



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS CURITIBANOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOSSISTEMAS AGRÍCOLAS E
NATURAIS

Borges Marfrann Dias Melo

**ESTOQUE E POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO NO ESTADO DE
SANTA CATARINA**

Curitibanos – SC
2023

Borges Marfrann Dias Melo

**ESTOQUE E POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO NO ESTADO DE
SANTA CATARINA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ecossistemas Agrícolas e Naturais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciência.

Orientador(a): Prof. Dr. Alexandre ten Caten

Curitibanos – SC

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Melo, Borges Marfrann Dias

Estoque e potencial de sequestro de carbono no Estado
de Santa Catarina / Borges Marfrann Dias Melo ;
orientador, Alexandre Ten Caten, 2023.

105 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Curitibanos, Programa de Pós-Graduação em
Ecossistemas Agrícolas e Naturais, Curitibanos, 2023.

Inclui referências.

1. Ecossistemas Agrícolas e Naturais. 2. Mudanças
climáticas. 3. Dados legados. 4. Geoprocessamento. I. Ten
Caten, Alexandre. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ecossistemas Agrícolas
e Naturais. III. Título.

Borges Marfrann Dias Melo

Estoque e potencial de sequestro de carbono no Estado de Santa Catarina

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 16 de fevereiro de 2023 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Djalma Eugenio Schmitt, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Arcângelo Loss, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Alexandre ten Caten, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Ciência.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Alexandre Siminski, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Alexandre ten Caten, Dr.
Orientador

Curitiba, 2023

AGRADECIMENTOS

A jornada do pós-graduando é muitas vezes exaustiva e solitária. Faz parte da nossa rotina estarmos "sozinhos" lendo e escrevendo infinitamente, comparando nossos resultados com outros, mesmo que isso venha a nos fazer duvidar da nossa própria capacidade. Muitos chegam a trabalhar tantas e tantas horas por dia e mesmo assim muitos de nós escutam os amigos ou familiares a grande pergunta: — mas você trabalha ou só estuda? A cobrança e a autocobrança podem nos massacrar se não tivermos cuidado. E aqui fica um lembrete, a ciência é um dos bens mais preciosos da humanidade!

Tudo isso me faz pensar nos últimos anos que me trouxeram até aqui como uma caminhada de amadurecimento e autoconhecimento. Por isso devo agradecer a você, Borges, que viveu intensamente essa fase diante de tantos desafios que permaneciam e insistiam para que você desistisse, mas você acreditou em si mesmo.

Essa decisão pela Academia também não surgiu sozinha. É fruto do incentivo de amigo/as que sempre reafirmaram minha capacidade, meu ânimo e meu entusiasmo para com a ciência; e praticamente me obrigaram a seguir em frente, mesmo com muita aversão da minha parte.

A trajetória do Mestrado, que neste momento se encerra, iniciou-se sem qualquer rumo também a ser seguido. E é por isso que agradeço ao meu mentor, professor e orientador, Dr. Alexandre ten Caten, que sempre paciente e disponível, me apresentou esse rumo que eu tanto precisava. Agradeço às ricas conversas científicas, ao profissionalismo, a sua ética, a sua humanidade singular e aos conselhos de como padecer do frio catarinense.

Claramente, isso também não teria sido possível sem as intervenções esporádicas, porém precisas, dos/das Docentes do Mestrado em Ecossistemas Agrícolas e Naturais que toleraram todos os meus anseios em prol desse objetivo, pelos dias de campo enriquecedores e também pelas animadas conversas; e ao secretário Delson capaz de me lembrar sempre dos prazos com cordialidade, atenção e cuidado.

Finalmente também na posse de um pensamento, recorria à equipe do Laboratório de Geomática que me acolheu e me abraçou fortemente, garantindo-me ao longo de todos esses meses que eu faria um bom trabalho.

