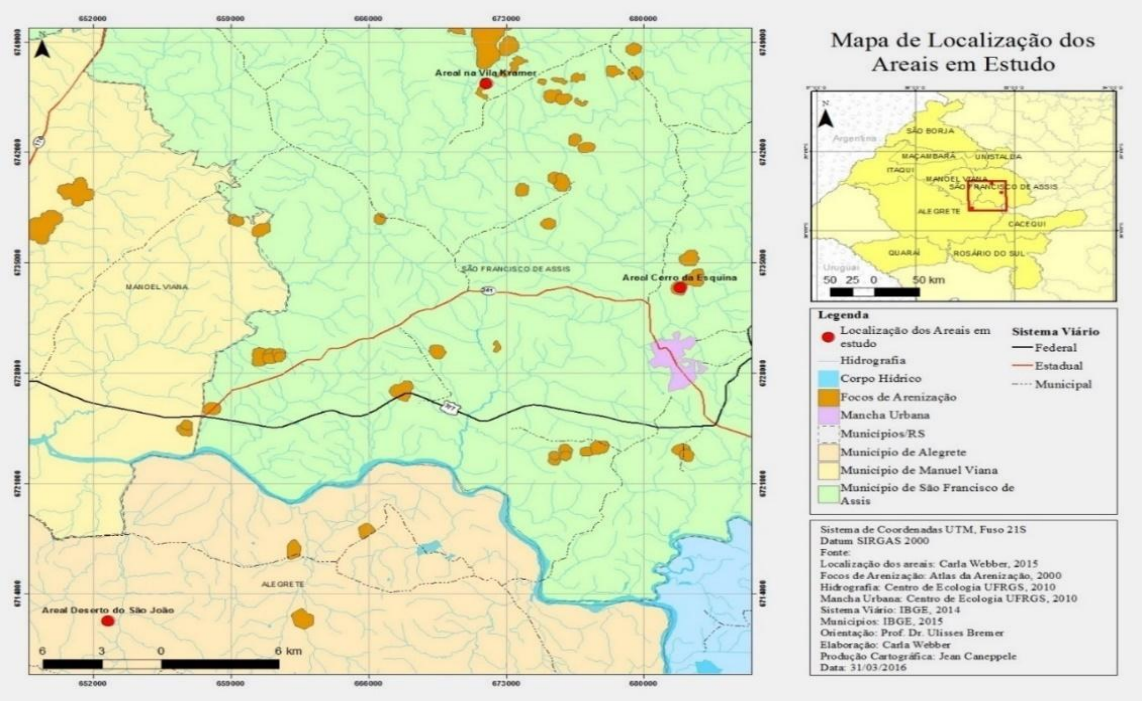
Este estudo foi realizado nos municípios de Alegrete e São Francisco de Assis, no Estado do Rio Grande do Sul (RS), em áreas que sofrem processos de arenização no bioma Pampa e apresentando formação de crostas biológicas de solo. No período entre abril de 2014 e outubro de 2017. As análises ocorreram em três Areais (Tabela 1, Fig.1) , sendo coletadas duas amostras em cada ponto de coleta, a fim de, reconhecer os aspectos florísticos de cada conjunto de biocrosta. Relacionando com as características do solo e geomorfologia. Deste modo os locais de amostra foram selecionados em diferentes feições geomorfológicas (Ab'Saber, 1995; Tricart, 1977), optando-se por contemplar os três estágios de sucessão das biocrostas: i) áreas iniciais de colonização por cianobactérias; ii) iniciar associações entre cianobactérias, liquens e musgos; iii) biocrostas bem desenvolvidas com aspecto de tapete musgoso.

Tabela 1 - Identificação de amostras e respectivas áreas de coleta.

Área	Amostra	Areal	Município	Coordenadas		Orientação Solar
1	01 e 02	Deserto São João	Alegrete	29º42'35'' W	S/55º25'13''	SE
2	03 e 04	Vila Kramer	São Francisco de Assis	29º30'54'' W	S/55º07'23''	SE
3	05 e 06	Cerro da Esquina	São Francisco de Assis	29º23'58'' W	S/55º13'60''	SW

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 1 - Mapa de localização das áreas de coleta das amostras.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

As áreas arenosas, no rio Grande do Sul, ocorrem sobre duas formações geológicas distintas: a Formação Botucatu, resultante de ambientes eólicos deposicionais, e a Formação Guará, causada por deposição fluvial (Suertegaray et al. 2012). As areias Arenosas possuem textura predominante arenosa e quando ocorre a formação de solo são classificados entre Neossolos Quartzarênicos Órticos segundo o SIBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013; Streck et al. 2008) ou areias quartzosas. Os processos de arenização

foram descritos anteriormente para essas regiões (Suertegaray, 1987; Verdum, 1997; Suertegaray et al., 2001; Bellanca 2002, Suertegaray & Verdum, 2008; Guasselli, 2012: Suertegaray, 2020; Oliveira & Suertegaray, 2021, Gomes e et al., 2022).

O clima subtropical desta região é caracterizado por alta umidade, com invernos frios e verões quentes (Rossato, 2012), no qual a temperatura média anual varia entre 20ºC e 23ºC, com temperaturas mínimas do ar entre 11ºC e 14ºC (em julho) e máximas entre 23ºC e 29ºC (em fevereiro). A evapotranspiração média é de 901-950 mm a^{-1} e a região experimenta uma insolação mensal total média entre 200-210 h (Wrege et al. 2012). Apesar da elevada precipitação anual (variando entre 1.400 e 1.700 mm a-1), as chuvas ocorrem apenas em 70-90 dias chuvosos, e a maior parte precipita em 6-9 dias no outono e na primavera (Binda & Verdum, 2020). Esses poucos eventos extremos estão ligados a altas taxas de descarga de sedimentos causando erosão do solo nessa área (Binda & Verdum, 2020). Consequentemente, são predominantemente responsáveis pelo aparecimento de ravinas, voçorocas e novos núcleos de arenização (Binda & Verdum, 2020).

