

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

Rômulo Augusto Aragones Aita

**ESTABILIDADE DE AGREGADOS E MATÉRIA ORGÂNICA EM
SOLOS DE ELEVADO TEOR DE AREIA NA DEPRESSÃO CENTRAL
SUL-RIOGRANDENSE FRENTE AO AUMENTO DE TEMPERATURAS**

Santa Maria, RS
2023

Rômulo Augusto Aragones Aita

**ESTABILIDADE DE AGREGADOS E MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS DE
ELEVADO TEOR DE AREIA NA DEPRESSÃO CENTRAL SUL-
RIOGRANDENSE FRENTE AO AUMENTO DE TEMPERATURAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Mauro Kumpfer Werlang

Santa Maria, RS
2023

AITA, ROMULO AUGUSTO ARAGONES
ESTABILIDADE DE AGREGADOS E MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS
DE ELEVADO TEOR DE AREIA NA DEPRESSÃO CENTRAL SUL
RIOGRANDENSE FRENTE AO AUMENTO DE TEMPERATURAS / ROMULO
AUGUSTO ARAGONES AITA.- 2023.
137 p.; 30 cm

Orientador: Mauro Kumpfer Werlang
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Geografia, RS, 2023

1. Erosão 2. Estabilidade de agregados 3. Matéria
orgânica 4. Mudança climática I. Kumpfer Werlang, Mauro
II. Título.

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

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

Rômulo Augusto Aragones Aita

**ESTABILIDADE DE AGREGADOS E MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS DE
ELEVADO TEOR DE AREIA NA DEPRESSÃO CENTRAL SUL-RIOGRANDENSE
FRENTE AO AUMENTO DE TEMPERATURAS**

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

Aprovado em 26 de maio de 2023:

Mauro Kumpfer Werlang, Dr. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

Anderson Augusto Volpato Scoti, Dr. (UFSM)

Carina Petsch, Dra. (UFSM)

Michel Watanabe, Dr. (UNIR)

Elsbeth Léia Spode Becker, Dra. (UFN)

Santa Maria, RS
2023

Dedico este estudo à memória de meu avô paterno, João Aita, de quem herdei força, resiliência e coragem; e à minha filha, Beatriz Mernak Aita, a quem faltei por um tempo em função do estudo.

AGRADECIMENTOS

Iniciamente, agradeço a Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de estudar e trabalhar, possibilitando minha contribuição e aprimoramento pessoal nesta instituição de ensino e pesquisa. Tenho também de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Mauro Kumpfer Werlang, por aceitar um projeto de doutorado incipiente e sem forma que, sob sua serena orientação, encontrou a instrução e suporte necessários para evoluir e desenvolver o conteúdo resultando no estudo o qual agora entrego à comunidade acadêmica.

Não posso deixar de ressaltar o apoio recebido pelos tutores e colegas, como o da então chefia do Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Maria, Prof^ª. Dr^ª. Carmen Rejane Flores e Prof. Dr. Luís Eduardo de Souza Robaina compreendendo minha dupla rotina de técnico e discente no Departamento. Ou como dos então colegas de trabalho, Nilza de Oliveira Doico e Ronaldo Machado da Fontoura que, com a empatia e profissionalismo característicos, tornaram aqueles dias menos difíceis.

Bem como o apoio técnico e mesmo do próprio carisma da secretária do PPGgeo, Liliane F. Bonilla ou dos colegas Paulo Bairros da Silva e Gabriele dos Santos. Tampouco posso deixar de mencionar o companheirismo do colega do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Rodrigo Correia Pontes, a cujo qual fomos muito próximos na época, e que nossas conversas e assuntos afins facilitaram muito o transcorrer daqueles dias.

Também não posso deixar sem menção o apoio que recebi do Prof. Dr. Anderson A. V. Scoti e da Prof^ª. Dr^ª. Carina Petsch, que nos momentos iniciais da minha pesquisa reconheceram meu trabalho como relevante dando muito incentivo para leva-lo a diante. Agradeço ainda o suporte acadêmico e pessoal dos professores, Dr. Eduardo Schiavone Cardoso e Dr^ª. Andrea Valli Nummer, assim como a todos os colegas do departamento que aqui não consigo listar, mas que sempre proporcionaram um alegre convívio e estimulante ambiente de trabalho.

E, para encerrar, agradeço o apoio dos meus amigos e familiares que nunca me abandonaram. Em especial, do meu pai (in memoriam), Rômulo João Augusto Socal Aita, minha mãe, Silvia Elisa Aragones Aita, e minhas irmãs, Dr^ª. Virgínia H. Aragones Aita, Dr^ª. Carmen S. Aragones Aita, Ana Lúcia Aragones Aita e Silvia Amélia Aita Wagner, bem como de minha esposa Ma. Fabiane Mernak Aita e minha filha Beatriz. Muito obrigado!

“Acredito que uma folha de grama não é menos que a jornada das estrelas.”

(Walt Whitman)

RESUMO

ESTABILIDADE DE AGREGADOS E MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS DE ELEVADO TEOR DE AREIA NA DEPRESSÃO CENTRAL SUL-RIOGRANDENSE FRENTE AO AUMENTO DE TEMPERATURAS

AUTOR: Rômulo Augusto Aragones Aita

ORIENTADOR: Mauro Kumpfer Werlang

Em vista da suscetibilidade natural à erosão dos solos predominantes na região da Depressão Central Sul-riograndense, este estudo teve como objetivo investigar as relações entre o aumento de temperaturas associadas a mudança climática e a possível intensificação de processos erosivos sobre estes solos buscando melhor entender o prognóstico deste quadro. Fundamentado nas relações entre a matéria orgânica e a estabilidade de agregados, tendo esta última como parâmetro da erodibilidade, este estudo procedeu avaliações preliminares expeditas de três amostras e incubações de duas amostras, predominantemente arenosa e argilosa, respectivamente. Nas avaliações preliminares, submeteu-se amostras a diferentes condições ambientais como Casa de Vegetação e Geladeira por 70 dias para posteriormente aplicar a avaliação metodológica do índice de estabilidade de agregados em água e do teor de matéria orgânica, através da determinação do carbono total do solo por ignição, antes e após o tratamento. Com isso, testou-se a metodologia proposta e contribuiu-se com assertivas relevantes. Posteriormente, iniciou-se o tratamento térmico propriamente dito, a incubação, proposto para simular a ação das condições de elevação de temperaturas associadas a mudanças climáticas sobre as amostras em caixa térmica construída especificamente para o tratamento. Ciclos diários de temperaturas de um solo degradado do sudoeste gaúcho durante o mês de janeiro a 10 cm de profundidade, oscilando entre 28°C a 35°C, obtido na literatura, foi assumindo como um quadro de temperaturas elevadas para testar a hipótese onde, sob tais condições climáticas, a matéria orgânica, principal agente cimentante da estrutura dos solos arenosos, seria afetada e também o seria a suscetibilidade a erosão. Dessa forma, as análises de matéria orgânica e da estabilidade de agregados foram feitas imediatamente após a coleta das amostras e ao longo do tratamento térmico de incubação durando aproximadamente 120 dias. Por discrepâncias nos resultados da matéria orgânica, o ensaio do tratamento térmico foi repetido uma segunda vez. Porém estes resultados reapareceram mesmo no segundo experimento sendo assumidos como característicos desta avaliação. Assim, as avaliações preliminares concluíram que restrições ambientais à ação microbiana sobre a matéria orgânica, como estiagens, podem não intensificar os processos erosivos relativos à estabilidade de agregados. Já as incubações, mesmo com as discrepâncias da matéria orgânica, concluíram que o transcorrer do tempo sob ação térmica aumentou consideravelmente a suscetibilidade à erosão nas amostras arenosas enquanto as amostras argilosas não se apresentam tão vulneráveis ao tratamento térmico, embora apresentem certo decréscimo na estabilidade de agregados ao final dos tratamentos. Assim, o estudo proposto conclui que o aumento de temperaturas, caso haja umidade, intensifica os processos erosivos principalmente nos solos de granulometria arenosa e que, teoricamente, a reposição e manutenção de níveis de matéria orgânica no solo apresentam-se como fundamentais para evitar este quadro com potencial de levar a desestabilização da paisagem caso não seja ao menos mantida a vegetação espontânea.

Palavras-chave: Erosão. Estabilidade de agregado. Matéria orgânica. Mudança climática

ABSTRACT

AGGREGATES STABILITY AND ORGANIC MATTER IN SOILS WITH HIGH SAND CONTENT IN THE SUL-RIOGRANDENSE CENTRAL DEPRESSION FACE TO AN TEMPERATURE INCREASE

AUTHOR: Rômulo Augusto Aragones Aita

ADVISER: Mauro Kumpfer Werlang

In view of the natural susceptibility to erosion of the predominant soils in the region of the Sul-riograndense Peripheral Depression, this study aimed to investigate the relationships between the increase in temperatures associated with climate change and the possible intensification of erosion processes on these soils in order to contribute and better understand the prognosis of this condition. Based on the relationship between organic matter and aggregate stability, with the latter as a parameter of erodibility, this study proceeded with expeditious preliminary evaluations of three samples and incubations of two samples, predominantly sandy and clayey, respectively. In the preliminary evaluations, the samples were placed in different environmental conditions such as a greenhouse and a refrigerator for approximately 70 days, to later apply the methodological evaluation of the stability index of aggregates in water and the content of organic matter, through the determination of the total carbon of the soil by ignition, before and after treatment. With this, the proposed methodology was tested and relevant assertions were contributed. Subsequently, the heat treatment itself began, the incubation, proposed to simulate the action of the conditions of rising temperatures associated with climate changes on the samples in a thermal box built specifically for the treatment. With this, an attempt was made to simulate a table of daily temperature cycles of a degraded soil in the southwest of Rio Grande do Sul during the month of January at a depth of 10 cm, oscillating between 28°C to 35°C, assuming that this would be a table of high temperatures to test the hypothesis that, under such climatic conditions, organic matter, the main cementing agent of the structure of sandy soils, would be affected and so would the susceptibility to erosion. Thus, analyzes of organic matter and aggregate stability were performed immediately after sample collection and throughout the incubation heat treatment every two weeks, lasting approximately 120 days. For reasons of apparent discrepancies in the organic matter results, the heat treatment test was repeated a second time. However, these results reappeared even in the second experiment and were assumed to be characteristic of this evaluation. Thus, it can be concluded from preliminary assessments that environmental restrictions on microbial action on organic matter, such as droughts, may not intensify erosion processes with regard to stability assessments of aggregates in water. And, from the incubations, it can be concluded that the passage of time under thermal action considerably increased the susceptibility to erosion in the sandy samples given their dependence on organic matter as a structural factor. The clayey samples, structurally governed by the electrostatic principles of clay dispersion, are not as vulnerable to heat treatment, although they show a decrease in the stability of aggregates at the end of the treatments. Thus, the proposed study concludes that the increase in temperatures, along with moisture, intensifies the erosive processes mainly in soils with sandy granulometry and that the replacement and maintenance of organic matter levels in the soil are fundamental to avoid this situation capable of leading to the destabilization of the landscape.

Keywords: Soil erosion. Aggregate stability. Organic matter. Climate change

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos Argissolos na Depressão Central Sul-riograndense.....	23
Figura 2 - Levantamento de solos do Município de Santa Maria e da Formação Santa Maria..	25
Figura 3 - Localização da área de coleta de amostras ressaltando seu contexto litológico e regional.....	76
Figura 4 - Aspecto geral da área onde foi coletada a amostra 2.....	79
Figura 5 - Aspecto geral da área onde foi coletada a amostra 2.....	80
Figura 6 - Ilustra o aspecto geral de onde foi coletada a amostra 3.....	81
Figura 7 - Amostras em casa de vegetação, como parte das avaliações preliminares expeditas.....	82
Figura 8 - Aspecto da caixa de incubação sem a tampa e sem a cobertura de isopor.....	85
Figura 9 - Aspecto da caixa montada.....	84
Figura 10 - Ciclos diários de temperaturas máximas e mínimas na caixa durante um período de 21 dias.....	85
Figura 11 - Ensaio de granulometria durante sedimentação (determinação de finos)	87
Figura 12 - Início do processo de peneiramento (determinação de grosseiros)	89
Figura 13 - Amostras sendo calcinadas em mufla.	92
Figura 14 - Aspecto dos macroagregados obtidos por peneiramento, passante 2 mm e retido 1 mm, utilizados no ensaio.....	93
Figura 15 - Macroagregados sendo conduzidos ao estresse úmido.....	94
Figura 16 - Repetições das amostras durante ensaio.....	95
Figura 17 - Exemplo da planilha usada para cálculo dos dados.....	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica das amostras 1, 2 e 3 em gráfico comparativo apresentando todas as classes de tamanho de partículas avaliadas.....	98
Gráfico 2 - Estabilidade de agregados em função da matéria orgânica na amostra 1 das avaliações preliminares.....	106
Gráfico 3 - Estabilidade de agregados em função da matéria orgânica nas amostras 2 e 3 das avaliações preliminares.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área e expressão da participação dos solos da Depressão Central Sul-riograndense sobre a Formação Santa Maria, segundo IBGE (2015)	24
Tabela 2 - Resultados da análise granulométrica para as amostras 1,2 e 3 demonstrando as diferenças entre as amostras.....	98
Tabela 3 - Resultados de matéria orgânica no transcorrer do tempo obtidos nas avaliações preliminares expeditas.....	99
Tabela 4 - Resultados de matéria orgânica no transcorrer do tempo obtidos na primeira incubação.....	102
Tabela 5 - Resultados de matéria orgânica no transcorrer do tempo obtidos na segunda incubação.....	103
Tabela 6 - Resultados de estabilidade agregados obtidos no transcorrer do tratamento das avaliações preliminares expeditas.....	105
Tabela 7 - Resultados de estabilidade agregados obtidos no transcorrer do tratamento da primeira incubação.....	108
Tabela 8 - Resultados de estabilidade agregados obtidos no transcorrer do tratamento da segunda incubação.....	109
Tabela 9 - Estimativa das perdas de solos a partir do índice de estabilidade de agregados em água das amostras provenientes das análises dos tratamentos avaliações preliminares.....	112
Tabela 10 - Estimativa das taxas de aumento das perdas de solos da amostra 1 ao longo dos tratamentos preliminares sobre a avaliação inicial e sua razão em função do número de dias.....	113
Tabela 11 - Estimativa das perdas de solos a partir do índice de estabilidade de agregados em água das amostras provenientes das análises do tratamento Primeira Incubação.....	114
Tabela 12 - Estimativa das taxas de perdas de solos da amostra 1 ao longo da primeira incubação sobre a avaliação inicial e sua razão em função do número de dias.....	114

Tabela 13 - Estimativa das perdas de solos a partir do índice de estabilidade de agregados em água das amostras provenientes das análises do tratamento segunda incubação.....	115
Tabela 14 - Estimativa das taxas de perdas de solos da amostra 1 ao longo da segunda incubação sobre a avaliação inicial e sua razão em função do número de dias.....	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	18
1.3	HIPÓTESE	19
1.4	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	DINÂMICA DA PAISAGEM NA DEPRESSÃO CENTRAL SUL-RIOGRANDENSE	22
2.1.1	Litologias e solos e a suscetibilidade a erosão	22
2.1.2	A fisiologia da paisagem	26
2.1.3	O Modelo Ecodinâmico de Tricart	29
2.2	INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	33
2.2.1	Propriedades biológicas e químicas do solo afetadas pelas mudanças climáticas	35
2.2.2	Propriedades físicas do solo afetadas pelas mudanças climáticas	37
2.3	A ESTRUTURA, A ESTABILIDADE DE AGREGADOS E A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	39
2.3.1	A Estrutura do solo	39
2.3.2	O carbono orgânico no solo	41
2.3.3	A matéria orgânica e a estabilidade de agregados	44
2.3.4	Agentes cimentantes e o modelo hierárquico de agregação do solo	46
2.4	MECANISMOS E FATORES QUE AFETAM A AGREGAÇÃO DO SOLO	49
2.4.1	Mecanismos de agregação	49
2.4.2	Fatores que afetam a agregação do solo	51
2.4.3	Os componentes orgânicos na agregação do solo	54
2.5	A VARIÁVEL TEMPERATURA	57
2.5.1	A temperatura do ar e a temperatura do solo	57
2.5.2	Temperatura e decomposição da matéria orgânica no solo	61
2.6	ERODIBILIDADE E ESTABILIDADE DE AGREGADOS	63
2.6.1	Erodibilidade: o fator K da Equação Universal de Perdas De Solos	63
2.6.2	Mecanismos de desagregação dos solos	66
2.6.3	Estabilidade de agregados como parâmetro de perdas de solos	69

2.6.4	Métodos de determinação da estabilidade de agregados.....	73
3	METODOLOGIA.	77
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÀREA AMOSTRADA.....	77
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	78
3.2.1	Coleta e tratamento de amostras.....	80
3.2.1.1	Avaliações preliminares expeditas.....	83
3.2.1.2	Tratamentos de Incubação.....	84
3.2.2	Ensaio de granulometria.....	87
3.2.3	Ensaio de determinação da matéria orgânica.....	91
3.2.4	Ensaio de estabilidade de agregados do solo em água.....	93
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	98
4.1	Granulometrias.....	98
4.2	Matéria orgânica.....	100
4.3	Estabilidade de agregados.....	106
4.4	Estimativas das taxas de perdas de solos pós tratamento.....	112
5	CONCLUSÕES	118
	REFERÊNCIAS	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A erosão do solo é um grave problema ambiental enquanto o solo é um recurso natural não renovável que deve ser utilizado de forma sustentável para o futuro da humanidade. A manutenção da estrutura do solo é crucial para a utilização deste recurso natural uma vez que beneficia inúmeros processos ecológicos, satisfazendo as necessidades humanas, preservando e melhorando a qualidade ambiental dada sua importância ao meio ambiente.

Assim, a boa estrutura do solo é uma característica altamente desejável para se ter um manejo sustentável do solo enquanto recurso natural. Um dos principais determinantes da estrutura do solo é a de presença matéria orgânica e de agregados do solo estáveis que minimizam a erosão e a degradação do meio ambiente como um todo.

Frente a uma perspectiva de aquecimento global, o entendimento da resposta da matéria orgânica do solo e da estabilidade de agregados do solo, e por conseguinte, da estrutura do solo, ao aumento de temperaturas, é de crucial importância. Não apenas para uma melhor compreensão e manutenção de processos econômicos, como produtividade e fertilidade dos solos, mas principalmente, para o entendimento e manutenção de processos ambientais chave intimamente relacionados com a estabilidade do meio ambiente, como a permeabilidade e controle da erosão do solo.

As relações entre clima e erosão são amplamente reconhecidas e tem sido aplicadas para propor teorias sobre o impacto da erosão do solo, bem como utilizadas para salientar diferentes fatores determinantes da erosão a serem investigados. Porém, sob um cenário de mudança climática, entender a resposta do carbono orgânico e suas funções no solo permite compreender sua influência sobre os processos erosivos em tais circunstâncias, dada sua relevância deste como protagonista de tais processos enquanto fator determinante da estabilidade de agregados do solo e da manutenção da qualidade estrutural do solo.

Também é importante ressaltar o número limitado de dados disponíveis para estabelecer a influência da mudança climática sobre diversos processos chaves na erosão do solo, principalmente no estado do Rio Grande do Sul. Neste contexto, este estudo busca colaborar para o entendimento de tais relações entre mudança climática e erosão avaliando a estabilidade de agregados do solo sob tratamento térmico, onde o efeito da

temperatura sobre os conteúdos de matéria orgânica e estabilidade de agregados dos solos venha a tomar relevância.

Na Depressão Central Sul-riograndense os solos predominantes são os Argissolos formados sobre litologias sedimentares. Estes solos, por sua composição textural, posição na paisagem, baixa fertilidade natural e baixos teores de matéria orgânica apresentam uma suscetibilidade natural a erosão.

Desta forma, este estudo discute a dinâmica da matéria orgânica e da estabilidade de agregados do solo sob um cenário de aumento de temperaturas em razão de mudanças climáticas sobre solos regionais. Com isso, busca-se contribuir para a compreensão de um prognóstico dos processos erosivos dos solos da Depressão Central Sul-riograndense frente a tal quadro.

Para tanto, tomou-se amostras superficiais de dois Argissolos representativos da região de Santa Maria- RS para proceder-se um tratamento térmico de incubação na expectativa de simular os efeitos de um aumento de temperaturas em razão de mudanças climáticas. Posteriormente, procedeu-se as determinações dos teores de matéria orgânica e dos índices de estabilidade de agregados em água para analisar as correlações entre o aumento da temperatura, a estabilidade de agregados e, conseqüentemente, a erosão.

1.2 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

A erosão do solo e a degradação das terras são um problema grave no Brasil tendo severos impactos socioeconômicos e ambientais. Embora a erosão seja um fenômeno natural e seja o principal fator da evolução não tectônica dos relevos, a atividade humana acelera tal fenômeno (GUERRA, 2014).

No Brasil 847 milhões de toneladas de solo são perdidas por ano causando danos locais como perdas de insumos em plantações, perda de capacidade de armazenamento de água e remoção de nutrientes do solo (PINTO, 2019). Enquanto, como danos regionais, tem-se a poluição das águas por eutrofização e sedimentos além do assoreamento de corpos hídricos, causando inundações.

Para Amézketa (2008), a estrutura do solo é um importante fator para a sustentabilidade dos solos e pode ser definida como o arranjo das partículas sólidas e vazios do solo e sua estabilidade em um dado momento. A estabilidade dos agregados do solo enquanto partículas estruturais do solo afeta a infiltração de água aumentando a

capacidade de armazenamento de água, a aeração, a atividade biológica, o crescimento de plantas e, por conseguinte, minimiza a erosão.

Para Tricart, segundo a teoria da Bioresistasia de Erhart (1956), existe um antagonismo entre pedogênese e morfogênese e a manutenção da vida nos sistemas geomorfológicos regulados pelos processos de infiltração e erosivos, respectivamente. A pedogênese, beneficiada pela infiltração, favorece o desenvolvimento de ecossistemas e a diversidade biológica.

Já a morfogênese, desencadeada pelo escoamento superficial, produz a instabilidade da superfície o que é um fator limitante ao desenvolvimento de seres vivos. Dessa forma, onde a morfodinâmica é intensa a vegetação é pobre e muito aberta, com biomassa reduzida e baixa variedade de espécies.

Assim, a estabilidade de agregados do solo influencia uma ampla gama de processos físicos e biológicos no meio natural, onde a manutenção da elevada agregação é essencial na preservação do solo e de funções chave para a qualidade ambiental. E neste contexto, segundo Pedron et al. (2019), a matéria orgânica do solo é um dos principais fatores determinantes da agregação do solo, principalmente em solos de textura arenosa, como os Argissolos da Depressão Central Sul-riograndense.

A dinâmica da matéria orgânica no solo é grandemente influenciada pela temperatura e modificações climáticas (LAL et al., 2007; RINNAN et al., 2007; WANG et al., 2013). Portanto, é esperado que o aumento de temperaturas em razão das mudanças climáticas venha a ter influência nos processos erosivos e consequências em processos de qualidade ambiental em tais circunstâncias.

Isto justifica a validade de estudar a agregação do solo frente a um simulado prognóstico de modificações climáticas (neste caso, temperatura), uma vez que equivale a antecipar informações capazes de subsidiar a definição de estratégias de manejo e mitigação de problemas ambientais e técnicos futuros.

1.3 HIPÓTESE

A estrutura do solo, representada pelas suas partículas elementares, os agregados do solo, peds ou torrões, é de fundamental importância para a qualidade ambiental visto seus atributos de porosidade, aeração e capacidade de infiltração da água no solo. Estas características lhe conferem protagonismo nos processos erosivos uma vez que a infiltração de água no solo é antagonica aos processos iniciais da erosão, dado que a água

infiltrada não soma ao cômputo do escoamento superficial nos momentos iniciais dos processos erosivos.

Assim, a boa estrutura do solo é uma característica desejada para um manejo sustentável dos recursos ambientais e ela depende da presença e estabilidade de suas partículas elementares: os agregados do solo. A estabilidade dos agregados do solo por sua vez é razão dos seus conteúdos granulométricos, da mineralogia de suas argilas, da presença de íons metálicos, presença de óxidos e carbonatos e dos teores de matéria orgânica do solo.

A matéria orgânica do solo tem sua maior importância para a estrutura e estabilidade de agregados em solos de maiores conteúdos de areias. Enquanto a mineralogia das argilas tem maior protagonismo em solos de maior conteúdo de argilas e ficando a relevância dos demais fatores condicionados a sua eventual ocorrência.

Tendo em vista que a dinâmica da matéria orgânica do solo respeita a teoria da cinética enzimática, isto é, a elevação da temperatura eleva a taxa de decomposição e transformação da matéria orgânica no solo, esperando-se que por sua vez afete a estabilidade de agregados e os respectivos processos erosivos. Dessa forma, a presença de solos de baixos teores de argilas nos seus horizontes superficiais, como Argissolos, predominantes na região do estudo, a Depressão Central Sul-riograndense, justifica o entendimento das relações entre temperatura, matéria orgânica, estabilidade de agregados e erosão para a estabilidade do meio ambiente regional.

Assim, o presente estudo traz à discussão a hipótese que em um quadro de aumento de temperaturas as taxas de decomposição da matéria orgânica serão afetadas e que por sua vez isto levará a uma intensificação dos processos erosivos quando as condições climáticas desfavorecerem a manutenção de teores satisfatórios de matéria orgânica em solos com conteúdos texturais arenosos em seus horizontes superficiais.

1.4 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar as relações entre estabilidade de agregados do solo, matéria orgânica e temperatura (associadas a mudança climática) e, por conseguinte, a erodibilidade e a possível intensificação de processos erosivos em Argissolos da Depressão Central Sul-riograndense, a partir de amostras de dois solos da região de Santa Maria-RS de diferentes conteúdos granulométricos.

Como objetivos específicos este trabalho pretende (1) realizar uma revisão sobre as relações entre estabilidade de agregado, matéria orgânica, temperatura e erosão do solo, (2) incubar amostras de dois Argissolos da região de Santa Maria-RS para testar o efeito da temperatura sobre os seus processos erosivos, (3) avaliar, como indicativo dos processos erosivos, a estabilidade de agregado das amostras incubadas juntamente com seus conteúdos de matéria orgânica e, (4) discutir os resultados obtidos nas avaliações em laboratório embasados na literatura consultada para contribuir ao entendimento dos processos erosivos para os Argissolos da Depressão Central Sul-riograndense em condições de temperatura elevadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DINÂMICA DA PAISAGEM NA DEPRESSÃO CENTRAL SUL-RIOGRANDENSE

2.1.1 Litologia e solos e a suscetibilidade a erosão

O domínio da Depressão Central Sul-riograndense (IBGE, 2009) corresponde a uma vasta depressão suportada por rochas sedimentares da Bacia Sedimentar do Paraná. Está delimitada ao sul e leste pelo Planalto Sul-Rio-Grandense e ao norte e a oeste pelos compartimentos planálticos capeados por derrames vulcânicos da Bacia do Paraná (DANTAS et al., 2010).

Neste domínio há preponderância de colinas de pouca amplitude altimétrica (20m a 50 m) podendo desenvolver um relevo de colinas amplas e suaves ou um relevo de colinas baixas, pouco a muito dissecadas, localmente denominadas coxilhas, cobertas de campos de pastagem natural. Em meio aos campos é comum a presença de capões isolados de mata de pequeno e grande porte (SEPLAN, 1986). Reinert et al. (2007) ainda mencionam que, junto a ocorrência do dissecado relevo de colinas sedimentares, há a ocorrência de amplas planícies aluviais.

Segundo Schmitt (2015), a região da Depressão Central do Rio Grande do Sul é composta predominantemente por rochas sedimentares pertencentes à Bacia do Paraná provenientes de sedimentos de áreas elevadas adjacentes desgastadas a partir do Período Devoniano. Esta região apresenta uma complexa sucessão de diferentes tipos de rochas sedimentares, antigamente considerada predominantemente Formação Rosário do Sul (STRECK et al., 2008).

Assim, a partir de levantamento realizado em 2006 a Formação Rosário do Sul foi alçada a categoria de grupo. Neste grupo foram separadas três Formações geológicas: Formação Sanga do Cabral, Formação Santa Maria e Formação Caturrita (CPRM, 2006) havendo ainda outra formação expressiva que cobre a área segundo o mapa publicado pela CPRM (2006) que é a Formação Piramboia composta de sedimentos mais antigos.

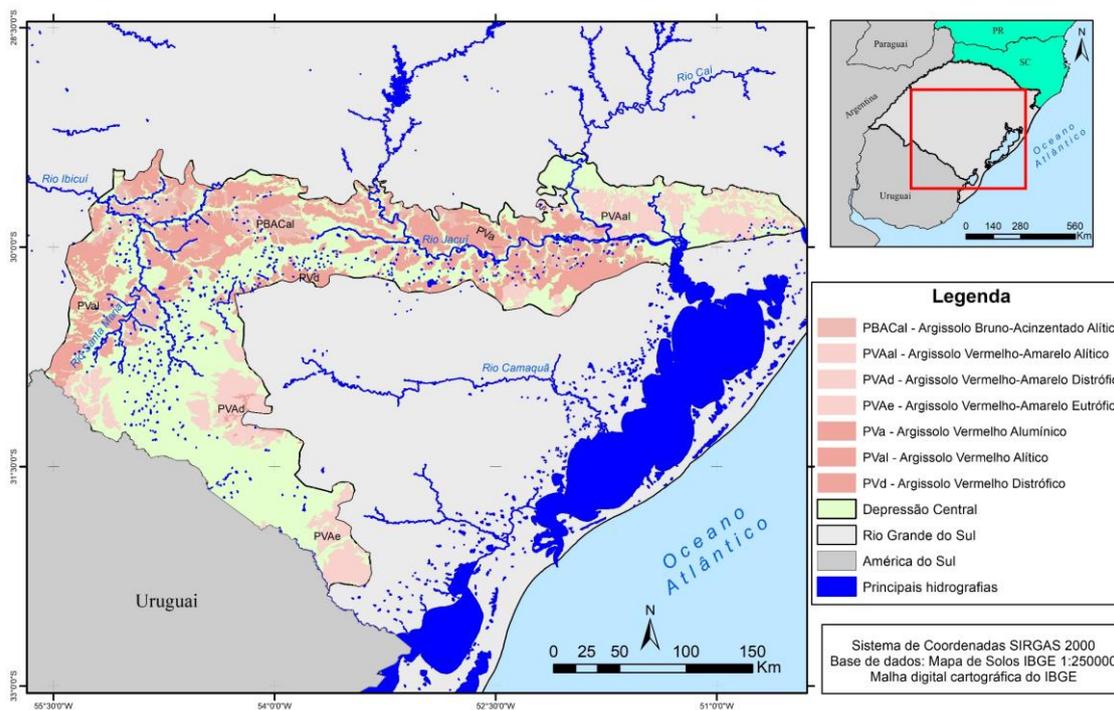
Ainda segundo Schmitt (2015), nestas legendas pode-se ainda observar que a Formação Caturrita é a formação superior do Grupo Rosário do Sul e é composta por arenitos, conglomerados e siltitos enquanto a formação intermediária, Formação Santa

Maria, é formada por arenitos e arenitos conglomeráticos, com pelitos subordinados. Já a Formação Sanga do Cabral é a formação inferior e formada por brechas, siltitos e raros argilitos.

Na área de abrangência deste estudo, predominam materiais geológicos pertencentes às Formações Santa Maria. Segundo Reinert et al. (2007), a Formação Santa Maria apresenta dois fácies. Um inferior, Membro Passo das Tropas, e outro superior, chamado Membro Alemoa. O Membro Passo das Tropas trata-se de um arenito de granulação grosseira, apresentando-se permeável. Já o Membro Alemoa constitui-se de siltito e argilito, apresentando-se impermeável (MACIEL FILHO, 1990).

Assim, sobre os arenitos, siltitos e argilitos das formações sedimentares da Depressão Central Sul-riograndense ocorrem Argissolos nas áreas de boa drenagem e na meia encostas sob drenagem imperfeita. Na figura 1 ilustra-se a distribuição da ocorrência de Argissolos na Depressão Central Sul-riograndense.

Figura 1 - Distribuição dos Argissolos na Depressão Central Sul-riograndense



Fonte: Autor, adaptado de IBGE (2015).

Os Argissolos caracterizam-se como naturalmente pouco férteis. Apresentam baixa disponibilidade de nutrientes para as plantas, baixa capacidade de troca de cátions e baixa saturação por bases, pobres em matéria orgânica (PEDRON et al., 2019).

A tabela 1 traz a participação da ocorrência das classes de solo na Depressão Central Sul-riograndense sobre a Formação Santa Maria. Nela é possível observar a predominância da ocorrência de Argissolos entre as demais classes sobre a área de abrangência da Formação Santa Maria.

Tabela 1 - Área e expressão da participação dos solos da Depressão Central Sul-riograndense sobre a Formação Santa Maria, segundo IBGE (2015).

Ocorrências	Área (km ²)	%
Formação Santa Maria	2.403,33	100%
Área urbana	86,04	3,58%
Corpos d'água continental	21,53	0,90%
Cambissolo Flúvico	36,59	1,52%
Chernossolo Argilúvico	24,38	1,01%
Nitossolo Vermelho	42,22	1,76%
Argissolo Bruno-Acinzentado	434,74	18,09%
Argissolo Vermelho Alumínico	1.094,26	45,53%
Argissolo Vermelho-Amarelo	354,26	14,74%
Neossolo Litólico Eutrófico	35,18	1,46%
Neossolo Litólico	7,63	0,32%
Neossolo Flúvico Ta Eutrófico	0,01	0,00%
Planossolo Háptico Eutrófico	64,03	2,66%
Luvissolo Háptico Órtico	202,45	8,42%
TOTAL	2.403,33	100%

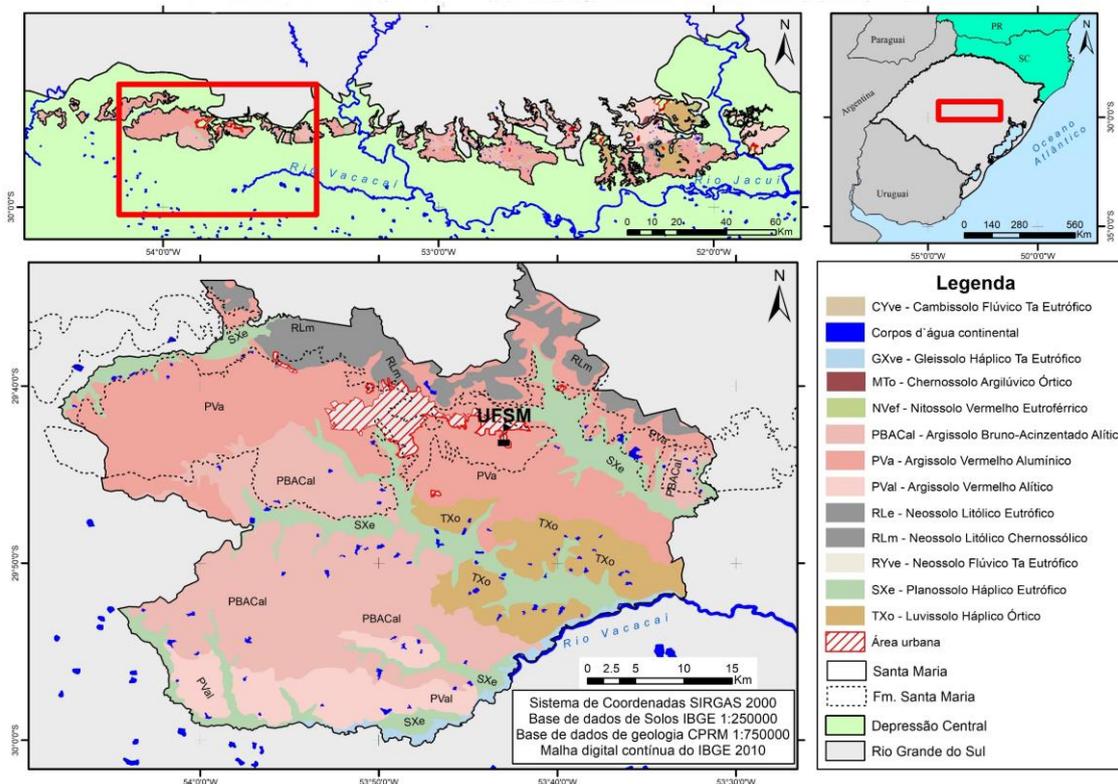
Fonte: Autor, adaptado de IBGE (2015).