O trajeto foi cheio de escolhas embaraçosas, as ideias nasciam e desapareciam em um piscar de olhos. Eu jamais teria conseguido agarrá-las sem a ajuda do meu amigo André Indú que sempre esteve pronto a me abraçar e me ouvir falar quase todos os dias do “mesmo assunto de sempre”.

Também em meio há uns anos confusos, com mudanças e adaptações culturais e sociais, reafirmei a força dos elos de sangue e coração, portanto, agradeço à minha grande amiga e quase irmã, Izabela Melo, que ilumina meus caminhos e me mostra que desistir nunca será uma opção, reforçando nossa rede de apoio. Agradeço também à minha família que mesmo distante acreditou nesse processo.

Outros agradecimentos excepcionais vão à Universidade Federal de Santa Catarina, que tornou a minha casa nesse período, à CAPES pela bolsa de estudos, ao PIAPE,

em especial Adriano Mesquita com quem trocamos figurinhas acadêmicas para que esse trabalho fosse realizado com êxito e aos colegas de Mestrado que sempre se mostraram compreensivos e acolhedores diante dos percalços.

Agradeço também à minha banca de qualificação que me mostraram diversos apontamentos e pensamentos para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O Estado de Santa Catarina, bem como seus ecossistemas agrícolas, possui grandes sumidouros de carbono nos solos. No entanto, é imprescindível uma melhor compreensão científica da estabilidade e do potencial do sequestro de carbono para antecipar a resposta do reservatório de carbono frente as mudanças climáticas e para identificar os melhores manejos do solo e preencher essa lacuna dentro da agricultura catarinense. Este trabalho analisou a variabilidade do estoque de carbono e áreas potenciais para sequestrar carbono atmosférico em Santa Catarina, a partir de métodos de geoprocessamento. Desse modo, compilaram-se dados legados de carbono orgânico do solo (COS) em até 100 cm de profundidade do solo e visualizou-se a variabilidade nas zonas edafoclimáticas, mesorregiões e classes do solo (2º nível categórico). Os resultados mostraram que o geoprocessamento pode ser uma ferramenta viável e importante na discussão de áreas potenciais para sequestrar COS. Os estoques totais de COS para o Estado de Santa Catarina nas profundidades do solo de 0-30 cm e 0-100 cm foram 651,8 Mt e 1328,5 Mt, respectivamente. As zonas edafoclimáticas Alto Irani e Alto Vale do Rio do Peixe (zona 4B) e Planalto Serrano de São Joaquim (zona 5), a mesorregião Serrana e as classes do solo Latossolo Bruno e Nitossolo Bruno foram as sub-áreas que apresentaram os maiores potenciais para sequestrar carbono a partir do manejo sustentável do solo frente a uma agricultura conservacionista em um prazo de 20 anos. Este estudo reforça que as áreas de maiores altitudes e temperaturas mais frias de Santa Catarina são um importante sumidouro de carbono orgânico e, se trabalhadas diante da conservação do ecossistema, podem atuar como uma fonte de dióxido de carbono (CO₂), contribuindo com a adaptação e mitigação às mudanças climáticas e créditos de carbono.

Palavras-chave: geoprocessamento; descarbonização; agricultura inteligente climática; Latossolo; Nitossolo; dados legados.