As coletas das amostras ocorreram conforme método previamente descrito por Zaady (2010) e Gundlapally & Pichel (2006). Para a coleta dos testemunhos de sondagem foram utilizadas placas de Petri com 10 cm de diâmetro e 2 cm de altura, o que proporciona mesmo volume para todas as amostras. As placas estavam esterilizadas e se mantiveram em uma caixa térmica com gelo para coleta durante todo o processo.

A primeira área de coleta encontra-se no areal Deserto de São João, localizado em Alegrete. O local escolhido é uma área geologicamente peculiar onde ocorrem sobre areias e afloramento rochoso promovido pelo escoamento superficial em antigos areais (Suertegaray e Oliveira, 2018). Geomorfologicamente, o areal encontra-se sobre uma feição de colina e foi um dos primeiros locais de cultivo de eucalipto na região, plantado há cerca de 20 anos, tempo suficiente para modificações biogeográficas da flora devido à inclusão da espécie exótica em monocultura.

A segunda área de coleta se processou em São Francisco de Assis, Rio Grande do Sul, Brasil. Foi escolhida por ser uma feição de interface entre terraços fluviais e depósitos de rampa. É um local que sofre com processos erosivos avançados de ravinamento, podendo ser considerado um núcleo de arenização, onde crostas biológicas recobrem o solo ainda estável no topo das ravinas.

A terceira área de coleta é no Cerro da Esquina, em São Francisco de Assis, na feição de depósito de rampa a qual recebe acúmulo de material de partículas mais finas na sua base como silte e argila. Foi escolhido por ser um areal muito estudado e ter ocorrido recentemente uma tentativa de estabilização e recuperação da área por estaqueamento de bambus (Vieira, 2012).

Optou-se por coletar amostras de três estágios de sucessão: (i) focos iniciais de colonização de cianobactérias; (ii) início de associação entre cianobactérias e componentes liquens e musgos; (iii) crosta bem constituída com aparência já de tapete de musgo.

Mapeamento e geomorfologia

Os mapas de compartimentação geomorfológica foram confeccionados a partir de bases Topodata 1:100.000 e foram cruzados dados com vegetação e geologia com a finalidade de construir um modelo digital de elevação. As áreas foram recortadas e reorganizadas em escala visual de 1:10.000, e adicionadas ao software ArcGis 10.3, em conjunto com o arquivo *shapefile* dos areais atualizados (Hasenack e Weber, 2010). e os pontos de coleta aferidos com GPS e plotados no software. A partir do reconhecimento da litologia e a confecção do mapa geomorfológico, foi possível elaborar este estudo da contribuição de biocrostas e relacionar com suas áreas de ocorrência.

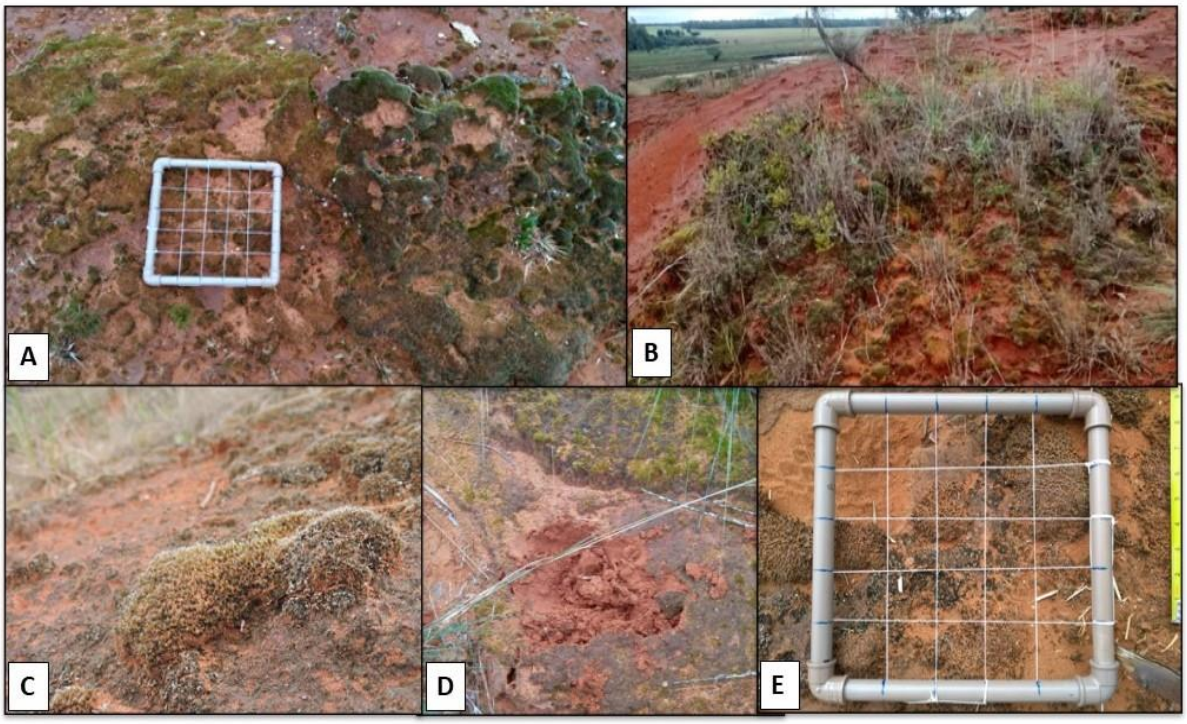
Análises de solo

As amostras foram coletadas conforme método padronizado pela Embrapa Solos (Lemos & Santos, 2002) no Areal Vila Kramer e Areal Cerro da Esquina. Para a amostragem de solo foi utilizado um trado holandês coletando à profundidade de 20 cm, sendo as amostras acondicionadas em sacos de coleta devidamente identificadas e georreferenciadas. Elas foram conservadas em local seco, sob temperatura ambiente, até que ocorresse a análise. As análises químicas dos solos ocorreram no Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, utilizando a metodologia da Rede Oficial de Laboratórios de análise de Solos do RS (ROLAS).