Sobre a Formação Santa Maria apresentam-se, entre outras unidades de mapeamento de solo, as unidades de mapeamento São Pedro e Santa Maria (BRASIL, 1973). No segmento oeste-leste da Depressão Central Sul-riograndense, correspondente a bacia de drenagem do Rio Jacuí, as unidades de mapeamento de solos predominantes são a Unidade São Pedro (Argissolo Vermelho/Vermelho Amarelo), ocupando posições de topo, e a Unidade Santa Maria (Argissolo Amarelo/Bruno Acinzentado) concentrando-se nas posições de encosta e pedimento (SCHMITT, 2015).

Segundo Streck et al. (2008), essas unidades de mapeamento ocorrem alternadamente acompanhando a litologia aflorante constituída de siltitos, argilitos ou arenitos até próximo a confluência dos rios Vacacaí e Jacuí.

Na figura 2 apresenta-se o levantamento de solos para a região de Santa Maria, salientando a ocorrência dos solos. Nela é possível observar a predominância de Argissolos vermelhos e brunos (representados nas colorações vermelho claro).

Figura 2 - Levantamento de solos do Município de Santa Maria e da Formação Santa Maria, segundo IBGE (2015).



Fonte: Autor, adaptado de IBGE (2015).

Os solos dessas duas unidades de mapeamento têm como características serem solos profundos onde a textura superficial é arenosa a média e textura subsuperficial é argilosa por apresentar translocação iluvial de argilas para o horizonte B conferindo um gradiente textural elevado (STRECK et al., 2008). De acordo com Brasil (1973); IBGE (1986); Schmitt (2015), esta é a característica que mais se destaca entre os solos da Depressão Central Sul-riograndense, denotando a extensão da expressão dos Argissolos ao longo desta região.

Assim, a presença de um horizonte superficial de textura arenosa confere a estes solos suscetibilidade a processos erosivos superficiais. A baixa reatividade das areias, juntamente com baixos teores de matéria orgânica e argilas, proporciona fraca agregação oferecendo pouca resistência mecânica a estes solos, (PEDRON et al., 2019).

Essa fragilidade textural, como caracterizada por Castro (2015), típica de solos com horizonte superficial mais arenoso, está associada à altas taxas de decomposição da matéria orgânica e à fraca agregação. O que predispõem a uma fragilidade estrutural características da baixa estabilidade dos agregados e de solos com estrutura pouco desenvolvida (ALBUQUERQUE ET AL., 2000).

Somado a isso, a posição destes solos na vertente e sua situação no declive os suscetibiliza a ação da gravidade, o que segundo Kawakubo et al. (2005), pode ser considerado como uma fragilidade potencial, que vulnerabiliza ainda mais estes solos aos processos erosivos de degradação e perdas. Ainda segundo Pedron et al. (2019.), a Região da Depressão Central Sul-riograndense, possui baixas precipitações e temperaturas mais elevadas onde, associadas a característica de solos arenosos de alta porosidade, leva a maiores taxas de degradação da matéria orgânica e o decréscimo na estrutura do solo e estabilidade estrutural como dito anteriormente.

Assim, a matriz mineral com baixo teor de argila, as mineralogias quartzosas e caulínicas (baixa CTC) além do clima quente, dificultam a manutenção dos níveis de matéria orgânica fazendo destes solos frágeis. Isto ocorre porque possuem baixa capacidade de proteção à matéria orgânica, o que impõem alto risco de degradação.

Desta maneira, o efeito da matéria orgânica sobre a estabilidade de agregados nos frágeis solos da Região da Depressão Central Sul-riograndense sugere a necessidade de estudos mais aprofundados uma vez que as características da matriz mineral destes solos influenciam a quantidade e qualidade de sua matéria orgânica, e esta, por sua vez, a qualidade estrutural destes solos. Frente a um cenário de mudança climática, este quadro provavelmente se apresente ainda mais crítico em relação a estabilidade da paisagem, uma vez intensificando seus processos.

2.1.2 A fisiologia da paisagem

Segundo Bertrand (1972), “a paisagem enquanto entidade global, admite que os elementos que a constituem participam de uma dinâmica comum que não corresponde obrigatoriamente à evolução de cada um dentre eles tomados separadamente”. Isto move-nos a buscar os mecanismos gerais da paisagem.

Para tanto, Ab’Saber (1969) ao propor níveis metodológicos para estudos em geomorfologia delimita três etapas fundamentais para o estudo do relevo. Em um

primeiro momento, ele propõe a caracterização e descrição das formas do relevo, o que seria a “compartimentação topográfica” da região em estudo.

Em um segundo momento, propõe a descrição sistemática da estrutura superficial e seus elementos constituintes na “fisionomia da paisagem”. E, por fim, o estudo dos processos atuais, seus mecanismos, o que se trata da “fisiologia da paisagem”.

Nestas duas primeiras etapas do estudo geomorfológico utiliza-se de dados provenientes da geomorfologia no transcorrer do tempo possibilitando as primeiras proposições. Já a “fisiologia da paisagem” busca entender o funcionamento atual, dando relevância aos processos morfoclimáticos e pedológicos (NAKASHIMA et al., 2017).

Portanto, em seu terceiro nível de pesquisa geomorfológica, procura-se a compreensão da “fisiologia da paisagem” entendida pelas relações entre as interações climáticas e hídricas sobre os processos da crosta terrestre através do tempo (AB’SABER, 1969). Enquanto a dinâmica hídrica ocorre na superfície e subsuperfície, os processos induzidos por organismos vivos e pelo homem ocorrem justamente nos solos e expressam-se nas vertentes.

Os níveis propostos por Ab’Saber (1969), favorecem o conhecimento da evolução das paisagens apresentando grande utilidade para os estudos de geografia física, enfatizando a relevância do conhecimento dos solos e sua dinâmica para estas pesquisas. Desta maneira, os solos assumem protagonismo fundamental nos estudos de paisagem uma vez que é a partir deles que ocorre a interação entre a geologia, geomorfologia e atmosfera, fazendo da escala dos solos o ponto onde se dão os processos mais facilmente perceptíveis, permitindo seu reconhecimento.

Sendo assim, enquanto a paisagem é uma categoria analítica da geografia, o solo apresenta-se como um de seus elementos. Seu estudo então faz-se fundamental quando revela os processos que atuam das rochas as formas do relevo.

Assim o solo enquanto corpo tridimensional impõem a necessidade de estudos integrados de geologia, geomorfologia e pedologia, fazendo dos estudos de solos um ramo natural da geografia, uma vez que partem de outros ramos da análise geográfica gerando dados que retornam para a paisagem. Portanto, o produto dos estudos pedológicos traz não só uma retomada à paisagem, mas implica em conhecer as escalas adequadas de cada um dos fenômenos abordados para permitir encontrar metodologias para estudos dessa natureza (NAKASHIMA ET ALI, op. cit.).

Dessa forma, o avanço da pedologia permite desvendar o funcionamento da paisagem uma vez que a proposta de Ab’Saber (1969), reserva à pedologia um papel

central na compreensão da cinética da paisagem, permitindo revelar assim seu funcionamento. Portanto, o estudo e observação dos processos que levam ao desenvolvimento de paisagens no tempo é um importante pré-requisito para entender os processos que estão ocorrendo e para o prognóstico de tendências futuras (FURTADO, 2018).

Assim, as projeções de características atuais e de suas modificações talvez possibilitem antecipar eventos e intensidades que levam a novos estados processuais. A exemplo de possíveis modificações na estabilidade dos meios em razão da intensificação dos atuais processos erosivos frente a modificações de variáveis climáticas, como a temperatura.

No que diz respeito a área de abrangência deste estudo, Werlang (2004), ao estudar a configuração da rede de drenagem e modelado do relevo em uma área de litologias sedimentares frágeis na Depressão Central Sul-riograndense coloca que a erosão é o processo mecânico que atua na superfície e em profundidade que se apresenta como a degradação, transporte e deposição de partículas de solo através da ação dos agentes erosivos. Também afirma que o processo erosivo causado pelas águas das chuvas e das águas correntes superficiais é um dos principais responsáveis pela dissecação do relevo a partir de fluxos hídricos concentrados e que esta dinâmica erosiva é a gênese das formas atuais do relevo regional.

Assim, para Werlang (2004), a relação entre a erosão e a rede de drenagem é tão próxima que permite considerar a configuração da rede de drenagem como resultado da ação erosiva sobre os solos e as camadas mais superficiais dos materiais litológicos. Podendo-se então identificar a causa do modelado como consequência da sucessão de eventos de erosão e deposição ocasionando áreas de dissecação e acumulação sobre os materiais superficiais e subsuperficiais face a sua natureza geomórfica, a exemplo da coesão de seus materiais constituintes, fazendo com que a dinâmica da paisagem em uma bacia hidrográfica da Depressão Central Sul-riograndense seja regida pelos processos erosivos de denudação/dissecação e deposição/acumulação sobre solos formados a partir de frágeis litologias sedimentares.

Desta forma, a dinâmica erosiva é proveniente da alteração e transporte de materiais litológicos preparados para a denudação através dos processos pedogenéticos nos mantos de alteração (ESPINDOLA, 2010). Enquanto para Selby (1993), a pedogênese é produto da interação de diversos fatores e que, por sua vez, também modifica estes fatores onde movimentos de bases, matéria orgânica e argila reduzem a espessura dos

horizontes fazendo com que as transferências pedológicas mudem as propriedades físicas do solo, modificando também a resistência aos futuros processos morfogenéticos.

Assim, Millot (1983), ao considerar o intemperismo e a pedogênese, os entende como fatores muito ativos e intermediários entre o embasamento rochoso e a denudação. Destacando que o papel do intemperismo é o da desagregação, com transformação volumétrica da rocha, e o da pedogênese, os mecanismos de dissolução, hidrólise e lixiviação, muito ativos próximos à superfície, promovendo a transformação dos produtos da alteração preparando os horizontes superficiais para a ação da denudação.

Desta forma, Werlang (2004) coloca que, os solos são um meio intermediário entre os agentes meteorológicos e a litosfera, podendo-se assim considerar que a evolução morfogenética do relevo faz-se em função da evolução dos solos. Uma situação de equilíbrio entre clima, relevo e vegetação ocasionaria o paralelismo dos horizontes ao longo da vertente caracterizando um estado de bioestasia (ERHART, 1956). Enquanto desequilíbrios climáticos, tectônicos, antrópicos ou retirada da vegetação acelerariam os processos de desgastes (morfogênese) em relação a decomposição das rochas (pedogênese), caracterizando um quadro de resistasia. Essa situação de resistasia favorece a denudação acelerada e processos erosivos levando a estados de instabilidades dos meios, como proposto por Tricart (1977).

Para melhor entender esta dinâmica, traz-se este tema segundo o geógrafo Jean Tricart quando aborda o assunto no seu modelo ecodinâmico proposto em 1977. Nele é esboçado o funcionamento de um sistema geomorfológico exemplificando o funcionamento da paisagem e seus graus de instabilidade em função do predomínio bioresistático dos meios em um sistema de níveis de interação entre a radiação incidente, a atmosfera e a litosfera.

2.1.3 O modelo ecodinâmico de Tricart

Tricart (1977) sugere, em seu modelo de funcionamento de um meio geomorfológico publicado sob o título de Ecodinâmica, aqui parcialmente transcrito, que em um primeiro momento a radiação solar incidente seria parcialmente absorvida pela atmosfera, o que proporcionaria aquecimento. E que a partir de então, o incremento energético nos gases atmosféricos, majoritariamente gás carbônico e vapor d'água, conferiria movimento e circulação devido as diferenças de temperaturas e diferentes densidades, ficando sujeitos a diferentes respostas da ação da gravidade.

Neste caso, o contato de massas de ar de diferentes temperaturas leva a condensação da umidade atmosférica gerando precipitações devido a circulação atmosférica. Atraídas pela gravidade da terra, as gotas de água da chuva precipitariam em direção à superfície, sendo então interceptadas pela vegetação.

Em um segundo momento, o autor explica que ao nível de interação com a vegetação, parte da radiação incidente seria utilizada para fotossíntese pela vegetação, enquanto o gás carbônico participa da síntese de carboidratos. Sendo estes os principais constituintes dos tecidos vegetais.

Uma vez que a gravidade confere aceleração às gotas de chuva estas chegam à superfície terrestre com uma velocidade adquirida de nove metros de queda livre, que é permitida pela resistência do ar. Assim as gotas são carregadas de certa quantidade de energia cinética, que caso não serem interceptadas pelas plantas, tocam e transferem esta energia ao solo.

Em um terceiro momento Tricart (1977) coloca que ao nível da superfície de solo, quando não há interceptação energética pela cobertura vegetal e as gotas atingem o solo, ocorrem duas situações no que diz respeito aos fluxos hídricos. Por um lado, a água pode infiltrar e participar da elaboração dos solos e do desenvolvimento vegetal e de todo ecossistema (biostasia). Caso a água não infiltre, ela escoar e volta rapidamente para o oceano (resistasia), sendo que do ponto de vista ecológico, este segundo aspecto é de crucial importância.

O escoamento superficial ocorre quando não há mais condições de infiltração da água no solo. Normalmente isto deriva do fato do solo já estar saturado, com todos os poros cheios de água, mas em contrapartida, o escoamento superficial pode se dar pelo selamento dos poros superficiais do solo, dando início ao fenômeno da erosão pluvial.

Para Tricart (1977) a erosão pluvial é o momento quando os agregados do solo são destruídos pela incidência das gotas da chuva. Os agregados dos solos são formados por fragmentos minerais cimentados por diversos materiais como a argila, o carbonato de cálcio, o óxido de ferro e a matéria orgânica.

Assim, a resistência mecânica dos agregados do solo é a razão de suas forças de ligação entre agregados, e é determinada pelas relações de carga entre as partículas e seus cimentantes. Já a erosão pluvial é resultado da energia cinética incidente no solo e da resistência mecânica que os agregados apresentam às forças destrutivas das chuvas incidentes, sendo esta dependente das características do solo e muito influenciada pelo material de origem e conteúdo de matéria orgânica.

Desta forma, Tricart (1977) sugere que a energia cinética das gotas de chuva sobre o solo depende das características das precipitações e da cobertura vegetal, sendo que a erosão pluvial é retardada por uma cobertura vegetal densa ou por camadas de detritos vegetais, principalmente folhas mortas, intervindo de duas maneiras principais no regime hídrico do ecossistema: a interceptação das precipitações e amortecimento da energia cinética.

Caso isso não aconteça, o impacto da gota quando carregado de energia suficiente provoca a fragmentação dos agregados do solo como uma pequena explosão: efeito “Splash”. Partículas minerais separadas do agregado saltam em todas as direções e caem no solo. A água que se infiltra as carrega para os poros do solo que ao se obstruir, depois de certo tempo, impermeabilizam a superfície do solo.

Para este autor a impermeabilidade da superfície do solo devido à erosão pluvial é o principal fator do escoamento superficial. É isto que permite esse fluxo mesmo em um solo longe de estar saturado, no qual permanecem muitos poros ainda não totalmente preenchidos com água, ou seja, um solo cujo potencial de armazenamento de água ainda não está completo, o que, do ponto de vista ecológico, é contraproducente. Como resultado o solo não poderá utilizar totalmente sua capacidade de armazenamento de água, menos água ficará disponível para a vegetação entre as chuvas devido ao armazenamento insuficiente e a falta de água também reduzirá o desenvolvimento vegetal.

Segundo Tricart, baseado na teoria da Bioresistância de Erhart (1956), há um antagonismo entre pedogênese e morfogênese e a manutenção da vida neste sistema. Enquanto a pedogênese promove condições favoráveis ao desenvolvimento e evolução de organismos e cadeias tróficas com a disponibilização de elementos químicos para a síntese dos tecidos dos organismos a partir dos minerais intemperizados das rochas, o escoamento superficial promove a morfogênese.

Para Tricart, a morfogênese é o componente mais importante da dinâmica da superfície da Terra, pois cria a instabilidade da superfície, que é um fator limitante da evolução biológica. Assim, onde a morfodinâmica é intensa, a vegetação é esparsa e muito aberta, com reduzida biomassa e baixa biodiversidade.

O conceito de estabilidade então se aplica à interface entre a atmosfera e a litosfera quando o modelo evolui lenta e imperceptivelmente, enquanto os processos mecânicos são lentos, as vertentes mantêm a mesma inclinação ou suavizam muito lentamente.

Meios como estes possuem vegetação bastante fechada e dissecação moderada com predominância de fluxos hídricos de infiltração favorecendo a pedogênese. Neste

caso, mantem-se o paralelismo dos horizontes pedológicos uma vez que a dissecação não predomina ao intemperismo.

Já nos meios instáveis, por outro lado, a morfogênese mostra-se um componente importante da dinâmica natural, subordinada aos fenômenos climáticos. Esses meios são produzidos no escoamento superficial, onde a vegetação e, conseqüentemente, a bioestasia é suprimida. Este estado não ocorre de maneira natural com muita frequência, e os impactos antrópicos somados a eventos climáticos intensificam os processos de degradação.

Assim, para Tricart (1977), em um caso típico de resistasia, a ativação morfodinâmica repentina destrói rapidamente os solos já existentes. No entanto, este tipo de degradação não é apenas a erosão do solo, significa que todos os materiais produzidos estão sujeitos à degradação como Formações e rochas da superfície terrestre.

A abrupta ablação de materiais provenientes do intemperismo não permite a pedogênese nem a formação de camadas de solos caracterizando sua ausência. Assim, a pedogênese é interrompida e seus efeitos anulados pela morfogênese.

Dessa forma, uma vez ponderando os efeitos da permeabilidade e escoamento superficial, pode-se dizer que há propriedades do solo reguladoras de qualidade ambiental, já que estas determinam a estabilidade dos meios onde se desenvolvem os ecossistemas. Estas propriedades são dinâmicas e estão sujeitas as variações ambientais.

2.2 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO E MUDANÇA CLIMÁTICA

As ocorrências de grandes mudanças ambientais relacionadas com as flutuações climáticas são reconhecidas como Mudanças Climáticas (Vitousek et al., 1997; Steffen et al., 2004; Dearing et al., 2006). Estas mudanças representam um novo cenário para as sociedades humanas e suas relações com o meio ambiente (GARCÍA-RUIZ et al., 2015).

Uma elevação nas concentrações atmosféricas de gases do efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono, é considerado ser o principal responsável pela maior parte do aquecimento global (Dhillon; von Wuehlsch 2013; Hassan et al. 2014; Urata et al. 2015; Wang et al. 2016). Enquanto para Allen et al. (2011), os fatores envolvidos nas mudanças climáticas são a alteração nas concentrações de gás carbônico, na intensidade das chuvas e na temperatura.

De acordo com as conclusões do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), considera-se a possibilidade de que haja um aumento de eventos

climáticos extremos. Estes eventos podem ser entendidos como ondas de calor, aumento das chuvas que levam a inundações, menos dias frios e temperaturas mínimas mais elevadas (GONZÁLEZ et al., 2006). Assim, os efeitos esperados das mudanças climáticas são o aumento de temperaturas, as modificações nas precipitações, o aumento na concentração de gases do efeito estufa, a elevação do nível dos mares e o aumento de virulência de patógenos (GONZÁLEZ et al., op. cit).

Em 130 anos, de 1880 a 2012, a temperatura média global da superfície terrestre aumentou 0,85°C. Estima-se que o aquecimento global pode atingir um aumento de 0,3 a 4,8°C até o final do século XXI (IPCC, 2013).

O quarto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), avaliou uma série de cenários de futuras emissões de gases de efeito estufa sem políticas específicas para reduzir as emissões, e concluiu que isso levaria a um aumento em temperaturas médias globais entre 1,6°C e 6,9°C até o final do século XXI. Embora muito da atenção política mundial esteja voltada para o potencial de aquecimento global de 2°C em relação a era pré-industrial, as projeções claramente sugerem que níveis muito maiores de aquecimento são possíveis até o final do século na ausência de mitigação (BETT et al., 2011).

Enquanto isso, Allen et al. (2011), destacam uma série de propriedades dos solos com potencial como indicadores da qualidade do solo. Estas propriedades estão sujeitas a alterações em razão da influência de mudança nos parâmetros climáticos como o impacto do aumento da temperatura. As principais propriedades da qualidade dos solos afetadas pelas mudanças climáticas são um grupo de parâmetros biológicos, químicos e físicos mensuráveis e capazes de avaliar o estado da qualidade dos solos relacionados a processos funcionais afetados pelos fatores envolvidos nas mudanças climáticas.

Para Allen et al. (2011), embora muitos estudos progrediram no esclarecimento das relações entre propriedades dos solos e sua resposta a fatores das mudanças climáticas, ainda não foi possível elucidar a questão de forma satisfatória. Segundo os autores, o esclarecimento de tais questões depende da capacidade de esclarecer as complexas interações entre as propriedades com funções no solo, com os elementos das mudanças climáticas.

2.2.1 Propriedades biológicas e químicas do solo afetadas pelas mudanças climáticas

Sob condições de mudança climática, os indicadores biológicos formam um componente integral na avaliação da qualidade do solo. Isto pois, eles envolvem sistemas adaptativos complexos, integrando os principais processos do solo de maneiras que outros indicadores não fazem (RITZ et al. 2009).

A matéria orgânica do solo compreende uma extensa gama de componentes vivos e não vivos e tem sido amplamente reconhecida como um dos componentes mais complexos e heterogêneos dos solos, que variam em suas propriedades, funções e taxas de renovação (WEIL; MAGDOFF, 2004). A exemplo disso, a matéria orgânica é considerada um importante atributo da qualidade do solo devido às muitas funções que fornece, incluindo a contribuição para as características como afetar a estabilidade do agregado, a retenção de água e as propriedades hidráulicas de infiltração e permeabilidade (WEIL; MAGDOFF, 2004; HAYNES, 2008).

Como a matéria orgânica regula a maioria das funções do solo, a sua diminuição pode levar à redução da fertilidade e da biodiversidade. Por conseguinte, a perda de matéria orgânica pode levar à perda da estrutura do solo, resultando em redução da capacidade de retenção de água, aumento da densidade do solo, conseqüentemente sua compactação e aumento do risco de erosão por escoamento superficial (WEIL; MAGDOFF op. cit.).

Segundo Rinnan et al. (2007), os indicadores de matéria orgânica do solo têm sido usados em experimentos para a avaliação das mudanças climáticas uma vez que a matéria orgânica está prevista para declinar com o aumento das temperaturas médias globais. Isto teria efeitos adversos em funções e processos importantes do solo bem como de sua qualidade (LAL et al., 2007).

Segundo Wang et al. (2013), sob um cenário de mudança climática, um aumento na temperatura do solo poderia acelerar a decomposição da matéria orgânica do solo, embora a resposta desta à temperatura elevada permaneça cientificamente controversa e sem consenso (AGREN; WETTERSTEDT, 2007). Em geral, o aumento da temperatura tem sido relatado como capaz de aumentar a decomposição da matéria orgânica do solo. Porém, o aumento da temperatura e da precipitação, a fertilização com CO² e a deposição de nitrogênio atmosférico, por ionização durante tempestades, podem sustentar a alta produtividade das plantas e a entrada de matéria orgânica no solo e, conseqüentemente,

umentar a matéria orgânica dos solos, no caso da presença de cobertura vegetada, Allen et al. (2011), o que sugere a obrigatoriedade da manutenção de ecossistemas ativos.

Já a biomassa microbiana, o componente vivo da matéria orgânica do solo, é considerada o carbono mais lábil do reservatório dos solos e um indicador sensível de mudanças nos processos do solo. Seu uso como indicador da qualidade do solo está atualmente limitado devido à indisponibilidade de valores de referência, dificuldade de interpretação e custo-benefício dos procedimentos de medição (DALAL, 1998). No entanto, a biomassa microbiana do solo, semelhante ao carbono lábil, mostra ser responsiva a mudanças ambientais de curto prazo (HAYNES, 2008).

Quanto as propriedades químicas da qualidade do solo relevantes em relação com as mudanças climáticas estão o pH, a capacidade de adsorção e a troca catiônica e a disponibilidade de nutrientes nas plantas. O pH do solo é função do material de origem, do tempo de intemperismo, da vegetação e do clima. Ele é considerado um dos parâmetros dominantes da qualidade de um solo. Tem a tendência de mudar em função de uma vasta gama de fatores como acidificação, salinização, desenvolvimento de lavouras e vegetação, disponibilidade de nutrientes e ciclagem e atividade biológica (DALAL; MOLONEY, 2000).

Brinkman e Sombroek (1999), sugerem que a maioria dos solos não apresentariam uma rápida mudança de pH em função de mecanismos das mudanças climáticas, tais como elevação de temperaturas e elevação das concentrações de CO₂. Mas, no entanto, é provável que estes mecanismos de mudanças climáticas irão afetar o estado e dinâmica da matéria orgânica, a ciclagem do carbono e de nutrientes, a disponibilidade de água para as plantas e a fertilidade, que no seu devido tempo irá afetar o pH do solo (ALLEN et al., 2011).

A capacidade de adsorção e capacidade de troca catiônica (CTC) é considerada um importante determinante da qualidade química de um solo, particularmente pela retenção de K, Ca e Mg, imobilização de cátions tóxicos Al e Mn, bem como a imobilização de pesticidas e materiais químicos (Ross et al. 2008). Em solos de baixa reatividade, como em solos arenosos, a CTC é predominantemente proveniente da matéria orgânica do solo (WEIL; MAGDOFF, 2004). Assim, um aumento na taxa de decomposição matéria orgânica do solo devido à elevação de temperaturas pode levar a uma redução da capacidade de troca de cátion e, conseqüentemente, um decréscimo em propriedades como fertilidade e suas derivações (JANSSENS, 2006).

2.2.2 Propriedades físicas do solo afetadas pelas mudanças climáticas

A estabilidade de agregados, a resistência dos agregados do solo à energia externa, como chuvas de alta intensidade, é determinada pela estrutura do solo e por uma série de propriedades biológicas e químicas interagindo entre si (MOEBIUS et al. 2007). É considerada como um indicador físico importante da qualidade do solo, pois está envolvido na manutenção de importantes funções do ecossistema no solo, incluindo capacidade de infiltração, movimento e armazenamento de água, atividade microbiana e radicular.

A estabilidade de agregados também é um parâmetro para medir a resistência do solo à erosão (LAL 1999; MOEBIUS et al. 2007). Pela sua associação com o carbono orgânico do solo e importantes funções do solo sua determinação pode ser útil na obtenção de estratégias de adaptação climática em áreas sujeitas a intensas chuvas e eventos erosivos (RIMAL; LAL, 2009).

Já a porosidade é uma medida da fração dos espaços vazios dos solos e fornece uma estimativa direta e quantitativa da capacidade de um solo de armazenar água e ar (REYNOLDS et al. 2002). Cenários futuros de mudanças climáticas (por exemplo, temperaturas elevadas) podem alterar as atividades biológicas alterando a porosidade do solo e a distribuição do tamanho dos poros e, conseqüentemente, as funções do solo podendo ser afetadas pelas mudanças climáticas (ALLEN et al., 2011).

A infiltração de água no solo, a taxa na qual a água entra na superfície do solo e se move em profundidade, pode mudar significativamente com o uso do solo. A disponibilidade de água para o crescimento das plantas e importantes processos do solo, como morfogênese e pedogênese, é governada por uma série de propriedades do solo, incluindo porosidade e textura (JARVIS, 2007).

A densidade aparente caracteriza o estado de compactação do solo em resposta ao uso da terra (HAKANSSON; LIPIEC, 2000). É considerada um indicador útil para a avaliação da qualidade do solo com respeito às funções do solo, como aeração e infiltração (REYNOLDS et al., 2009).

Como a densidade aparente é geralmente correlacionado de maneira inversa com a matéria orgânica do solo ou conteúdo carbono orgânico, a perda de carbono orgânico por decomposição aumenta a densidade aparente (DAVIDSON; JANSSENS, 2006). Isto torna o solo mais propenso à compactação por meio de atividades de manejo da terra e

estresses das mudanças climáticas, como por exemplo, chuvas variáveis e de alta intensidade e eventos de seca (BIRKAS et al. 2009).

A cobertura da superfície do solo (por exemplo, uma camada de resíduos de culturas ou serrapilheira) também é uma propriedade indicadora da qualidade dos solos pois fornece uma série de funções ecológicas importantes, incluindo a proteção da superfície do solo por dissipação da energia de impacto da gota de chuva, estabilização do solo e retenção de água e nutrientes (BOX; BRUCE, 1996). Dalal e Moloney (2000) observam que a cobertura da superfície do solo fornece um indicador integrado de manejo físico do solo, entrada de matéria orgânica e efeitos associados à erosão e escoamento, por ser uma característica dinâmica e sujeita a oscilações.

Assim, as propriedades indicadoras de qualidade de solos são interligadas e também são os fatores da mudança climática. O entendimento do impacto da qualidade do solo em relação a mudança climática é possível através do uso de propriedades indicadoras (valores ou atributos mensuráveis) que relacionem propriedades biológicas, químicas e físicas a funções ecológicas dentro do contexto qualidade do solo e mudança climática.

Indicadores chave da qualidade do solo afetados pela mudança climática incluem a estabilidade de agregados, a matéria orgânica do solo, o ciclo do carbono e a biomassa do solo. A seleção de indicadores dentro de um conjunto mínimo de dados depende da sua sensibilidade à gestão e às mudanças climáticas, capacidade de integrar e relacionar-se com outras funções do solo, facilidade de uso, repetibilidade e custo de medição. Este conjunto mínimo de dados conseguiria então estimar o efeito de uma mudança climática na qualidade do solo (ALLEN et al., 2011).

Nesta perspectiva, o estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo sob efeito da temperatura e suas implicações sobre a estabilidade de agregados do solo tem sua pertinência quando discute a resposta da estrutura do solo a variações no parâmetro climático temperatura. Assim, a escolha da avaliação da estabilidade de agregados como parâmetro de modificação processual pedológico mostra-se bastante plausível.

Portanto, em um cenário de mudança climática, entender a resposta da matéria orgânica do solo e da estabilidade dos agregados ao aumento de temperatura é importante (WANG et al., 2016). Ora para um melhor entendimento e manutenção de benesses ambientais relevantes como a fertilidade do solo, produtividade das culturas e propriedades derivadas, ora para a compreensão de processos ambientais chave intimamente relacionados com a manutenção de outros benefícios ambientais regulatórios

como a infiltração das águas no solo, a mitigação da erosão e seu impacto no ecossistema como um todo.

2.3 ESTRUTURA DO SOLO, AGREGAÇÃO E MATÉRIA ORGÂNICA

2.3.1 Estrutura e matéria orgânica do solo

O aumento das perdas de solo está comumente associado com mudanças na estrutura do solo (BIRD et al., 2007). A estrutura do solo é reconhecidamente responsável por controlar diversos processos no solo (RABOT et al., 2018) enquanto regula a retenção e infiltração de água no solo, controlando os processos de morfogênese e pedogênese, as trocas gasosas, a dinâmica da matéria orgânica e de nutrientes, a penetração de raízes e a erosão.

Sendo o habitat de uma miríade de organismos do solo, a estrutura do solo regula sua atividade e sua diversidade, Elliott et al. (1988), sendo, em contrapartida, ativamente regulada por estes organismos modificando a distribuição de água e gás neste habitat (BOTTINELLI et al., 2015). O clima e a posição na paisagem têm sua influência sobre a estrutura do solo por fatores como temperatura e precipitação enquanto propriedades do solo como a textura, a mineralogia, o carbono orgânico do solo e os organismos contrapõem a influência do clima.

A estrutura do solo facilita a infiltração de oxigênio e água e pode melhorar o armazenamento de água (FRANZLUEBBERS, 2002). Neste caso, a perturbação da estrutura do solo pode resultar na rápida reciclagem de nutrientes, formação de crostas, redução da disponibilidade de água e ar para as raízes e conseqüente culminando com o predomínio da morfogênese. Dessa forma, o desenvolvimento estrutural e da agregação de um solo ocorrem no contexto dos processos pedogenéticos naturais e atividades antrópicas onde uma série complexa de adições e perdas do solo, ação de organismos e efeitos climáticos determinam o desenvolvimento e dinâmica da estrutura do solo.

Assim, a estrutura é um fator chave para o funcionamento dos solos e sua habilidade para suportar vida e regular a qualidade do meio ambiente quando sua continuidade de poros influencia a capacidade de retenção e transmissão de fluidos e substâncias orgânicas e inorgânicas, (LAL, 1991). Portanto, uma boa estrutura do solo e alta estabilidade de agregados aumentam a qualidade ambiental e a fertilidade enquanto sua porosidade diminui a erodibilidade.

A agregação é o processo pelo qual agregados de diferentes tamanhos são unidos e mantidos juntos por diferentes materiais, orgânicos e inorgânicos. Portanto, isto inclui o processo de formação e estabilização que, no campo, ocorre continuamente de maneira concomitante. Portanto, a estabilidade de agregados do solo é um indicador chave para a estrutura do solo e está correlacionada a capacidade de infiltração do solo e a erodibilidade (BIRD et al., 2007).

Desta maneira, a estrutura do solo é definida em termos de forma e estabilidade, sendo a forma o arranjo heterogêneo dos vazios e das partículas sólidas através de diferentes escalas, enquanto a estabilidade, a capacidade de manter este arranjo em um dado tempo quando exposto a diferentes estresses, Angers et al. (1998), depende de agregados estáveis. Assim, a fase sólida e os espaços porosos são aspectos complementares da estrutura do solo que podem ser abordados por ambas as perspectivas.

A perspectiva da fase sólida é baseada no mecanismo de agregação do solo sendo defendido por Tisdall e Oades (1982), onde a agregação é vista através de uma organização hierárquica de três estágios da fase sólida do solo e cada estágio envolvendo agentes ligantes distintos. Partículas primárias que se ligam entre si formando microagregados, que por sua vez ligam-se entre si formando macroagregados.

Já a perspectiva dos espaços porosos apresenta-se na combinação de diferentes tipos de poros onde a superfície das partículas do solo assume o papel de paredes do espaço poroso. Semelhante à hierarquia de agregados, há uma hierarquia de poros e dependente de seus tamanhos sendo essenciais para a transmissão, difusão e retenção de água, gases e elementos nutrientes das plantas provendo caminhos para o crescimento de raízes.

Em contrapartida, os agregados do solo são partículas secundárias da estrutura do solo formadas pela combinação de partículas minerais primárias com substâncias orgânicas e inorgânicas. O complexo dinâmico de agregação é resultado da interação de muitos fatores incluindo, ambiente, manejo do solo, composição mineralógica do solo, textura, concentração de carbono orgânico, processos pedogenéticos, atividade microbiana, capacidade de troca de íons, presença de metais e carbonatos, e disponibilidade de umidade (KAY, 1998).

O carbono orgânico do solo atua como um agente ligante e núcleo de formação de agregados. A biota e seus produtos orgânicos contribuem para o desenvolvimento da estrutura, o que a torna significativamente controlada pela dinâmica do carbono do solo.

Desta forma, o tempo de permanência do carbono no solo e sua taxa de decomposição são fatores chave na sua efetividade em influenciar a estrutura e a agregação do solo.

2.3.2 O carbono no solo

Este subtítulo discute a dinâmica do carbono no solo para, posteriormente, enfatizar seu efeito sobre a estrutura do solo. Aqui busca-se levantar as bases que o efeito da provável modificação ambiental da variável temperatura sobre a dinâmica da matéria orgânica no solo pode ter sobre os processos erosivos em alguns solos de elevados teores de areias em seus horizontes superficiais que ocorrem na Depressão Central Sul-riograndense. Para tanto, a compreensão da dinâmica da matéria orgânica no solo, a caracterização de suas frações, assim como sua função no modelo de agregação do solo e sua relação com a temperatura e com a própria erodibilidade, tornam-se fundamentais

Assim, segundo Tisdal e Oades (1982), a matéria orgânica do solo tem um papel central na ciclagem de nutrientes para as plantas, influencia as relações entre água e erosão e é um fator chave para a estrutura do solo. Proveniente das interações entre a radiação incidente sobre os organismos clorofilados e os elementos químicos oriundos da decomposição das rochas bem como presentes na atmosfera, a matéria orgânica disponibiliza aos organismos da cadeia trófica compostos energéticos e estruturais.

A partir do processo de fotossíntese ocorrem adições permanentes de material orgânico ao solo. Já a atividade biológica, através do processo de respiração, é o principal mecanismo de perda destes materiais na forma de gás carbônico e seu respectivo retorno a atmosfera (CUNHA et al, 2015).

Ainda segundo Cunha et al (2015), a vegetação é a principal fonte da origem da matéria orgânica do solo. Nela são também contabilizados os resíduos de animais mortos, excretos de organismos vivos e até mesmo populações de microrganismos e materiais carbonizados apresentando-se como um complexo de resíduos de plantas e animais em vários graus de decomposição em razão da sua labilidade. É o caso dos açúcares, amidos, celulose, hemicelulose, lignina, aminoácidos, proteínas, gorduras, óleos e ceras provenientes dos organismos bem como de complexas substâncias húmicas derivadas da ação microbiana sobre moléculas residuais provenientes da sua decomposição.