ABSTRACT

Santa Catarina State, as well as its agricultural ecosystems, has large carbon sinks in soils. However, a better scientific understanding of the stability and potential of carbon sequestration is essential to anticipate the response of the carbon pool to climate change and to identify the best soil management and fill this gap within the Santa Catarina agriculture. This work analyzed the variability of carbon stocks and potential areas for sequestering atmospheric carbon in Santa Catarina, using geoprocessing methods. Thus, legacy data of soil organic carbon (SOC) up to 100 cm soil depth were compiled and the variability was visualized for soil and climate zones, meso-regions and soil classes (2nd categorical level). The results showed that geoprocessing can be a viable and important tool in the discussion of potential areas to sequester SOC. The total SOC stocks for Santa Catarina State at soil depths 0-30 cm and 0-100 cm were 651.8 Mt and 1328.5 Mt, respectively. The edaphoclimatic zones Alto Irani and Alto Vale do Rio do Peixe (zone 4B) and Planalto Serrano de São Joaquim (zone 5), the mesoregion Serrana and the soil classes Latossolo Bruno and Nitossolo Bruno were the sub-areas that presented the greatest potential for sequestering carbon from sustainable soil management in the face of conservationist agriculture over a 20 year period. This study reinforces that the areas of higher altitudes and cooler temperatures in Santa Catarina are an important organic carbon sink and, if worked on in the face of ecosystem conservation, can act as a source of carbon dioxide (CO₂), contributing to the adaptation and mitigation of climate change and carbon credits.

Keywords: geoprocessing; decarbonization; climate-smart agriculture; Oxisol; Nitosoil; legacy data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões totais alocadas no Estado de Santa Catarina de 1990 a 2020 (CO _{2eq}), em Mt.....	24
Figura 2 - Linha do tempo das ações governamentais e políticas públicas.	27
Figura 3 - Mudanças entre o COS e COS centrado nas práticas de manejo do solo sustentável.	33
Figura 4 - Localização do Estado de Santa Catarina	36
Figura 5 - Localização das zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina.	38
Figura 6 - Localização das mesorregiões do Estado de Santa Catarina.....	39
Figura 7 - Mapa de localização classes de solo (2º nível categórico) do Estado de Santa Catarina.	40
Figura 8 – Fluxograma de trabalho.	43
Figura 9a - Espacialização dos pontos de estoque de COS levantados em bibliotecas. 9b e 9c – Histogramas dos estoques de COS em profundidade de solo 0-5 cm (b) e 0-5 cm (c).	49
Figura 10 - Mapas de estoque de COS para o Estado de Santa Catarina em uma profundidade do solo até 30 cm (a) e até 100 cm (b).....	52
Figura 11- Incerteza dos mapas de estoques preditos de COS para o Estado de Santa Catarina para profundidade de solo de 0-100 cm (a) e 0-30 cm (b).....	53
Figura 12 - Dados literatura citada e do PronaSolos nas profundidades de 0-5 cm e 0-30 cm.	55
Figura 13 - Estoque médio de COS para as zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina em profundidades do solo 0-30 cm.....	58
Figura 14 - Estoque médio de COS para as zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina em profundidades do solo 0-100 cm.....	59
Figura 15 - Mapa hipsométrico do Estado de Santa Catarina.....	62
Figura 16 - Box plot do estoque de COS para profundidades de solo de 0-30 cm (a) e 0-100 cm (b) para zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina.....	63
Figura 17 - Emissão de toneladas de CO ₂ eq. das mesorregiões do Estado de Santa Catarina.....	65
Figura 18 - Estoque de COS para as mesorregiões de Santa Catarina na profundidade do solo de 0-30 cm.....	66