3. Resultados e Discussão

As CBS coletadas apresentavam três específicos componentes dominantes: cianobactérias, líquens e musgos (fig. 2).

Figura 2 - Aparência das Crostas Biológicas de Solo do Rio Grande do Sul. A) CBS Dominância Musgo em Vila Kramer; B) Aparência de uma CBS mista dando suporta a vegetação gramíneas; C) Detalhe CBS musgo em primeiro plana com manchas pretas de biocrosta ciano dominância; D) Pata de animal destruindo parte de uma crosta; E) Composição de CBS com marca de referência 25 cm x 25 cm.



Fonte: Acervo dos autores. (2022)

As cianobactérias observadas formam manchas pretas a verdes escuras sobre o solo podendo ser vistas a olho nu por causa da sua textura granulada e macroscópicas. Dentre os organismos observados, todos eram do tipo filamentoso com presença Hormogônios que são responsáveis pela entrada de Nitrogênio no solo. Esse tipo de cianobactéria é importante para a agregação de partículas, o que auxilia na redução da erosão por ventos e chuvas fracas a médias (Patova, 2017).

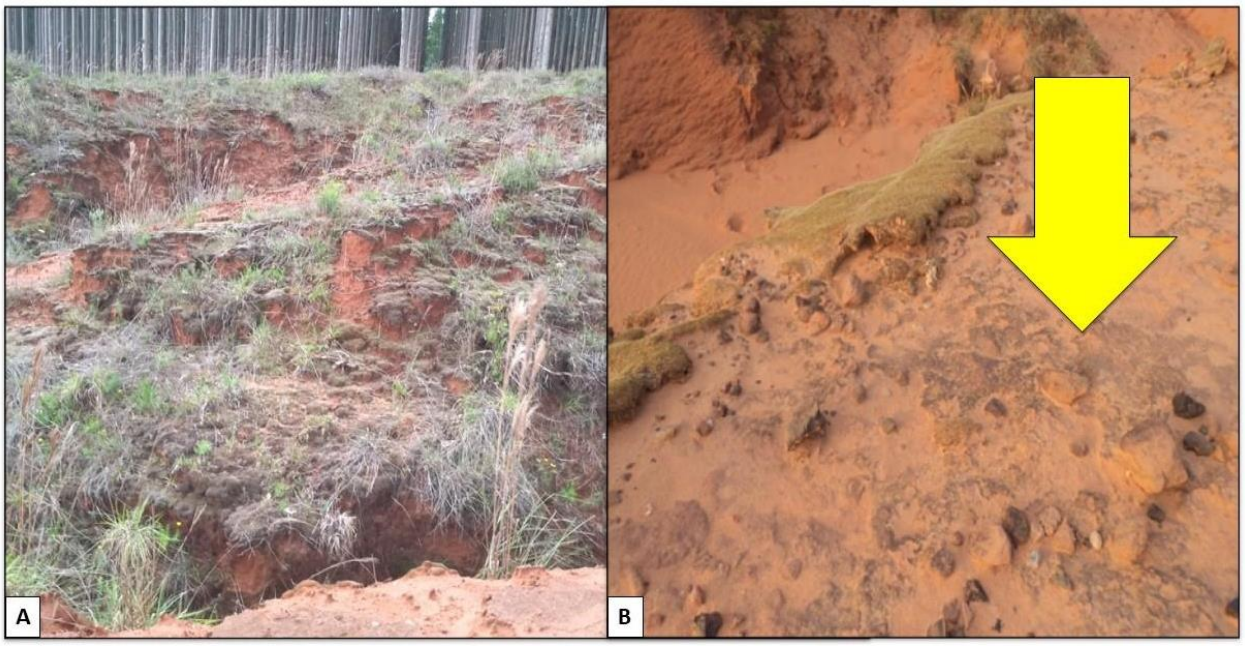
Os liquens observados pertencem a dois grandes grupos: Cladônias e Rhizocarpon. Esses organismos são capazes de produzir ácidos como: Barbático, Didímico, Púlvinos e/ou Rodocladônico. As substâncias liquênicas contribuem na formação de solo e participam ativamente da ciclagem de nutrientes (Legaz et al., 2006).

Os musgos são o componente mais desenvolvido das CBS e auxiliam na capacidade de estabilidade do solo bem como na formação de microclimas devido à mudança de umidade e temperatura que este promove no solo. Trata-se de um microrganismo muito resistente à seca e ao calor (Eldridge, 2003) e que auxilia positivamente na infiltração da água diminuindo o escoamento superficial no solo.

Quando analisada a sequência de sucessão foi possível observar que as cianobactérias se fazem presentes em primeiro plano, sendo sua visualização através de tapetes pretos a verde escuros e continuam evoluindo até atingirem o clímax com a presença de líquens e musgos. Quando no estado mais evoluído é possível observar grandes tapetes de musgos principalmente nas encostas das ravinas.