Portanto, a matéria orgânica do solo é toda fração orgânica presente no solo em forma de resíduos frescos ou em diversos estágios de decomposição, associados ou não à

fração mineral, ou composta por organismos vivos como raízes e os constituintes da fauna edáfica (ROSCOE; MACHADO, 2002).

As transformações que ocorreram desde a entrada de matéria fresca no solo até a formação das frações húmicas mais estáveis compreendem a dinâmica da matéria orgânica no solo. Estas transformações abrangem dois processos básicos. A mineralização e a humificação.

Segundo Moreira et al. (2006), durante o processo da mineralização atuam organismos trituradores, responsáveis pelo fracionamento dos resíduos orgânicos, e organismos decompositores, microrganismos em geral (fungos e bactérias) que, em virtude de ação enzimática, irão decompor estes resíduos orgânicos em subprodutos do complexo orgânico do solo. Durante a atuação dos microrganismos decompositores por ação enzimática, há a degradação de alguns componentes mais prontamente assimiláveis devido a sua labilidade.

Em um primeiro momento, há uma decomposição que transforma 70 a 80% dos resíduos lábeis (açúcares, amidos, celulose) em moléculas simples, permanecendo apenas compostos fenólicos solúveis e compostos lignificados parcialmente transformados que posteriormente serão usados nos demais processos que resultarão nas substâncias húmicas. A fração solúvel em água, polissacarídeos e as proteínas, Cunha et al. (2015), são os primeiros a serem metabolizados, enquanto a celulose e a hemicelulose têm uma sobre vida intermediária enquanto a lignina, sendo mais duradoura, torna-se o mais abundante componente da matéria orgânica do solo.

Esta fração leve (ou de baixa densidade) e os componentes macro-orgânicos da matéria orgânica dos solos consistem principalmente de partículas de plantas e resíduos animais, que servem como substrato prontamente decomposto por microrganismos do solo, bem como um reservatório de nutrientes lábil (GREGORICH et al., 1994; POST; KWON, 2000; WAGAI et al., 2009) sendo rapidamente esgotada à medida que a temperatura aumenta (DAVIDSON; JANSSENS 2006; KNORR et al. 2005).

Já no processo de humificação, os ácidos húmicos, fúlvicos e demais componentes do húmus, são formados pela ação de microrganismos especializados que transformam os restos orgânicos, provenientes da mineralização, em material humificado. Há quatro caminhos distintos propostos para a síntese de substâncias húmicas no ambiente pedológico. Embora distintos, todos convergem para a ideia de complexação, isto é, a polimerização de corpos carbônicos e nitrogenados mais simples disponíveis que, ao final, se unem em extensas e pesadas moléculas orgânicas (SILVA et al., 2009).

Segundo estes autores, as prováveis reações químicas envolvidas no processo de humificação são: a reação de amino compostos sintetizados por microrganismos com ligninas modificadas na decomposição da matéria orgânica; a oxidação de polifenóis à quinonas que reagem com amino compostos; a reação de açúcares redutores com amino compostos e a polimerização de melaninas produzidas por fungos e por actinomicetos do solo. No último mecanismo, estruturas orgânicas simples seriam transformadas em material condensado de cor escura, com teores de nitrogênio relativamente altos (BUDZIAK; MAIA; MANGRICH, 2004).

Desta forma, o húmus possui propriedades físico químicas inteiramente diferentes do material vegetal ou animal original sendo completamente distinto da biomassa do solo, dos tecidos biológicos não degradados e até mesmo dos produtos de sua decomposição (SILVA et al., 2009). Estas substâncias húmicas (ácidos fúlvicos, húmicos e humina) e outras macromoléculas orgânicas mais resistentes ao ataque microbiano compõem a fração estável da matéria orgânica do solo.

Assim, a matéria orgânica do solo apresenta-se em diferentes frações e estas frações apresentam diferentes estados de estabilidade. Desde materiais lábeis, prontamente assimiláveis pelos microrganismos, a materiais estáveis de longa duração chegando a permanecer indefinidamente na natureza, como é o caso do carbono orgânico presente nos hidrocarbonetos fósseis constituintes do petróleo (BRANCO, 2014).

Dentre os principais fatores que controlam a mineralização e humificação da matéria orgânica do solo, segundo Zech et al. (1997), pode-se citar: a natureza das substâncias orgânicas, a mineralogia, a textura, a temperatura, a acidez e os organismos do solo, além da utilização antrópica. A natureza das substâncias orgânicas refere-se da resistência destes materiais frescos à decomposição, onde o conteúdo de lignina faria a principal diferença (CUNHA et al, 2015).

Uma maior acidez do solo dificultaria a degradação da matéria orgânica por parte dos microrganismos, segundo Anderson e Joergenson (1997). Enquanto a especificidade e população de microrganismos do solo relaciona-se à eficiência de sua decomposição e a síntese de substâncias húmicas (ALEXANDER, 1967).

Os fatores relacionados a mineralogia e textura dos solos dizem respeito as interações entre a matéria orgânica e suas partículas físicas. Tamanho, natureza mineralógica e teores dos diferentes tamanhos destas partículas no solo regulam desde os tipos de ligações que as diferentes frações da matéria orgânica estabeleceram com as

diferentes partículas do solo, bem como, a própria estabilidade destas frações da matéria orgânica quando associada às partículas minerais.

Enquanto a cinética enzimática dos processos respiratórios e de decomposição é principalmente regulada pela temperatura, a textura também define a disponibilidade de oxigênio no solo para a oxidação da matéria orgânica por parte dos microrganismos através da respiração, uma vez que solos com altos teores de areias possuem maior permeabilidade gasosa em função de um maior número de macroporos.

Já a ação antrópica, por alterar drasticamente o ambiente, é capaz de modificar a maior parte dos fatores ligados a dinâmica da matéria orgânica no solo principalmente através de práticas de manejo na produção agrícola, tanto de forma positiva quanto comprometedoras, ora adicionando matéria orgânica através da incorporação de resíduos culturais e práticas conservacionistas, ora efetuando perturbações do sistema pedológico ocasionando perdas de carbono na forma de gás carbônico para a atmosfera.

2.3.3 A matéria orgânica e a estabilidade de agregados

Vários autores consideram a matéria orgânica como o componente principal de modelos de agregação do solo, entre eles Edwards e Bremner (1967), Tisdall e Oades (1982) e Six et al. (2004). Para Bayer e Mielniczuk (2008), a formação de agregados do solo ocorre pelas forças físicas envolvidas nos ciclos de umedecimento e ressecamento do solo e pela ação de compressão do sistema radicular das plantas.

A matéria orgânica, posteriormente, atua como um dos fatores determinantes na estabilização de agregados em decorrência das ligações químicas entre os compostos da matéria orgânica e as partículas minerais dos solos, de acordo com Bayer e Mielniczuk (op. cit.). Para Silva e Mielniczuk (1997), a importância da matéria orgânica para a estabilidade de agregados está intimamente ligada a textura e mineralogia do solo tendo maior importância em solos com maior intemperismo e textura arenosa.

Segundo estes autores o processo de estabilização se dá pelas ligações formadas pelos radicais dos compostos orgânicos com as cargas da superfície mineral das partículas do solo por meio de pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals. Neste modelo, os solos apresentam predomínio de cargas positivas enquanto a matéria orgânica apresenta cargas negativas, atuando assim como cimentante das partículas minerais dada a interação de tais cargas nas relações entre as partículas minerais e as moléculas orgânicas.

As partículas de argila também têm uma ação de cimentação nos agregados, mas estas ligações têm sua integridade relativa aos teores de umidade no solo. Hidróxidos de alumínio e ferro também cimentam partículas de agregados maiores que 0,1mm especialmente em solos que contêm mais de 10% destes óxidos assim como carbonatos de cálcio que também atuam como agente cimentante (Tisdall e Oades, 1982), podendo atuar de forma permanente se forem dominantes, enquanto a presença de mucilagens orgânicas seriam um incremento nesta ação cimentante. Porém, nas camadas superiores dos solos a matéria orgânica parece desempenhar um papel maior na cimentação de agregados principalmente no que diz respeito ao estresse causado por um rápido umedecimento.

Tisdall e Oades (op. cit.), sugerem que diferentes frações da matéria orgânica dos solos possuem diferentes funções na agregação do solo. Mucilagens compostas de hidratos de carbono simples, raízes e hifas de fungos, controlados pelo crescimento de plantas e pela oxidação dos processos respiratórios seriam responsáveis pela agregação dos macroagregados ($> 0,25$ mm), enquanto os microagregados ($< 0,25$ mm) dependeriam das ligações entre as estáveis substâncias húmicas com as partículas dos solos, principalmente argilas.

Assim, estes autores sugerem que os agentes orgânicos de cimentação envolvidos na estabilização de agregados podem ser considerados em 3 grupos principais em função da sua duração e estado de degradação e, ainda afirmam que a estabilidade de agregados em muitos solos é dependente dos materiais orgânicos, e os classificam como Transitórios, Temporários e Persistentes. De maneira geral, polissacarídeos, raízes e hifas; resistentes componentes aromáticos e, polímeros fortemente adsorvidos às argilas, respectivamente.

Os agentes transitórios correspondem ao material orgânico que é decomposto rapidamente pelos microrganismos. O grupo mais importante são os polissacarídeos produzidos por microrganismos, pela decomposição de materiais frescos adicionados ao solo, e polissacarídeos associados a rizosfera de origem radicular ou da biomassa microbiana (RUSSELL, 1973). Estes polissacarídeos são produzidos rapidamente, mas também são rapidamente decompostos e estão associados a macroagregados, maiores que 0,25mm de diâmetro.

Estes agentes são transitoriamente estáveis, sendo beneficiados pela adição de material orgânico ao solo (GUCKERT et al., 1975). Em uma escala de tempo, pode se dizer que substratos orgânicos prontamente disponíveis, como a glicose, tem um efeito

de algumas semanas enquanto materiais menos prontamente disponíveis como tecidos de gramíneas levam a uma elevação gradual da sua persistência por diversos meses, enquanto substratos mais duradouros como a celulose tem um efeito estabilizador que perdura por muitos meses (TISDALL; OADES, 1980).

De acordo com Martin (1971), alguns polissacarídeos podem ser protegidos da degradação microbial por associação com íons metálicos ou taninos ou por estarem adsorvidos as superfícies das argilas. Estes materiais e suas ações cimentantes podem se tornar persistentes por diversos anos cimentando partículas de argilas em agregados menores que 0,1mm (TISDALL; OADES, 1972).

2.3.4 Agentes cimentantes e o modelo hierárquico de agregação do solo

Segundo Hubbell e Chapman (1946), os agentes temporários de cimentação são as raízes e as hifas, particularmente as vesículas arbusculares das hifas micorrizais. Estes agentes desenvolvem-se nos solos em poucas semanas ou meses à medida que o sistema radicular e as hifas associadas crescem, sendo persistente por talvez anos se não forem afetadas pelo uso do solo (TISDALL; OADES, 1979).

As raízes disponibilizam não apenas resíduos orgânicos lábeis ao solo como também abrigam uma grande população microbiológica na rizosfera. Já as raízes das gramíneas agem especificamente como agentes cimentantes uma vez que proporcionam uma rede que envolve, engloba, as partículas do solo em macroagregados estáveis mesmo quando mortas (CLARK et al., 1967). Parte do efeito das plantas na estabilidade de agregados em água é devido ao fato do efeito de secagem da rizosfera, Allison (1968), uma vez que as raízes se encontram separadas por menos de 3mm, sendo que é reconhecido o efeito dos ciclos de umedecimento e ressecamento na formação dos agregados do solo (BAYER; MIELNICKZUK, 2008).

Já as hifas são pegajosas e incrustam-se às partículas as retendo estáveis por sua força em agregados do solo mesmo quando dessecados, podendo manter unidos agregados em solos de dunas arenosas (HUBBEL; CAMPBELL, 1946). Embora o efeito isolado das hifas não seja tão forte, quando combinados às finas raízes, em suas redes tridimensionais que englobam os agregados, ajudam a mantê-los coesos evitando seu rompimento quando rapidamente umidificados. Agentes temporários de cimentação estabilizam macroagregados e são relativamente grandes em sua maioria, Tisdal e Oades (1979), sendo demonstrado que enquanto raízes penetram nos macroporos, enquanto as

micorrizas desenvolvem-se majoritariamente nas partes externas dos agregados e sua persistência no solo, mesmo após a morte do hospedeiro, é de diversos meses (TISDAL; OADES, 1980).

Os agentes cimentantes persistentes constituem-se de material orgânico aromático associados a íons metálicos e a argilas formando grandes frações organominerais no solo constituindo de 52 a 98% do total da matéria orgânica dos solos (GREENLAND, 1965). Estes agentes cimentantes também podem incluir polímeros, como polissacarídeos, estabilizados pela associação com metais di e trivalentes que agirão como estabilizadores destes materiais orgânicos.

Os materiais cimentantes persistentes podem derivar de fragmentos resistentes de raízes, hifas e células bacterianas desenvolvidas na rizosfera sendo o centro da agregação de partículas de argila quando nestas adsorvidas, Marshall (1986), não sendo dessa forma uma mera película de matéria orgânica ligada a superfície das argilas (GREENLAND, 1965).

Portanto, considera-se que os microagregados podem ser estabilizados contra rupturas ocasionadas por secagem e umedecimento rápido e perturbações mecânicas, por diversos mecanismos sendo o papel dos complexos organominerais de fundamental importância onde as mucilagens de polissacarídeos também estão envolvidas. Dessa forma, a cimentação dos microagregados é relativamente permanente não sendo influenciada pelos conteúdos de matéria orgânica do solo (TISDAL; OADES, 1982).

Por outro lado, a estabilidade de macroagregados depende amplamente de raízes e hifas e, por conseguinte, do desenvolvimento do sistema radicular. O número de macroagregados diminui com a decomposição da matéria orgânica caso não seja repostada dependendo do sistema de uso do solo. Nesse sentido, a estabilização de macroagregados é controlada pelo manejo, aumentando sob pastagens e declinando com práticas de aragem em áreas agrícolas (TISDAL; OADES, 1980).

Portanto, quando um agregado é umedecido rapidamente, ele se separa em subunidades menores que podem permanecer ainda como agregados. As subunidades ou pequenos agregados resultantes da fragmentação também podem se apresentar instáveis a partir da dispersão das partículas de argilas. A dispersão espontânea ocorre quando a partícula de argila expande a tal ponto que as forças atrativas entre as partículas não são suficientes para manter a coesão (EMERSON, 1977).

Esta fragmentação é comum e ocorre em uma vasta gama de solos onde os agregados não apresentam coesão suficiente para suportar as pressões provocadas por

poro pressão, gases aprisionados na porosidade e conseqüente inchamento. A campo, esta fragmentação dos agregados ocorre principalmente nas camadas superficiais uma vez que as camadas inferiores estão protegidas da secagem ao ar e de um umedecimento abrupto (TISDAL; OADES, 1982).

Expansão e dispersão são funções das trocas iônicas associadas a superfície das partículas, entretanto, enquanto estas funções tratam-se amplamente de um fenômeno eletrostático, a estabilização de macroagregados envolve agentes de cimentação, ou ligação, que podem ser orgânicos, organominerais ou inorgânicos, como visto anteriormente.

Isto indica que agregados estáveis em água com diâmetros de poucos milímetros não são simples arranjos aleatórios das partículas da textura dos solos embora a floculação das argilas desempenhe um papel de pré-requisito para a estabilidade de agregados em água (TISDAL; OADES, op. cit.). Assim, estes autores propõem um modelo hierárquico de agregação com quatro estágios. Nele é demonstrado que há a construção das unidades estruturais de vários tamanhos (macroagregados, microagregados e partículas) e ligadas por diversos agentes cimentantes respeitando-se uma ordem hierárquica.

O principal agente de cimentação é a matéria orgânica, mesmo com variações de seus teores no solo, porém as evidências indicam que a estabilidade destas partículas, em cada um dos estágios, está associada a algum agente cimentante orgânico específico seja transitório, temporário ou permanente

Neste modelo há quatro estágios de agregação: agregados maiores que 2 mm de diâmetro, agregados de 0,25 a 0,02 mm de diâmetro, agregados de 0,02 a 0,002 mm diâmetro e agregados menores que 0,002 mm de diâmetro.

Os agregados maiores que 2 mm em solos com teores de matéria orgânica maiores que 2% teriam como principal agente cimentante a rede de raízes e hifas enquanto em solos com teores de matéria orgânica inferiores, menores que 1%, o principal agente cimentante seriam apenas agentes orgânicos transitórios. Uma vez que a estabilidade de agregados maiores que 2mm é majoritariamente regulada por raízes e hifas, sua estabilidade é controlada pelas práticas agrícolas.

Agregados de 0,25 a 0,02 mm seriam majoritariamente compostos de partículas minerais de 0,02 a 0,002 mm cimentadas por materiais orgânicos persistentes, óxidos e argilas apresentando-se estáveis, em parte por serem menores, e em parte por apresentarem diversos tipos de agentes cimentantes que atuam em um efeito aditivo e,

desta maneira, serem considerados microagregados estáveis (EDWARDS; BREMNER, 1967).

Os agregados de 0,02 a 0,002 mm de diâmetro constituem-se de partículas menores que 0,002 mm cimentadas fortemente por materiais orgânicos e, em certa instancia, pela flocculação das argilas presentes e filmes de biomassa, principalmente em agregados jovens, não sendo rompidos por práticas agrícolas, Marshall (1976). Já os agregados menores que 0,002 mm de diâmetro são flocos onde partículas individuais de argila se unem para formar uma massa onde a matéria orgânica, por efeito iônico, pode aumentar a interação das cargas nas superfícies das argilas aumentando a atração entre estas partículas.

De uma forma geral, pode-se considerar que microagregados são decorrentes principalmente de processos físico-químicos, como flocculação, adsorção, interação química (troca de ligantes) e física (atração eletrostática), tendo na matéria orgânica humificada (compostos orgânicos persistentes) um dos principais componentes responsáveis pela sua estabilidade, além dos minerais da fração argila. Em decorrência da estabilidade dos agentes orgânicos responsáveis pela sua estabilidade no solo, os microagregados são pouco alterados pelo uso e manejo do solo, sendo mais dependentes do tipo de solo (JASTROW; MILLER, 1998).

Em contrapartida, os macroagregados são de natureza biológica e a sua estabilidade depende da constante adição de resíduos vegetais. Esta constante adição visa a reposição dos compostos orgânicos transitórios (polissacarídeos microbianos) e temporários (raízes finas e hifas de fungos), os quais são os principais responsáveis pela sua estabilidade (TISDALL; OADES, 1980; SILVA; MIELNICZUK, 1997).

2.4 MECANISMOS E FATORES QUE AFETAM A AGREGAÇÃO DO SOLO

2.4.1 Mecanismos de agregação

Segundo Bromick e Lal (2005) há diversos mecanismos de agregação dos solos sendo os agregados do solo formados em diferentes estágios com diferentes mecanismos dominantes em cada estágio. Os microagregados são formados por moléculas orgânicas ligadas a argilas e cátions polivalentes para formar partículas compostas (organominerais) que por sua vez juntam-se a outras partículas compostas para formar os macroagregados (TISDALL, 1996).

Em contrapartida, os macroagregados também podem se formar em torno de fragmentos de matéria orgânica à medida que esta é decomposta e exsudatos microbianos são liberados, o macroagregado torna-se então mais estável, e microagregados se formam no seu interior.

Estes microagregados presentes no interior dos macroagregados contêm um conjunto de carbono orgânico mais recalcitrante e estável (BEARE et al., 1994). À medida que o aporte de carbono orgânico mais lábil é utilizado e a atividade microbiana diminui, o suprimento de exsudatos também diminui e o macroagregado perde estabilidade, eventualmente rompendo-se e liberando microagregados estáveis (JASTROW et al., 1998; SIX et al., 1999) enquanto raízes e hifas que envolvem liberam compostos orgânicos que agem como cola para manter as partículas unidas.

Segundo Santos et al. (1997) estas partículas podem ser rearranjadas durante o emaranhamento das raízes e hifas, enquanto os ciclos umedecimento e ressecamento ajudam a estabilizar os agregados. Enquanto isso, os microagregados bacterianos se formam a partir de colônias bacterianas e seus exsudatos formam uma cápsula polissacarídica em torno da qual as partículas de argila são alinhadas e rearranjadas por ciclos de umedecimento e ressecamento, bem como pela contração das argilas.

Assim, esta película de argila forma um revestimento protetor à colônia bacteriana inibindo a decomposição do carbono orgânico no seu interior. Esta teoria da agregação sugere que as camadas externas são construídas concentricamente sobre a superfície externa do agregado, com carbono jovem e lábil nas camadas externas do agregado (polissacarídeos) enquanto que no interior do agregado encontra-se formas mais estáveis e maduras como ácidos húmicos (SANTOS et al., 1997).

A precipitação de óxidos e carbonatos aumenta a agregação. Cátions como Si^{4+} , Fe^{3+} , Al^{3+} e Ca^{2+} estimulam a precipitação de compostos que atuam como agentes cimentantes para partículas primárias. Estes cátions também formam pontes entre as partículas de argila e a matéria orgânica do solo, resultando em agregação.

Compostos orgânicos dissolvidos podem complexar com Fe^{3+} e Al^{3+} em pHs baixos formando compostos organometálicos móveis que podem ser precipitados em outras partes do solo. Dessa forma, a complexação diminui o acesso microbiano ao carbono orgânico e a mineralização.

2.4.2 Fatores que afetam a agregação do solo

Dois grupos principais de fatores que afetam a estabilidade do agregado do solo podem ser considerados: fatores internos e fatores externos ao solo. Entre as características que compõem os fatores internos do solo estão a presença de íons (concentração e pH), a mineralogia das argilas, a presença de carbonatos, a presença da matéria orgânica e óxidos de Fe e Al.

Entre os fatores externos, pode-se citar o clima, os fatores biológicos e o uso do solo. No entanto, não se deve considerar um parâmetro desconsiderando as interações com os outros parâmetros.

Nos efeitos interativos contínuos dos processos de formação do solo as propriedades do solo, fatores endógenos, e fatores exógenos estabelecem um equilíbrio dinâmico na estrutura do solo enquanto que os agregados podem ser rompidos por uma variedade de mecanismos, dependendo da natureza dos agentes cimentantes.

A mobilização do solo pode promover a dissolução e quebra de agregados, bem como a formação de novos agregados enquanto a ingestão do solo pela fauna do solo (poliquetas) pode romper os agregados, embora geralmente aumente a estabilidade dos agregados (SCHRADER; ZHANG, 1997). Os agregados também são suscetíveis à ruptura por distúrbios físicos, como a expansão da argila, uso do solo e o impacto da chuva.

A atividade dos organismos do solo influencia o tempo de retenção de carbono e sua dinâmica no solo, o que afeta a qualidade deste carbono que por sua vez afeta a agregação. Em contrapartida, a decomposição é regulada pela atividade dos organismos do solo, propriedades do solo e fatores ambientais como temperatura, concentração gasosa, disponibilidade de nutrientes e gradientes de umidade (Christensen, 2001).

Essa dinâmica interna do sistema sugere que a decomposição da matéria orgânica do solo é afetada pela estrutura do solo, através da porosidade, trocas gasosas e umidade do solo, bem como pela localização física do carbono, como profundidade e oclusão dentro do agregado. A dinâmica do carbono varia espacialmente no solo e nos agregados individuais, bem como ao longo do tempo (BROMICK; LAL, 2005).

Assim, o clima afeta a agregação do solo através de alterações nos regimes de temperatura e umidade e ciclos de umedecimento e ressecamento, que podem reorientar as partículas, Singer et al. (1992), possivelmente resultando em uma melhor agregação e maior isolamento do carbono orgânico dentro dos agregados. Mudanças nos níveis de

temperatura e umidade afetam a atividade microbiana e biótica, que alteram suas taxas de decomposição.

Dessa forma, a relação entre temperatura e decomposição é altamente variável devido à influência de uma variedade de outros fatores. Temperaturas mais quentes resultam em maior respiração e atividade biológica no solo, enquanto temperaturas mais baixas resultam em maior estoque permanente de carbono orgânico no solo (FRANZLUEBBERS et al., 2001).

Os solos sofrem mudanças contínuas no regime de umidade. Sob condições de estiagem, os ciclos de umedecimento e ressecamento são mais comumente relacionados a fatores climáticos enquanto em um nível localizado, a absorção de água pelas raízes das plantas, influenciada pela evapotranspiração, pode levar à secagem na zona radicular. A umidade do solo e os ciclos de umidade e ressecamento têm um efeito variável na agregação (BROMICK; LAL, 2005).

Os ciclos de umedecimento e ressecamento podem interromper a agregação em argilas expansíveis. À medida que as partículas de argila expandem, elas se separam de outras partículas, diminuindo a estabilidade do agregado (SINGER et al., 1992). Assim, os ciclos de umedecimento e ressecamento têm uma influência mais positiva nos estágios iniciais em solos com argilas não expansivas e em macroagregados.

Durante o umedecimento, as partículas de argila tendem a se dispersar e, durante a secagem, formar ligações e revestimentos (ATTOU; BRUAND, 1998). Isso leva a um contato mais próximo entre as partículas e aumento das ligações entre as argilas (Singer et al., 1992). Os ciclos de umedecimento e ressecamento também afetam a quantidade de partículas organo-minerais incorporadas nos agregados e a porosidade (DENEFF et al., 2001).

A diminuição da humidade do solo e a conseqüente redução da vegetação podem resultar na diminuição do desenvolvimento estrutural e da agregação e no aumento da erosão. A diminuição da estabilidade do agregado pode ser devido ao aumento da erosão e escoamento resultando em menor carbono orgânico no solo, teor de argila e capacidade de troca catiônica (BOIX-FAYOS et al., 1998).

A textura do solo tem uma influência significativa na agregação. Em solos de textura grosseira, o carbono orgânico do solo tem maior influência na estrutura, enquanto que em solos com maior teor de argila o tipo de argila é mais importante do que a quantidade na determinação da agregação (KAY, 1998). Em contrapartida, solos mais arenosos apresentam maior dificuldade da manutenção dos teores de matéria orgânica

dada a disponibilidade de oxigênio e maior taxa de oxidação da matéria orgânica apresentando baixa capacidade de proteção química e física da matéria orgânica impondo alto risco de degradação (SANTOS, 2011).

A concentração de argila afeta fisicamente a agregação através da CTC e é frequentemente relacionada a agregados estáveis (DIMOYIANNIS et al., 1998). A agregação é estimulada pela ligação policatiônicas nas quais as forças entre a argila carregada negativamente e o carbono orgânico são reduzidas enquanto os agregados contendo cátions polivalentes (Ca^{2+} , Al^{3+} e Fe^{3+}) são mais resistentes (TISDALL, 1996).

O carbono orgânico do solo cria regiões de heterogeneidade no solo, levando a sítios ótimos de agregação. Maiores teores de carbono orgânico do solo estão relacionados a maior agregação enquanto as propriedades químicas do carbono orgânico do solo determinam suas capacidades de carga e complexação e influenciam as taxas de decomposição tendo efeito direto na agregação (SCHULTEN; LEINWEBER, 2000).

O efeito de ligação agregado do carbono orgânico lábil do solo é rápido, mas transitório (Kay, 1998), enquanto o carbono orgânico de decomposição mais lenta tem efeitos mais sutis na agregação, mas com efeitos mais duradouros (Martens, 2000). O isolamento da fração lábil prontamente assimilável dentro dos agregados do solo aumenta a estabilidade e a sua durabilidade, reduzindo sua decomposição enquanto aumentos na biomassa microbiana estão associados a aumentos na estabilidade dos agregados (HAYNES; BEARE, 1997).

Esta matéria orgânica particulada, associada a fração mineral do solo, é composta por grandes fragmentos de matéria orgânica (250-2000 μm) que existem como fração da matéria orgânica fresca incrustadas nas partículas do solo, que por sua vez lhe oferecem proteção física contra a decomposição (PLANTE; MCGILL, 2002). Esta fração “leve” e lábil da matéria orgânica no solo está geralmente associado à argila e a cátions polivalentes na formação de agregados (JASTROW, 1996).

Dentro dos macroagregados, a decomposição do carbono orgânico em matéria orgânica oclusa pode levar ao enriquecimento relativo do carbono recalcitrante. A ruptura da matéria orgânica oclusa dentro dos agregados resulta na exposição do carbono lábil, tornando-o disponível para decomposição microbiana (PLANTE; MCGILL, 2002).

2.4.3 Os componentes orgânicos na agregação do solo

O papel dos carboidratos na melhoria da estrutura do solo é variável, relacionado à fonte e natureza dos carboidratos, bem como às propriedades dos agregados e fatores ambientais. Carboidratos oriundos de plantas são frequentemente de maior tamanho e ocorrem na fração areia, enquanto os carboidratos produzidos por atividades microbianas são mais finos e estão presentes nas frações argila e silte e tendem a ser resistentes à decomposição (SCHULTEN; LEINWEBER, 2000).

Os polissacarídeos são prontamente mineralizáveis e atuam como agentes de ligação transitória iniciando a agregação, mas podem não ter estabilidade a longo prazo (KAY, 1998; TISDALL; OADES, 1982). Os polissacarídeos são fortemente adsorvidos nas superfícies minerais, atuando como “pontes” para ligar as partículas do solo formando uma substância gelatinosa que atua como uma cola para unir partículas em agregados (KAY, 1998; MARTENS, 2000).

Moléculas fenólicas podem se complexar com cátions para formar pontes catiônicas. Fenóis e polifenóis são precursores de substâncias húmicas e aumentam a agregação.

A menor agregação em solos cultivados é atribuída aos baixos teores de fenólicos nos resíduos, e a alta agregação é frequentemente associada a plantas ricas em fenóis. Isto, uma vez que, em contra partida, os ácidos fenólicos aumentam as interações de agregação com produtos microbianos (MARTENS, 2000).

A baixa taxa de decomposição da lignina é considerada um fator chave nas taxas de renovação do carbono do solo, aumentando a agregação (Magill e Aber, 1998). Mucilagem e outros compostos de fungos decompositores de lignina também contribuem para a agregação do solo (CAESAR-TONTHAT, 2002).

Nos solos, os lipídios são frequentemente enriquecidos na fração argila (SCHULTEN E LEINWEBER, 2000). Em alguns solos, os lipídios podem melhorar a estabilidade dos agregados contra o rompimento e dispersão, provavelmente relacionado à sua natureza hidrofóbica (PARE et al., 1999).

A eficácia dos lipídios em melhorar a estabilidade dos agregados pode estar relacionada à mineralogia da argila uma vez que os lipídios desempenham um papel mais importante na ligação em solos argilosos mistos e ilita do que em solos dominados por caulinita ou esmectita (DINEL et al., 1997). O aumento de lipídios totais extraíveis está presente em solos arados em comparação com a solos com plantio direto, que geralmente

exibem níveis mais altos de biodegradabilidade da matéria orgânica dos solos (PARE et al., 1999).

A recalcitrância das substâncias húmicas é resultado de sua resistência química e sua associação com a matriz do solo, que oferece proteção física. Tarchitzky et al. (2000) levantaram a hipótese de que a distribuição de substâncias húmicas, incluindo ácido fúlvico, ácido húmico e humina em agregados, pode refletir no revestimento inicial de partículas com substâncias húmicas servindo para unir as partículas.

Os ácidos húmicos podem ser adsorvidos nas partículas de argila por cátions polivalentes, tornando-os especialmente eficazes na superação da dispersão de argila. As substâncias húmicas podem aumentar a estabilidade do agregado e reduzir a dispersão devido aos ciclos de umidade e ressecamento (PICCOLO et al., 1997).

Já a atividade microbiana pode depender do tamanho do agregado do solo. As bactérias são frequentemente associadas a argila e polissacarídeos em microagregados, resultando em menor biomassa microbiana em microagregados do que em macroagregados (TISDALL; OADES, 1982; LUPWAYI et al., 2001).

Uma razão bactérias/fungos mais baixa em macroagregados do que em microagregados sugere que a atividade bacteriana pode dominar na microagregação enquanto a atividade fúngica domina na formação de macroagregados, enquanto aumentos de macroagregados estão associados a aumentos nas atividades fúngicas e resíduos frescos (DENEFF et al., 2001).

A atividade microbiana varia com o tamanho do agregado, estações do ano, atividades de cultivo, manejo, qualidade e quantidade de resíduos e tipo de solo (MENDES et al., 1999). A influência microbiana é mais pronunciada em solos arenosos onde os microrganismos do solo produzem fontes de carbono prontamente disponíveis para a rápida estabilização dos agregados (KIEM; KANDELER, 1997).

As hifas fúngicas melhoram a estabilidade do agregado (Ternan et al., 1996) pela reorientação das partículas de argila, ligando as partículas com polissacarídeos extracelulares e enredando as partículas. As hifas também envolvem microagregados para formar macroagregados, sugerindo que a agregação aumenta com a densidade de hifas sendo uma das influências bióticas mais importantes na agregação do solo sugere que a agregação aumenta com a densidade de hifas (HAYNES; BEARE, 1997).

A glomalina é uma glicoproteína liberada pelas hifas fúngicas. Está presente em solos em altas concentrações e é um fator importante na estabilização de agregados,

possivelmente devido à sua natureza recalcitrante e alta concentração em alguns solos (RILLIG et al., 2002).

Solos ricos em argilas expansivas têm mais glomalina total do que aqueles contendo argilas de baixa atividade. Sendo possível que a natureza hidrofóbica e recalcitrante da molécula de glomalina possa proteger outros agentes agregadores, Wright e Upadhyaya (1998), enquanto os ciclos de umedecimento e ressecamento podem aumentar a polimerização e a hidrofobicidade da glomalina.

O aumento de temperaturas pode ter efeitos diretos e indiretos sobre fungos e pode afetar diretamente a decomposição de seus produtos (a exemplo da glomalina). Ao estudar o efeito do aquecimento artificial sobre populações de fungos micorrízicos em pastagens na Califórnia, Rilling et al. (2002), identificou o aumento das populações de fungos micorrízicos, mas também encontrou relação inversa sobre a estabilidade de agregados.

Estes autores encontraram uma redução na estabilidade de agregados frente ao tratamento de aquecimento artificial. Este aquecimento artificial foi realizado com aquecedores infravermelhos para a simulação de uma estação de crescimento.

Embora o crescimento das hifas e a produção de glomalina sejam reconhecidas por aumentar a estabilidade de agregados do solo, é importante perceber que este experimento foi um estudo de aquecimento do ecossistema. Assim, outras condições do solo, que podem ter mudado concomitantemente com o aquecimento também podem ter impactado no crescimento das hifas (SHAVER et al. 2000).

Por exemplo, o aquecimento do solo pode causar alteração na disponibilidade de nutrientes através da estimulação da mineralização microbiana, que por sua vez pode influenciar o crescimento de hifas (SMITH; READ 1997).

A glomalina diminuiu nas parcelas aquecidas analisadas neste estudo. Isso é consistente com a hipótese de que a glomalina, bem como outras porções da matéria orgânica do solo, podem estar sujeitas a uma decomposição mais rápida em temperaturas mais altas, observando que a estabilidade do agregado mudou após apenas uma estação de crescimento do tratamento térmico.

2.5 A VARIÁVEL TEMPERATURA

2.5.1 A temperatura do ar e a temperatura do solo

Segundo Marin et al. (2008), a temperatura é um índice que expressa a energia interna de uma substância ou corpo qualquer sendo definida como a medida da energia cinética das moléculas que compõem um sistema num dado meio físico. Este estado de energia interna da matéria influi sobre suas propriedades físicas alterando seu estado (sólido, líquido ou gasoso), sua densidade, pressão de vapor, condutividade hidráulica e ainda pode também afetar os organismos vivos ectotérmicos acelerando a velocidade das reações metabólicas (DANTAS et al., 2017).

A temperatura é também a condição que determina o fluxo de calor que passa de uma substância para outra onde o calor desloca-se de um corpo que tem temperatura mais elevada para um outro com temperatura mais baixa (AYOADE, 1996). Portanto, quando se colocam dois sistemas com temperaturas diferentes em contato, a temperatura do sistema mais quente começa a diminuir, ocasionando perda de energia em direção ao ponto mais frio, que tem sua temperatura elevada. Esta transferência de energia entre sistemas pode ocorrer de três formas: Condução, Convecção e Radiação.

A condução é a propagação da energia térmica por meio do contato entre as moléculas com temperaturas diferentes. A convecção é a transferência de energia térmica decorrente do transporte de massa no interior de um fluido (gases ou líquidos). Já a radiação é o processo de transferência de energia térmica através de ondas eletromagnéticas no espaço.