Figura 19 - Estoque de COS para as mesorregiões de Santa Catarina na profundidade do solo de 0-100 cm.....	67
Figura 20 - Box plot do estoque de COS para profundidades de solo de 0-30 cm (a) e 0-100 cm (b) para as mesorregiões do Estado de Santa Catarina.	68
Figura 21 - Box plot do estoque de COS para profundidades de solo de 0-30 cm (a) e 0-100 cm (b) para as classes de solos (2º nível categórico) do Estado de Santa Catarina.....	71
Figura 22 - Potencial de estoque de COS para profundidades de solo de 0-30 cm para do Estado de Santa Catarina.	73
Figura 23 - Box plot do potencial de sequestro de COS para profundidades de solo de 0-30 cm para as zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina.	75
Figura 24 - Box plot do potencial de sequestro de COS para profundidades de solo de 0-30 cm para as mesorregiões do Estado de Santa Catarina.	77
Figura 25 - Box plot do potencial de sequestro de COS para profundidades de solo de 0-30 cm para as classes de solos do Estado de Santa Catarina.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área em km ² e porcentagem das zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina.....	38
Tabela 2 - Área em km ² e porcentagem das mesorregiões do Estado de Santa Catarina.....	40
Tabela 3 - Área em km ² e porcentagem das classes de solo (2º nível categórico) do Estado de Santa Catarina.	41
Tabela 4 - Estatísticas descritivas do estoque de COS para o Estado de Santa Catarina nas profundidades do solo de 0-30 cm e 0-100 cm.	51
Tabela 5 - Estatísticas descritivas dos dados levantados em literatura e mapa de COS para o Estado de Santa Catarina nas profundidades do solo de 0-5 cm e 0-30 cm..	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CSA	<i>Climate-Smart Agriculture</i>
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
CO	Carbono orgânico
COP 21	21º Conferência das Partes
COP 26	26º Conferência das Partes
COS	Carbono orgânico do solo
DS	Densidade do solo
FBN	Fixação biológica de nutrientes
FED	Floresta Estacional Decidual
FOM	Floresta Ombrófila Mista
FOD	Floresta Ombrófila Densa
GEEs	Gases de efeito estufa
Gt	Gigatonelada
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
ILP	Integração lavoura-pecuária
ILPF	Integração lavoura-pecuária-floresta
IPCC	<i>Intergovernmental Painel on Climate Change</i>
MO	Matéria orgânica
MSS	Manejo sustentável do solo
Mt	Megatonelada
NETs	Tecnologias de emissão negativa
N ₂ O	Óxido nitroso
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
Plano ABC	Plano de Agricultura de Baixo Carbono
Plano ABC+	Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com Vistas ao Desenvolvimento Sustentável
Programa ABC	Programa para a Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa na Agricultura

PNMC	Políticas Nacionais de Mudanças do Clima
SAF	Sistema agroflorestal
SPC	Sistema de Plantio Convencional
SPD	Sistema de Plantio Direto
SPDH	Sistema de Plantio Direto em Hortaliças
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMA	17
1.2	LACUNA CIENTÍFICA.....	17
1.3	HIPÓTESES.....	18
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	18
3.2	EMIÇÃO DE GEE NA AGRICULTURA BRASILEIRA.....	21
3.2.1	Emissão de GEE na agricultura catarinense	23
3.2.2	Ações governamentais e políticas públicas brasileiras	25
3.3	CARBONO E MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO	27
3.4	SEQUESTRO DE CARBONO.....	30
3.4.1	Fatores que afetam o sequestro de COS	32
3.5	CRÉDITOS DE CARBONO E SEUS PROTOCOLOS	34
4	MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1	ÁREA DE ESTUDO	36
4.2	SUB-ÁREAS DE ESTUDO	37
4.2.1	Zonas Edafoclimáticas	37
4.2.2	Mesorregiões	39
4.2.3	Classes de solos	40
4.3	METADADOS	42
4.3.1	Origem dos metadados	44
4.3.2	Pré-processamento dos metadados	44
4.3.3	Mapas preditos	45
4.3.4	Mapas de incerteza	45
4.4	DADOS DO POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO	47
4.5	DADOS DE EMISSÃO DE GEE.....	48
4.6	DADOS DA LITERATURA CITADA.....	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	ESTOQUE DE COS.....	50

5.2	ESTOQUE DE COS PARA SUB-ÁREAS	55
5.2.1	Zonas Edafoclimáticas	55
5.2.2	Mesorregiões.....	63
5.2.3	Classes de solos	68
5.3	POTENCIAL DE SEQUESTRO DE COS.....	71
5.4	POTENCIAL DE SEQUESTRO DE PARA SUB-ÁREAS	73
5.4.1	Zonas Edafoclimáticas	74
5.4.2	Mesorregiões.....	76
5.4.3	Classes de solos	77
6	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS.....	80
	APÊNDICE A - Códigos no R.....	91
	ANEXO A – Dados tabelados conforme Fogaça (2021).....	93
	ANEXO B – Listas de trabalhos científicos extraídos os valores tabulados conforme Fogaça (2021).....	95
	ANEXO C – Mapas de estoque de COS de outros países.....	101