Quando levado em conta a localização da crosta, podemos afirmar que nas vertentes voltadas para o norte há menor expressividade de crostas, podendo ter como motivo o ressecamento do solo, enquanto as vertentes expostas para sul permanecem mais úmidas por períodos maiores e favorecem a presença de crostas. Assim, a posição solar das vertentes voltadas para as direções Sudoeste, Sul e Sudeste marcam a maior presença de crostas nessas vertentes, entretanto, também foi possível encontrá-las em vertentes nas direções Nordeste, Norte e Noroeste, todavia em pouquíssima a nenhuma expressividade.

Figura 3 - A) Crostas com sequência de sucessão com predominância de musgos em degraus nas encostas. B) Crostas iniciais de cianobactérias localizadas em borda de ravina.

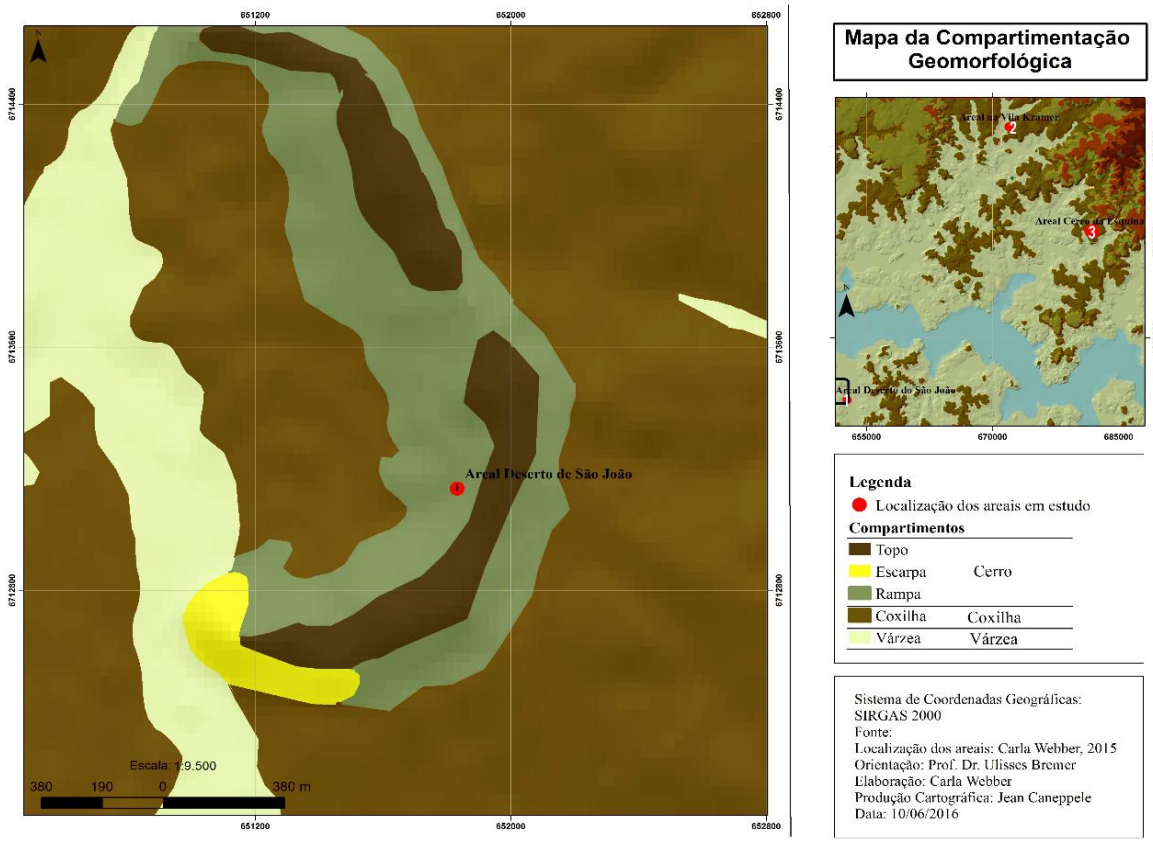


Fonte: Acervo dos autores (2022)

Correlações Geomorfológicas

A primeira área de estudo Areal São João (Fig. 4) encontra-se sobre uma feição de rampa, com um topo a seu montante e uma coxilha no entorno. Os topos desta área possuem baixa declividade (entre 0 e 3%) e são encontrados entre altimetrias que variam de 180 a 250 metros, nas áreas ao Norte do Ibicuí, enquanto nas áreas ao Sul, estão em cotas menores que variam de 140 a 200 metros. Os topos são constituídos de arenitos da Formação Guará e Botucatu, com materiais mais resistentes que do seu entorno friável (Schirmer et al., 2013). Os topos não apresentam ocorrência de areais ou focos de arenização.