Assim, de maneira sumária, pode-se dizer que a temperatura do ar, enquanto resultado do equilíbrio térmico dos sistemas atmosféricos, é derivada de uma complexa interação entre os gases que os compõem respeitando suas particularidades físicas. Dessa forma, a temperatura do ar é a expressão local de um extenso sistema subordinado aos processos térmicos de condução, convecção e radiação e suas consequências sobre os fluidos do sistema (MARIN, 2008).

Já a temperatura do solo, ainda segundo Marin (2008), está diretamente relacionada à quantidade de radiação incidente, ao albedo do solo ou de seu material de cobertura (reflexão da radiação solar), ao processo de advecção (condução lateral do sistema) e ao tipo e espessura de material de cobertura. Nesse sentido, a temperatura do solo é resultado da energia térmica, proveniente de parte da radiação solar que incide

sobre a superfície da Terra, e absorvida pelo solo (GASPARIM et al., 2005). Esse processo de absorção pode ser agravado por alguns fatores como: o tempo de incidência da radiação solar, a inclinação da superfície receptora e características granulométricas do solo.

As trocas de calor entre o ar e o solo também podem contribuir para as oscilações de temperatura verificadas no solo, principalmente nas camadas mais próximas à superfície (KLAR, 1974). A temperatura do solo é continuamente variável e os principais fatores atuantes estão relacionados ao ciclo de radiação, que produz flutuações diárias significativas nos primeiros trinta centímetros abaixo da superfície do solo nu.

Assim, o solo aquece e resfria a partir do balanço energético na conexão superfície do solo e atmosfera. Isso resulta na propagação de uma onda de calor, por condução, para as camadas inferiores do solo e também é transferido calor para a atmosfera por condução e principalmente por convecção (AZEVEDO; GALVANI, 2003).

Diversos trabalhos buscaram estabelecer a relação entre temperatura do ar e temperatura do solo (MATOS et al., 2013; BELAN et al., 2013 e DANTAS et al., 2017). Estes autores encontraram correlação bastante significativa entre estes parâmetros variando em função da profundidade.

Por exemplo, Dantas et al. (2017), identificou uma correlação entre a temperatura do ar e da superfície do solo de $R^2 = 0,93$ para o mês de janeiro e $R^2 = 0,97$ para o mês de junho a profundidades de até 30 cm. Já a correlação entre a temperatura do ar e do solo na profundidade de 50 cm apresentou uma correlação negativa, sendo $R^2 = -0,96$ para o mês de janeiro e $R^2 = -0,95$ para o mês de junho.

Portanto, observou-se então um aumento proporcional na temperatura do solo na superfície à medida que aumentou a temperatura do ar, porém, essa relação vai se reduzindo gradativamente ao longo do perfil e chega a uma relação inversamente proporcional, na camada de 50 cm.

Assim, estes trabalhos concluem que existe uma relação direta entre a temperatura do ar e a temperatura do solo apenas na superfície e que em profundidades inferiores a 30 cm a correlação direta não ocorre. Enquanto Buol et al. (1990), afirmam que há uma forte relação entre a temperatura média anual do solo e seu conteúdo de matéria orgânica os efeitos de um aquecimento sobre a biologia subsuperficial não são bem entendidos e são bastante complexos mormente por terem efeitos diretos e indiretos, e suas interações devem ser consideradas.

A relevância destes dados para o presente estudo reside no fato de esclarecer as relações da temperatura do ar e a superfície do solo uma vez que aqui se discute processos erosivos superficiais frente a variações de temperatura que regulam a atividade microbiológica auxiliando não só a compreensão de tais processos, como na definição de temperaturas para os tratamentos térmicos das amostras a serem avaliadas nas próximas fases deste estudo.

Nesse sentido, o trabalho de Eltz e Roveder (2005) é bastante claro ao definir as variações da temperatura do solo em área de campo nativo e em um núcleo de degradação do solo, ambos sobre solo Neossolo Quartzarênico distrófico no sudoeste do Rio Grande do Sul, a partir da implantação de um conjunto de geotermômetros a 3, 10 e 20 cm de profundidade. Neste trabalho, sobre solos de origem arenítica, altamente suscetíveis à degradação por processos erosivos, foram observadas as variações da temperatura do solo em quatro condições de campo e cobertura do solo: campo nativo com plantas de cobertura, área degradada revegetada com plantas de cobertura, campo nativo e área degradada, caracterizada pela retirada da vegetação e exposição do solo arenoso.

Assim, de acordo com estes autores, a temperatura do solo ao longo do dia evidencia que há diferenças estatisticamente significativas entre as observações nas quatro coberturas de solo analisadas durante as estações da primavera, outono e verão, bem como nos distintos horários e profundidades de monitoramento. Às 12 horas, durante o verão, a presença de vegetação com plantas de cobertura proporcionou uma redução de 13% da temperatura em relação a área degradada, enquanto no tratamento área degradada com planta de cobertura e no tratamento de campo estas reduções ficaram na ordem de 18,6% e de 11%, respectivamente.

Também às 12 horas a 10 cm de profundidade, foram observadas reduções de 9% na temperatura do solo no campo com plantas de cobertura, 9% na área degradada com plantas de cobertura e 65 no campo quando comparadas à área degradada. Enquanto a temperatura do solo foi reduzida em 6%, 5% e 4% nas áreas com vegetações de campo com plantas de cobertura, área degradada com plantas de cobertura e campo a profundidade de 20 cm às 18hs, respectivamente.

Assim, ao transcorrer da temperatura ao longo do dia foi observou-se uma tendência de ocorrência de temperaturas mínimas às 9 horas e máximas às 15 horas a 3 e 10 cm de profundidade sendo que um decréscimo foi observado a partir das 18 horas nas quatro estações do ano. As temperaturas máximas do dia foram observadas nas profundidades de 20 cm às 18 horas, enquanto as mínimas foram observadas às 9 horas,

salvo na primavera onde ocorreram às 12 horas no campo com plantas de cobertura, área degradada com plantas de cobertura e campo.

Exatamente como o encontrado para 3 e 10 cm, a variação senoidal da intensidade de radiação durante o dia ocasiona uma variação senoidal da temperatura nas camadas mais superficiais do solo (PREVEDELLO, 1996). Pela temperatura do solo a 20 cm ter-se apresentou de maneira diferenciada, demonstrando uma tendência crescente entre às 9 e 18 horas, caracteriza o retardamento da propagação da radiação em tal profundidade uma vez comparada às camadas superiores, ocasionando maiores variações nas camadas subjacentes.

Ainda no que diz respeito a profundidade do solo, as temperaturas nas camadas superiores foram mais altas que nas camadas inferiores, em todos os horários de observação. As maiores amplitudes de variação entre as temperaturas máxima e mínima diárias foram apresentadas nas estações da primavera e do outono, nas três profundidades de observação, e no inverno a 20 cm e no verão a 3 cm, na área degradada.

Segundo Eltz e Roveder (2005), Morote et al. (1990), Bortoluzzi e Eltz (2000), solos expostos apresentam maiores amplitudes térmicas quando comparados com cobertura vegetada. Sendo o outono a estação que apresentou maiores amplitudes térmicas enquanto o inverno apresentou as menores.

Sob a área degradada, a uma profundidade de 3 cm foi observada a maior temperatura, 49°C, em contrapartida, a menor foi de 5°C, também observada a 3cm na área degradada, durante o inverno. As maiores amplitudes térmicas foram observadas na área degradada principalmente durante a primavera e o outono. Sendo que após as 9 horas do dia o efeito de amenização da temperatura do solo tornou-se mais evidente.

Em relação a temperatura do solo os tratamentos campo, campo com plantas de cobertura e área degradada com plantas de cobertura apresentaram tendência de comportamento bastante semelhante. Porém, nas profundidades de 3 a 10 cm, mais superficiais, apresentaram-se mais elevadas de uma maneira geral às 15 horas, sendo que as temperaturas mais elevadas foram registradas mais tarde, às 18 horas, aos 20 cm de profundidade (ELTZ; ROVEDER, 2005).

Assim, segundo esses autores, ponderando as características destes solos, as alterações mais importantes causadas pelo processo de degradação são promovidas pela remoção da cobertura vegetal, a exposição do solo a agentes erosivos e o rompimento da formação de camadas portadoras de matéria orgânica. Entre as propriedades físicas

alteradas pela remoção da cobertura vegetal, a temperatura do solo atinge sua amplitude máxima na transição de ambientes vegetados para ambientes degradados.

Dessa forma, a quantidade e o tipo de cobertura vegetal interagem profundamente com as propriedades térmicas do solo, determinando a quantidade de água e matéria orgânica, e as flutuações de temperatura, principalmente no horizonte superficial, onde a amplitude das flutuações é maior do que em outros horizontes pela Influência da Incidência direta da radiação solar (PREVEDELLO, 1996). Sendo que assim, as amplitudes da temperatura influenciam, fundamentalmente, os mecanismos das reações químicas e os processos biológicos que ocorrem no solo.

2.5.2 Temperatura e decomposição da matéria orgânica no solo

A temperatura aumenta o estado de energia das moléculas, aumenta a velocidade das reações químicas e, por sua vez, espera-se que intensifique as reações metabólicas de degradação e respiração por parte dos organismos do solo sobre os compostos carbônicos. Dessa forma, é de se esperar que a decomposição dos compostos orgânicos do solo seja linear a temperatura até um nível ótimo (DAVIDSON; JANSSENS, 2006).

Porém isto não é de todo correto, visto que parte dos materiais orgânicos do solo estão de fato sujeitos a uma taxa de decomposição que é regulada pela temperatura e o princípio da teoria da cinética enzimática. Mas há frações do carbono orgânico do solo que não respondem desta forma e são condicionados por restrições específicas de sua natureza e de sua relação com o ambiente do solo.

Segundo Schlentner et al. (1985), as reações da cinética enzimática em um meio homogêneo são bastante lineares em relação a temperatura ambiente sobre a taxa de decomposição dos compostos orgânicos, mas esta sensibilidade a temperatura diminui à medida que estes compostos se apresentam mais complexos. E no solo há uma grande variedade de diferentes compostos de carbono orgânico, cada qual com suas próprias cinéticas inerentes.

As plantas são os grandes produtores dos materiais orgânicos que se encontram no solo. Mas estes materiais frescos sofrem transformações sob a ação microbiana ou reações de condensação abiótica que produzem novas estruturas aromáticas, de maior peso molecular, insolúveis ou com uma arquitetura molecular. Esta nova conformação afeta a eficácia das enzimas que atuam para lhe degradar exigindo maior temperatura de ativação a menores taxas de decomposição, que pode ser entendida como “sensibilidade

a temperatura intrínseca” da matéria orgânica a decomposição (KELLY; ESTEVENSON, 1996).

Além disso, o meio do solo não é um meio heterogêneo, o que pode ocasionar limitações físicas ou químicas a ação dos microrganismos sobre os substratos carbônicos, Sollins et al. (1996), causando limitações em micro sítios do meio do solo. Assim, a resposta a temperatura dos compostos envolvidos em tais restrições abióticas ocasionaria uma “sensibilidade a temperatura aparente” dado o efeito das restrições ambientais sobre as taxas de decomposição da matéria orgânica, enquanto esta seria muito menor que a “sensibilidade a temperatura intrínseca”.

As restrições ambientais que podem, temporária ou indefinidamente, afetar a taxa de decomposição dos compostos orgânicos do solo são: a proteção física da matéria orgânica no interior dos agregados do solo, onde organismos e suas enzimas teriam acesso restrito bem como baixa disponibilidade de oxigênio; a proteção química, uma vez que a matéria orgânica ficaria adsorvida na superfície de suas partículas minerais através de ligações eletrostáticas ou covalentes, impedindo sua decomposição; secas, que reduziriam a espessura dos filmes de água, inibindo a difusão de enzimas extracelulares e mesmo dos substratos orgânicos, diminuindo sua disponibilidade a reações e, por fim; inundações, que diminuiriam a disponibilidade de oxigênio a decomposição (DAVIDSON; JANSSENS, 2006).

Portanto, cada uma destas restrições ambientais afetam as taxas de decomposição da matéria orgânica, direta ou indiretamente, ao invés de ter-se uma taxa direta temperatura-dependente. No entanto, a maioria dos modelos de decomposição assumem que a taxa de decomposição, de uma maneira geral, responde a um incremento de temperatura em seu cômputo total (SCHIMMEL et al., 1994).

Porém, deve-se levar em conta que uma fração significativa da matéria orgânica lábil do solo está sujeita a uma decomposição temperatura-dependente. Enquanto outra também significativa fração da matéria orgânica do solo, mantém-se intacta sob a influência de restrições ambientais que limitam a sua sensibilidade intrínseca a temperatura, mas que está principalmente condicionada às relações entre substrato orgânico e as partículas minerais do solo, expressa em sua relação textural uma vez que esta característica regula em grande parte a presença de micro sítios de restrições.

Com isso, espera-se que solos com distintos conteúdos granulométricos apresentem diferentes respostas a temperatura em suas taxas de decomposição do carbono

orgânico no solo. E também que isto se expresse na estabilidade de agregados destes mesmos solos e, em última análise, em suas taxas de erosão.

2.6 ERODIBILIDADE E ESTABILIDADE DE AGREGADOS

2.6.1 Erodibilidade: o fator K da Equação Universal de Perdas de Solos

A estrutura do solo tem papel fundamental na erosão hídrica. Solos bem estruturados possuem maior porosidade, o que resulta numa melhor infiltração conferindo-lhe uma maior resistência aos agentes denudacionais e erosivos (SCHIMIGUEL et al., 2014). Isto quer dizer que quanto mais desenvolvida a estrutura do solo, isto é, quanto maior for o número e o diâmetro dos agregados do solo, melhor será a infiltração da água em detrimento do escoamento superficial e da morfogênese.

Segundo Sanchis et al, 2008, a erodibilidade representa a resposta do solo a intensidade das chuvas e ao escoamento superficial. Porém, a erodibilidade não é um parâmetro mensurável controlado por um único fator sendo resultado de todas as características do solo, estáticas e dinâmicas, que controlam uma gama de subprocessos que afetam a erosão. Ainda segundo este autor, as características que controlam o comportamento do solo em sua interação com a água são: a taxa de infiltração, a permeabilidade, as forças de retenção de água deste solo, a porosidade, a capacidade de troca de cátions, o tamanho de partículas primárias (textura) e mineralogia, o tamanho e estabilidade de agregados e a matéria orgânica no solo.

Assim, a importância destes fatores para a erodibilidade reside no fato justamente destes atuarem de forma direta ou indireta em resposta à intensidade das chuvas e no acúmulo de água sobre a superfície do solo. O impacto de gotas de chuva causa desagregação, transporte e deposição de partículas do solo para os processos erosivos a partir do selamento superficial, decréscimo da infiltração e o aumento do escoamento superficial.

Neste contexto, é senso comum que a resistência dos agregados do solo ao impacto das gotas de chuva está correlacionada a estabilidade de agregados. Para Imeson e Vis (1984) e Legout et al. (2005), a estabilidade de agregados depende das ligações entre as partículas que são resultado das condições de uso deste solo juntamente com as características básicas do solo.

Assim, a erosão do solo pela água, a erodibilidade, é um importante aspecto para avaliar os efeitos de mudanças climáticas em ecossistemas terrestres. Pode-se dizer então que é válido examinar o efeito de variáveis climáticas sobre a erodibilidade do solo, a partir da estabilidade de seus agregados, dado o protagonismo deste parâmetro nos estágios iniciais dos processos erosivos (SANCHIS et al., 2008).

Embora haja controvérsias a seu respeito, até o momento, não há um modelo mais adequado para avaliar as perdas de solo que a Equação Universal de Perdas do Solo, (WISCHMEIER; SMITH, 1965, 1978). No entanto, existe uma série de modelos baseados em processos físicos que são opostos ao empirismo da EUPS. Esses métodos, segundo Renard et al. (1997), parecem não ser tão eficientes e práticos quanto a EUPS, devido ao grande número de informações necessárias para um bom funcionamento.

Isto se deve ao fato destes outros modelos de erosão hídrica serem baseados em diversos parâmetros físicos para representar a resposta dos solos as chuvas e ao escoamento superficial enquanto a Equação Universal de Perdas dos Solos baseia-se apenas em um único parâmetro, a erodibilidade, que pode ser estimada usando-se parâmetros mais básicos característicos do solo. A Equação Universal de Perdas dos Solos assume que a erosão é função do clima, propriedades do solo, topografia, condições da superfície do solo e ação humana onde expressa-se como resultado das relações destes fatores.

A expectativa média de perdas de solos por erosão de uma vertente pode ser expressa pela equação 1 (WISCHMEIER; SMITH, 1965, 1978):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Onde:

A = média de perdas de solos por unidade de temporal considerando o fator K, expressa em ton.ha-1.ano-1;

R = Fator de erosividade das chuvas, expressa em MJ.mm.ha-1.h-1;

K = Fator de erodibilidade do solo, expressa em ton.h.MJ-1.mm-1;

L = Comprimento da vertente, expresso em metros;

S = grau de declividade, expresso em porcentagem;

C = Cobertura do solo, adimensional, função do uso e manejo; e

P = Práticas conservacionistas, que é adimensional.

Desta forma, a erodibilidade, como definida na estrutura da Equação Universal de Perdas do Solo, Wischmeier e Smith (1965, 1978), corresponde a quantidade de solo perdido em dada área por unidade do índice de erosividade adotado, nas condições padrão, decorrente dos processos de desagregação e transporte (RENARD et al., 1997). O fator K medido no campo (método direto), por meio de chuvas simuladas ou naturais, é considerado o valor que verdadeiramente reflete a erodibilidade do solo, tal como ela é compreendida na EUPS. No entanto, o método direto, além de necessitar de determinações morosas e de alto custo, principalmente quando medido mediante chuvas naturais, requer também rigorosa padronização (MARQUES et al., 1997).

Os métodos indiretos têm como vantagens serem mais rápidos e de menor custo na determinação da erodibilidade uma vez que os resultados do método direto são muito demorados para serem obtidos (SILVA et al, 2003). Além disso, os métodos analíticos também permitem a estimativa do fator K por parâmetros obtidos em laboratório e de fácil determinação.

Wischmeier e Mannering (1969) estudaram a erodibilidade a partir de 24 propriedades básicas e suas interações e demonstraram que 4 propriedades principais afetam a erodibilidade. A textura ou composição granulométrica, a estrutura do solo, a percentagem de matéria orgânica e a permeabilidade do solo. A partir disso, Wischmeier et al. (1971), desenvolveram o primeiro método analítico para estimar a erodibilidade do solo que se trata de uma representação gráfica (monográfico) baseado na combinação indireta das propriedades físicas e porcentagem de matéria orgânica. Esta metodologia também permite expressar-se em forma numérica para que se possa calcular os valores do Fator K ao invés de ler os gráficos.

Segundo Marques et al. (1997), o método indireto do monográfico é o mais usual para a determinação do fator K, mas apresenta-se inadequado as condições brasileiras uma vez desenvolvido na América do Norte sobre solos de textura média e leva a resultados superestimados quando aplicados as condições do Brasil. É interessante mencionar que no estudo de Marques et al. (op. cit.), é proposto uma revisão metodológica para a estimativa de valores do fator K em solos brasileiros com presença de horizontes B textural, comparando-o a dados obtidos a campo.

Assim, a avaliação de metodologias indiretas para a estimativa do fator k, como as averiguadas por Marques et al. (Op. cit.), que talvez possam ser usadas na extrapolação dos resultados obtidos neste estudo. Dessa forma, buscar-se-ia determinar a influência da alteração da temperatura sobre os processos erosivos, através da estimativa indireta da

erodibilidade ou de taxas de perdas de solos com dados de estabilidade de agregados em água para subsidiar uma discussão que possa contribuir sobre seu efeito em um prognóstico dos processos erosivos nos solos da Região da Depressão Central Sul-Riograndense, em condições de mudanças climáticas.

2.6.2 Mecanismos de desagregação dos solos

Emerson e Greenland (1990), definiram dois processos de desagregação do solo: rompimento e dispersão. Outros autores, mais preocupados com observações de campo, consideram o impacto das gotas de chuva a principal causa da degradação estrutural na superfície do solo (NEARING; BRADFORD, 1985).

A quebra de agregados pela água pode resultar de uma variedade de mecanismos físico e físico-químicos e pode envolver diferentes escalas da estrutura do solo, desde interações entre partículas de argila até o comportamento macroscópico de agregados (ELLIOTT, 1986; OADES; WATERS, 1991).

Mas segundo Bissonais (1996) quatro principais mecanismos podem ser identificados. O rompimento, ou seja, a quebra causada pela compressão do ar aprisionado durante o umedecimento rápido; a desagregação por expansão e contração de argilas; a desagregação por impacto de gotas de chuva e a dispersão físico-química devido ao estresse osmótico.

Esses mecanismos diferem-se entre si de diversas maneiras. Desde a natureza das ligações entre as partículas e na energia envolvida em sua ruptura, das condições físicas e químicas necessárias para a desagregação, da cinética do processo de degradação até o tipo de propriedades do solo que influenciam o mecanismo de degradação (CHAN; MULLINS, 1994).

Assim, o rompimento é causado pela compressão do ar aprisionado dentro dos agregados do solo durante o umedecimento. Ocorrendo quando agregados secos são umedecidos rapidamente ou mergulhados em água, sendo que o efeito do ar aprisionado depende do volume de ar dentro do agregado, da taxa de umedecimento e da resistência ao cisalhamento do agregado molhado. O rompimento ocorre mesmo sem nenhuma agitação do solo em água embora a agitação aumente o efeito do rompimento por adicional desagregação mecânica.

Truman et al. (1990) afirmam que o rompimento diminui à medida que o conteúdo de umidade aumenta devido a redução do volume de ar aprisionado durante o

umedecimento. Também o aumento do conteúdo de argila influencia o rompimento à medida que este decresce frente a maiores teores de argila. (LE BISSONNAIS, 1996).

Os fragmentos resultantes do rompimento são principalmente microagregados, sendo que quanto maior o conteúdo de argila do solo maior o tamanho destes. Este efeito é resultante da porosidade em função da textura ocasionando menor conteúdo de ar no interior do agregado.

A expansão e contração das argilas durante os ciclos de umedecimento e ressecamento resulta em microfissuras que formam linhas de fraquezas nos agregados. Estas dependem de propriedades como o rompimento e taxa de umedecimento para gerar microagregados similares aos gerados no processo de rompimento (KHEYRABI; MONNIER, 1968).

A desagregação devido à expansão e contração das argilas é semelhante ao rompimento ocasionado pelo ar aprisionado, porém decresce em razão da diminuição dos conteúdos e argilas. As consequências da desagregação por expansão e contração das argilas na infiltração são menos severas que aquelas causadas pelo ar aprisionado uma vez que seu produto apresenta menor tamanho (CHAN; MULLINS, 1994).

A desagregação causada pelo efeito mecânico das gotas da chuva normalmente ocorre em combinação com outros mecanismos. A importância deste efeito é claramente demonstrada pelo papel da cobertura vegetal na proteção do solo quando esta intercepta as gotas de chuva e dissipa a energia cinética antes destas atingirem o solo.

Sob condições mal drenadas, a tensão de compressão do impacto das gotas de chuva é transformada em tensão de cisalhamento lateral que faz com que os fragmentos se soltem e se projetem (AL-DURRAH; BRADFORD, 1982). Além disso, a desagregação ocasionada pelo efeito mecânico das gotas das chuvas sobre o solo não só destaca partículas, mas também desloca fragmentos previamente fragilizados o que configura o efeito “splash” (FARRES, 1987).

Até mesmo agregados estáveis são deslocados pelo efeito “splash”, mas o resultado da ação desagregadora das gotas de chuva é geralmente de pequeno porte, tratando-se de partículas elementares, como grãos minerais, ou pequenos microagregados. O efeito “splash” tem um papel dominante nos solos molhados uma vez que os agregados são mais fracos quando úmidos (AL-DURRAH; BRADFORD, 1982).

Já a dispersão físico-química é resultado da redução das forças de atração entre as partículas coloidais durante o umedecimento (SUMMER, 1993). A dispersão depende principalmente da porcentagem de sódio trocável do solo, sendo o principal mecanismo

de degradação de solos argilosos (Bromick; Lal, 2005; Amézketa, 2008) e dependente de sua mineralogia, respeitando a ordem decrescente de reatividade das argilas: Illita>Vermiculita>Esmectita>Caulinita.

A principal característica da dispersão é a produção de partículas elementares em vez de microagregados. Portanto, a dispersão é um dos processos mais eficazes de desagregação de agregados, e aumenta muito o efeito dos demais mecanismos de desagregação (BRESSION; BOIFFIN, 1990).

A dispersão induz a formação de crostas na superfície do solo, diminuindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial (BEN-HUR et al., 1992). No entanto, Abu-Sharar (1987) mostrou que algumas vezes a dispersão tem que ser associada com o rompimento do agregado pelo ar aprisionado para reduzir a condutividade hidráulica uma vez que as partículas de argila dispersas são móveis, facilmente iluviadas e não são capazes de obstruir grandes poros condutores.

Estudando a formação de crostas em um solo franco, Bajracharya e Lal (1998), relataram que a quebra mecânica dos agregados pelo impacto de gotas de chuva ocorre principalmente durante o estágio inicial de evento de chuva. Também estudando a formação de crostas, mas em agregados artificiais Tanaka et al. (1999) distinguiram entre chuvas fortes iniciais, que promoveram o rompimento pelo ar aprisionado, e chuvas iniciais leves, que promoveram o enfraquecimento dos agregados posteriormente desintegrados pelo impacto e efeito residual da ruptura pelo ar aprisionado.

Embora vários mecanismos possam contribuir para a desagregação, a ruptura pelo ar aprisionado pode ser considerada particularmente importante, especialmente em áreas tropicais, onde chuvas intensas são frequentes (Roose, 1996), e em solos com baixa proporção de sódio trocável e baixo teor de argilas expansivas.

No entanto, a desagregação não é o único mecanismo envolvido na erosão. O desprendimento de partículas por cisalhamento por gotas de chuva e escoamento superficial, bem como o transporte por respingos de chuva e escoamento superficial, também podem contribuir para a erosão do solo pela água (CASENAVE; VALENTIN, 1989; AGASSI; BRADFORD, 1999).

A desagregação pelas gotas das chuvas tem sido reconhecida como a força erosiva dominante que afeta a taxa de erosão em áreas entre sulcos, onde a capacidade de transporte geralmente não é reconhecida como um fator limitante (POESEN, 1992; JAYAWARDENA; BHUIYAN, 1999). Considerando que a resistência dos agregados ao rompimento pelo ar aprisionado influencia grandemente o desprendimento do solo pela

chuva, especialmente em solos tropicais com baixos teores de sódio trocável, teor de argilas expansivas, pode-se concluir que é um importante determinante da erosão entre sulcos.

De fato, sabe-se que a estabilidade dos macroagregados em água evita o desprendimento de partículas facilmente transportáveis e, assim, o entupimento da superfície (formação de crostas) e o escoamento superficial (LE BISSONNAIS, 1996). Desta maneira, a influência da resistência do agregado da superfície do solo à erosão na erosão entre sulcos e em sulcos explica as relações entre a estabilidade do agregado e a suscetibilidade ao escoamento superficial, e esta, por conseguinte, à erosão, especialmente em solos tropicais sujeitos a chuvas intensas.

2.6.3 Estabilidade de agregados como parâmetro de perdas de solos

A estimativa da erosão do solo é um processo complexo afetado por diversos fatores. Ela é função da erodibilidade do solo, da Erosividade das chuvas, da topografia e da cobertura vegetal do solo (EGASHIRA, 1983).

A erosão do solo pode ser determinada por uma série de métodos com diferentes abordagens, sendo que a Equação Universal De Perdas Dos Solos (EUPS) é uma das mais amplamente aceita. A EUPS dá uma estimativa das taxas de erosão do solo pela água da ordem de $\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ obtida da combinação de diversos fatores, como dito anteriormente (MARTÍNEZ; MURILLO, 2020).

Entre os fatores da EUPS está a erodibilidade. Ela expressa a suscetibilidade intrínseca das partículas ao desprendimento e consequente transporte pelo escoamento superficial (FERNANDEZ et al., 2003).

Assim, a erodibilidade corresponde a suscetibilidade de um solo e a erosão sendo uma característica inerente ao solo que não pode ser determinada de maneira imediata e direta, embora durante muitos anos tenha-se buscado relacionar a erodibilidade a propriedades físicas dos solos que possam ser prontamente determinadas em laboratório ou a campo (EGASHIRA et al., 1983).

Desta forma, a suscetibilidade de um solo à erosão está ligada a estabilidade dos agregados que depende de propriedades envolvidas na estrutura e agregação visto que caracteriza a resistência do solo à degradação. Isto se dá uma vez que a ruptura de agregados leva ao destacamento de partículas e agregados menores, o que favorece a

formação de crostas superficiais e posteriormente ao escoamento e conseqüentemente ao transporte de partículas (DE PLOEY; POESEN, 1985; LE BISSONNAIS, 1996).

Assim, enquanto a EUPS estima a erosão do solo, considerando entre outros parâmetros a erodibilidade do solo, é razoável esperar que haja uma relação entre erodibilidade do solo e agregação do solo, e por sua vez a perdas dos solos, visto que a agregação não só deva estar relacionada a erodibilidade mas também refletir parcialmente as taxas de erosão do solo (STANCHI et al., 2015).

Para a maioria dos solos a erosão resulta do escoamento superficial causado pelo decréscimo da infiltração durante as chuvas que frequentemente é seguido de formação de crostas e selamento superficial (POESEN; GOVERS, 1986; LE BISSONNAIS, 1990). Este fenômeno chega a causar um decréscimo na taxa de infiltração até um limite de 1 mm/h.

As relações entre a formação de crostas superficiais e erosão foram investigadas por Hairsine e Hook (1995). Eles concluíram que havia muito em comum em ambos os processos e que as taxas de erosão eram predominantemente controladas pela ruptura dos agregados do solo.

Dessa forma, a fragmentação dos agregados em microagregados e partículas elementares é a principal forma de encrustamento sendo estas frações carreadas pelo subsequente escoamento superficial e o efeito “splash”. Aqui o efeito “splash” tem particularmente grande importância na erosão entre sulcos onde a capacidade de destacamento do escoamento superficial tem seu efeito reduzido (LE BISSONNAIS, 1996).

A erosão do solo, portanto, pode ser dividida em dois componentes importantes: erosão entre sulcos e a erosão em sulcos. A erosão entre sulcos ocorre na superfície do solo pelo efeito combinado do impacto de gotas de chuva (efeito “splash”) e do escoamento de lâminas de água superficiais ao solo enquanto a erosão em sulcos ocorre devido ao destacamento e transporte de agregados e partículas em fluxos concentrados.

O encrustamento pode afetar ambos os processos pois ambos dependem do escoamento superficial, bem como do efeito “splash”. Dependendo também da capacidade de transporte e da capacidade de destacamento durante o processo.

A erodibilidade do solo para a erosão em sulcos e entre sulcos é tida como um parâmetro chave enquanto estimativa da suscetibilidade a erosão e essencial para predizer as perdas de solo. Ela tanto pode ser determinada com dados obtidos a campo quanto a

partir de propriedades do solo como textura, coesão, resistência ao cisalhamento, conteúdo de argila e a própria estabilidade de agregados (WANG et al., 2013).

Dentre estas propriedades, a estabilidade de agregados é uma propriedade chave para a estrutura do solo que descreve a resistência do solo à ação desintegradora da água (VALMIS et al., 2005). Dessa forma, a estabilidade de agregados tem uma enorme influência sobre a erosão do solo (BARTHÈS; ROOSE, 2002; DIMOYIANNIS et al., 2006; DING; ZHANG, 2016).

Isto pode ser percebido quando se verifica que a estabilidade de agregados é maior em solos de menor suscetibilidade à erosão, Zheng et al. (1989), fazendo com que a habilidade dos agregados da superfície do solo de resistir a erosão seja sistematicamente reportada como um indicador válido de erosão entre sulcos e por escoamento superficial em solos de textura arenosa (CANTÓN et al., 2009).

Assim, a importância da estabilidade de agregados em prever a erodibilidade dos solos reside no fato da sua influência na habilidade dos solos de resistir a forças físicas associadas ao efeito “splash” das gotas de chuva e ao rápido umedecimento. Desta maneira a estabilidade de agregados do solo contribui para a resistência à desagregação, à dispersão e, conseqüente, à erosão do solo (KUYKENDALL, 2008).

Diversos estudos têm estabelecido correlações inversas significativas entre erodibilidade e estabilidade de agregados que corroboram o observado por Zheng et al., (1989), quando ressalta a relações inversas entre solos de alta estabilidade de agregados e baixa erodibilidade. Entre eles encontram-se os estudos de Egashira et al. (1983), Elwell (1986), Le Bissonais (1996), Levy e Miller (1997), Barthès e Rose (2002), Amézqueta et al. (2008), Ahmadi et al. (2011), Igwe e Obalum (2013), Nciizah et al. (2014), Stanchi et al. (2015), Wen-feng (2016), Xiao et al. (2017), Wang et al. (2019) e Martínez-Murillo et al. (2020).

Le Bissonais (1996), estabelece bases teóricas e metodológicas para tais avaliações da determinação da estabilidade de agregado como correspondente a erodibilidade, sendo uma literatura básica sobre o assunto. Já os demais estudos promovem comparações entre dados de erodibilidade, obtidos a campo ou através de fórmulas derivadas da EUPS, e dados de estimativas da estabilidade de agregados, seja diâmetro médio de agregados ou índice de estabilidade de agregados, obtidos em laboratório.

Como dito anteriormente, estes trabalhos apresentam correlações negativas, isto é, relações inversamente proporcionais entre erodibilidade e estabilidade de agregados.

Estes dados oscilam na ordem de - 0,9 para alguns valores de R^2 enquanto outros estudos encontram correlações em torno - 0,7. Mas seus valores em módulo representam uma forte relação significativa entre estabilidade de agregados em água e erodibilidade.

A exemplo do primeiro dado, Egashira et al. (1983), apresenta em seu estudo correlações de R^2 em torno de - 0,95 entre erodibilidade e o índice de estabilidade de agregados. Também nesta comparação, Wen-feng (2016), encontra correlações de R^2 igual a - 0,98 para o índice de estabilidade de agregados e Elwell (1986), também encontra tais correlações da ordem de -0,9 para R^2 entre erodibilidade e índice de estabilidade de agregados.

Já os valores da ordem de -0,7 para R^2 correspondem a correlações envolvendo a distribuição do diâmetro de agregados. São, por exemplo, encontrados por Wang et al. (2019), Xiao et al. (2017), Martínez-Murillo et al. (2020) e Ahmadi et al., (2011).

Segundo Renard et al. (1997), a erodibilidade corresponde a quantidade de solo perdido em dada área por unidade do índice de erosividade adotado, nas condições padrão, decorrente dos processos de desagregação e transporte. Obviamente os dados obtidos com os ensaios de estabilidade de agregados em água referem-se aos materiais provenientes dos processos de desagregação.

Assim, analisando as altas correlações em módulo entre erodibilidade e estabilidade de agregados em água encontradas pelos pesquisadores citados acima pode-se perceber que a estabilidade de agregados em água corresponde de 70% a 95% do cômputo da erodibilidade uma vez referindo-se ao material degradado e destacado dos agregados do solo. Ficando então o restante percentual atribuído a fatores como erodibilidade das chuvas e declividade e comprimento de lançante ou mesmo demais fatores determinantes da EUPS.

Portanto, aqui pretende-se dizer que a estabilidade de agregados em água é uma ferramenta capaz de estimar a erodibilidade com uma aproximação da ordem de 70% a 90% de acurácia segundo os resultados obtidos nos estudos referidos neste subtítulo. E assim este parâmetro será usado para inferir estimativas de prognósticos de perdas e intensificações de processos erosivos, como aumento da erodibilidade do solo sob o efeito do aumento de temperaturas, nas discussões a serem desenvolvidas posteriormente.

2.6.4 Métodos de determinação da estabilidade de agregados

A qualificação e quantificação da estrutura do solo é importante uma vez que o tamanho, a forma e a estabilidade das partículas secundárias do solo (agregados, pedos ou torrões) afetam muitos processos ambientais (DÍAZ-ZORITA et al., 2002).

A caracterização da estrutura do solo inclui a condutividade hidráulica, a taxa de infiltração e a distribuição de tamanho de poros enquanto outros métodos envolvem a observação direta por microscopia eletrônica ou a observação de lâminas impregnadas que são métodos laboriosos e demorados. Em contrapartida, a medição da agregação do solo e da estabilidade de agregados do solo é uma análise simples, reprodutível e precisa, que pode ser efetuada em laboratório de maneira rápida (AMÉZKETA, 2008).