1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural de importância essencial para a vida humana no planeta, como base para a produção de alimentos, fibras, energia, na oferta de serviços ambientais, preservação da biodiversidade, e contribuindo, ainda, se bem manejados, para a mitigação das mudanças climáticas. Quando a ideia tange às práticas de manejo do solo e das culturas, como também a substituição de ecossistemas naturais por agrícolas, elas provocam alterações nos atributos do solo, que podem causar perda de qualidade, afetando a sustentabilidade ambiental e econômica da atividade agrícola.

Diante às ações humanas na natureza, a influência antrópica contribui com mudanças rápidas e generalizadas por todo o planeta, a exemplo das alterações climáticas (IPCC, 2021). Desse modo, gerenciar os solos de forma sustentável faz-se eficiente na mitigação das mudanças climáticas e na segurança alimentar. É possível também ter o entendimento da habilidade do solo em sustentar a produtividade, a diversidade e os serviços ecossistêmicos, promovendo o uso sustentável dos ecossistemas terrestres e a detenção de perda de biodiversidade. Dessa forma, cria-se a necessidade de monitorar os estoques e as potencialidades dos solos em sequestrar carbono atmosférico.

O uso de técnicas de geoprocessamento para o Estado de Santa Catarina pode ser vantajoso e inteligente na necessidade de produzir narrativas e afirmações acerca dos conteúdos e estoques de carbono orgânico do solo (COS), capaz de gerar benefícios em nível regional e nacional. Além disso, estimar os potenciais de sequestro de carbono do solo e a vulnerabilidade que as regiões do Estado têm na emissão de gases de efeito estufa (GEEs) é primordial. Esses resultados obtidos serão de grande interesse nas políticas públicas e no monitoramento de sistemas de produção, como também na adoção de práticas de agricultura conservacionista em Santa Catarina.

Diante do exposto, compreender a potencialidade que Santa Catarina tem em sequestrar carbono atmosférico em seus solos é urgente, bem como estudar sua relação e sua variabilidade dentro das regiões do Estado. Por fim, conseguir resultados inéditos na distribuição do COS em território catarinense, gerado com uso de técnicas de geoprocessamento, para a obtenção de informações que possam ser

aproveitadas tanto para fins de produção agrícola como ambiental são pertinentes e essenciais.

Essa necessidade de produzir e disponibilizar informações sobre a regionalização e extrapolação desses estoques de carbono do solo é fundamental. Assim, o manejo e conservação de uma área, tendo os estoques de carbono como um indicador da prestação de serviços ambientais relacionados à qualidade do solo reforça essa necessidade. Desse modo, surgiu o ato de organizar e levantar essas informações existentes utilizando informações a partir de dados legados. É desta maneira que essa dissertação analisa o território catarinense, na busca por gerar um material específico, em função de incentivar cada vez mais um melhor conhecimento através desses cenários e recortes. Portanto, nesse contexto encontramos o problema, a lacuna científica e as hipóteses desse trabalho.

1.1 PROBLEMA

O mapeamento e levantamento dos estoques de COS do território catarinense atualmente estão ao nível de reconhecimento de baixa intensidade, traduzindo uma frágil consistência quando se pensa em estratégia pública estadual. Gera, portanto, uma necessidade de realizar levantamentos e mapeamentos de solos já existentes a partir de produtos geoespacializados, sendo primordial frente às tomadas de decisões rápidas e necessárias, principalmente para conservação e preservação de áreas prioritárias. Para a produção de dados geoespacializados e digitalizados para Santa Catarina, uma organização de recortes pré-estabelecidos e fonte de dados de estoque e potencial de sequestro de COS poderão suprir esse problema.