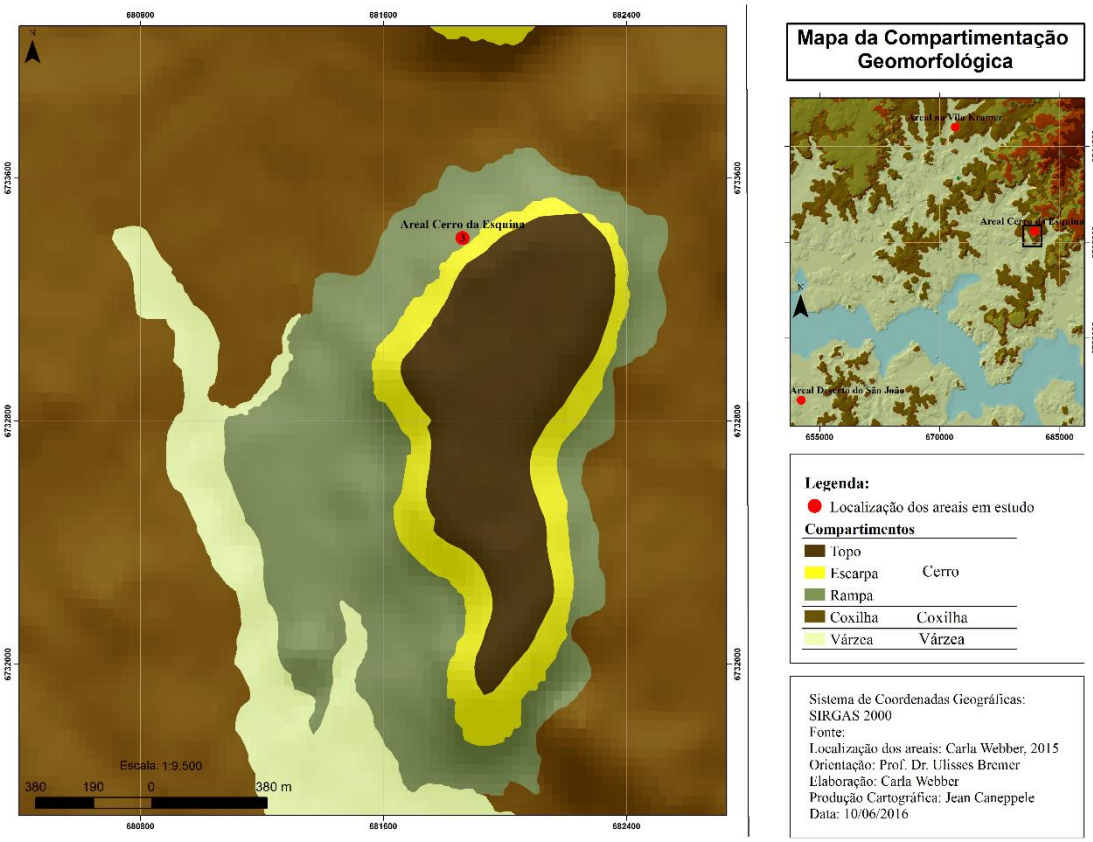
Figura 4 - Mapeamento geomorfológico do Areal São João em Alegrete – RS



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

O mapeamento geomorfológico do Areal Cerro da Esquina (Fig. 5) indica um depósito de rampa. Análises de amostras revelaram material de menor esfericidade devido à proximidade do material de origem no topo do relevo com o depósito. A energia empregada na seleção do material foi mediana, pois a textura mamelonar refere-se a grãos que sofreram e sofrem constantes mudanças. A energia empregada também fica evidente quando o quesito esfericidade é ponderado devido a este possuir uma esfericidade média. O material analisado por ser predominantemente fosco acredita-se ter sua origem distante e o transporte por erosão eólico sobre a fluvial que produz grãos brilhantes.

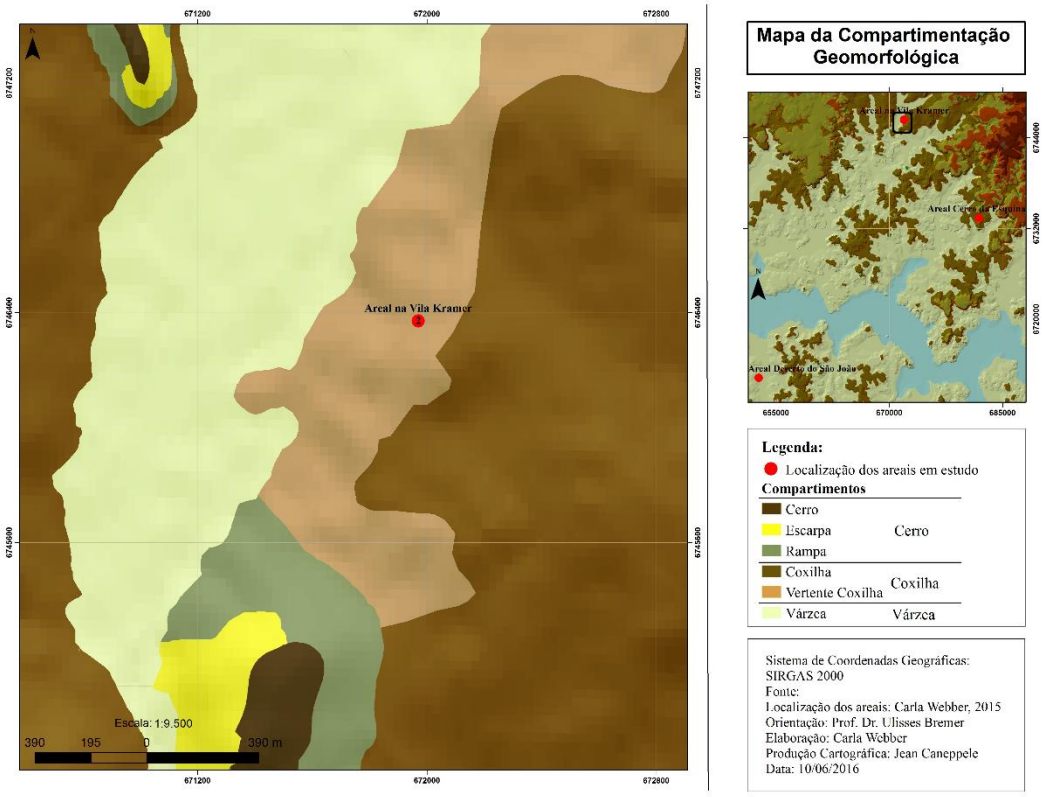
Figura 5 - Mapeamento geomorfológico do Areal Cerro da Esquina em São Francisco de Assis, RS