De acordo com a teoria de agregação dos solos de Tisdal e Oades (1982) e Oades (1984) a hierarquia de agregação do solo aceita três níveis de agregação: partículas do tamanho de argilas ($<2 \mu\text{m}$), microagregados ($<250 \mu\text{m}$) e macroagregados ($>250 \mu\text{m}$) enquanto cada tamanho de partícula possui seu próprio mecanismo de estabilização. Por isso, os diferentes níveis de agregação apresentam diferentes estabilidades e respondem ao meio de maneiras diferentes, como as chuvas, por exemplo.

Assim, macroagregados são rompidos facilmente por umedecimento e agitação enquanto microagregados tem maior estabilidade exigindo tratamentos de maior energia para sua total dispersão. Estes, como já dito, requerem maiores incrementos energéticos durante o tratamento para desagregarem-se enquanto a fração argila requer tratamentos mais vigorosos ainda, tanto físicos quanto químicos, para a completa dispersão.

Pojasok e Kay (1990), enfatizam a importância de proceder-se medições sistematizadas que caracterizem o comportamento da agregação do solo, que conseqüentemente consistem na aplicação de testes de estabilidade de agregados. Existem muitos métodos diferentes para se medir a macroagregação do solo sendo que alguns focam na distribuição do tamanho dos agregados e outros focam na estabilidade dos agregados (JASTROW; MILLER, 1991).

Alguns analisam o rompimento dos agregados pela ação do umedecimento enquanto outros consideram a ação mecânica enquanto ainda outros incluem ambos mecanismos. Portanto, estes testes foram projetados para, basicamente, quantificar a erosão causada pelo efeito mecânico da água. Além disso, os testes de estabilidade de agregados apresentam a conveniência de poder se proceder um grande número de amostras sendo um teste rápido e relativamente barato.

A distribuição do tamanho de agregados, que pode ser determinada via seca ou úmida, tem na via seca sua maior popularidade para a determinação da erosão pelo vento e do efeito do manejo do solo sobre a agregação (KEMPER; ROSENAU, 1986). Já a sua determinação via úmida é o método mais comum de para a avaliação de macroagregados sob o efeito da água envolvendo o umedecimento da amostra e sua subsequente seleção por tamanhos usando-se peneiras submersas.

Este procedimento gera a ruptura através do umedecimento e, portanto, permite testar a estabilidade de agregados em água. Dessa forma, a distribuição por tamanho de agregados estáveis em água é essencialmente uma determinação da estabilidade de macroagregados que permanecem estáveis durante processo de umedecimento e peneiramento do teste (JASTROW; MILLER, 1991).

Neste sentido, Yoder (1936), Williams et al. (1966), Kemper e Koch (1966), e Kemper e Rosenau (1986) empregaram primeiramente diversos métodos básicos aplicando múltiplas peneiras para determinar a estabilidade de agregados. Entretanto, Kemper e Rosenau (1986) concluíram que os resultados obtidos utilizando apenas uma única peneira ao invés de múltiplas é igualmente bastante representativo ao fenômeno que ocorre a campo, sendo que o uso de múltiplas peneiras se torna mais laborioso e demorado que o método de uma única peneira.

Assim, em consequência disso, no teste padrão de estabilidade de macroagregados usa-se de uma única peneira e foi inicialmente proposto por Kemper e Koch (1966), e posteriormente aprimorado por Kemper e Rosenau (1986). Assim, o teste padrão de estabilidade de agregados inclui o umedecimento da amostra, o peneiramento úmido, a dispersão da massa de agregados estáveis e o desconto da massa de areias contida na amostra utilizada no ensaio.

Dessa forma, o ensaio padrão de determinação da estabilidade de agregados consiste em tomar-se 4 g de agregados de 1 a 2 mm colocados sobre uma peneira de malha 60 mesh (0,25 mm) e umedecido a saturação por vapor. A peneira é então submetida a oscilações de curso (subida e decida) de 1,3 cm por 35 ciclos por três minutos. O material reminescente após três minutos de oscilações é secado em estufa a 105°C e pesado, sendo está a massa de agregados. Após pesado este material é disperso em solução de NaOH sobre a mesma peneira utilizada anteriormente e a massa de areias é conduzida a estufa e tem sua massa determinada após a secagem.

O Índice de Estabilidade de Agregados, ou a percentagem de agregados estáveis ou de estabilidade de agregados em água da amostra é então calculada pela equação 2.

$$EA \% = \left(\frac{\text{Massa de Agregados Retidos} - \text{Massa Areias}}{\text{Massa amostra Seca Total} - \text{Massa Areias}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Mas mesmo para o método padrão, a literatura demonstra variações em procedimentos específicos. Algumas dessas variações são necessárias ou influenciadas pelos tipos de solos a serem estudados, mas outras resultam dos materiais disponíveis para as análises.

Segundo Barthès e Rose (2002) alguns autores propuseram estudar a estabilidade de agregados utilizando agregados secos calibrados em um determinado tamanho. Nesse sentido, foi proposto utilizar-se agregados de 3 a 5 mm, ao invés das frações menores que 2mm.

Porém, os resultados não foram satisfatórios pois estas frações maiores que 3 mm possuem partículas ou agregados menores que resultam em uma desagregação excessiva e descontrolada durante a peneiração a seco para a preparação da amostra (LE BISSONNAIS; LE SOUDER, 1995). Portanto, tem-se encontrado dificuldades em estudos de agregação usando agregados calibrados senão os calibrados a < 2 mm uma vez que estes tem levado a resultados mais próximos dos obtidos em medições e observações a campo.

Há também estudos, como Valmis et al. (2005), e Dimoyiannis et al. (2006), estabelecendo relações entre erosão entre sulcos e estabilidade dos agregados superficiais. Estes estudos usam do efeito do umedecimento rápido durante o peneiramento dos agregados como uma das principais influências na destruição de agregados.

Barthès e Rose. (2002), demonstrou que a suscetibilidade de solos à erosão e ao escoamento superficial está relacionada a resistência dos agregados superficiais ao rompimento ocasionado pelo ar aprisionado. Visto que este processo resulta da compressão ocasionada pelo ar durante o rápido umedecimento do agregado, este é o principal mecanismo de desintegração durante a imersão rápida de agregados secos em água (LE BISSONNAIS, 1998).

Este efeito pode parcialmente explicar a relação entre a erosão entre sulcos e a estabilidade dos agregados superficiais, Xiao et al. (2017), embora o rompimento de agregados pelo ar aprisionado e o impacto das gotas de chuva também sejam subprocessos

relevantes e, mesmo nestes casos, o índice de estabilidade de agregados com umedecimento rápido é um bom indicador destes processos (SHI et al., 2010).

Assim, uma das adaptações do método seria substituir o pré-umedecimento das amostras por iniciar-se o teste com a amostra seca ao ar sem pré-umedecimento algum e submetê-la ao umedecimento rápido (imersão). Isto tem trazido resultados mais significativos nas correlações entre estabilidade de agregados e erodibilidade e taxas de perdas de solos, como tratado sucintamente no capítulo anterior.

Além disso, Stanchi et al. (2015) propõem que quando se avalia a estabilidade de agregados dos solos em água pelo método padrão de peneiramento úmido, o dado resultante é o índice de estabilidade de agregados do solo em água. Porém, normalmente despreza-se os valores de perdas de solos. No caso, os valores de perdas de solo, segundo proposto por Stanchi et al. (2015) podem ser obtidos pela equação 3 conforme segue.

$$\% \text{ de Perdas de Solo} = 100 - \left(\frac{\text{Massa de Agregados Retidos} - \text{Massa Areias}}{\text{Massa amostra Seca Total} - \text{Massa Areias}} \times 100 \right) \quad (3)$$

Dessa forma, este autor propõe que as perdas de solos correspondem as perdas sofridas pelos agregados durante o procedimento do teste padrão. Dessa forma, os valores de perdas dos solos correspondem aos valores complementares do índice de agregação dos solos, isto é $100 - EA\%$, o que viabiliza a quantificação de uma estimativa dos valores de erodibilidade e taxas das perdas de solos, neste caso, a erosão.

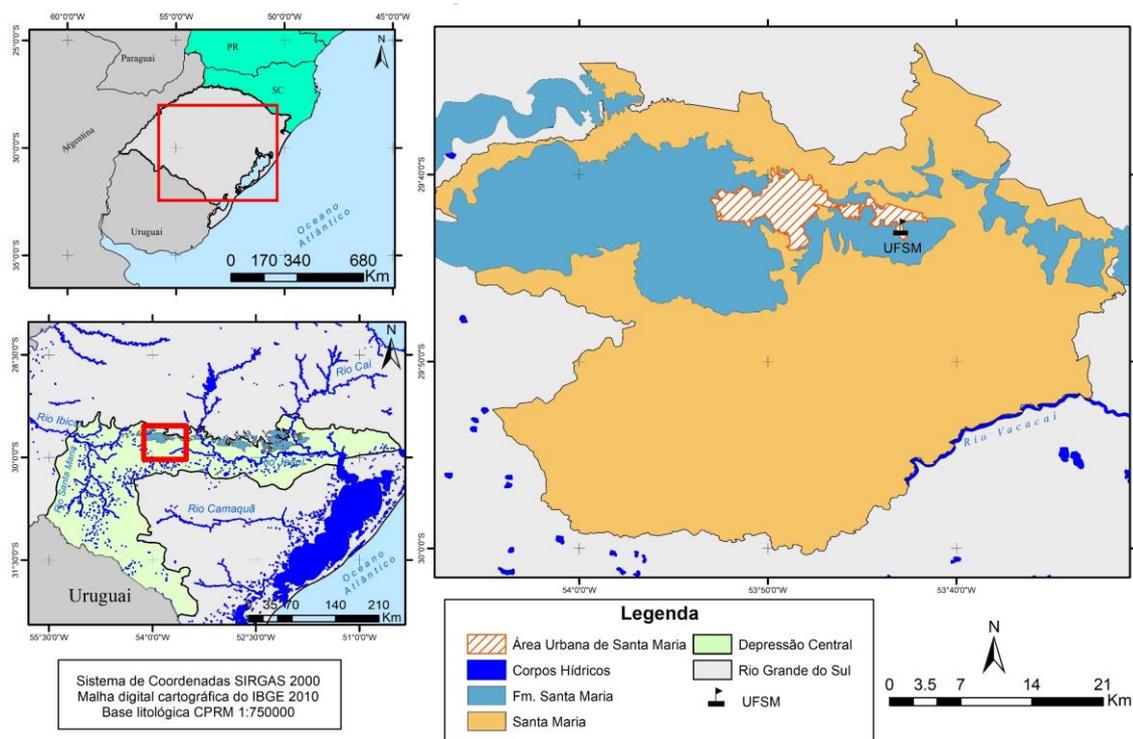
3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA AMOSTRADA

Segundo Almeida et al. (2021), o Campus da UFSM possui uma área de 112,1 ha e está localizado entre as coordenadas geográficas 29°41' de latitude sul e 53°48' de longitude oeste, na Depressão Central Sul-riograndense, próximo a borda do planalto. O clima é do tipo subtropical, Cfa segundo a classificação de Koeppen, com temperatura média anual de 19,4 °C, oscilando entre 30 °C no verão e médias inferiores a 18 °C no inverno.

As chuvas normalmente bem distribuídas variam entre 1.300 a 1.800 mm ao ano sendo os meses de maio e junho os de maior precipitação. A vegetação natural predominante é de campo nativo, formada por gramíneas, compostas e leguminosas. Na figura 3 tem-se o mapa de situação da área amostrada (Campus da UFSM).

Figura 3 - Localização da área de coleta de amostras ressaltando seu contexto litológico e regional.



Fonte: Autor, adaptado de IBGE, 2015

Na área do Campus da Universidade Federal de Santa Maria ocorre a Formação Santa Maria, do triássico com duas fácies: o Membro Passo das Tropas (inferior) constituído predominantemente por arenitos grosseiros a médios de cores amarela intercalados com camadas de siltitos arenosos indicativos de ambiente fluvial. O Membro

Alemoa constituído por siltitos argilosos maciços (lamitos) de cor vermelha, podendo ocorrer intercalado com cor cinza claro.

Ocorrem também Terraços Fluviais Pleistocênicos constituídos por conglomerados, arenitos médios argilosos e siltitos arenosos fluviais; e Sedimentos Aluviais recentes, representados por cascalhos, areias, siltes e argilas fluviais (MACIEL FILHO et al, 1988). A figura 3 mostra a área de coleta de amostras ressaltando seu contexto litológico e regional.

Sobre os arenitos do Membro Passo das Tropas, de relevo mais suave, ocorre predominantemente Argissolo Vermelho-Amarelo. Este apresenta variações significativas, principalmente em relação ao horizonte A, mais espesso nas áreas de relevo mais suave, e a quantidade de mosqueados e concreções de óxidos de ferro no topo do horizonte B, mais abundante nas zonas de oscilação do lençol freático.

Sobre o Membro Alemoa, da Formação Santa Maria, ocorrem colinas mais amplas e suaves, sendo identificadas no mesmo as classes de solos Argissolo Vermelho-Escuro e Argissolo Vermelho-Amarelo no topo e terço superior das colinas; Argissolos Bruno-Acinzentado e Plintossolo no terço médio inferior das mesmas, podendo ocorrer Planossolos, Gleissolos Húmico, Pouco Húmico e Vertissolos no terço inferior das colinas (ALMEIDA et al., 2021).

Os Terraços Fluviais apresentam relevo ondulado a suave ondulado formando colinas com ombro de encosta bem definido, onde ocorrem Argissolos Vermelho-Amarelos com sequência de horizontes A, E, Bt e A, BA, Bt, com textura superficial areia franca. Nas Planícies com Sedimentos Aluviais recentes ocorrem as classes Planossolos, Gleyssolos intrincadamente associados, sendo esta sequência de perfis na toposseqüência a mais comum na Depressão Central Sul-riograndense (ALMEIDA et al., op. cit.).

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para avaliar o efeito da elevação de temperatura sobre a estabilidade de agregados dos solos tomaram-se amostras de solos no Campus da UFSM. Estas amostras foram usadas para ter-se dados de solos representativos sobre a região e possibilitar a aplicação da metodologia proposta que consta de incubação e avaliação do índice de estabilidade de agregados ao longo do período de avaliação.

Os Argissolos são o alvo desta avaliação uma vez que possuem características texturais e de posição na paisagem regional que os vulnerabilizam aos processos erosivos

superficiais. O fato de desenvolverem-se nas cotas superiores das unidades de relevo os predispõem a processos denudacionais, naturais ou antrópicos, que lhes conferem particular atenção em seu uso, manejo e vulnerabilidade ambiental.

Em razão disto, e para obter dados preliminares neste estudo e posteriormente testar a metodologia de incubação proposta, foram coletadas amostras do terço superior de vertentes. As amostras foram coletadas durante o mês de fevereiro de 2021, em três pontos distintos.

Assim, foram amostrados Argissolos disponíveis nas proximidades sem a preocupação em se efetuar uma cobertura dos solos de toda a região acreditando-se que os aspectos discutidos neste estudo permitem uma extrapolação e que, em vista disto, seria representativo da classe predominante e mais propensa a processos erosivos da área.

Portanto, as amostras aqui avaliadas têm o propósito de testar a metodologia de análise e responder a hipótese sugerida no estudo, isto é, que os Argissolos da Depressão Central Sul-riograndense com textura superficial arenosa muito provavelmente estão suscetíveis a intensificação dos processos erosivos em um quadro de elevação de temperaturas frente a mudanças climáticas.

Para tanto, foram efetuados três procedimentos. Uma avaliação preliminar expedita do efeito da temperatura sobre a estabilidade de agregados por 70 dias e, posteriormente, foram conduzidos dois tratamentos de incubação sobre as amostras de solos durante um período de aproximadamente 120 dias.

Após a coleta das amostras, houve uma avaliação imediata da granulometria, matéria orgânica e da estabilidade de agregados para verificar os valores destes parâmetros a campo. Para depois, comparar com os resultados dos ensaios durante o tratamento e inferir sobre as modificações.

Na avaliação preliminar expedita três amostras de locais diferentes foram submetidas a duas diferentes condições de temperatura com avaliações dos parâmetros granulometria, estabilidade de agregados e matéria orgânica. Posteriormente, os dois ensaios de incubação de amostras foram conduzidos por um período de aproximadamente 120 dias com duas amostras de granulometrias distintas pertencentes ao ponto 1 e ponto 2, respectivamente, nas quais foram conduzidas as determinações dos parâmetros iniciais e ao longo do ensaio para verificar sua evolução de matéria orgânica e estabilidade de agregados.

3.2.1 Coleta e tratamentos das amostras

A primeira área amostrada, correspondente a amostra 1, está situada próxima à área experimental do Departamento de Solos do Centro de Ciências Rurais, nas coordenadas geográficas: 29°43'08" S e 53°42'09" W, a leste do campus da Universidade Federal de Santa Maria, ao lado da estrada municipal Pedro Fernandes da Silveira. A figura 4 apresenta o aspecto geral da área em que o material foi coletado. Sendo as amostras coletadas na parte superior do barranco.

Figura 4 - Aspecto geral da área onde foi coletada a amostra 1.

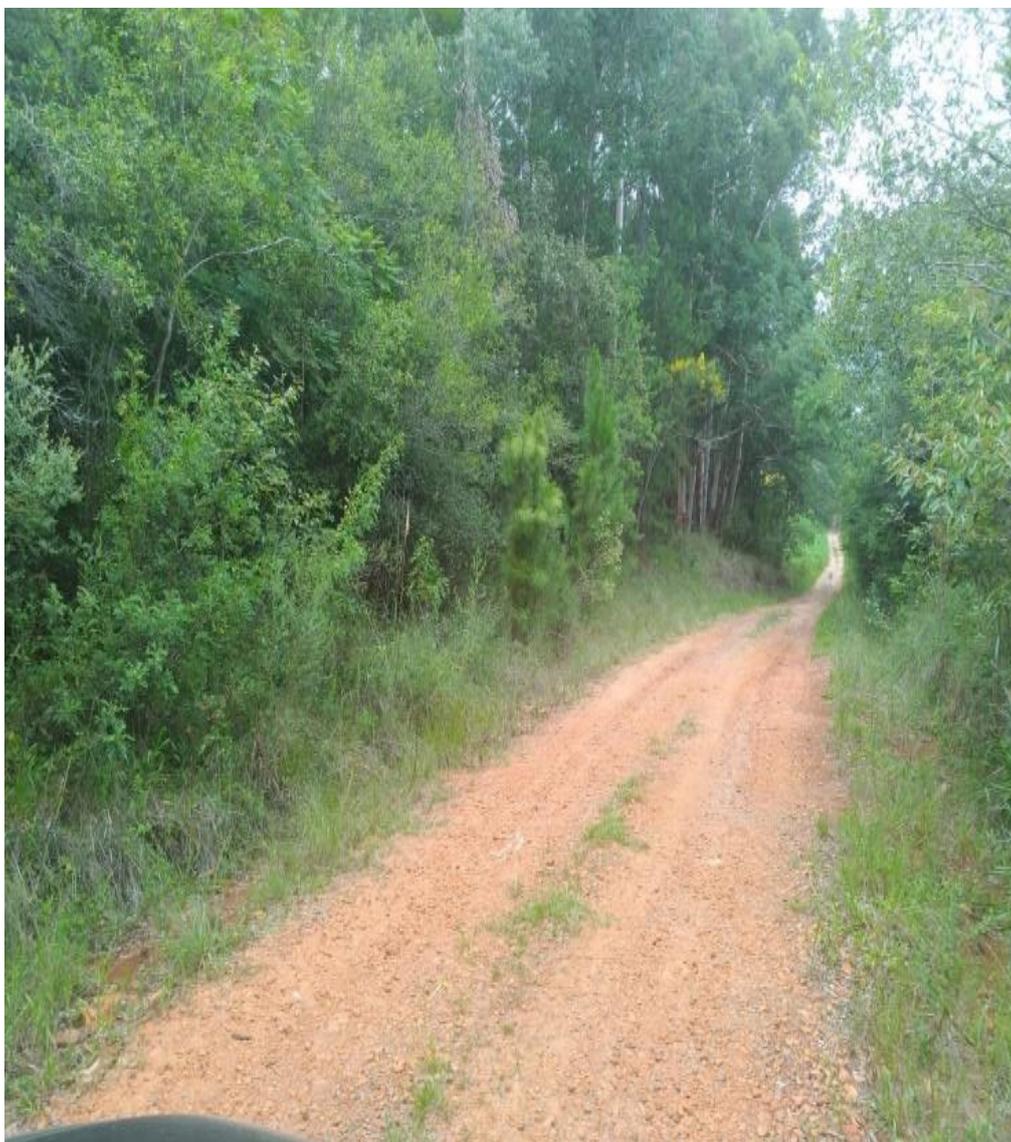


Fonte: Autor

A segunda área amostrada, correspondente a amostra 2, localiza-se nas coordenadas geográficas: 29°43'01" S e 53°43'39" W. Situa-se em uma estrada próxima ao jardim botânico da Universidade Federal de Santa Maria.

A figura 5 ilustra o aspecto geral da área onde foi coletada a amostra 3. Sendo a amostra coletada dos horizontes superficiais de um perfil à esquerda da imagem que aparece na foto.

Figura 5 - Aspecto geral da área onde foi coletada a amostra 3.



Fonte: Autor

A terceira área amostrada, correspondente a amostra 3, localiza-se nas coordenadas geográficas: 29°43'54" S e 53°44'19" W. Situa-se na estrada para a colônia Pau a Pique, no distrito de Pains, próxima a área nova da Universidade Federal de Santa Maria.

A figura 6 conforme apresenta o aspecto geral do local. Lembrando que o material foi coletado no horizonte superficial no topo da coxilha.

Figura 6 - Ilustra o aspecto geral de onde foi coletada a amostra 3.



Fonte: Autor

Assim, uma vez que este estudo avalia a erodibilidade, que é razão da resistência do solo a ação erosiva das chuvas, fenômeno em superfície, foram coletadas apenas amostras superficiais, correspondentes a primeira camada imediatamente abaixo da serapilheira. As amostras coletadas corresponderam a 10 cm de profundidade a partir da superfície e foram recolhidas em sacos plásticos, identificadas e encaminhadas ao laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências da UFSM, onde foi imediatamente procedida a subdivisão e padronização das amostras (uso de quartiador de amostras e peneiramento) para a obtenção da classe de agregados a ser trabalhada nos ensaios.

As amostras subdivididas e padronizadas foram utilizadas nas determinações para os ensaios com a intenção de obter a caracterização da curva granulométrica, teor de matéria orgânica por ignição e o percentual da estabilidade de agregados em água nos procedimentos com e sem tratamento térmico nas avaliações das três amostras que entraram nas avaliações preliminares expeditas.

3.2.1.1 Avaliações preliminares expeditas

As avaliações preliminares expeditas das amostras padronizadas corresponderam a tratamentos elementares e de curta duração para testar, de maneira sucinta, a metodologia e os parâmetros através da aplicação da metodologia levantada. Nestes tratamentos as amostras tiveram três destinos: avaliação imediata, resguardadas em geladeira e uma tentativa rudimentar de tratamento térmico correspondente às amostras resguardadas em casa de vegetação, conforme demonstrado na figura 7.

Figura 7 - Amostras em casa de vegetação, como parte das avaliações preliminares expeditas.



Fonte: Autor

As amostras encaminhadas imediatamente aos ensaios de avaliação foram prontamente ensaiadas para obter-se suas propriedades o mais próximo às condições de campo. Estas foram identificadas como Avaliação Imediata.

As amostras Resguardadas em Geladeira foram armazenadas em refrigerador pelo mesmo período de incubação em casa de vegetação (2 meses) a temperaturas em torno de 15 °C. Já as amostras encaminhadas à casa de vegetação, foram mantidas por um período

de dois meses com temperaturas com oscilações diárias no período entre 25 a 40 °C observadas em termômetro de temperatura máxima e mínima.

Desta forma, esperou-se que as amostras imediatamente avaliadas caracterizassem as condições de campo dos materiais, enquanto as amostras tratadas possibilitassem a posterior comparação com as amostras tratadas, averiguando assim o diferencial.

Das amostras resguardadas na geladeira esperou-se que mantivessem em parte suas características originais o mais próximo das amostras imediatamente avaliadas. Das amostras incubadas em casa de vegetação, esperou-se que perderiam parte de seu conteúdo de matéria orgânica em razão do tratamento térmico e que isso alterasse sua estabilidade de agregados em água.

Embora tais efeitos não tenham sido exatamente como o esperado (o tratamento em casa de vegetação não foi satisfatório), por isso as repetições do tratamento ‘geladeira’ e ‘estufa’ (casa de vegetação). Os resultados obtidos possibilitaram algumas inferências relevantes a serem discutidas posteriormente nos resultados.

Assim, uma vez submetidas aos tratamentos e secagem ao ar, as amostras foram avaliadas em sua composição granulométrica, seu conteúdo de matéria orgânica e sua estabilidade de agregado em água.

3.2.1.2 Tratamentos de Incubação

Os tratamentos de incubação constaram de amostras de solo obtidas em uma segunda e terceira coleta que contemplou apenas as amostras 1 e 2 por uma questão de disponibilidade de espaço na caixa de incubação e a necessidade de diversas repetições. Tratam-se dos mesmos locais de coleta, porém em momentos distintos.

Uma vez coletadas e padronizadas as amostras para os ensaios de incubação estas foram colocadas em recipientes com aproximadamente 250 gramas de solo e encaminhadas ao tratamento térmico. O tratamento térmico procedeu-se em uma caixa de incubação desenhada para este ensaio e projetada para manter umidade e temperatura elevada.

Para isto, construiu-se uma caixa de vidro de 60 cm de comprimento com 30 cm de largura e 40 cm de altura colada com cola de silicone e coberta com tampa de vidro e com suas bordas superiores revestidas com fita de EVA, própria para proporcionar vedação.

Na figura 8 e 9 ilustra-se o aspecto geral da caixa de incubação utilizada nos tratamentos térmicos das amostras durante o estudo.

Figura 8 - Aspecto da caixa de incubação sem a tampa e sem a cobertura de isopor.



Fonte: Autor

Figura 9 - Aspecto da caixa montada.



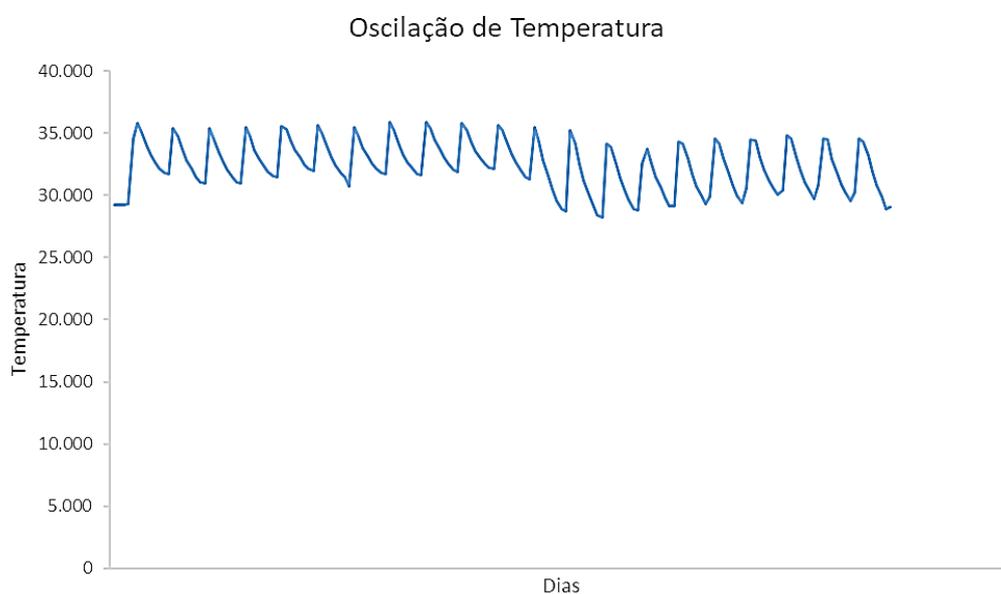
Fonte: Autor

Pode-se notar a presença de um certo nível de água no fundo do reservatório que foi usado como mantedor da umidade e temperatura pois nele se encontrava o sistema de aquecimento.

O sistema de aquecimento, manutenção da temperatura e umidade, neste caso contou com este sistema onde utilizou-se um termostato automático com resistência de 400w ajustado a temperatura máxima de 35°C. Este termostato encontrou-se submerso nesta lâmina de água destilada de 10 cm de profundidade e ligado a um *timer* que regulou seu horário de funcionamento, regulando assim os ciclos de temperatura e a manutenção umidade.

Utilizou-se também uma cobertura de placas de isopor sobre a caixa para proporcionar isolamento térmico cobrindo inclusive a tampa. Durante os períodos iniciais de funcionamento as oscilações de temperatura e saturação foram monitoradas por um datalogger Termo-higrômetro Digital, modelo HOBO UX100-003, percebendo leituras de 100% de saturação e variações de temperatura conforme gráfico a seguir, onde o intervalo entre a máxima e a mínima correspondem ao ciclo de um dia. A figura 10 ilustra e exemplifica a manutenção da temperatura e seus ciclos diários durante um período de 21 dias.

Figura 10 - Ciclos diários de temperaturas máximas e mínimas na caixa durante um período de 21 dias.



Fonte: Autor

Desta maneira, foi possível monitorar a simulação dos ciclos de aquecimento e resfriamento diários a 10 cm de profundidade do solo conforme proposto por Eltz e Roveder (2005). Com isso, buscou-se mimetizar as temperaturas obtidas em solos

degradados no bioma pampa gaúcho durante o verão, com oscilações de 36°C a partir das nove da manhã e declinando a 28°C até a manhã do dia seguinte.

Os ciclos de temperatura se mantiveram frequentes durante o período de ambas incubações, mantendo-se bastante homogêneos e apresentando apenas uma pequena oscilação conforme as variações climáticas sazonais da temperatura ambiente. Bem como os níveis de saturação higroscópica, que se mantiveram constantes a 99% ao longo de todo o tratamento de incubação. O sistema também se apresentou bastante hermético, não sendo inclusive necessária a reposição dos níveis de água destilada.

Uma vez iniciada as incubações, procederam-se eventuais ventilações na caixa para renovar o ar e disponibilizar oxigênio para as reações biológicas. As determinações de teor de matéria orgânica e índice de estabilidade de agregados foram efetuadas aproximadamente a cada quinze dias a partir da segunda semana de início da cultura. A determinação granulométrica foi efetuada logo após a coleta das amostras. Tais determinações foram procedidas conforme as metodologias a serem descritas a seguir.

3.2.2 Ensaio de Granulometria

A metodologia para a determinação do tamanho de partículas minerais dos solos utilizada nas determinações deste estudo baseia-se na descrição proposta por Suguio (1973), e na norma ABNT NBR 7181 de 1984.

Esta metodologia utiliza-se de dois métodos de quantificação do tamanho das partículas minerais uma vez que os sedimentos e solos apresentam conteúdos heterogêneos existindo partículas finas, silte e argila, bem como grosseiras em sua constituição granulométrica. Assim, este método utiliza-se do peneiramento para a determinação das partículas grosseiras (fração areia) e de processos de sedimentação (figura 11), baseados na lei de Stokes (1851) para a determinação de finos (frações silte e argilas).

O limite entre grosseiros e finos utilizado nesta metodologia está em 0,062 mm. Nesta granulação, ao extremo inferior, tem-se as areias muito finas na classificação de Wentworth. Abaixo desta granulação, encontram-se os finos, siltes e argilas, contemplados pela faixa de aplicabilidade da lei de Stokes.

Em contraste com o método baseado na aplicabilidade da lei de Stokes, o processo de peneiramento é o método universal na análise das frações arenosas. Os grãos passam através da peneira (grãos menores que a malha), e aqueles que permanecem (grãos

maiores que a malha) são chamados de “fração retida” ou “fração passante”, respectivamente.

Já a determinação de sedimentos finos, isto é, menores que 0,062 mm de diâmetro, dependem exclusivamente da lei de Stokes (1851). Esta lei permite calcular a resistência friccional exercida sobre uma partícula esférica em queda em meio fluido (líquido ou gás), calmo em sedimentação. A figura 11 exemplifica esta etapa.

Figura 11 - Ensaio de granulometria durante sedimentação (determinação de finos).



Fonte: Autor

Dentre os métodos de sedimentação, que são baseados na lei de Stokes, esta metodologia utilizou o método indireto de separação por pipetagem. Este método é baseado nas mudanças de concentração de partículas em uma suspensão originalmente uniforme, pela tomada de várias alíquotas com uma pipeta (em intervalos de tempo definidos), em profundidade que corresponde à do material que acabara de sedimentar naquele momento.

As quantidades de materiais em cada uma das classes granulométricas são obtidas a partir das mudanças na concentração de material em suspensão sendo a determinação feita pela pesagem do resíduo seco da pipetagem. Entre todos os métodos de análises granulométricas dos sedimentos finos (menor de 0,062mm), o método da pipeta é o que

recebe mais ampla aceitação em virtude da simplicidade de operação e do equipamento requerido.

Se uma suspensão for bem agitada, até que as partículas fiquem uniformemente distribuídas dentro de uma proveta graduada de 1 litro de volume e depois deixada em repouso, todas as partículas que tiverem velocidade de sedimentação maior que o tempo de sedimentação terão afundado até abaixo de um plano de profundidade, no fim de um intervalo de tempo.

Neste caso, todas as partículas que tenham uma velocidade de queda menor que o tempo de sedimentação permanecerão em sua original concentração até a profundidade de coleta, porque elas terão afundado somente uma fração daquela distância neste intervalo de tempo. Então, uma pequena amostra é tomada com pipeta, da profundidade de coleta no tempo de sedimentação e evaporada até a secagem total.

O peso do resíduo multiplicado por um fator de proporcionalidade, baseado na razão do volume da pipeta para o volume total da suspensão, representará a quantidade total de matéria que tem velocidade de decantação. Essa velocidade de decantação das partículas é calculada pela lei de Stokes (1851).

Depois que a primeira amostra de pipeta é recolhida, a suspensão é novamente agitada e um período maior de tempo é dado para repouso, de modo que partículas de tamanho menor que o intervalo anterior decante até a profundidade definida. A segunda amostra de pipeta conterà um resíduo mais fino do que a primeira amostra em uma quantidade igual ao peso do material situado entre as duas medidas escolhidas ou velocidades de decantação.

O processo pode ser repetido e, por simples subtração dos pesos dos resíduos sucessivos e cada vez mais finos (cada um multiplicado pelo fator de proporcionalidade), pode-se ter o peso do material em quaisquer intervalos granulométricos. Se for escolhida a escala de Wentworth, o método da pipeta ficará restrito a um material mais fino 0,062 mm, e os mesmos tempos e profundidades especificados no processo de decantação contínua serão usados para se colher amostras de suspensão com volumes de 20 cm³.

Após a homogeneização da suspensão, são colhidas amostras de pipeta nos seguintes intervalos de tempos e profundidades, conforme a granulação do material que se quer amostrar. Depois que várias amostras de pipeta foram colhidas, e os béqueres levados à evaporação até secarem completamente, o peso do resíduo contido em cada béquer é determinado por meio de uma balança analítica até duas a três casas decimais em gramas.

Para cada béquer com resíduo a anotação das pesagens pode ser feita descontando o peso seco prévio do copo tendo como resto apenas o valor do resíduo. O volume da pipeta, sendo de 20 cm³, corresponderá a 1/50 do volume total da suspensão, então cada um dos pesos encontrados deve ser multiplicado por 50 para converter os pesos em termos do volume original.

Esta conversão para o volume total para se encontrar o peso total da fração na suspensão inicial de 1.000 ml, que é feita multiplicando-se os pesos dos resíduos em cada béquer por 50, pode ser feita após encontradas as quantidades (peso) de materiais de cada classe contidas em 20cm³. Os pesos de cada uma das frações granulométricas, cujos limites dependem da escala escolhida, são convertidos em porcentagens relativas ao peso total da amostra, para tratamento estatístico dos dados.

Figura 12 - Início do processo de peneiramento (determinação de grosseiros).



Fonte: Autor

Uma vez encerradas as amostragens por pipetagem, o material em suspensão é lavado em peneira 0,062 mm, secado e peneirado (Figura 12).

Para executar o peneiramento dispõem-se de peneiras de 8 polegadas de diâmetro de armação com 1 ou 2 polegadas de altura, possuindo telas com malhas padronizadas, que geralmente podem ser combinadas seguindo uma determinada escala granulométrica (por exemplo, escala de Wentworth) para a classe areias.

As telas são fabricadas de latão ou bronze fosforoso e as armações de alumínio ou latão. Um conjunto de peneiras pode ser montado colocando-se várias peneiras uma sobre a outra, por meio de encaixes especiais, com a malha aumentando de baixo para cima.