1.2 LACUNA CIENTÍFICA

Diante das deficiências de informações geoespacializadas mais fundamentadas a respeito COS e frente a uma agricultura 4.0, como propor melhorias à sociedade sem informações mais digitalizadas para ao planejamento e estabelecimento de políticas de uso, manejo e conservação dos solos? Conhecer adequadamente de forma geoespacializada e digitalizada áreas com potenciais de sequestro de carbono atmosférico e estoque de COS traz à tona essa discussão na

ciência. Essa lacuna permitirá tratar o COS de modo a evitar a degradação dos solos e garantir os serviços ecossistêmicos das gerações atual e futura.

1.3 HIPÓTESES

Os dados legados são capazes de fornecer informações espaciais do estoque e áreas potenciais de sequestro de COS frente a uma narrativa de conservação e uso do solo para Santa Catarina.

Como hipótese secundária, as áreas com os menores estoques de COS em Santa Catarina apresentam um maior potencial de sequestrar carbono atmosférico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Compilar dados legados de carbono orgânico do solo na profundidade de até 0-100 cm, a partir de técnicas de geoprocessamento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mapear o estoque de carbono orgânico no Estado de Santa Catarina nas zonas edafoclimáticas, mesorregiões e respectivas classes de solo (2ª nível categórico);

Identificar no Estado de Santa Catarina áreas que apresentam potencial para aumentar os estoques de carbono orgânico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças climáticas já são reconhecidas como os principais desafios da humanidade neste século XXI e a cada dia admite mais seriedade, não apenas nos processos físicos e químicos, mas também seus impactos na sociedade (HABERMAN et al., 2020). Tanto que, a sociedade, agente e paciente das mudanças climáticas e

seus governos, reconhece que ações concretas são eficazes para encontrar formas de mitigação e adaptação dos espaços, seja de abrangência internacional, nacional e local, por meio de políticas públicas (CALDAS, 2020).

Este fenômeno das mudanças climáticas possivelmente está associado à degradação dos recursos naturais, como desmatamento, uso inadequado da terra, a queima de combustíveis fósseis e outras atividades antrópicas que conduzem à emissão de GEEs para a atmosfera (WOOMER et al., 2000; LAL, 2004a; BATJES, 2019). Consequentemente, a influência humana no processo de mudanças climáticas, segundo o IPCC (2014), é intensa e as recentes emissões antropogênicas de GEEs são as mais altas da história. Logo, essas alterações climáticas influenciam profundamente a vida humana, a biodiversidade e a segurança alimentar (HABERMAN et al., 2020). Existem fortes evidências (IPCC, 2014; 2021) que toda essa alteração de gases na atmosfera causou um aquecimento de aproximadamente 0,85 °C durante o período de 1880 a 2012 (IPCC, 2014), e esse aquecimento global será excedido durante todo o século XXI, em uma média de 1,5 °C a 2 °C (IPCC, 2021).

Isso traz uma discussão séria sobre os cenários previstos de alterações climáticas para o próximo século, pois eles serão expressivos para transformar os habitats, como também tem exigido um comprometimento mundial para a redução das emissões de GEEs (ROCHA et al., 2005; IPCC, 2014; LOVATO; SCHULTZ; REVILLION, 2020). Para fins de conceito, esse aquecimento da superfície da Terra é resultado de um "aumento do efeito estufa", causado principalmente pelas atividades humanas, conhecida como aquecimento global antropogênico (DHILLON; VON WUEHLISCH, 2013). Nesse contexto, a agricultura tem uma contribuição marcante também dentro desse cenário de aumento das emissões de GEEs. As atividades associadas às degradações dos recursos naturais e agrícolas (WOOMER et al., 2000) juntamente com a combustão de combustíveis fósseis contribuem para o aumento da temperatura do planeta, e isso traz uma atenção para o potencial dos solos dentro dessa temática (BERNOUX et al., 2006).