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

O mapeamento geomorfológico de Areal Vila Kramer (Fig. 6), mostra uma feição de interface entre terraços fluviais e depósitos de rampa classificada como vertente de coxilha. Foi evidenciado um material de alta energia devido a maior distância e trabalhamento do material pela textura mamelonar em predomínio, mas também lisa e esfericidade média a alta. Por ser um ambiente de transição foi possível identificar um predomínio de grãos foscos, mas com presença de grãos polidos, contudo estes em menor expressividade

Figura 6 - Mapeamento geomorfológico do Areal Vila Kramer



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Análises de solo

O aporte de Carbono se mostrou diferenciado em solos com e sem crosta biológica como mostra a tabela 2, sendo de 0,35% em camadas sem crosta a 0,81% em solos com profundidade de 0-20cm. O Nitrogênio possui também mais aporte na área dos areais aparece como invariável (tab.2)

Tabela 2 – Atributos químicos de carbono e nitrogênio das amostras de solo com e sem crosta

Areal	Interfase Geomorfológica	Insolação Solar	Carbono Orgânico	Nitrogênio TKN	C/N
			% (m/m)		
Cerro da Esquina s/ CBS	**Rampa**	**So**	**0.35**	**0.02**	**17.5**
Cerro da Esquina c/ CBS	**Rampa**	**So**	**0.81**	**0.02**	**40.5**
Vila Kramer s/ CBS	**Vertente coxilha**	**Se**	**0.12**	**0.01**	**12.0**
Vila Kramer c/ CBS	**Vertente coxilha**	**Se**	**0.23**	**0.02**	**11.5**

Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

4. Considerações Finais

As CBS dos areais do Rio Grande do Sul possuem uma complexidade de organismos que variam entre cianobactérias, liquens e musgos sendo os microorganismos cianobactérias os primeiros colonizadores seguidos de líquens e musgos. As cianobactérias agregadoras de solo filamentosas encontram-se presentes e estas são do tipo heterocitadas que contribuem para o aporte de Nitrogênio e Carbono.

Dentre as áreas observadas, a sequência de sucessão se fez inicialmente com manchas pretas a verdes de cianobactérias, evoluindo para tapetes de musgos em seu estágio mais complexo, no qual se pode considerar como estágio clímax da crosta e ela passa a dar suporte para espécies superiores como gramíneas

A existência de crostas nas vertentes do relevo especialmente recobrindo as ravinas e topos das áreas próximas às perturbações mostram a importância da preservação das CBS nos areais pois elas amenizam a mobilidade de sedimentos dando suporte às espécies superiores através da erosão do vento e água. Quando comparamos a relação inicial de aporte de Carbono encontramos uma pequena significância em solos contendo CBS, o que nos mostra a capacidade de aporte de carbono ao solo pela existência da CBS.

A geomorfologia nos mostra que as feições de rampa e vertente de coxilha são as mais propícias para a existência desses microrganismos, acreditamos estar relacionado com a textura do solo que tende a ser mais fina e menos granular, partícula silte.

A posição solar é um fator que nos pareceu também condicionante para a existência das CBS que cobrem especialmente as direções Sudoeste, Sul e Sudeste mais úmidas e menos ensolaradas.

Quando observadas as áreas com perturbações conseguimos ver a entrada das CBS em seu estágio inicial e quando mais consolidadas em estágios mais complexos com maior número de componentes na crosta observamos a presença de outras vegetações em seu entorno o que nos sugere a mudança do microclima do solo e estabilidade, o que pode ser um fator contributivo para a fixação de plantas vasculares do tipo gramíneas e pequenos arbustos.

Assim, as comunidades de biocrostas podem desempenhar um papel fundamental na preservação e restauração da vegetação do Pampa. No entanto, o conhecimento sobre as comunidades de biocrostas nesta área é extremamente escasso, uma vez que, tanto quanto sabemos, a sua ocorrência, distribuição e relevância na prevenção da degradação do solo ainda necessita de maior estudo.

5. Referências

AB'SABER, A. N. A revanche dos Ventos - Derruição de solos areníticos e formação de areais na Campanha Gaúcha. **Ciência e Ambiente**. 11: 53-64, 1995.

BALDWIN, I. T.; CALDWELL, M. M.; HELDMAIER, G.; LANGE, O. L.; MOONEY, H. A.; SCHULZE, E.-D.; SOMMER, U.; BELNAP, J; LANGE, O. L. (Ed.). **Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. (Ecological Studies). ISBN 978-3-540-43757-4.

BARGER, N. N.; WEBER, B.; GARCIA-PICHEL, F.; ZAADY, E.; BELNAP, J. Patterns and Controls on Nitrogen Cycling of Biological Soil Crusts. In: WEBER, B.; BÜDEL, B.; BELNAP, J. (Org.). **Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands,** Cham: Springer International Publishing, 2016 (Ecological Studies. ISBN 978-3-319-30212-6, p. 257–285.

BEHLING, H; PILLAR, V. D.; BAUERMANN, S. G. Late Quaternary grassland (Campos), gallery forest, fire and climate dynamics, studied by pollen, charcoal and multivariate analysis of the São Francisco de Assis core in western Rio Grande do Sul (southern Brazil). **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 133, 3-4, p. 235–248, 2005. doi:10.1016/j.revpalbo.2004.10.004.

BELLANCA, E. T. **Uma contribuição para a explicação da gênese dos areais do Sudoeste do Rio Grande do Sul**. Tese (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BELNAP, J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 15, p. 3159–3178, 2006. doi:10.1002/hyp.6325.