Desta maneira, os grãos que permanecerem em uma determinada peneira, após o peneiramento, são maiores que a abertura da malha daquela peneira, mas menores que os da peneira superposta. Por fim, destes materiais retidos, determina-se sua massa, assim como as demais frações, e estipula-se sua fração percentual dentro da amostra total e constrói-se a curva granulométrica da amostra.

3.2.3 Ensaio de determinação da matéria orgânica

Há diversas metodologias de determinação da matéria orgânica dos solos. Segundo Sena et al. (2015), o método mais comumente utilizado como rotina nos laboratórios de análise de solos no Brasil é o proposto por Walkey-Black (1934), que se utiliza da oxidação química.

Embora este método seja tido como bastante preciso e de baixo custo (Tedesco et al., 1995; Sato, 2013), apresenta o inconveniente de gerar resíduos indesejáveis (Cr^{+6} e Ácido Sulfúrico) e superestimar os conteúdos de carbono orgânico das amostras uma vez que computa no resultado final interferências devido à oxidação ou redução de alguns constituintes do solo, como o Cl^- , Fe^{2+} e MnO_2 (NELSON; SOMMERS, 1996).

Assim, outra metodologia utilizada para a determinação do carbono orgânico do solo é a perda de massa por ignição conduzida em mufla a altas temperaturas. Tem como princípio a combustão do carbono orgânico por via seca fazendo a determinação gravimétrica do C transformado em CO_2 , o qual é estimado a partir da massa volatilizada de uma amostra de solo seco submetido à elevada temperatura (SCHULTE; HOPKINS, 1996).

Dessa forma, trata-se de uma opção para evitar qualquer contaminação do material e do meio (BEN-DOR; BANIN, 1989). Assim, neste estudo optou-se, por questões metodológicas e disponibilidade de equipamento, pelo método da perda de massa por ignição.

Também a literatura tem o considerado satisfatório para a determinação de matéria orgânica em solos, Brunetto et al. (2006), Escosteguy et al. (2007) e Sena et al. (2015), em substituição a utilização do método sulfocrômico proposto por Walkey-Black (1934).

Além disto, a metodologia da perda por ignição também é considerada adequada por apresentar a vantagem de não ocasionar descarte de materiais potencialmente nocivos ao meio ambiente. Isto, uma vez que seus resíduos são apenas o solo calcinado.

Figura 13 - Amostras sendo calcinadas em mufla.



Fonte: Autor

Assim, a metodologia utilizada neste estudo para a determinação dos teores de matéria orgânica seguiu as orientações do Manual de Métodos de Análise de Solos (EMBRAPA, 2017), das aplicações segundo Escosteguy et al. (2007), bem como de acordo com a Norma ABNT NBR13600 de 2022.

Dessa forma, o procedimento em si consta da condução a mufla das amostras que se deseja avaliar os teores de matéria orgânica, para tanto, utiliza-se de cadinhos aproximadamente de 30 cm³ de volume. Inicialmente estes cadinhos são secados na mufla por duas horas e determinado seu peso calcinado após resfriamento em dessecador por tempo suficiente até atingir a temperatura ambiente.

Pesa-se então nestes cadinhos aproximadamente 4 gramas do solo a ser analisado e seca-se este material em estufa a + ou - 105 °C por tempo suficiente até peso constante.

E então, para determinar a quantidade de solo seco que será calcinado, pesa-se novamente.

Uma vez conhecido o peso de solo seco que será calcinado, o peso inicial, este material é conduzido a mufla por duas horas à 400 °C para a ignição da matéria orgânica. Este cálculo é descrito pela equação 4 conforme segue.

$$M.O. \% = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100 \quad (4)$$

Uma vez transcorrido este período retira-se os cadinhos com solo calcinado da mufla e o resfria a seguir em um dessecador até atingir temperatura ambiente. Uma vez equiparada a temperatura faz-se a pesagem e obtém-se o peso final descontando-se o peso do cadinho.

3.2.4 Ensaio de estabilidade de agregados do solo em água

Segundo Cesário (2010), a partir do trabalho de Yoder (1936), os estudos da estabilidade de agregados do solo vêm sendo realizados com a finalidade de relacionar este parâmetro aos processos erosivos. Atualmente os estudos da estabilidade de agregados estendem-se a avaliação do impacto de uso do solo e seu manejo na qualidade física do solo, uma vez que o estado de agregação varia com o tempo e espaço à medida que os agregados se formam, desintegram-se e reintegram-se periodicamente.

Os solos variam suas respostas a forças destrutivas de acordo com sua vulnerabilidade, e a estabilidade de agregados mede esta vulnerabilidade expressando a resistência dos agregados ao rompimento quando expostos a processos destrutivos (Cesário, Op. cit.). Para testar a resistência dos solos a estes agentes destrutivos geralmente submete-se amostras de agregados do solo a forças artificialmente induzidas que simulam o que ocorre no campo (HILLEL, 2003).

A metodologia mais usada para simular estas forças é a ação destrutiva da água. A água pode causar o colapso dos agregados do solo quando dissolve ou enfraquece ligações de substâncias cimentantes, ocasiona a expansão de argilas expansivas ou a pressão da expulsão de gases a medida que o agregado umedece (HILLEL, Op. cit.).

Assim, a metodologia clássica e que mais prevalece no estudo da estabilidade de agregados é o método de peneiramento molhado proposto por Yoder (1936), e descrito por Kemper (1965), conforme apresentado a seguir:

Uma vez seca ao ar as amostras de solo são destorroadas com um cilindro e passadas nas peneiras de 2 e 1 mm simultaneamente. Despreza-se o material retido na peneira 2mm e recolhe-se o material que ficou retido na peneira 1mm. Na figura 14 demonstra-se o aspecto deste material resultante.

Figura 14 - Aspecto dos macroagregados obtidos por peneiramento, passante 2 mm e retido 1 mm, utilizados no ensaio.



Fonte: Autor

A partir do material retido na peneira 1mm separa-se 3 subamostras de aproximadamente 4 gramas em cápsulas de alumínio previamente pesadas. Desta 3 subamostras 1 será usada para determinar o conteúdo de umidade da amostra e 2 serão encaminhadas ao procedimento de peneiramento úmido.

O processo de peneiramento úmido consiste em submeter a amostra sobre uma peneira 0,25 mm de abertura a um oscilamento vertical submergido em água de 210 repetições de curso de 1,3 cm durante 5 minutos.

Para tanto, a metodologia sugere o uso de um aparelho de oscilação vertical ajustável, porém, na indisponibilidade de tal aparelho, este estudo optou por proceder de forma adaptada ao método onde as oscilações foram efetuadas manualmente. Neste procedimento adaptado, respeitou-se o número de oscilações e o tempo de duração do ensaio bem como o comprimento do curso das oscilações da peneira. A figura 15 apresenta os agregados sendo adicionados a peneira para iniciar o ensaio.

Figura 15 - Macroagregados sendo conduzidos ao estresse úmido.



Fonte: Autor

Normalmente, inicia-se o procedimento com o umedecimento paulatino da amostra. Para isso, a amostra é colocada por dez minutos antes do início do ensaio sobre a peneira de 0,25 mm que deverá estar ligeiramente em contato com a superfície da água. Isto ocasionará um lento umedecimento da amostra evitando-se assim os efeitos destrutivos de um umedecimento abrupto sobre os agregados do solo, como referidos anteriormente.

Porém, conforme sugerido por Barthès et al. (2002), Valmis et al. (2005) e Dimoyiannis et al. (2006), os efeitos de um umedecimento rápido são muito mais representativos às perdas por erosão que os resultados obtidos pelo umedecimento paulatino. Portanto, neste estudo onde procura-se correlacionar perdas da estabilidade de

agregados em função de incrementos nas temperaturas com processos erosivos, procedeu-se o umedecimento instantâneo das amostras.

Assim, após adicionar-se abruptamente a amostra de agregados secos ao ar à peneira já submergida, inicia-se o procedimento das oscilações verticais com um curso de 1,3 cm por 210 repetições distribuídas em um tempo de 5 minutos. Quando finalizada o total de oscilações e transcorrido o tempo específico o material remanescente do procedimento do ensaio é transferido a uma cápsula de alumínio previamente pesada com o auxílio de pisset com água e levada a estufa a + ou - 105°C para a secagem e posterior pesagem e determinação da massa de agregados que resistiram ao processo de estresse em água. A figura 16 apresenta as repetições a serem conduzidas ao ensaio.

Figura 16 - Repetições das amostras durante ensaio.



Fonte: Autor

Em uma etapa seguinte do ensaio busca-se obter o conteúdo de areias nos agregados remanescentes ao processo de abrasão úmida.

Para isso, coloca-se o conteúdo de agregados obtidos na etapa anterior sobre a peneira de malha 0,25 mm e submerge-se os agregados sobre a peneira em uma solução de 1/3 de NaOH e 2/3 de água e, com o auxílio de um bastão de vidro, desagrega-se suavemente o material.

Uma vez finalizado este processo de lavagem das areias, recolhe-se as areias aqui presentes para uma cápsula previamente pesada e leva-se a estufa para a secagem e posterior pesagem. Conforme equação 6.

$$EA \% = \frac{\text{Peso de Agregados Retidos} - \text{Peso de Areias}}{\text{Peso amostra Seca Total} - \text{Peso Areias}} \quad (6)$$

Quando em posse dos dados dos resultados do ensaio, aplicou-se a fórmula proposta por Hillel (2003) conforme descrita acima. Uma vez aplicadas as metodologias supracitadas os dados obtidos foram processados em planilhas eletrônicas Excel a exemplo da figura 17.

Figura 17 - Exemplo da planilha usada para cálculo dos dados.

Determinação M. O. amostra inicial (Coleta: 02/12/2021)											
Amostra	nº Cad.	P 360	P 105	P 360	P seco	P calcin.	% M. O.				
Exfluvio	3	34,387	39,057	39,013	4,67	4,626	0,942184154				
Exfluvio	6	42,34	46,709	46,649	4,369	4,309	1,373311971	Média Sel.Méd. Geral			
Exfluvio	10	30,826	35,015	34,977	4,189	4,151	0,907137742	0,924661	1,074		
Jad. Bot.	15	33,086	36,791	36,696	3,705	3,61	2,564102564				
Jad. Bot.	18	32,486	36,346	36,244	3,86	3,758	2,642487047				
Jad. Bot.	21	31,208	35,284	35,178	4,076	3,97	2,600588813	2,582346	2,602		
Determinação Est. De Agregado (Coleta: 02/12/2021)											
Amostra	Nº Cap.	Peso Cap.	Cap+Amost	Cap+Agreg.	Cap+Areia	Amostra	Am. Corrig.	Umidade	Agregado	Areia	% de Est. de Agreg.
Exfluvio	18	22,159	26,745	25,792	23,172	4,586		4,583	3,633	1,013	73,38186205
Exfluvio	16	19,162	23,581	22,67	20,105	4,419		4,416	3,508	0,943	73,84566412
Exfluvio	32	18,405	22,602	21,552	19,253	4,197		4,195	3,147	0,848	68,69683161 Méd. Dire Méd. Sel.
Exfluvio	12br	18,476	22,976	21,746	19,329	4,5		4,497	3,27	0,853	66,32067621 70,56126 71,97479
Jad. Bot.	35r	20,438	24,403	23,697	20,759	3,965		3,959	3,259	0,321	80,75546731
Jad. Bot.	6r	19,358	23,699	22,972	19,824	4,341		4,335	3,614	0,466	81,3733501
Jad. Bot.	17	22,363	26,883	25,785	22,668	4,52		4,513	3,422	0,305	74,06749027 Méd. Dire Méd. Sel.
Jad. Bot.	11	22,978	26,764	26,015	23,264	3,786		3,780	3,037	0,286	78,72577801 78,73052 81,06441
Determinação Umidade Amostras (Coleta: 02/12/2021)											
Amostra	Nº Cap.	Peso Cap.	Cap+Amost	Cap+am sec	Solo umd	Solo secc	% Umidade				
Exfluvio	42	18,696	23,185	23,047	4,489	4,351		0,057			
Jad. Bot.	22	21,206	25,453	25,098	4,247	3,892		0,148			

Fonte: Autor

Na determinação da matéria orgânica, obteve-se seu percentual sobre a amostra total para cada tratamento sendo as determinações de matéria orgânica efetuadas em concomitância aos ensaios de estabilidade de agregados do solo em água.

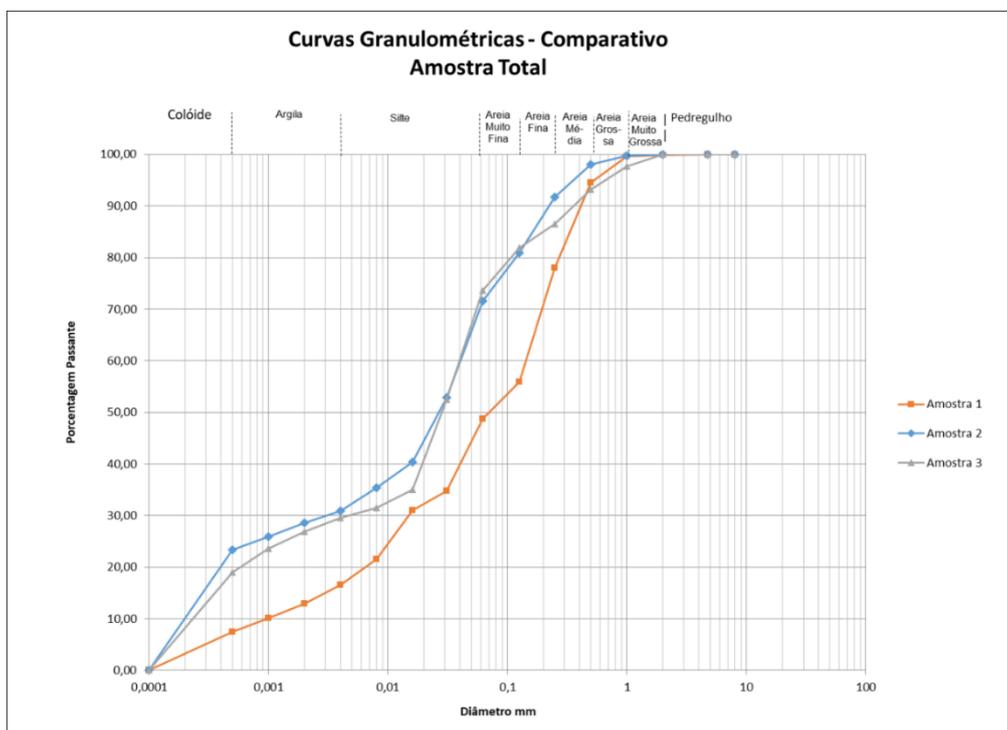
Já nos Ensaios de estabilidade de agregados em água obteve-se o percentual de agregados obtidos pelo tratamento de estresse em água reminescente sobre o percentual da amostra total.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Granulometrias

Das três amostras analisadas, duas resultaram em granulometrias semelhantes de elevados teores de argilas visto se tratarem de solos relativamente próximos provenientes de mesmo material de origem. Tratam-se das amostras 2 e 3. Em contrapartida, obtida de um lugar mais distante, a granulometria da amostra 1 apresentou menor porcentagem da fração argila e quantidades bem mais significativas de areias, como pode ser observado no gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva granulométrica das amostras 1, 2 e 3 em gráfico comparativo apresentando todas as classes de tamanho de partículas avaliadas.



Fonte: Autor

Como produtos das análises granulométricas obteve-se não só os conteúdos percentuais das frações areia, silte e argila de cada uma das amostras, como também a curva granulométrica (gráfico 1), pormenorizando o conteúdo de cada fração presente nas amostras. Este último formato de apresentação dos resultados da análise granulométrica é bastante útil para perceber as distinções e similaridades entre as amostras, porém não

permite a obtenção de dados numéricos muito precisos para considerações e correlações a partir da caracterização da amostra.

Nesse sentido, e dentro da aplicabilidade deste estudo, os valores percentuais absolutos dos conteúdos das frações areia, silte e argila, são necessários nas determinações das relações e comparações entre os conteúdos de matéria orgânica e do percentual de estabilidade de agregados do solo em água, para a pertinência das análises.

Assim, segue abaixo na tabela 2, os valores das frações de areia, silte e argila obtidas para cada amostra. Com a exposição dos dados dessa forma, e mesmo na observação do gráfico comparativo das curvas granulométricas, pode-se perceber a similaridade entre as amostras 2 e 3 em sua distribuição das classes dos tamanhos de partículas.

Tabela 2 - Resultados da análise granulométrica para as amostras 1, 2 e 3 demonstrando as diferenças entre as amostras.

Amostra	Areia %	Silte %	Argila %
1	51,12	32,18	16,58
2	28,43	40,67	30,91
3	26,34	44,05	29,60

Fonte: Autor

Ainda analisando o quadro acima, pode-se perceber que a amostra 1, em função de seus maiores conteúdos de areias e argilas mais modestas, apresenta-se discrepante das demais. Assim, das três análises granulométricas caracterizadas, três amostras foram utilizadas nas avaliações preliminares expeditas e apenas duas nos procedimentos de incubação, como dito anteriormente.

Isto, uma vez que apenas duas amostras, amostra 1 e 2, apresentavam conteúdos distintos de teores granulométricos satisfazendo os interesses das avaliações para os tratamentos térmicos. Já as amostras 2 e 3, que se apresentaram bastante semelhantes justificaram o descarte da amostra 3. Estas relações podem ser observadas tanto nas curvas granulométricas, no gráfico 1, como nos percentuais dos conteúdos granulométricos de cada amostra, na tabela 2.

Com isso, pretendeu-se avaliar amostras com distintos conteúdos texturais possibilitando um comparativo entre condições pedológicas representativas de diferentes quadros superficiais presentes na região analisada. Onde a expectativa de que diferentes respostas aos tratamentos dadas suas diferenças entre texturas ocasionem distintas

respostas à evolução do teor de matéria orgânica e à estabilidade de agregados e reflita na sua resposta ao quadro de temperaturas no qual a amostra foi submetida.

Portanto, da amostra de maior conteúdo de argilas espera-se uma maior resistência da matéria orgânica à decomposição devido às relações de oclusão carbono-partícula durante o tratamento. Bem como, uma resposta menos linear da estabilidade de agregados a incubação uma vez que o predomínio de argilas desverticaliza as relações entre estabilidade de agregados e matéria orgânica nestes solos.

Já da amostra de maior conteúdo de areias pode-se esperar uma maior decomposição da matéria orgânica visto que esta está sujeita a maiores disponibilidades de oxigênio para a oxidação de seus compostos devido à maior macroporosidade. Também foram esperados maiores efeitos sobre a estabilidade de agregados deste solo, uma vez que a ausência de argilas torna a matéria orgânica o principal agente cimentante dos agregados dos solos arenosos, e fizeram desta amostra a mais suscetível aos efeitos do tratamento.

4.2 Matéria orgânica

Como resultado das análises de matéria orgânica esperava-se que estes dados expressassem um gradiente decrescente de matéria orgânica com o transcorrer do tempo. Porém não foi exatamente isto o que surgiu nos resultados das amostras analisadas.

Exceto nos tratamentos “avaliações preliminares expeditas”, que realmente se apresentaram com uma tendência linear e decrescente em função do tempo, os conteúdos de matéria orgânica nos tratamentos com incubação mostraram uma tendência crescente em função do transcorrer do tempo à medida que o tratamento térmico evoluiu. Embora os resultados de estabilidade de agregados não tenham seguido a mesma tendência, mostrando-se decrescentes. Na tabela 3 apresenta-se os valores obtidos de matéria orgânica das avaliações preliminares expeditas e sua tendência decrescente.

Tabela 3 - Resultados de matéria orgânica no transcorrer do tempo obtidos nas avaliações preliminares expeditas.

Tratamento	Imediata	Geladeira	Estufa	Rev. Estufa	Rev. Geladeira
Tempo em dias	0	70	73	78	79
Amostra 1	2,11%	2,00%	1,95%	1,82%	1,75%
Amostra 2	4,00%	3,57%	3,16%	3,13%	3,04%
Amostra 3	3,50%	3,58%	2,86%	2,62%	2,33%

Fonte: Autor

Assim, como pode-se observar na tabela 3, os valores de matéria orgânica nos tratamentos das avaliações preliminares expeditas apresentam uma redução significativa em função do tempo transcorrido entre a avaliação imediata a coleta das amostras e as respectivas determinações ao final dos tratamentos. Enquanto as amostras resguardadas em geladeira apresentaram menor taxa de decomposição de matéria orgânica, as amostras resguardadas em casa de vegetação (Estufa) apresentaram uma maior diferença salientando o efeito da temperatura na preservação dos níveis de carbono orgânico dos solos.

Os valores das determinações imediatas corroboram a expectativa de que solos arenosos apresentem menores teores de matéria orgânica (vide tabela 2 de granulometria, e vide tabela 3 de matéria orgânica) dada a sua dificuldade na manutenção de tais teores em solos de matrizes arenosas. Também é esperado que nas amostras 2 e 3 apresentem valores aproximadamente semelhantes entre si de matéria orgânica em função de suas granulometrias similares.

Estes aspectos granulométricos que parecem regular intensamente a manutenção destes níveis de matéria orgânica no solo a campo já que os processos de oxidação biológica são otimizados pela maior presença de oxigênio em função da maior presença de macroporos nos solos arenosos. Porém esta tendência não aparece nestes resultados in vitro. Isto sugere que as condições a campo se distinguem das condições experimentais.

Assim, a perda de matéria orgânica em função do tempo detectada nestes ensaios, principalmente nos resultados obtidos na amostra 1 do tratamento avaliação preliminar expedita, deixa a desejar quando sua taxa de decomposição não correspondendo a expectativa sugerida pelos teores de areias da amostra uma vez que deveriam ser mais intensas. Isto pode ser atribuído a restrições ambientais sobre a ação da biota na matéria orgânica destes solos das amostras durante as condições de tratamento preliminar.

Nas avaliações preliminares expeditas não houveram controle rigoroso de temperatura e umidade como nos ensaios de incubação. As amostras foram simplesmente alocadas nos locais de tratamento, sacos abertos na casa de vegetação e sacos fechados em geladeira. Assim, no tratamento das amostras resguardadas em casa de vegetação (Estufa) rapidamente perdeu todo o conteúdo de umidade permanecendo secos durante todo o período de tratamento ocasionando restrições ambientais enquanto as amostras resguardadas em geladeira mantiveram teores de umidade constantes.

Portanto, considerando o sugerido por Davidson e Janssens, 2006, quando afirmam que as restrições ambientais podem, temporária ou indefinidamente, afetar a taxa

de decomposição dos compostos orgânicos do solo. Onde quando secas, reduziram a espessura dos filmes de água, inibindo a difusão de enzimas extracelulares e mesmo dos substratos orgânicos, diminuindo sua disponibilidade a reações, que também se refletirá nos resultados de estabilidade de agregados, pode-se então dizer que as avaliações preliminares expeditas mostram que a indisponibilidade de água preservou a matéria orgânica de maiores efeitos do incremento térmico.

O que se reflete também na sua estabilidade de agregados a ser discutido posteriormente, afetada por aspectos restritivos da ação bacteriana sobre a matéria orgânica. Assim, a matéria orgânica preservada em um estado de “mumificação” pela desidratação sugere que estiagens não favorecem o efeito aditivo do incremento térmico sobre os processos erosivos em solos arenosos sendo corroborado pelos resultados de estabilidade de agregados apresentados no subtítulo a seguir.

Segundo os resultados destes dados, pode-se ressaltar que, mesmo as amostras resguardadas em geladeira que se apresentaram mantidas a maiores teores de umidade, resultaram em maiores níveis de degradação da matéria orgânica e de perdas na estabilidade de agregados, quando comparadas as amostras mantidas em casa de vegetação que desidrataram, ressaltando a importância da umidade para os processos de degradação da matéria orgânica no solo e depauperamento de sua estrutura.

Já em relação aos resultados das incubações pode-se dizer que tiveram maiores particularidades uma vez que durante os ensaios de incubação os parâmetros temperatura e umidade foram rigorosamente controlados. A atividade microbiana da biota do solo provavelmente respondeu a estas condições ideais de cultura, alta temperatura e saturação de umidade constante, durante os tratamentos de incubação com um provável aumento exponencial de sua população.

Portanto, os valores de matéria orgânica obtidos nas avaliações dos tratamentos de incubação não só não se apresentaram lineares nas amostras argilosas (vide tabela 4) como apresentaram, de maneira geral, uma tendência crescente. Esta diferença em relação aos resultados dos tratamentos anteriores talvez possa ser atribuída ao tratamento térmico e manutenção da umidade constante nas amostras durante a incubação enquanto condições ideais de cultura.

De uma maneira geral os resultados de matéria orgânica obtidos nas incubações apresentaram a amostra 1 bastante regular enquanto a amostra 2 mostrou-se errática em sua sequência temporal de dados, mas que ao final apresentou uma diferença perceptível.

No entanto, dar-se-á maior ênfase à discussão dos resultados da amostra arenosa por tratar-se do objeto deste estudo.

Os resultados de matéria orgânica da amostra 1 do primeiro tratamento de incubação, apresentam-se linearmente crescentes salvo no 97º dia onde houve uma pequena discrepância neste sentido. Enquanto a amostra 2 apresenta uma certa maior discrepância nos dados dos 47º aos 97º dias conforme tabela 4.

Tabela 4 - Resultados de matéria orgânica no transcorrer do tempo obtidos na primeira incubação.

Tratamento	Primeira incubação							
	Tempo em dias	0	47	61	75	97	110	124
Amostra 1		1,07%	1,08%	1,41%	1,52%	1,38%	1,54%	1,55%
Amostra 2		2,60%	2,12%	2,38%	1,90%	1,94%	2,15%	2,94%

Fonte: Autor

Estes valores de matéria orgânica destes ensaios nestas datas referidas acima quebra a tendência crescente e este tipo de evento se faz presente em todas as avaliações dos materiais incubados. Mas estas particularidades não invalidam os resultados e, pelo contrário, os enriquecem.

Isto significa que há uma dinâmica intrínseca muito mais extensa ocorrendo na amostra não percebida apenas pelas determinações do carbono orgânico total das amostras na ocasião. Trata-se inclusive de uma questão de interações com o meio de cultura, estados iniciais da biota, matéria orgânica e solo enquanto meio de cultura antes e durante o processo de incubação.

Portanto, resultados como estes nos levam a enfatizar o grau de complexidade que é trabalhar com carbono orgânico em solos e em meios de cultura de amostras. Onde a máxima caracterização do perfil do carbono orgânico do solo deveria ser mapeada para dados mais conclusivos fazendo do dado carbono orgânico total do solo obtido por ignição, apenas um dado parcial.

Assim, apesar de parecerem ligeiramente incoerentes, estes dados sugerem um comportamento específico de cada amostra frente ao processo de incubação. Onde sua pormenorização carece de dados específicos, mas possibilita inferências pertinentes.

E, neste sentido, os dados aqui apresentados permitem uma visão geral da evolução do ensaio que não invalida a discussão dos resultados por episódios pontuais. Além disto, esta foi uma das razões pela qual houve a segunda repetição do tratamento

de incubação. As outras razões foram a aparente aleatoriedade dos resultados de estabilidade de agregados da amostra 2, e a própria tendência crescente dos valores de matéria orgânica do primeiro tratamento de incubação.

A seguir, na tabela 5, apresentam-se os resultados obtidos de matéria orgânica durante o segundo tratamento de incubação. Salienta-se as maiores taxas de aumento da matéria orgânica em ambas as amostras. Porém, percebe-se uma tendência crescente na evolução dos valores entre a avaliação inicial e a última avaliação. E isto foi considerado como relevante, pois enfatiza mais a tendência que a sequência propriamente dita.

Tabela 5 - Resultados de matéria orgânica no transcorrer do tempo obtidos na segunda incubação.

Tratamento	Segunda incubação						
	Tempo em dias	0	23	37	55	78	106
Amostra 1	0,94%	1,30%	1,33%	1,18%	2,15%	2,56%	2,65%
Amostra 2	2,37%	2,39%	2,20%	2,43%	3,87%	3,78%	3,84%

Fonte: Autor

Assim, a amostra 1 da primeira incubação apresenta-se praticamente linear e com uma variação crescente de matéria orgânica da ordem de aproximadamente 0,5% (vide tabela 4). Enquanto a amostra 2, de maior conteúdo argiloso, apresentou uma variação de aproximadamente 0,4% (vide tabela 5) ao longo dos quatro meses de incubação, entre a primeira avaliação direta do material vindo do campo e a última avaliação do período de incubação.

Estas taxas de aumento de matéria orgânica apresentadas por estas amostras durante este primeiro tratamento térmico aparentemente são bastante modestas quando comparadas às apresentadas pelos ensaios do tratamento seguinte, a segunda incubação, sendo de aproximadamente 1,7% e 1,5%, respectivamente para as amostras 1 e 2.

Tais resultados talvez se devam ao fato do primeiro tratamento de incubação ter sido coletado e amostrado em período do ano distinto do segundo tratamento de incubação, início final do inverno e início do verão, respectivamente. O que leva a crer que as condições de campo como o estado e composição da biota do solo estavam modificadas. Desta maneira poder-se-ia atribuir o aumento e flutuações da matéria orgânica a alterações da biota das amostras do solo ao longo do período de tratamento e suas interações (ações/modificações) sobre os substratos orgânicos do solo enquanto meio de cultivo num quadro específico em cada amostra, particularmente sugerindo maiores padronizações.

Portanto, o aumento e flutuações da matéria orgânica das amostras durante o período de incubação deve-se ao aumento e dinâmica da biomassa da microbiota do solo em função do seu crescimento exponencial em tais condições ideais de cultivo. Sua evolução no ensaio talvez possa ser atribuída a presença de elementos minerais precursores de substratos orgânicos, como nitrogênio e fósforo na forma mineral, a decomposição dos resíduos vegetais mais resistentes presentes nas amostras ensaiadas, como fragmentos de folhas e raízes aumentando a disponibilidade via mineralização de nutrientes com o passar do tempo, as condições ideais de cultura (umidade e temperatura) e a disponibilidade e ciclagem de nutrientes.

Logo a seguir serão demonstrados os valores de estabilidade de agregados e nestes será perceptível a ação destes microrganismos sobre os elementos componentes do arcabouço estrutural dos solos arenosos, uma vez que demonstrará o efeito do tratamento térmico sobre este parâmetro. Sendo possível perceber o quanto houve influência deste incremento da população de organismos no solo sobre a estabilidade de agregados.

Outro aspecto relativo à matéria orgânica do solo é sua relação com a estabilidade de agregados onde se espera que um aumento de seus níveis diminua a suscetibilidade à erosão medida pela estabilidade de agregados. Neste sentido há que se dizer que embora realmente tenha-se tido um aumento na matéria orgânica esta não se aplicou da forma esperada sobre a estabilidade de agregados, a ser discutido no subtítulo seguinte.

Por fim, pode-se dizer que os ensaios dos tratamentos preliminares expeditos foram satisfatórios como resultados iniciais para definir estratégias de como conduzir o tratamento de incubação. Seus resultados de matéria orgânica também foram bastante conclusivos para inferências a serem utilizadas posteriormente neste estudo.

Já os ensaios dos tratamentos de incubação possibilitaram o entendimento de relações entre matéria orgânica e estabilidade de agregados mesmo não correspondendo exatamente as expectativas teóricas e sugerindo respeito à complexidade do assunto. Mas que permitem inferências pertinentes e que sugerem estudos mais detalhados para elucidar tais questões.

Muito provavelmente estes estudos devem voltar-se principalmente a parâmetros qualitativos da matéria orgânica do solo, haja vista que as determinações de carbono orgânico total do solo, proporcionadas pelo método de perdas por ignição, não satisfazem a demanda de esclarecimentos necessária para a elucidação pormenorizada.

A própria elucidação da elevação da matéria orgânica não ter alterado de forma esperada as relações de estabilidade de agregados nos levam a sugerir que uma

pormenorização dos conteúdos de componentes orgânicos ocorrentes nas amostras talvez possa elucidar tais demandas frente ao fato de uma simples determinação do carbono orgânico total por ignição não cumprir tal tarefa, dados seu perfil e funções específicas.

4.3 Estabilidade de agregados do solo em água

Os ensaios de estabilidade de agregados do solo em água foram efetuados no laboratório de sedimentologia do Departamento de Geociências da UFSM e seguindo a metodologia referida anteriormente. Os ensaios foram concomitantes à determinação da matéria orgânica do tratamento e amostra em questão para ter maior fidedignidade dos dados e evitar diferenças entre os dados obtidos.

A metodologia levou dois dias para ser aplicada para cada amostra. Uma vez obtidos os valores de agregados estáveis em água, a obtenção do conteúdo das areias presentes nos agregados, requisito para o cálculo do dado final, não gerou maiores preocupações por ser um material inerte e não estar sujeito a variações, dando maior flexibilidade no momento das determinações, diferente dos agregados estáveis em água, que respeitam uma certa urgência dada sua relação com a matéria orgânica.

Desta forma, para cada quatro sub amostras que foram conduzidas para a determinação do percentual de agregados estáveis em água, três foram conduzidas para a determinação da matéria orgânica. Assim, durante a execução do ensaio foram utilizadas 8 sub amostras de 4g, onde duas destas foram encaminhadas concomitantemente para a determinação da matéria orgânica. A tabela 6 traz os resultados de estabilidade de agregados de solo em água para o tratamento avaliações preliminares expeditas.

Tabela 6 - Resultados de estabilidade agregados obtidos no transcorrer do tratamento das avaliações preliminares expeditas.

Tratamento	Imediata	Geladeira	Estufa	Rev. Estufa	Rev. Geladeira
Tempo em dias	0	70	73	78	79
Amostra 1	89,83%	86,12%	87,13%	85,68%	84,67%
Amostra 2	91,49%	84,75%	92,02%	92,30%	91,93%
Amostra 3	78,58%	73,71%	80,32%	80,41%	81,05%

Fonte: Autor

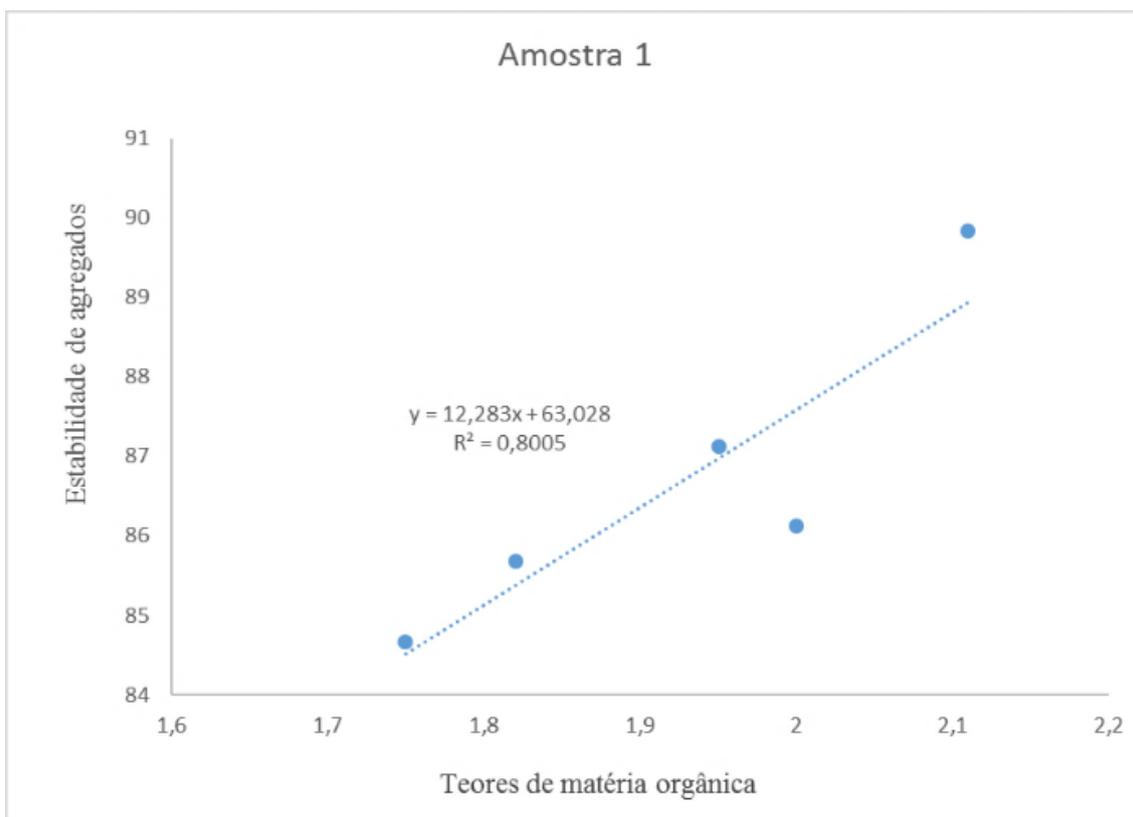
A partir da tabela 6 observar-se que a estabilidade de agregados na amostra 1 mostrou-se bastante linear e decrescente apresentado uma diferença de aproximadamente

5% entre a determinação inicial e a final. Pode-se então construir um gráfico da estabilidade em função dos conteúdos de matéria orgânica (gráfico 2), de alta correlação.