A agricultura contribui para as mudanças climáticas por meio de emissões diretas de GEEs e mudanças indiretas no uso da terra, mas segundo Oldfield et al. (2021), a agricultura e os solos têm o potencial de ajudar a solucionar e/ou mitigar as mudanças climáticas por meio de sequestro de carbono e evitar emissões, além de aumentar a superação aos impactos climáticos praticamente inevitáveis.

Atualmente existem organizações relacionadas às mudanças climáticas, planejadas a partir da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Juntamente com essa contribuição, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) também colabora com relatórios que alertam para as principais causas das alterações climáticas e com projeções capazes de controlar níveis de emissões, tal qual nas alterações nos principais sistemas naturais (FERREIRA et al., 2017).

Assim, no 4º relatório do IPCC, em 2007, a agricultura foi apontada como uma das fontes emissoras de GEEs, sendo responsável mundialmente por aproximadamente 22% das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) e 55% das emissões de metano (CH₄) (IPCC, 2007). Já no seu 5º relatório, em 2014, o IPCC relatou que o aquecimento global é uma realidade e destacou a participação do ser humano ligado às mudanças climáticas. Também alertou que as transformações no uso e manejo da terra são responsáveis por aproximadamente 1/4 das emissões globais de GEEs (IPCC, 2014). O 6º e mais recente relatório do IPCC apresenta dados em que temperatura da superfície global continuará a aumentar até pelo menos meados do final do século XXI, a uma taxa de 1,5° C, a menos que profundas reduções de emissões de GEEs diminuam drasticamente (IPCC, 2021). Para termos chances razoáveis de limitar o aumento de temperatura global nesta temperatura, as reduções de emissões globais acumuladas devem ser limitadas a 500 gigatoneladas de CO₂ equivalente¹ (CO₂ eq) entre 2020 e 2100. Isso significa limitar a emissão per capita global a cerca de 1 tonelada por habitante por ano em meados do século (SEEG, 2019).

A mudança climática é um dos maiores desafios ambientais que nosso planeta já enfrentou e isto representa uma ameaça à sobrevivência da vida na Terra. Este grande desafio exige ação imediata de toda a sociedade como partes interessadas, especialmente dos emissores de GEEs (SEEG, 2021). O principal desafio é identificar o custo-benefício, bem como as opções de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Dessa forma, práticas de manejo sustentável do solo (MSS) centradas sobre o sequestro de COS são uma das opções mais econômicas para as

¹ CO₂ equivalente é a unidade de medida utilizada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) para agregar todos os tipos de gases de efeito estufa. Por exemplo, uma tonelada de metano (CH₄) representa 28 CO₂eq, pois seu efeito na atmosfera é 28 vezes superior ao de uma tonelada de CO₂.

mudanças climáticas e adaptação e mitigação, bem como para o combate à desertificação, degradação da terra e insegurança alimentar (FAO; ITPS, 2022).

Perante o cenário mundial sobre o clima, ter um esforço global na mitigação das mudanças climáticas é um caminho para entender os impactos do uso da terra no balanço de carbono terrestre do mundo (PRIMIERY; MUNIZ; LISBOA, 2017). Contudo, grandes pesquisas no âmbito das mudanças climáticas global requerem interdisciplinaridade e colaboração, atravessando diferentes escalas em quais processos do ecossistema são observados e modelados (SCURLOCK; HALL, 1998).

3.2 EMISSÃO DE GEE NA AGRICULTURA BRASILEIRA

As atividades agropecuárias geram emissões diretas e indiretas de GEEs por diversos processos, como fermentação entérica nos herbívoros ruminantes, dejetos de animais e o cultivo de arroz inundado, emitindo principalmente CH₄, bem como o preparo convencional do solo e calagem emitindo CO₂ e a queima de resíduos agrícolas causando também a emissão de CO₂, CH₄ e óxido nitroso (N₂O) para a atmosfera (IMAFLOA, 2014, BRASIL, 2009). O setor agropecuário brasileiro teve um aumento de 2,5% de toneladas (t) de CO₂ (aproximadamente 577 milhões de t de CO₂) em relação a 2019, sendo o maior aumento desde 2009 (SEEG, 2021). As maiores emissões vêm de fermentação entérica, sendo 65% das emissões diretas, e manejo de dejetos de animais, cultivo de arroz, queima de resíduos agrícolas e solos manejados.