BELNAP, J.; LANGE, O. L. Structure and Functioning of Biological Soil Crusts: a Synthesis. In: BALDWIN, I. T.; CALDWELL, M. M.; HELDMAIER, G.; LANGE, O. L.; MOONEY, H. A.; SCHULZE, E.-D.; SOMMER, U.; BELNAP, J.; LANGE, O. L. (Org.). **Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management,** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003 (Ecological Studies. ISBN 978-3-540-43757-4, p. 471–479.

BELNAP, J.; WEBER, B.; BÜDEL, B. Biological Soil Crusts as an Organizing Principle in Drylands. In: WEBER, B.; BÜDEL, B.; BELNAP, J. (Org.). **Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands,** Cham: Springer International Publishing, 2016 (Ecological Studies. ISBN 978-3-319-30212-6, p. 3–13.

BINDA, A. L.; VERDUM, R. CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS PLUVIOMÉTRICOS EXTREMOS EM ÁREA AFETADA POR PROCESSOS DE ARENIZAÇÃO NO SUDOESTE DO RIO GRANDE DO SUL. **GEOgraphia**, v. 21, n. 47, p. 97, 2020. doi:10.22409/GEOgraphia2019.v21i47.a14426.

CHAMIZO, S.; RODRÍGUEZ-CABALLERO, E.; ROMÁN, J. R.; CANTÓN, Y. Effects of biocrust on soil erosion and organic carbon losses under natural rainfall. **CATENA**, v. 148, p. 117–125, 2017. doi:10.1016/j.catena.2016.06.017.

CHAUDHARY, V. B.; BOWKER, M. A.; O'DELL, T. E.; GRACE, J. B.; REDMAN, A. E.; RILLIG, M. C.; JOHNSON, N. C. Untangling the biological contributions to soil stability in semiarid shrublands. **Ecological Applications**, v. 19, n. 1, p. 110–122, 2009. doi:10.1890/07-2076.1.

ELDRIDGE, D. J.; GREENE, R. S.B. Microbiotic soil crusts - a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. **Soil Research**, v. 32, n. 3, p. 389, 1994. doi:10.1071/SR9940389.

ELDRIDGE, D. J.; LEYS, J. F. Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation, and wind erosion. **Journal of Arid Environments**, v. 53, n. 4, p. 457–466, 2003. doi:10.1006/jare.2002.1068.

EVANS, R. Microbiotic Crusts and Ecosystem Processes. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 18, n. 2, p. 183–225, 1999. doi:10.1016/S0735-2689(99)00384-6.

GALL, C.; NEBEL, M., QUANDT, D.; SCHOLTEN, T.; SEITZ, S. Pioneer biocrust communities prevent soil erosion in temperate forests after disturbances. **Biogeosciences**, v. 19, n. 13, p. 3225–3245, 2022. doi:10.5194/bg-19-3225-2022.

GOMES, T. C.; VERDUM, R.; LAURENT, F.; SILVA, N. L. Arenização: dinâmica climática atual, erosiva-deposicional e de usos e cobertura da terra no Pampa brasileiro. **Sociedade & Natureza**, v. 34, n. 1, 2021. doi:10.14393/SN-v34-2022-64606.

GUNDLAPALLY, S. R.; GARCIA-PICHEL, F. The community and phylogenetic diversity of biological soil crusts in the Colorado Plateau studied by molecular fingerprinting and intensive cultivation. **Microbial ecology**, v. 52, n. 2, p. 345–357, 2006. doi:10.1007/s00248-006-9011-6.

LEGAZ, D. M. E.; MILLANES, A. M; CÓRDOBA, C. V. Fisiologia dos Líquens In: XAVIER-FILHO, L; LEGAZ, M.E; CORDONA, C,V; PEREIRA, E.C.G**. Biologia de Liquens**, Rio de Janeiro: Âmbito Cultural,.163p.

LEMOS, R.C. de; SANTOS R.D. dos. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 4° ed. Viçosa - MG: SBCS, 83p., 2002.

MCCANN, E.; REED, S. C.; SAUD, P.; REIBOLD, R. H.; HOWELL, A.; FAIST, A. M. Plant growth and biocrust-fire interactions across five North American deserts. **Geoderma**, v. 401, p. 115325, 2021. doi:10.1016/j.geoderma.2021.115325.

OLIVEIRA, M. G.; SUERTEGARAY, D. M. A. MORFOPEDOGÊNESE EM ÁREA COM OCORRÊNCIA DE AREAIS- RS. **Espaço & Geografia**, vol.24, n.1, n.1, p. 215–243, 2021.

PATOVA, E.; SIVKOV, M.; PATOVA, A. Renitrogen Fixation Activity in Cyanobacterial Biological Soil Crusts with Domination of the Stigonema Genus Species in Mountain and Plain North-East European Tundra Ecosystems. **Environment Pollution and Climate Change**, v. 01, n. 04, 2017. doi:10.4172/2573-458X.1000138.

RODRIGUEZ-CABALLERO, E.; STANELLE, T.; EGERER, S.; CHENG, Y.; SU, H.; CANTON, Y.; BELNAP, J.; ANDREAE, M. O.; TEGEN, I.; REICK, C. H.; PÖSCHL, U.; WEBER, B. Global cycling and climate effects of aeolian dust controlled by biological soil crusts. **Nature Geoscience**, v. 15, n. 6, p. 458–463, 2022. doi:10.1038/s41561-022-00942-1.

ROSSATO, M. S.; SUERTEGARAY, D. M. A. **O clima no sudoeste do Rio Grande do Sul**. 1. ed. Porto Alegre: Compasso Lugar-Cultura, 2012. ISBN 978-85-7697-318-8.

SCHERER, C. M.S.; LAVINA, E. 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. doi:10.1016/j.gr.2005.12.002.

SCHIRMER, G. J.; ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R. Mapeamento geomorfológico em municípios da Quarta Colônia do Rio Grande do Sul. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 17, n. 2, 2013. doi:10.5902/223649949244.