A partir deste gráfico pode-se observar que a correlação entre os conteúdos de matéria orgânica e o índice de estabilidade de agregados apresenta-se bastante significativa se observado o de correlação valor R^2 de 0,8. Isto corresponde a dizer que estas relações apresentam um determinismo de 80% e que a matéria orgânica é um bom indicador da estabilidade de agregados para este solo, no caso, a amostra de maior conteúdo de areias, aproximadamente 50%, e menores conteúdos de argilas, em torno de 15%.

A seguir o gráfico 2 salientando a verticalidade da reta e linearidade das relações entre estes dois parâmetros para a amostra 1, amostra de maior conteúdo de areias. Resaltando o R^2 de 0,8 e seu alto grau de correlação.

Gráfico 2 - Estabilidade de agregados em função da matéria orgânica na amostra 1 das avaliações preliminares.



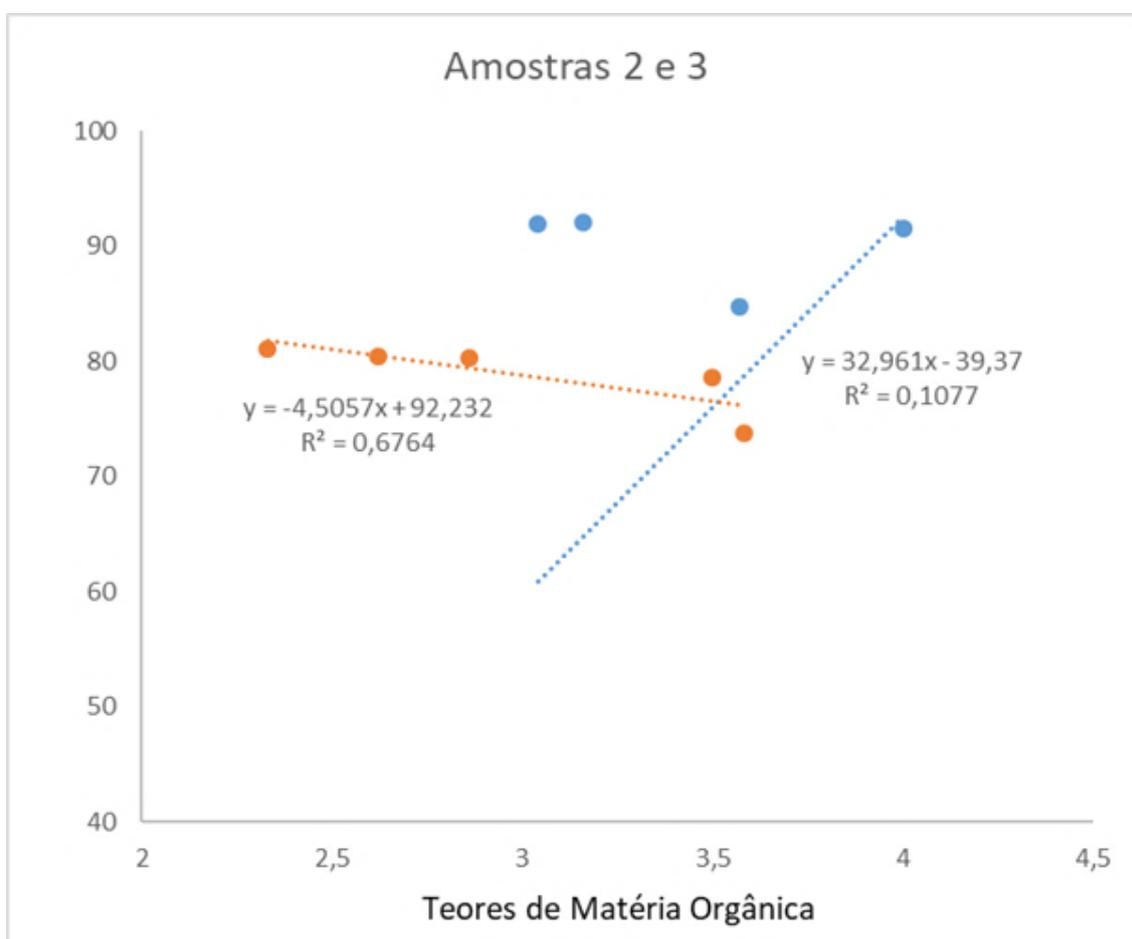
Fonte: Autor

Já as correlações das amostras com conteúdo superiores de argilas, em torno de 30%, amostras 2 e 3, não apresentam a mesma tendência ficando sua correlação na ordem

de 0,1, para amostra 2, e de -0,6 para a amostra 3. Isto provavelmente deva-se a mecanismos específicos de desagregação dos solos arenosos que não respeitem primariamente as relações entre matéria orgânica e estabilidade estrutural.

Ambas assertivas podem ser constatadas com a observação conforme apresentado no gráfico 3, a seguir. Observa-se que para ambas as amostras não há uma linearidade nas relações salientando a não exclusividade da dependência da matéria orgânica para manutenção da estabilidade de agregados para solos argilosos, segundo estes dados.

Gráfico 3 - Estabilidade de agregados em função da matéria orgânica nas amostras 2 e 3 das avaliações preliminares.



Fonte: Autor

Isto demonstra que não há correlação significativa entre estes dois parâmetros nas amostras argilosas. E suas variações não têm influência significativa na determinação dos índices de estabilidade de agregados para estas amostras nestas condições de análises.

Esta constatação corrobora Bromick e Lal (2005), e Amézketa (2008), quando afirmam que o principal mecanismo de desestabilização de solos argilosos é a dispersão,

regulada pelas oscilações eletroquímicas, como sugerido anteriormente, sobre os sítios de cargas das argilas resultando na redução das forças de atração entre as suas partículas coloidais durante o umedecimento nos agregados destes solos. E isto pode ser percebido nos resultados das estabilidades de agregados apresentados nas tabelas com uma rápida observação nos valores obtidos na amostra 2 na tabela 7 que demonstra os valores de estabilidade de agregados obtidos na primeira incubação.

Tabela 7 - Resultados de estabilidade agregados obtidos no transcorrer do tratamento da primeira incubação.

Tratamento	Primeira incubação						
	0	47	61	75	97	110	124
Amostra 1	72,0%	69,9%	70,2%	63,5%	60,1%	59,2%	57,5%
Amostra 2	78,73%	81,62%	82,31%	73,66%	64,98%	70,37%	76,34%

Fonte: Autor

Dessa forma, a aparente inconsistência dos dados, tanto das amostras argilosas 2 e 3 do tratamento “avaliação preliminar expedita” (vide tabela 6) quanto da amostra 2 das outras duas incubações, muito provavelmente possa ser atribuída à predominância dos efeitos de desagregação dispersivo das argilas pelas oscilações das concentrações de sais dissolvidos na água durante o procedimento dos ensaios. Isto uma vez que os ensaios foram produzidos em datas distintas, o que possibilitaria a ocorrência de diferentes concentrações na água que foi usada nos ensaios, visto que esta não foi padronizada, sendo utilizada para o procedimento dos ensaios a simples água da torneira, ao invés de água destilada ou deionizada.

Assim, o mecanismo de desagregação por dispersão parece ser uma justificativa adequada para estes dados apresentarem-se não lineares e sem uma lógica ligada a teores de matéria orgânica ou o transcorrer do tempo sob tratamento térmico nos ensaios de incubação nas amostras argilosas de uma maneira geral. Mas mesmo assim, mesmo com dados inconstantes da estabilidade de agregados, obtidos durante a incubação, ainda pode-se observar uma tendência ao decréscimo em tais tratamentos, visto que os valores obtidos nas determinações imediatas a coletas e as determinações ao final dos tratamentos apresentaram diferenças de valores que sugerem um decréscimo no índice de estabilidade de agregados, e isto será considerado nas discussões seguintes deste estudo.

No entanto, os valores de estabilidade de agregados resultantes dos tratamentos de incubação sobre a amostra de maior conteúdo de areias, apresentam uma linearidade quase perfeita sendo perturbada apenas por um único ressalto na sequência dos valores decrescentes de estabilidade de agregados. Sendo que isto ocorre para ambas as repetições do tratamento de incubação das amostras.

Assim, estes resultados apresentam-se regulares e cadenciados durante o transcorrer do tratamento térmico e este de fato gerou alterações significativas nos valores de estabilidade de agregados em ambas repetições entre o início e o fim do tratamento. Isto como pode ser observado nos dados apresentados na tabela 8 que apresenta os resultados da segunda incubação.

Tabela 8 - Resultados de estabilidade agregados obtidos no transcorrer do tratamento da segunda incubação.

Tratamento	Segunda incubação						
	Tempo em dias	0	23	37	55	78	106
Amostra 1	73,26%	75,54%	72,75%	72,51%	71,40%	61,84%	55,30%
Amostra 2	70,94%	69,04%	76,18%	80,85%	64,82%	66,69%	62,48%

Fonte: Autor

Dessa forma, tem-se uma redução da estabilidade de agregados conforme o esperado quando submetidos os solos ao tratamento de incremento térmico prolongado. Porém, os valores de matéria orgânica não acompanham a lógica da cinética enzimática proposta por Schlentner et al. (1985) ou mesmo a dinâmica da matéria orgânica no solo esperada frente a um incremento de temperaturas, segundo Wang et al. 2013 e Hill et al. 2015, ao menos como esperado.

Mas talvez, a própria cinética enzimática em função da temperatura e a dinâmica da matéria orgânica do solo possam explicar por que houve um incremento de matéria orgânica enquanto também houve um decréscimo na estabilidade de agregados do solo nas amostras analisadas nestes ensaios.

Como discutido anteriormente nos resultados de matéria orgânica, muito provavelmente devam-se ao tratamento térmico e a manutenção de umidade elevada que proporcionaram condições ideais de desenvolvimento da biologia do solo. Ora favorecida pelas condições ambientais, ora favorecida pela disponibilização de nutrientes provenientes da ciclagem e mineralização da matéria orgânica.

Assim, os microrganismos do solo promoveram a decomposição de compostos carbônicos e aumentaram sua biomassa aumentando a matéria orgânica das amostras. Porém diminuindo a estabilidade de agregados pois atuam sobre os componentes carbônicos ativos na estabilização.

Neste caso, o incremento da matéria orgânica do solo talvez não tenha tido efeito sobre a estabilidade de agregados, pois, nas condições do tratamento, isto é, saturação plena de 100% de umidade constante e sem eventos de ressecamento alternados com umedecimento, condições de processos de formação de agregados do solo, não se apresentaram condições para o desenvolvimento e organização dos agregados nas amostras testadas durante a incubação.

Isto quer dizer que não houveram, no ensaio, condições dinâmicas capazes de promover o incremento da estabilidade de agregados através de mecanismos e fatores que afetam a agregação do solo como propostos por Tisdall (1996); Jastrow et al. (1998); Six et al. (1999) ou mesmo Singer et al. (1992) e Bromick e Lal (2005), visto que estes ocorrem em condições de campo tendo os eventos de ressecamento e umedecimento alternados como seu principal fator.

Assim, mesmo com um incremento na matéria orgânica em condições experimentais, permitiria uma deterioração da estabilidade de agregados uma vez que não ocorreriam as devidas reorganizações dos componentes do solo necessárias para a estabilização e formação de novos e mais estáveis agregados durante a ocorrência do ensaio. Ou seja, apesar de estarem presentes os fatores de agregação do solo os mecanismos de agregação não foram acionados.

Além disso, como dito anteriormente, este ensaio avaliou apenas o carbono orgânico total das amostras, iniciais e ao longo dos tratamentos. Sem fazer discriminação de seus conteúdos e naturezas distintas, sem elucidar as relações e funções das diferentes frações orgânicas presentes no solo das amostras estudadas, não permitiu discutir a dinâmica da matéria orgânica atuante e das suas diferentes funções na agregação em questão.

Assim, apesar dos teores de matéria orgânica não se apresentarem como o esperado, os resultados da estabilidade de agregados são bastante satisfatórios pois corroboram a expectativa de deterioração da estrutura do solo sob condições de incremento de temperatura em solos arenosos. Pois mesmo com um incremento dos valores de matéria orgânica, acredita-se que houve um ataque sobre os compostos

carbônicos das amostras por parte desta biota multiplicada depreciando da estabilidade de agregado nas amostras arenosas.

Portanto, embora os teores de matéria orgânica não tenham satisfeito as expectativas, os índices de estabilidade de agregados em água o fizeram de maneira satisfatória pois expressaram exatamente o esperado. Não uma redução nos níveis de matéria orgânica, mas sua dinâmica, o que afetou da mesma maneira os valores de estabilidade de agregados do solo.

E isto permite estabelecer uma estimativa de perdas de solos dentro do período elevação de temperaturas principalmente se considerados os valores iniciais e finais obtidos nos ensaios dos tratamentos. Dessa forma, utilizando-se das proposições de Stanchi et al. (2015), sobre as perdas de solos quando correspondem as perdas sofridas pelos agregados durante o procedimento do teste padrão de determinação do índice de estabilidade de agregados, pode-se propor uma estimativa de perdas de solos sob condições de incremento de temperaturas.

Assim, quando os valores de perdas de solos correspondem aos valores complementares do índice de agregação dos solos, isto é, 100% menos o índice de estabilidade de agregados ($\text{Percentual de Perdas de Solo} = 100\% - \text{EA}\%$). Pode-se então estabelecer uma estimativa da diferença das perdas de solos, antes e depois dos tratamentos, bem como das perdas de solos em condições de incremento de temperaturas ao longo de um período dentro da vigência do ensaio.

4.4 Estimativa das taxas de perdas de solos pós-tratamento

Uma vez que o material desagregado é carregado pelo escoamento superficial, as perdas de solos são estimadas a partir dos percentuais de materiais perdidos pela desagregação durante o ensaio do índice de estabilidade de agregados. Assim, uma vez obtido o valor do índice de estabilidade de agregados é possível estimar o percentual de material desagregado e perdido, por diferença entre o índice de estabilidade de agregados em água e o total de material que entrou no ensaio (diferença inicial/final).

Com esta estimativa, a partir do procedimento do ensaio de estabilidade de agregados em água, propõem-se que a estimativa da diferença das perdas de solo entre um estado inicial, pós coleta imediata da amostra, e um estado alterado, ao decorrer ou término do tratamento, caracterize as perdas de solos. Com isso, espera-se obter um

prognóstico de eventos de aumentos de temperaturas sobre processos erosivos nos solos de maior vulnerabilidade.

Assim, tomando-se os resultados dos tratamentos foi possível confeccionar tabelas, apresentadas logo a seguir a partir da tabela 9 demonstrando estes valores. Inicialmente dentro do intervalo de tempo entre as determinações do índice de estabilidade de agregados em água ao longo do tratamento e posteriormente, discute-se sua evolução e propõem-se suas taxas de erosão em função do tempo, obtidas no estudo como um todo.

Desta maneira, observando-se os resultados apresentados na tabela 9, pode-se considerar que as perdas de solos ao longo do decorrer do tempo nos resultados dos tratamentos preliminares foram predominantemente lineares decrescentes na amostra arenosa, a amostra 1, representativa da região da Depressão Central Sul-riograndense.

Tabela 9 - Estimativa das perdas de solos a partir do índice de estabilidade de agregados em água das amostras provenientes das análises dos tratamentos avaliações preliminares expeditas.

Tratamento	Imediata	Geladeira	Estufa	Rev. Estufa	Rev. Geladeira
Tempo em dias	0	70	73	78	79
Amostra 1	10,17%	13,88%	12,87%	14,32%	15,33%
Amostra 2	8,51%	15,25%	7,98%	7,70%	8,07%
Amostra 3	21,42%	26,29%	19,68%	19,59%	18,95%

Fonte: Autor

Seus valores apresentam um gradiente que decai da avaliação imediata ao septuagésimo nono dia salvo um pequeno ressalto ao septuagésimo terceiro dia do transcorrer do tempo ao longo das avaliações preliminares expeditas.

Entre a primeira e a última avaliação dos tratamentos preliminares expeditos a diferença das perdas propostas por este estudo na amostra 1 é da ordem de 5,16% ao transcorrer de setenta e nove dias de tratamento. Enquanto os valores obtidos para as amostras argilosas não apresentaram a sequência lógica esperada conforme já discutido anteriormente, uma vez regidas por outros mecanismos de desagregação que não respeitaram os princípios selecionados para avaliar a variável.

A partir da tabela 9 pode-se derivar a taxa de aumento da erosão de cada avaliação comparando a avaliação inicial a cada avaliação isolada em função dos dias, obtida dividindo-se os valores de perdas de solo na avaliação pelo número de dias, de maneira a demonstrar a evolução deste parâmetro ao longo do período do tratamento. Como isso,

pretende-se averiguar qual a razão da taxa de erosão que se apresentou ao longo do tratamento térmico buscando-se um prognóstico da intensidade dos processos erosivos em função do efeito de um aumento de temperaturas em função do tempo.

Neste sentido a tabela 10, a seguir, possibilita perceber a taxa de erosão após o período total de tratamento, de 5,16%, bem como a evolução linear crescente das taxas de perdas ao longo do período do ensaio sobre a amostra 1.

Também pode-se perceber a evolução dos valores de perdas em função dos dias transcorridos, o que se manteve bastante constante até o final do período quando se demonstrou ligeiramente maior.

Isto sugere que com o passar do tempo os efeitos sobre a agregação de solos arenosos se intensificam. Aqui analisa-se apenas a amostra 1 pois a amostra 2, por não ter tido um comportamento linear, não permite tal formato de análise. Estes aspectos são demonstrados conforme a tabela 10 a seguir.

Tabela 10 - Estimativa das taxas de aumento das perdas de solos da amostra 1 ao longo dos tratamentos preliminares sobre a avaliação inicial e sua razão em função do número de dias.

Tratamento	Imediata	Geladeira	Estufa	Rev. Estufa	Rev. Geladeira
Tempo em dias	0	70	73	78	79
Amostra 1	0%	3,71%	2,70%	4,15%	5,16%
Taxa de Perda/dias	0%	0,05%	0,04%	0,05%	0,07%

Fonte: Autor

Já nos resultados das incubações foi possível estabelecer uma sequência de inferências a partir dos resultados do tratamento térmico. Assim, as tabelas 11 e 12 trazem os valores das taxas estimadas de perdas de solos a partir do índice de estabilidade de agregados em água para os tratamentos de incubação.

Como nos demais resultados, houve diferenças entre o comportamento das amostras argilosas e arenosas. Corroborando as demais discussões, a amostra argilosa não respeita uma lógica linear temporal de perdas de estabilidade, desagregação ou perdas de solos dados os mecanismos predominantes da desagregação de solos argilosos serem distinto dos solos arenosos.

Em contrapartida, a amostra de solos arenoso demonstra uma perda por desagregação bastante nítida e marcante, em gradiente linear decrescente, salientando apenas um leve ressalto ao quadragésimo sétimo dia, como pode ser observado na tabela 11.

Tabela 11 - Estimativa das perdas de solos a partir do índice de estabilidade de agregados em água das amostras provenientes das análises do tratamento Primeira Incubação.

Tratamento	Primeira incubação						
Tempo em dias	0	47	61	75	97	110	124
Amostra 1	28,03%	30,05%	29,82%	36,53%	39,91%	40,76%	42,49%
Amostra 2	21,27%	18,38%	17,69%	26,34%	35,02%	29,63%	23,66%

Fonte: Autor

Assim, durante o primeiro tratamento de incubação a amostra arenosa, amostra 1, apresentou uma taxa de decomposição da matéria orgânica da ordem de 14,5% de perdas de solo estimadas ao longo de todo o período de 124 dias do tratamento, entre a avaliação imediata inicial e a última avaliação.

Observando-se a tabela 12, pode-se notar que os valores das taxas de perdas de solos ao longo dos primeiros dias são menos significativos que nos dias posteriores sugerindo que com o passar do tempo há um incremento do aparato dos mecanismos de desagregação ocasionando uma maior taxa nas datas posteriores, o que sugere uma adaptação e intensificação de ação da biota do solo com o decorrer do tempo.

Tabela 12 - Estimativa das taxas de perdas de solos da amostra 1 ao longo da primeira incubação sobre a avaliação inicial e sua razão em função do número de dias.

Tratamento	Primeira incubação						
Tempo em dias	0	47	61	75	97	110	124
Amostra 1	0,0%	2,0%	1,8%	8,5%	11,9%	12,7%	14,5%
Taxa de Perda/dias	0,0%	0,04%	0,03%	0,11%	0,12%	0,12%	0,12%

Fonte: Autor

Desta maneira, pode-se perceber que a razão entre taxa de perdas de solos em função de dias nas datas das determinações aumenta abrupta e significativamente a partir do septuagésimo quinto dia, passando de entorno de 0,04% para entorno de 0,12%. Caso esta discrepância esteja ligada à ativação da biota do solo sobre os conteúdos de matéria orgânica, o que é bastante provável, mas não pode ser comprovado no ensaio, tem-se o quadro esperado de aumento da cinética enzimática ligada ao aumento das populações microbianas na amostra (biomassa), onde ao longo do tempo as populações microbianas ajustaram-se às condições de incubação e do meio de cultura.

Assim, analisando-se os dados da segunda incubação na tabela 13, pode-se novamente perceber as diferentes respostas dos solos argilosos e arenosos aos processos de desagregação e perdas de solos. Novamente a amostra argilosa, amostra 2, mostra-se

não linear, mas com diferença significativa entre a primeira e última avaliação, conforme tabela 13 a seguir.

Tabela 13 - Estimativa das perdas de solos a partir do índice de estabilidade de agregados em água das amostras provenientes das análises do tratamento segunda incubação.

Tratamento	Segunda incubação						
Tempo em dias	0	23	37	55	78	106	120
Amostra 1	26,74%	24,46%	27,25%	27,49%	28,60%	38,16%	44,70%
Amostra 2	29,06%	30,96%	23,82%	19,15%	35,18%	33,31%	37,52%

Fonte: Autor

Enquanto isso, a amostra arenosa, amostra 1, mostra-se predominantemente linear e crescente nos seus conteúdos de perdas de solos. Denotando apenas com um decréscimo no vigésimo terceiro dia e um incremento abrupto no percentual de perdas de solos a partir do centésimo sexto dia.

Na observação da tabela 14 pode-se perceber um total de perdas de solo no período do tratamento, 120 dias, de 18%. Há uma discrepância no vigésimo terceiro dia. Também pode-se perceber novamente o abrupto aumento destes valores a partir do centésimo sexto dia, onde há um incremento de 0,09% até o final do tratamento como pode ser observado na tabela 14 a seguir.

Tabela 14 - Estimativa das taxas de perdas de solos da amostra 1 ao longo da segunda incubação sobre a avaliação inicial e sua razão em função do número de dias.

Tratamento	Segunda incubação						
Tempo em dias	0	23	37	55	78	106	120
Amostra 1	0,00%	-2,3%	0,5%	0,7%	1,9%	11,4%	18,0%
Taxa de Perda/dias	0,00%	-	0,01%	0,01%	0,02%	0,11%	0,15%

Fonte: Autor

Assim, esta grande perda de solos de 18% ao final do tratamento sugere processo de adaptação dos materiais, principalmente da biota, à variação ambiental e esta diferença de tempo corresponde ao seu período de resposta. Nesta sequência até o 78º dia a taxa se mantém próxima a 0,01%, quando então tem um abrupto incremento da ordem de 0,11% a 0,15% nas datas seguintes.

Salvo a discrepância do vigésimo terceiro dia, os resultados deste tratamento, bem como da outra incubação, apresentam-se bastante satisfatórios uma vez que caracterizam

novamente os solos argilosos como não prontamente responsivos ao tratamento térmico e ao ensaio de índice de estabilidade de agregados em água enquanto caracterizam os solos arenosos como responsivos ao tratamento de térmico e ao ensaio de índice de estabilidade de agregados em água.

As dinâmicas das biotas nas amostras ao longo dos ensaios ajudaram a compreender a sensibilidade e complexidade do carbono orgânico do solo. Estes dados referidos a pouco sobre a evolução das taxas de perdas de solos dos tratamentos de incubação mostram que nada é estanque e que há muito a ser investigado. Mas também já se tem dados suficientes para concluir algumas inferências sobre os efeitos de um aumento de temperatura sobre solos de textura arenosa da Depressão Central Sul-Riograndense.

Portanto, pode-se afirmar que embora as amostras argilosas não apresentem um comportamento linear em razão de não terem a matéria orgânica como principal elemento estrutural do solo, mesmo assim, apresentaram uma redução na estabilidade de agregados e aumento nas perdas de solos ao término do ensaio. E isto pode ser constatado em ambas as incubações onde obteve-se diferenças significativas nas taxas de perda de solos entre a avaliação inicial e a avaliação final, conforme a tabela 13 e a tabela 14.

Isto leva a considerar que embora a dinâmica da matéria orgânica não seja o principal responsável pelos mecanismos de agregação e estabilidade estrutural dos solos argilosos, estes também estão sujeitos a uma parcela de influência do efeito térmico sobre os componentes orgânicos do arcabouço estrutural do solo. Assim, mesmo não sendo o objeto de pesquisa deste estudo, observa-se que há uma certa suscetibilidade e influência do aumento de temperaturas associadas a mudanças climáticas sobre os solos de matriz argilosa, porém não tão significativa

Já em relação aos solos arenosos, tendo como seu principal elemento de agregação e estabilidade estrutural a matéria orgânica, segundo os dados obtidos nesta análise, pode-se dizer que há uma estreita relação entre o aumento de temperaturas associadas a mudança climática e intensificação de processos erosivos. Dadas as taxas de perdas de solos estimadas a partir dos dados obtidos em ambas as incubações, é possível afirmar que durante o período de temperaturas diurnas de 35°C e condições de saturação higroscópicas durante aproximadamente 120 dias, se obteve um aumento de 14,5 % a 18% de intensificação dos processos erosivos no tratamento.

5 CONCLUSÕES

Segundo este estudo foi possível concluir que temperaturas elevadas duradouras durante um certo período afetam negativamente a estrutura dos solos, principalmente de elevado conteúdo de areias. Isso pôde ser afirmado mediante a constatação em ensaio do fato de que sua estabilidade de agregados diminuiu ao longo do tempo de exposição a uma simulação de ambiente climaticamente modificado, dadas as estritas relações entre matéria orgânica, sua labilidade e funções na estabilidade e agregação dos solos.

Pode-se afirmar isto pois verificou-se que nos tratamentos de incubação, embora a matéria orgânica não tenha respondido como da forma esperada na literatura, os solos arenosos de fato sofreram uma redução de sua estabilidade estrutural, a qual foi verificada via índice de estabilidade de agregados em água, após um período de incubação. De outra parte, vale notar que os solos argilosos não responderam da mesma forma aos tratamentos térmicos e pode-se dizer que não apresentam, em um primeiro momento, vulnerabilidade desta natureza e intensidade, uma vez que, seus mecanismos de estabilização seguem princípios distintos.

Já os mecanismos que regulam a estabilização de solos arenosos parecem ter grande afinidade com a dinâmica térmica do solo. Porém, mesmo com a revisão teórica convergindo para relações diretas entre estrutura, estabilidade de agregados, matéria orgânica e temperatura, por questões metodológicas, neste estudo, não foi possível estabelecer diretamente tais correlações.

Também é fundamental mencionar que, embora os valores de matéria orgânica tenham aumentado ao longo do processo de incubação e que a estabilidade de agregados do solo tenha reduzido, o que de certa forma se contrapõem com a proposta da literatura citada, vale ressaltar que a formação de agregados do solo, com efeito, ocorre pelas forças físicas envolvidas nos ciclos de umedecimento e ressecamento do solo e pela ação de compressão do sistema radicular das plantas e que por sua vez, o clima afeta a agregação do solo através de alterações nos regimes de temperatura e umidade e ciclos de umedecimento e ressecamento, que podem reorientar as partículas.

Com base nessas afirmações, ressalva-se a importância de perceber que durante o tratamento a umidade manteve-se constante durante todo o período sem proporcionar condições de rearranjo dos agregados. Assim, não houveram variações ambientais necessárias para que os mecanismos e fatores de agregação do solo entrassem em ação.

Isto, talvez justifique o fato de que, mesmo com uma matéria orgânica alta, não tenha ocorrido um incremento da estabilidade de agregado.

Porém, fica claro que após um período de incubação simulando condições de aquecimento climático, há uma maior intensificação da vulnerabilidade a processos erosivos verificada nos solos analisados segundo os dados obtidos. E, do mesmo modo, esta modificação do parâmetro de estabilidade de agregados, muito provavelmente esteja regulada pela dinâmica da matéria orgânica que respeita a cinética enzimática via ativação térmica da biota sobre os compostos orgânicos do solo.

Desta maneira, a partir dos resultados de estabilidade de agregados onde após o tratamento, efetivamente, constatou-se a redução de seus percentuais sugerindo perdas de solos a campo, pode-se afirmar que potencialmente há a um prognóstico de intensificação de processos erosivos nos solos associado a mudanças climáticas. E, igualmente, segundo os dados obtidos neste estudo, o mesmo seria da ordem de 14 a 18 % em um período de 4 meses com temperaturas semelhantes às de verões no estado, embora acompanhados de disponibilidade de alta umidade.

Nesse ponto, observa-se um precedente de exceção no referido quadro em que possivelmente esse prognóstico não se aplique. Deve-se, por conseguinte, levar em consideração que a Depressão Central Sul-Riograndense apresenta temperaturas elevadas durante estações secas, as quais não favoreceriam a ocorrência do processo aqui descrito, dada a falta de umidade durante a estação quente modificando a intensidade dos processos tais como foram aqui descritos e possivelmente melhor se apliquem às bacias sedimentares tropicais.

Essas implicações tornam imprescindíveis estudos climatológicos adicionais para permitir a definição de perspectivas futuras e projeções que viabilizem ajustes em estudos pedológicos posteriores relativos a prognósticos adaptativos associados a mudanças climáticas à região. Como perspectivas mais bem definidas das estações e uma avaliação de caráter sistêmico das relações ao nível as interações pedológicas e atmosféricas ao longo de todo o ano, por exemplo, tendo em vista uma determinação mais incisiva das assertivas propostas.

Deve-se advertir que se trata aqui de um estudo pedológico de carácter exploratório, com escassa literatura atualizada sobre o tema tendo assim que apoiar-se em abordagens paralelas para construir sua leitura. Ainda, observa-se que se impuseram variações à metodologia de incubação ou tratamento de amostras similar anteriormente descrita para obtenção de tais dados de estabilidade de agregados.

Não obstante, por mais que pareça parco o que aqui é trazido à apreciação, trata-se de um dado novo e representativo dentro de uma metodologia embasada e proposta na literatura de forma teórica e convergente.

Neste sentido, ainda pode-se afirmar que se esperava que da obtenção dos dados de matéria orgânica fosse possível obter uma taxa de decomposição da matéria orgânica a qual permitisse obter um índice de reposição de seus níveis com vistas à manutenção da estrutura do solo. Muito embora, considerando as discrepâncias dos valores obtidos neste parâmetro não foi possível definir tal relação, deixando uma lacuna a ser investigada posteriormente.

No entanto, a despeito de seu caráter incipiente, esse estudo de prognósticos erosivos associados às mudanças climáticas, mesmo carecendo de suporte mais robusto dado seu caráter exploratório, presume-se trazer à discussão dados que preenchem lacunas da literatura anterior. Dessa forma, cumpre o papel de dar continuidade à construção do conhecimento científico em direção ao suprimento das informações e do arcabouço de dados que não temos disponíveis até o momento, contribuindo assim para que o conhecimento e a ciência, enquanto recursos da sociedade que antevêm os fatos antes dos eventos propriamente ditos.

Assim, embora não tendo sido possível esclarecer diretamente as relações entre matéria orgânica e estabilidade de agregados utilizando-se apenas de dados de carbono orgânico total do solo, o resultado do tratamento térmico sobre a estabilidade de agregados dos solos arenosos fornece uma ampla margem a essas assertivas. O que demonstra o potencial de desestabilização da paisagem sobre os solos arenosos da Depressão Central Sul-riograndense frente a um quadro de mudanças climáticas de aumento de temperaturas e sua dependência da manutenção dos níveis de matéria orgânica nestes solos.

Por conseguinte, avança na demonstração da fragilidade dos sistemas pedológicos de matriz arenosa da Depressão Central Sul-riograndense e sua dependência de sistemas orgânicos para sua sustentação e manutenção das qualidades do solo cruciais para a estabilização ambiental. De modo que pretendeu-se com esse estudo uma advertência reiterada para a importância decisiva da matéria orgânica e suas interações colaborativas com o equilíbrio do meio, da importância da incorporação de resíduos vegetais, nas áreas de cultivo, ou mesmo na manutenção da própria vegetação espontânea, tanto para fins de estabilidade ambiental quanto para estoque de carbono.

REFERÊNCIAS

- AB'SASER, A. N. **Um Conceito de Geomorfologia a Serviço das Pesquisas sobre o Quaternário**. Geomorfologia São Paulo, n. 18, p. 1-23, 1969.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600 Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440 °C**.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica**.
- ABU-SHARAR, T. **Stability of Soil Aggregates as Affected by Electrolyte Concentration and Composition**. Soil Science Society of America Journal. 51. 309-31 1987.
- ABU-SHARAR, T.M.; BINGHAM, F.T.; RHOADES, J.D. **Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation**. Soil Science Society of America Journal, 51, 342-346, 1987.
- AGASSI, M.; BRADFORD, J.M. **Methodologies for interrill soil erosion studies**. Soil & Till. Res., 49:277-287, 1999.
- ÅGREN, G. I. & WETTERSTEDT, J. M. **What determines the temperature response of soil organic matter decomposition?** Soil Biology and Biochemistry 39(7), 1794-1798, 2007.
- AHMADI, A.; NEYSHABOURI, R.; ASADI, H. **Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility**. Journal of Hydrology - J HYDROL. 400. 305-311. 10.1016/j.jhydrol.2011.01.045, 2011.
- ALBUQUERQUE, J. A.; CASSOL, E. A.; REINERT, D. J. **Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, v. 24, p. 141-151, 2000.
- AL-DURRAH, M. M.; BRADFORD, J. M. **The mechanism of raindropsplash on soil surfaces**. Soil Science Society of America Journal, 46, 1086-1090, 1982.
- ALEXANDERE, M. I. H. **Introduction to soil microbiology**. 4 ed. New York: John Wiley, 472 p., 1967.
- ALLEN, D.E., SINGH, B.P. E DALAL, R.C. **Soil Health Indicators under Climate Change: A Review of Current Knowledge**. Singh, B., Cowie, A. e Chan, K., Eds., Soil Health and Climate Change, Springer, Berlin, 25-45, 2011.
- ALMEIDA, P. S. G. de; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E. **Características, classificação e relação solo-superfície-material de origem dos solos do campus da ufsm**. Departamento de Solos, CCR, UFSM. <http://www.ufsm.br/ccr/solos>, acessado em 25 de agosto de 2021.

AMÉZKETA, E. **Soil aggregate stability: a review**. J. Sustain. Agric. 14, 83–151, 2008.

ANDERSON, T.H.; JOERGENSEN, R.G. **Relationship between SIR and FE estimates of micro biomass in deciduous soils at different pHs** Soil Biology & Biochemistry, v. 29, n. 7, 1033-1042, 1997.

ANGERS, D. A.; CARON, J. **Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks**. Biogeochemistry 42, 55– 72, 1998.

ATTOU, F.; BRUAND, A. **Experimental study of ‘fragipans’ formation in soils. Role of both clay dispersion and wetting–drying cycles**. C. R. Acad. Sci., Ser. 2, Fascicule II. Sci. Terre Planetes 326, 545– 552, 1998.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 4. ed. Rio De Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

AZEVEDO, T. R.; GALVANI, E. **Ajuste do ciclo médio mensal horário da temperatura do solo em função da temperatura do ar**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 11, n. 2, p. 123-130, 2003.

BAJRACHARYA, R. M.; LAL, R. **Crusting effects on erosion processes under simulated rainfall on a tropical Alfisol**. Hydrol. Processes 12, 1927–1938., 1998.

BARTHÈS, B.; ROOSE, E. **Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels**. Catena 47, 133–149. 2002.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S. da; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F. de O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole 7-18, 2008.