SEITZ, S.; NEBEL, M.; GOEBES, P.; KÄPPELER, K.; SCHMIDT, K.; SONG, Z.; WEBBER, C.L.; WEBER, B.; SCHOLTEN, T. Bryophyte-dominated biological soil crusts mitigate soil erosion in an early successional Chinese subtropical forest. **Biogeosciences**, v. 14, n. 24, p. 5775-5788, 2017. doi.org/10.5194/bg-14-5775-2017.

SILVA, D. L. M. **Microclima e bioindicadores paleoclimáticos em paisagens com ocorrência de areais em São Francisco de Assis, RS, Brasil**. 2009. 152 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

STRECK, E.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**, 2 ed. Porto Alegre, EMATER/RS-ASCAR, 2008.

SUERTEGARAY, D. M. A. **A trajetória da Natureza: um estudo geomorfológico sobre os areais de Quaraí - RS**. 1987, 243 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, letras e ciências humanas, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1987.

SUERTEGARAY, D. M. A. A pesquisa: areais e arenização, o ponto de partida para uma reflexão em Geografia. **Ciência e Natura**, v. 42, e46, 2020. doi:10.5902/2179460X55108.

SUERTEGARAY, D. M. A.; MOURA, N. S. V. **Morfogênese do Relevo do Estado do Rio Grande do Sul.:** Rio Grande do Sul: paisagens e territórios em transformação. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012. ISBN 978-85-386-0165-4. Disponível em:<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/218539/000869934.pdf?sequence=1>.

SUERTEGARAY, D. M. A ; SILVA, L. A. P.; GUASSELLI, L. A. (ORG.). **Arenização Natureza Socializada**. 1. ed. Porto Alegre: Compasso lugar-Cultura, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/218539>.

SUERTEGARAY, D. M. A; VERDUM, R. **Desertification in the Tropics.** Paris:, 2008. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/pgdr/wp-content/uploads/2021/12/671.pdf>.

SUERTEGARAY, D. M. A; VERDUM, R.; GUASSELLI, L. A. **Atlas da Arenização, Sudoeste do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, Secretaria da coordenação e do planejamento e secretaria da ciência e tecnologia, Governo do Estado do RS, 2001, 84 p.

THIELEN, S. M.; GALL, C.; EBNER, M.; NEBEL, M.; SCHOLTEN, T.; SEITZ, S. Water's path from moss to soil: A multi-methodological study on water absorption and evaporation of soil-moss combinations. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 69, n. 4, p. 421–435, 2021. doi:10.2478/johh-2021-0021.

TUCKER, C.; FERRENBERG, S.; REED, S. C. Modest Residual Effects of Short-Term Warming, Altered Hydration, and Biocrust Successional State on Dryland Soil Heterotrophic Carbon and Nitrogen Cycling. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 8, 2020. doi:10.3389/fevo.2020.467157.

VERDUM, R. **Approche géographique des "déserts" dans les communes de São Francisco de Assis et Manuel Viana, État du Rio Grande do Sul, Brésil**. 1997. Tese (Doutorado).Université de Toulouse-le-mirail, UFR de Geographie et Aménagent, Toulouse. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/12433>.

VIEIRA, C.L. **Emprego de técnicas mecânico vegetativas em ravinamento no Areal em São Francisco de Assis** – Sudoeste do Rio Grande Do Sul. 2012, 164 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Curso de pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

WEBER, B.; BELNAP, J.; BÜDEL, B.; ANTONINKA, A. J.; BARGER, N. N.; CHAUDHARY, V. B.; DARROUZET-NARDI, A.; ELDRIDGE, D. J.; FAIST, A. M.; FERRENBERG, S.; HAVRILLA, C. A.; HUBER-SANNWALD, E.; MALAM ISSA, O.; MAESTRE, F. T.; REED, S. C.; RODRIGUEZ-CABALLERO, E.; TUCKER, C.; YOUNG, K. E.; ZHANG, Y.; ZHAO, Y.; ZHOU, X.; BOWKER, M. A. What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community. **Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society**, 2022. doi:10.1111/brv.12862.

WEBER, B.; BÜDEL, B.; BELNAP, J. (Ed.). **Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands**. Cham: Springer International Publishing, 2016. (Ecological Studies). ISBN 978-3-319-30212-6.

WEBER, B.; WU, D.; TAMM, A.; RUCKTESCHLER, N.; RODRÍGUEZ-CABALLERO, E.; STEINKAMP, J.; MEUSEL, H.; ELBERT, W.; BEHRENDT, T.; SÖRGEL, M.; CHENG, Y.; CRUTZEN, P. J.; SU, H.; PÖSCHL, U. Biological soil crusts accelerate the nitrogen cycle through large NO and HONO emissions in drylands. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 50, p. 15384–15389, 2015. doi:10.1073/pnas.1515818112.

WREGE, M.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; ALMEIDA, I. **Atlas climático da região sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**, 2012. ISBN 9788570350138.

ZAADY, E.; BEN-DAVID, E. A.; SHER, Y.; TZIRKIN, R.; NEJIDAT, A. Inferring biological soil crust successional stage using combined PLFA, DGGE, physical and biophysiological analyses. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 5, p. 842–849, 2010. doi:10.1016/j.soilbio.2010.02.002.

ZAADY, E.; ELDRIDGE, D. J.; BOWKER, M. A. Effects of Local-Scale Disturbance on Biocrusts. In: WEBER, B.; BÜDEL, B.; BELNAP, J. (Org.). **Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands,** Cham: Springer International Publishing, 2016 (Ecological Studies. ISBN 978-3-319-30212-6, p. 429–449.