BEARE, M.H.; HENDRIX, P.F.; COLEMAN, D.C. **Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soils**. Soil Sci. Soc. Am. J. 58, 777– 786, 1994.

BELAN, L. L. et al. **Manejo alternativo do oídio na cultura do pepino em ambiente protegido**. Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais, v. 11, n. s. 2, 2013

BEN-DOR, E.; BANIN, A. **Determination of organic matter content in arid-zone soils using a simple “loss-on-ignition” method**. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 20:1675-1695, 1989.

BEN-HUR, M.; MALIK, M.; LETEY, J.; MINGELGRIN, U. **Adsorption of polymers on clays as affected by clay charge and structure, polymer properties, and water quality**. Soil Science 349-356, 1992.

BETTS, R. A.; COLLINS, M.; HEMMING, D. L.; JONES, C. D.; LOWE, J. A.; SANDERSON. M. G. **When could global warming reach 4°C?** Philos Trans A Math Phys Eng Sci., 2011.

BIRKA 'S, M.; DEXTER, A.; SZEMO"K. A. **Tillage-induced soil compaction, as a climate threat increasing stressor**. *Cereal Res Commun* 37:379–382, 2009.

BOIX-FAYOS, C.; CALVO-CASES, A.; IMESON, A.C.; SORIANO-SOTO, M.D.; TIEMESSEN, I.R. **Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a Mediterranean climatological gradient**. *Catena* 33, 123–138, 1998.

BORTOLUZI, E. C.; ELTZ, F. L. F. **Efeito do manejo mecânico da palhada de aveia preta sobre a cobertura, temperatura, teor de água no solo e emergência da soja em sistema plantio direto**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, n.2, p. 449-457, 2000.

BOTTINELLI, N.; P. JOUQUET, P.; CAPOWIEZ, Y.; PODWOJEWSKI, P.; GRIMALDI, M.; PENG, X. **Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists?** *Soil and Tillage Research*, Volume 146, Parte A, 118-124, 2015.

BOX JE, BRUCE RR **The effect of surface cover on infiltration and soil erosion**. In: Agassi M (ed) *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. Marcel Dekker Inc, New York, 1996.

BRANCO, P. M. **Petróleo** Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 2014 in: <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Petroleo-1256.html>

BRASIL, Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento doss solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: convênio MA/DPP – SA/DRNR, 1973.

BRESSON, L.M.; BOIFFIN, J. **Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field**. *Geoderma*, v.47, 301-325, 1990.

BRINKMAN, R., SOMBROEK W. **The effects of global change on soil conditions in relation to plant growth and food production**. In: Bazzaz F, Sombroek W (eds) *Global climate change and agricultural production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and John Wiley and Sons Ltd., Rome, Italy, 1999.

BRONICK, C. J.; LAL, R. **Soil structure and management: a review**. *Geoderma*, 124, 3-22 2005.

BRUNETTO, G.; MELLO, G. W.; KAMINSKI, J. **Avaliação do método de perda de peso por ignição na análise de matéria orgânica em solos da Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul**. *Ci. Rural*, 36:1936-1939, 2006.

BUDZIAK, C. R.; MAIA, C. M. B. F.; MANGRICH, A. S. **Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos da indústria madeireira**. *Quím. Nova* [online]. vol. 27, no. 32008-11-09], pp. 399-403, 2004.

BUOL, S. W.; SANCHEZ, P. A.; WEED, S. B.; KIMBLE, J. M. Predicted impact of climatic warming on soil properties and use. – In: ASA, CSSA, SSSA (ed.), **Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture. ASA spec. publ. 53: 71–83, 1990.**

CAESAR-TONTHAT, T.C. **Soil binding properties of mucilage produced by a basidiomycete fungus in a model system.** Mycol. Res. 106, 930–937, 2002.

CANTÓN, Y.; SOLÉ-BENET, A.; ASENSIO, C.; CHAMIZO, S.; PUIGDEFÁBREGAS, J. **Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion.** Catena 77, 192–199, 2009.

CASENAVE, A. AND VALENTIN, C. **Les états de surface de la zone sahélienne.** Orstom, 229, 1989.

CASTRO, S. S. de; HERNANI, L. C. (ed.). **Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade.** Brasília, DF: Embrapa, 367, 2015.

CESÁRIO, F. V.; DONAGEMMA, G. K.; Ruiz, H.A.; BALIEIRO, F. C. **Estabilidade de agregados em água: análise crítica e padronização.** Comunicado Técnico (Embrapa-Solos), v. 57, p. 1, 2010.

CHAN, K. Y.; MULLINS, C. E. **Slaking characteristics of some Australian and British soils.** European Journal of Soil Science, 45, 273-283, 1994.

CHRISTENSEN, B. T. **Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover.** Eur. J. Soil Sci. 52, 345–353, 2001.

CUNHA, T. J.; MENDES, A. M.S. **Matéria Orgânica do Solo** In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Org.). Recurso solo: propriedades e usos. São Carlos: Cubo, 2015. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/137613/1/Tony-2015>

DALAL, R. C. **Soil microbial biomass – what do the numbers really mean?** Aust J Exp Agric 38:649–665, 1998.

DALAL, R. C.; MOLONEY D. Sustainability indicators of soil health and biodiversity. In: Hale P, Petrie A, Moloney D, Sattler P (eds) **Management for sustainable ecosystems.** Centre for Conservation Biology, Brisbane, 101–108, 2000.

DANTAS, D.; BARBOSA, G. P.; CUNHA, E. G. S.; DE SOUZA, M. J. H.; e de SOUZA, C. M. P. **Temperatura do ar e do solo em diferentes profundidades, em Diamantina-MG.** Caderno de Ciências Agrárias, v.9, p. 61-66, 2017.

DANTAS, M.; VIERO, A. C.; SILVA, D.R. **Origem das paisagens do estado do Rio Grande do Sul,** 2010. in https://www.researchgate.net/publication/336927569_Origem_das_paisagens_do_estado_do_Rio_Grande_do_Sul acessado em 27//05/2021

DAVIDSON, E. A., AND JANSSENS, I. A. **Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change.** *Nature* 440, 165–173, 2006.

DE PLOEY, J.; POESEN, J. Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion. In: **Geomorphology and Soils** (eds K.S. Richards, R.R. Arnett & S. Ellis), Allen and Unwin, London, 99-120, 1985.

DEARING, J.; BATTARBEE, R., DIKAU; R., LAROCQUE; I.; OLDFIELD, F. **Human-environment interactions: towards synthesis and simulation.** *Reg. Environ. Change* 6, 115–123. 2006.

DENEF, K., SIX, J., BOSSUYT, H., FREY, S. D., ELLIOTT, E. T., MERCKX, R., PAUSTIAN, K. **Influence of dry – wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics.** *Soil Biol. Biochem.* 33, 1599-1611, 2001.

DÍAZ-ZORITA, M.; PERFECT, E.; GROVE, J.H. **Disruptive methods for assessing soil structure.** *Soil Res.* 64, 3–22. 2002.

DIMOYIANNIS, D. G.; TSADILAS, C. D.; VALMIS, S. **Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils.** *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29, 1239– 1251, 1998.

DIMOYIANNIS, D.; VALMIS, S.; DANALATOS, N.G. **Interrill erosion on cultivated Greek soils: modeling sediment delivery.** *Earth Surf. Process. Landf.* 31, 940–949, 2006.

DINEL, H.; RIGHI, D.; HARDY, M.; JAMBU, P. **Neutral lipids and structural stability of physically degraded soils.** *Agrochimica* 41, 97– 108, 1997.

DING, W. F.; ZHANG, X. C. **Evaluation on using soil aggregate stability as an indicator of interrill erodibility.** *J. Mt. Sci-Engl.* 13 (5), 831–843, 2016.

DOWDESWELL-DOWNEY, E., GRABOWSKI, R., AND RICKSON, J.: **Temperature and moisture content influences aggregate stability: linking climate induced microbial change to aggregate (de)stabilisation,** EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-16470, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-16470>, 2020.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. **Microaggregates in soils.** *J. Soil Sci.* 18, 64–73, 1967.

EGASHIRA, K. ET AL. **Aggregate stability as an index of erodibility of ando soils.** *Soil Science and Plant Nutrition* 473-481, 1983.

ELLIOTT, E. T. AND COLEMAN, D. C. **Let the soil work for us.** – *Ecol. Bull.* 39: 23–32, 1988.

- ELLIOTT, E.T. **Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils.** Soil Science Society of America Journal, 50, 627-633, 1986.
- ELTZ, F.L.F.; ROVEDDER, A.P.M. **Revegetação e temperatura do solo em áreas degradadas no sudoeste do Rio Grande do Sul R.** Bras. Agroci., 11:193-200, 2005.
- ELWELL, H. A. **Determination of erodibility of a subtropical clay soil: a laboratory rainfall simulator experiment.** Journal of Soil Science. 37(2).345-350., 1986.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. URL: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/990374/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>
- EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 573p. 2017.
- EMERSON, W. W. Physical properties and structure. p. 78-104. In J. S. Russell and E. L. Greacen (ed.) **Soil factors in crop production in a semi-arid environment.** Queensland University Press, Brisbane, Australia. 1977.
- EMERSON, W. W.; GREENLAND, D. J. Soil aggregates-Formation and stability. In: **Soil colloids and their associations in aggregates** (eds M. De Boodt, M. Hayes & A. Herbillon), pp. 485-511. Plenum Press, New York, 1990.
- ERHART, H. **La theorie bio-rexistesique et les problemews biogeographiques et paleobiologiques.** Soc. Biogeogr., France, 1956.
- ESCOSTEGUY, P. A. V.; GALLIASSI, K.; CERETTA, C. A. **Determinação de matéria orgânica do solo pela perda de massa por ignição em amostras do Rio Grande do Sul.** Rev. Bras. Ci. Solo, 21:247-255, 2007.
- FACCO, R.; WERLANG, M. K. **Influência dos parâmetros físico-hídricos do solo na conformação das vertentes na formação Santa Maria (membro alemoa) no bairro Camobi e distrito de Pains, Santa Maria - RS.** Geografia Ensino e Pesquisa. 24. e26, 2020.
- FARRES, P. J. **The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability.** Catena, 14, 119-130, 1987.
- FERNANDEZ, C.; WU, J.Q.; MKCOOL, D.K.; STOCKLE, C.O. **Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. J.** Soil Water Conserv. 58, 128–136. 2003.
- FRANZLUEBBERS, A. J. **Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth.** Soil Tillage Res. 66, 197– 205, 2002.
- FRANZLUEBBERS, A. J., HANEY, R. L., HONEYCUTT, C. W., ARSHAD, M. A., SCHOMBERG, H. H., HONS, F. M. **Climatic influences on active fractions of soil organic matter.** Soil Biol. Biochem. 33, 1103– 1111, 2001.

FURTADO, M. L. S. **Dinâmica da paisagem a partir de uma visão geossistêmica no município de Ipanguaçu/RN.** 67 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Biociências. Programa Regional de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente/PRODEMA, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2018.

GARCIA-RUIZ R., OCHOA V., VINEGLA B., HINOJOSA M. B., PENA-SANTIAGO R., LIEBANAS G., LINARES J.C., CARREIRA J.A. **Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive-oil farming: influence of seasonality and site features.** *Appl Soil Ecol* 41:305–314, 2009.

GASPARIM, E. et al. **Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu.** *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 27, n. 1, p. 107-115, 2005.

GONZÁLEZ, R. P.; LÓPEZ, J. L. P.; SESMAN, J. S. **Análisis de posibles impactos del cambio climático. Estudio de caso preliminar: Cancún, Quintana Roo.** Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 2006.

GREENLAND, D. J. **Interaction between clays and organic compounds in soils. Part 2. Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties.** *Soils Fertilizers*, 28:521-532, 1965.

GUCKERT, A.; CHONE, T.; JACQUIN, F. **Microflore et stabilité des sols. Reoue d'Écologie et de Biologie du Sol.** 12, 211-223, 1975.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; ALEXANDRE, S. T. **Soil erosion and conservation in Brazil.** *Anuário do Instituto de Geociências. UFRJ* 37: 81-91, 2014

HAIRSINE, P. B. & HOOK, R. A. Relating soil erosion by water to the nature of the soil surface. In: **Sealing, Crusting and Hardsetting Soils: Productivity and Conservation** (eds H. B. So, G. D. Smith, S. R. Raine, B. M. Schafer & R. J. Loch), Australian Society of Soil Science, Brisbane, 77-91, 1995.

HAKANSSON, I., LIPIEC J. **A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction.** *Soil Tillage Res* 53:71–85, 2000.

HAYNES, R. J.; BEARE, M. H. **Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions.** *Soil Biol. Biochem.* 29, 1647– 1653, 1997.

HAYNES, R.J. Soil organic matter quality and the size and activity of the microbial biomass: their significance to the quality of agricultural soils. pp 201-230. In: HUANG Q, HUANG, P.M. VIOLANTE, A. (EDS) **Soil mineral-microbe-organic interactions: Theories and applications.** Springer, Berlin, 2008

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics.** Burlington: Academic Press, p. 73-89. 2003.

HUBBEL, D. S.; J. E. CHHAPMAN. **The genesis of structure in two calcareous soils.** *Soil Sci.* 62: 271-281, 1946.

IBGE. **Base de dados espacial 1:250000.** Folha SH21 e SH22, pedologia. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html>

IBGE. **Levantamento de recursos naturais do projeto Radam-brasil.** Folha SH. 22 Porto Alegre e parte das folhas SH.22 Uruguaiana e SI.22 lagoa Mirim: geologia geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: IBGE, 1986

IBGE. **Mapa geomorfológico do Brasil.** Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 1995

IGWE, C.; OBALUM, S. **Microaggregate Stability of Tropical Soils and its Roles on Soil Erosion Hazard Prediction.** 10.5772/5247, 2013.

IMESON, A. C.; VIS, M. **Assessing soil aggregate stability by water-drop impact and ultrasonic dispersion.** *Geoderma* 34: 185–200. 1984.

IPCC, 2007 **Climate change 2007: the physical science basis. Summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

IPCC, 2013: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press.

JARVIS, N. J. **A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality.** *Eur J Soil Sci* 58:523–546, 2007.

JASTROW, J. D. **Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter.** *Soil Biol. Biochem.* 28, 665– 676, 1996.

JASTROW, J. D.; MILLER, R. M. **Methods for assessing the effects of biota on soil structure.** *Agric., Ecosystems & Environm.* 34:279-303, 1991.

JASTROW, J. D.; MILLER, R. M., LUSSENHOP, J. **Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie.** *Soil Biol. Biochem.* 30, 905– 916, 1998.

JAYAWARDENA, A. W.; Bhuiyan, R. R. **Evaluation of an interrill soil erosion model using laboratory catchment data.** *Hydrol. Processes* 13, 89– 100, 1999.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J. L. **S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005.

KAY, B.D. Soil structure and organic carbon: a review. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (Eds.), **Soil Processes and the Carbon Cycle.** CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 169–197, 1998.

KELLEY, K. R. E STEVENSON, F. J. in **Humic Substances in Terrestrial Ecosystems** (ed. Picolo, A.) 407–427 (Elsevier, Amsterdam, 1996).

KEMPER, M.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and particule size distribution. In: Klute, A. (Ed.), **Methods of Soil Analysis, Part.1.** American Society of Agronomy, KEMPER, W. D. **Aggregate Stability.** In: Black, C. I. A. **Methods of soil analysis. Part 1.** Madison. Wic. ASA. 511-519, 1965.

KEMPER, W. D.; KOCH, E. J. **Aggregate stability of soils from western United States and Canada.** USDA-ARS Tech. Bull. 1355. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. 1966.

KEMPER, W.O., **Aggregate stability, In Methods of Soil Analysis, Part I,** ed. by CA. Black et 01., American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. 511-519, 1965.

KHEYRABI, D.; MONNIER, G. **Etude expdrimentale de l'influence de la composition granulomtrique des terres sur leur stabilit structural.** Annales Agronomiques, 19, 129-152, 1968.

KIEM, R.; KANDELER, E. **Stabilization of aggregates by the microbial biomass as affected by soil texture and type.** Appl. Soil Ecol. 5, 221–230, 1997.

KLAR, A. E. **A influência do solo e do clima nas necessidades hídricas da cultura da cebola.** Botucatu, 1974. 171 f. Tese (Livre-docência) - Faculdade de Ciências Agrárias Médicas e Biológicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 1974.

KNORR, W.; PRENTICE, I. C.; HOUSE, J. I.; HOLLAND, E. **A. Long-term sensitivity of soil organic carbon turnover to warming.** Nature 433:298–301, 2005.

KUYKENDALL, H. **Soil quality physical indicators: selecting dynamic soil properties to assess soil function.** (Soil Quality Tech. Note 10). Washington (DC): Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality National Technology Development Team, 2008.

LAL, R. **Soil quality and soil erosion.** Soil and Water Conservation Society, Ankeny, 1999.

LAL, R. **Soil structure and sustainability.** J. Sustain. Agric. 1, 67–92, 1991.

LAL, R., Follett R. F., Stewart B. A., Kimble J. M. **Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security.** Soil Sci 172:943–956, 2007.

LE BISSONNAIS, Y. **Aggregate stability and measurement of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology.** Eur. J. Soil Sci. 47, 425–437, 1996.

LE BISSONNAIS, Y. **Experimental study and modeling of soil surface crusting processes.** In Bryan, R.B. (ed.). Soil erosion-experiments and models. Catena Supplement 17:13-28, 1990.

LE BISSONNAIS, Y.; LE SOUDER; C. **Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion.** Etude Gestion Sols 2, 43– 56, 1995.

LEGOUT, C.; LEGUEDOIS, S.; BISSONNAIS, Y. **Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements.** European Journal of Soil Science 56: 225–237, 2005.

LEVY, G.J.; MILLER, W.P. **Aggregate stabilities of some Southeastern U.S. soils.** Soil Science Society of America Journal, v.61, p.1176-1182, 1997.

LUPWAYI, N. Z.; ARSHAD, M. A.; RICE, W. A.; CLAYTON, G. W. **Bacterial diversity in water-stable aggregates of soils under conventional and zero tillage management.** Appl. Soil Ecol. 16, 251– 261, 2001.

MACIEL FILHO, C. L. **Carta geotécnica de Santa Maria.** Santa Maria: Imprensa Universitária (UFSM), 1990.

MACIEL FILHO, C. L.; SARTORI, P. L. P.; VEIGA, P. e GASPARETTO, N. V. L. **Mapa Geológico da Folha de Camobi.** Texto explicativo. Santa Maria, UFSM, 1988. Madison, Wisconsin 456-442, 1986.

MAGILL, A. H.; ABER, J. D. **Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems.** Plant Soil 203, 301– 311, 1998.

MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; PILAU, F. G. **Clima e ambiente: introdução à climatologia para ciências ambientais.** - Campinas, SP: Embrapa Informática Agropecuária, 2008

MARQUES, J.J.G.S.M.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; SÁ, M.A.C. **Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Vol.21, p.447-456, 1997.

MARTENS, D.A. **Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration.** Soil Biol. Biochem. 32, 361– 369, 2000.

MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; REMOND, R.; RUIZ-SINOGA, J. D. **Validation of RUSLE K factor using aggregate stability in contrasted mediterranean ecomorphological landscapes (southern Spain).** Environ Res. 2020.

- MENDES, I. C.; BANDICK, A. K.; DICK, R. P.; BOTTOMLEY, P. J. **Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter cover crops**. Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 873– 881, 1999.
- MOEBIUS, B. N.; VAN ES H. M.; SCHINDELBECK, R. R.; IDOWU, O. J.; CLUNE, D. J.; THIES, J. E. **Evaluation of laboratory-measured soil properties as indicators of soil physical quality**. Soil Sci 172:895–912, 2007.
- MOREIRA, F.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2a edição, Editora UFLA, 2006.
- MOROTE, C.G.B.; VIDOR, C.; MENDES, N.G. **Alterações na temperatura do solo pela cobertura morta e irrigação**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 14, p. 81 –84, 1990.
- NAKASHIMA, M. R.; ALVES, G. B.; BARREIROS, A. M.; QUEIROZ NETO, J. P. **Dos solos à paisagem: uma discussão teórico-metodológica**. Revista da ANPEGE, [S. l.], v. 13, n. 20, p. 30–52, 2017.
- NCIIZAH, A. D.; WAKINDIKI, I.I.C. **Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility**. Arch. Agron. Soil Sci. 2015.
- NEARING, M. A.; BRADFORD, J. M. **Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils**. Soil Science Society of America Journal, 49, 547-552, 1985.
- NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. **Total carbon, organic carbon and organic matter**. In: Methods of Soil Analysis Part 3. **Chemical Methods**-SSSA Book. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, n.5, p.963-1010, 1996.
- OADES, J. M.; WATERS, A. G. **Aggregate hierarchy in soils**. Aust. J. Soil Res. 29, 815– 828, 1991.
- OADES, J.M. **Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management**. Plant Soil 76:319-337, 1984.
- PARE, T.; DINEL, H.; MOULIN, A.P.; TOWNLEY-SMITH, L. **Organic matter quality and structural stability of a Black Chernozemic soil under different manure and tillage practices**. Geoderma 91, 311– 326, 1999.
- PEDRON, F. A.; DALMOLIN, R. S. D. (Org.). **Solos arenosos do bioma Pampa**. Santa Maria: Editora UFSM, 218, 2019.
- PENA, R. F. A. "**Categorias da Geografia**"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilestola.uol.com.br/geografia/categorias-geografia.htm>. Acesso em 12 de junho de 2020.
- PENTEADO, M. M. **Fundamentos de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 1978.

PICCOLO, A.; PIETRAMELLARA, G.; MBAGWU, J. S. C. **Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability.** *Geoderma* 75, 267– 277, 1997.

PINTO, G. S.; SERVIDONI, L. E.; LENSE, G. H. E.; MOREIRA, R. S.; MINCATO, R. L. **Estimativas das perdas de solo por erosão hídrica utilizando o método de erosão potencial.** *Revista do Departamento de Geografia*, v. 39, n. 1, p. 1-10, 2020.

PLANTE A.; CONANT R.T. **Soil Organic Matter Dynamics, Climate Change Effects.** In: Freedman B. (eds) *Global Environmental Change. Handbook of Global Environmental Pollution*, vol 1. Springer, Dordrecht. ,2014.

PLANTE, A. F.; MCGILL, W.B. **Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies.** *Soil Tillage Res.* 66, 79–92, 2002.

POESEN, J.; GOVERS, G. A field-scale study on surface sealing and compaction on loam and sandy loam soils. Part 11. Impact of soil surface sealing on compaction and water erosion processes. In: **Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting** (eds F. Callebaut, D. Gabriels & M. De Boodt), Flanders Research Centre for Soil Erosion and Soil Conservation, Gent, 183-193, 1986.

POESEN, J.W.A. **Mechanisms of overland-flow generation and sediment production on loamy and sandy soils with and without rock fragments.** In: Parsons, A.J., Abrahams, A.D. (Eds.), *Overland Flow Hydraulics and Erosion Mechanics*. UCL Press, London, pp. 275– 305, 1992.

POJASOK, T.; KAY. B. D. **Effect of root exudates from corn and bromegrass on soil structural stability.** *Can. J. Soil Sci.* 70:351-362, 1990.

PREVEDELLO, C. L. **Física do Solo.: Com problemas resolvidos.** Curitiba, 446p., 1996.

RABOT, E., WIESMEIER, M., SCHLÜTER, S., VOGEL, H.J. **Soil structure as an indicator of soil functions: a review.** *Geoderma* 314, 122–137, 2018.

REINERT, D. J. **Principais solos da depressão central e campanha do Rio Grande do Sul: guia de excursão.** Universidade Federal de Santa Maria-Centro de ciências Rurais–Departamento de solos, 2007.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. A.; YODER, D. C. **Predicting Soil Erosion by Water: a Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE,** *Agricultural Handbook 703*, USDA, WA, 1997.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN B. T.; DRURY C. F.; TAN C. S.; LU X. **Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters.** *Geoderma* 110:131–146, 2002.

REYNOLDS, W. D.; DRURY C. F.; TAN C. S.; FOX C. A.; YANG, X. M. **Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality.** *Geoderma* 152:252–263, 2009.

RILLIG, M. C. AND ALLEN, M. F. **What is the role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant-to-ecosystem responses to elevated atmospheric CO₂? – Mycorrhiza** 9: 1–8, 1999.

RILLIG, M. C.; WRIGHT, S. F.; EVINER, V. T. **The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species.** *Plant Soil* 238, 325– 333, 2002.

RIMAL, B. K.; LAL, R. **Soil and carbon losses from five different land management areas under simulated rainfall.** *Soil Tillage Res* 106:62–70, 2009.

RINNAN, R.; MICHELSEN, A.; BAATH, E.; JONASSON, S. **Fifteen years of climate change manipulations alter soil microbial communities in a subarctic heath ecosystem.** *Glob Change Biol* 13:28–39, 2007.

RITZ, K.; BLACK H. I. J.; CAMPBELL, C. D.; HARRIS J. A.; WOOD C. **Selecting biological indicators for monitoring soils: a framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development.** *Ecol Indic* 9:1212–1221, 2009.

ROOSE, E. **Land husbandry: components and strategy.** *FAO Soils Bull.* 70, 370, 1996.

ROSCOE, R. e MACHADO, P. L. A. **Fracionamento físico do solo e estudos da matéria orgânica.** Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2002.

ROSS, D. S.; MATSCHONAT, G.; SKYLLBERG, U. **Cation exchange in forest soils: the need for a new perspective.** *Eur J Soil Sci* 59:1141–1159, 2008.

RUSSELL, E. W. **Soil Conditions and Plant Growth** 10th edn. London: Longmans, 1973.

SANCHIS, M. P. S., TORRI, D., BORSELLI, L., e POESEN, J. **Climate effects on soil erodibility.** *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(7), 1082–1097.

SANDERS, F. E.; MOSSE, B.; TINKERP, B. **Endomycorrhizas.** New York Academic Press, 1975.

SANTOS, D.; MURPHY, S. L. S.; TAUBNER, H.; SMUCKER, A. J. M.; HORN, R. **Uniform eparation of concentric surface layers from soil aggregates.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 720– 724, 1997.

SANTOS, D.C. **Agregação e frações físicas da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso no Bioma Pampa.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n 5, p 1735-1744, 2011.

SATO, J. H. **Métodos para determinação do carbono orgânico em solos do cerrado.** Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2013.

SCHIMEL, D. S. **Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils.** *Glob. Biogeochem. Cycles* 8, 279–293, 1994.

- SCHIMIGUEL, R.; SÁ, J.C.M.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D.C.; ZUFFO, J. **Estabilidade de agregados do solo devido a sistemas de cultivo**. Synergismus scyentifica UTFPR, 9 (1):1-5, 2014.
- SCHLENTNER, R. E.; VAN CLEVE, K. **Relationships between CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska**. Can. J. For. Res. 15, 97–106, 1985.
- SCHMITT, C. **Gênese de solos desenvolvidos de rochas sedimentares na Depressão central do Rio Grande do Sul**. 172f. Tese (Doutorado em ciência do solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre (RS), 2015.
- SCHRADER, S.; ZHANG, H. Q. **Earthworm casting: stabilization or destabilization of soil structure?** Soil Biol. Biochem. 29, 469– 475, 1997.
- SCHULTE, E. E.; HOPKINS, B.G. **Estimation of soil organic matter by weight-loss-on-ignition**. In: MAGDOFF F.R.; et al. Soil organic matter: analysis and interpretation. SSSA Spec. Publ. 46, Madison, WI. 1996.
- SCHULTEN, H. R.; LEINWEBER, P. **New insights into organic–mineral particles: composition, properties and models of molecular structure**. Biol. Fertil. Soils 30, 399– 432, 2000.
- SCHUTTER, M. E.; DICK, R. P. **Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil**. Soil Sci. Soc. Am. J. 66, 142– 153, 2002.
- SECRETARIA ESTADUAL DE PLANEJAMENTO – SEPLAN. (1986) **Levantamento dos recursos naturais**. Rio de Janeiro: IBGE.
- SHAVER, G. R., CANADELL, J., CHAPIN, F. S. ET AL. **Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis**. – BioScience 50: 871– 882, 2000.
- SHI, Z.; YAN, F.; LI, L.; LI, L.; CAI, C. **Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China**, CATENA, Volume 81, 240-248, 2010.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Editora Rima; 2003.
- SILVA, F. A M.; GUERRERO LOPEZ, F.; VILLAS BOAS, R. L.; SILVA, R. B. **Transformação da matéria orgânica em substâncias húmicas durante a compostagem de resíduos vegetais**. Revista Brasileira Agroecológica, v. 4, p. 59-66, 2009.
- SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. **Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo.**, R Bras Ci Solo v.21, p.113-117, 1997.

SIMON B. BIRD, JEFFREY E. HERRICK, MICHELLE M. WANDER, LEIGH MURRAY **MULTI-scale variability in soil aggregate stability: Implications for understanding and predicting semi-arid grassland degradation**, *Geoderma*, Volume 140, Issues 1–2, 2007.

SINGER, M. J.; SOUTHARD, R. J.; WARRINGTON, D. J.; JANITZKY, P. **Stability of synthetic sand clay aggregates after wetting and drying cycles**. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1843–1848, 1992.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. **A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics**. *Soil and Tillage Research*. v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. **Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems**. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1350–1358, 1999.

SMITH, S. E.; Read, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. – Academic Press, 1997.

SOLLINS, P., HOMANN, P. E CALDWELL, B. A. **Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls**. *Geoderma* 74, 65–105, 1996.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. **Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls**. *Geoderma* 74, 65–105, 1996.

STANCHI, S.; FALSONE, G.; BONIFACIO, E. **Soil aggregation, erodibility, and erosion rates in mountain soils (NW Alps, Italy)**. *Solid Earth* 6, 403–414, 2015.

STEFFEN, W.; SANDERSON, A.; TYSON, P.; JÄGER, J.; MATSON, P.; MOORE III, B.; OLDFIELD, F.; RICHARDSON, K.; SCHNELLNHUBER, H.; TURNER II, B.; WASSON, R. **Global Change and the Earth System: a Planet under Pressure**. executive Summary. The IGBP Global Change Series. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 44, 2004.

STOKES, G. G. **On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums**. *Trans. Camb. Phil. Soc.* 9, Part II, p. 8-106, 1851.

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

SUGUIO, K. **Introdução a sedimentologia**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher. EDUSP, p. 317, 1973.

SUMNER, M. E. **Sodic soils—new perspectives**. *Aust. J. Soil Res.* 31, 683–750, 1993.

SUMNER, M. E. The electrical double layer and clay dispersion. In: **Soil Crusting: Physical and Chemical Processes** (eds M.E. Sumner & B.A. Stewart) p. 1-31. Lewis, Boca Raton, Florida, 1992.

TANAKA, U.; YOKOI, Y.; KOSAKI, T.; KYUMA, K. **Mechanisms and processes of crust formation on artificial aggregates: III. Relations between natural rainfall characteristics and degree of crusting.** *Soil Sci. Plant Nutr.* 45, 537–549, 1999.

TARCHITZKY, J.; HATCHER, P.G.; CHEN, Y. **Properties and distribution of humic substances and inorganic structure-stabilizing components in particle-size fractions of cultivated Mediterranean soils.** *Soil Sci.* 165, 328–342, 2000.

TEDESCO, M. J.; et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, 1995.

TERNAN, J. L.; WILLIAMS, A.G.; ELMES, A.; HARTLEY, R. **Aggregate stability of soils in central Spain and the role of land management.** *Earth Surf. Processes Landf.* 21, 181–193, 1996.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. **The management of ryegrass to stabilize aggregates of a red-brown earth.** *Australian Journal of Soil Research* 18.4 15422, 1980.

TISDALL, J.M. **Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter.** In: Carter, M.R., Stewart, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils.* CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 57–96, 1996.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. **Organic matter and water stable aggregates in soil.** *J. Soil Sci.* 33, 141–163, 1982.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. **Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass.** *Australian Journal of Soil Research*, 17, 429-441, 1979.

TRICART, J. **Ecodinâmica.**, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Superintendência de Recursos Naturais e Meio ambiente. Diretoria Técnica. Rio de Janeiro, 1977.

TRUMAN, C. C.; BRADFORD, J. M.; FERRIS J.E. **Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1385-1392, 1990.

URATA, T.; YAMADA, T.; ITSUBO, N.; INOUE, M. **Modeling and Balancing for Costs and CO2 Emissions in Global Supply Chain Network among Asian Countries.** *Procedia CIRP.* 26. 664-669, 2015.

VALMIS, S.; DIMOYIANNIS, D.; DANALATOS, N.G. **Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece.** *Soil Tillage Res.* 80. 139–147, 2016.

VITOUSEK, P.; MOONEY, H.; LUBCHENCO, J.; MELILLO. **Human domination of Earth ecosystems.** *Science.* 277. 494-499, 1997.

VITTE A.C. **O texto no contexto. A tese de doutoramento de João Dias da Silveira “Estudo Geomorfológico dos Contrafortes Ocidentais da Mantiqueira”.** I Seminário Nacional de transformações paradigmáticas na geomorfologia brasileira entre 1930 e 2000. SP, FAPESP (processo 06/01047-7), relatório final, 2008.

- VITTE, A. C.; SOARES NIEMANN, R. **Uma Introdução À História Da Geomorfologia No Brasil: A Contribuição De Aziz Nacib Ab'saber**. Revista Brasileira de Geografia Física. 2009.
- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. **An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method**. Soil Sci., 37:29–38, 1934.
- WANG, B.; ZHENG, F. L.; RÖMKENS, M. J. M.; DARBOUX, F. **Soil erodibility for water erosion: a perspective and Chinese experiences**. Geomorphology 187, 1–10, 2013.
- WANG, BAORONG; ZHAO, XIAODAN; LIU, YANG; FANG, YING; MA, RENTIAN; YU, QIANG; AN, SHAOSHAN. **Using soil aggregate stability and erodibility to evaluate the sustainability of large-scale afforestation of Robinia pseudoacacia and Caragana korshinskii in the Loess Plateau**. Forest Ecology and Management. 450. 117491. 10.1016/j.foreco,117491, 2019.
- WANG, J. G.; YANG, W.; YU, B.; LI, Z. X.; CAI, C. F.; MA, R. M. **Estimating the influence of related soil properties on macro- and micro-aggregate stability in ultisols of southcentral China**. Catena 137, 545–553, 2016.
- WEIL, R. R.; MAGDOFF, F. **Significance of soil organic matter to soil quality and health**. In: Weil RR, Magdoff F (eds) Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC press, Florida, pp 1–43, 2004.
- WEN-FENG, D.; ZHANG, X. C. **An evaluation on using soil aggregate stability as the indicator of interrill erodibility**. Journal of Mountain Science. 13. 831-843, 2016.
- WERLANG, M. K. **Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- WILLIAMS, B. G.; GREENLAND D. J., LINDSTROM, G. R.; QUIRK, J. P. **Techniques for the determination of the stability of soil aggregates**. Soil Sci. 101:157-163, 1966.
- WISCHMEIER, W. H., SMITH, D. D. **Predicting Rainfall Erosion Losses**, Agriculture Handbook 537. USDA: Washington, DC., 1978.
- WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B. Cross BV. **A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites**. Journal of Soil and Water Conservation 26(5): 189 – 194, 1971.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH D. D. **Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains**, Agriculture Handbook 282. USDA: Washington, DC., 1965.
- WISCHMEIER, W.H.; MANNERING, J.V. **Relation of soil properties to its erodibility**. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 33:131-137, 1969.

WISCHMEIER, W.H.; MANNERING, J.V. **Soil and Water Management and Conservation. Relation of Soil Properties to its Erodibility.** Soil Science Society of America, Proceedings, 33, 131-137, 1969.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D.; **Prediction of Rainfall Splash Erosion Losses a Guide to Conservation Planning.** Agriculture Handbook No. 537. US Department of Agriculture, Washington DC, pp. 58. 1978.

WRIGHT, S. F., UPADHYAYA, A. **A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi.** Plant Soil 198, 97–107, 1998.

XIAO, H.; LIU, G.; LIU, P.; ZHENG, F.; ZHANG, J.; HU, F. **Developing equations to explore relationships between aggregate stability and erodibility in ultisols of subtropical China.** Catena, 157, 279–285, 2017.

YODER, R. E. **A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses.** Journal of the American Society of Agronomy, v. 28, n. 5, p. 337-351, 1936.

YODER, R.E. **A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses.** J. Am. Soc. Agron. 28:337-351, 1936.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T.M.; MILTNER, A. e SCHROTH, G. **Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics.** Geoderma, 79:117-161, 1997.

ZHENG, F. L.; TANG, K. L.; ZHOU, P. H. **Study on factors affecting rill erosion on cultivated slope land.** Acta Pedol. Sin. 26, 109–116, 1989.