O total de emissões brasileiras de GEEs foi 2,16 gigatoneladas (Gt) e 1,97 Gt de CO₂ (1 bilhão de toneladas equivale a 1 gigatonelada de unidade), em 2020 e 2019, respectivamente, e entre 1990 e 2020 as emissões brutas² (SEEG, 2021) foram de 2,05 Gt para 2,06 Gt de CO₂, causando um aumento da emissão desse gás para a atmosfera (SEEG, 2021). O principal fator do aumento de CO₂ foi o desmatamento, em especial nos biomas Amazônia e Cerrado (SEEG, 2021), uma vez que no Cerrado sendo um *hotspot* global, aproximadamente 46% da sua cobertura original tem sido claramente transformada em pastagens e áreas cultivadas com grãos (RODRIGUES

² As estimativas de emissões brutas de gases do efeito estufa não consideram a remoção de dióxido de carbono pelas mudanças de uso do solo, isto é, a quantidade de gases de carbono fixados pelo crescimento da vegetação. Quando há descontro das remoções, as estimativas são de emissões líquidas (emissões menos remoções).

et al., 2022). Essas transformações resultadas do desmatamento para implantação de culturas agrícolas, principalmente soja, e pastagens causam consequências no clima tanto regional como global (ARANTES; FERREIRA; COE, 2016; RODRIGUES et al., 2022).

Todavia, a agricultura e a pecuária são atividades econômicas de grande importância no Brasil. Devido à vasta extensão de terras agricultáveis e disponíveis para pastagem, o país ocupa um lugar de evidência no mundo quanto à produção desses setores (BRASIL, 2009). A agropecuária, então, contribui com mais da metade das emissões de GEEs do Brasil quando consideramos aquelas provenientes das atividades produtivas, somadas ao contínuo desmatamento dos ecossistemas naturais para expansão agrícola (IMAFLOA, 2014). Esse crescimento da agricultura e da pecuária foi impulsionado devido à grande disponibilidade de terra propícia para atividades agropecuárias, aliada às condições climáticas adequadas, ao avanço tecnológico e ao empreendedorismo dos produtores, causando um estímulo ao crescimento econômico brasileiro (ASSAD; MARTINS; PINTO, 2012). Essa expansão provocou a mudança do uso da terra e colocou a agricultura brasileira como um dos responsáveis pela emissão de GEEs, tanto na produção agrícola, com o uso de fertilizantes e manejo das áreas agricultáveis, quanto na pecuária, pelo uso de áreas desmatadas e emissão de CH₄ pelo rebanho bovino (ASSAD; MARTINS; PINTO, 2012).

Por conseguinte, as fontes de emissão de GEEs vindo da agricultura revelam-se nas lavouras sob plantio convencional e pastagens degradadas. De outro lado, as fontes de remoção desses gases advêm dos plantios diretos, pastagens bem manejadas, sistemas de integração-lavoura-pecuária-floresta (ILPF), dentre outros. Em 2020, por exemplo, o balanço de carbono resultou uma remoção líquida³ de 150,1 milhões de t de CO₂, com aumento de 2,6% em relação a 2019 (SEEG, 2021).

A estimativa das emissões de GEEs do último inventário na agricultura brasileira ultrapassem 470 milhões de t de CO_{2eq} (SEEG, 2021). O setor agrícola, em função de suas características, é extremamente vulnerável às mudanças do clima. Por isso, é necessário um esforço conjunto, tanto no desenvolvimento de novas tecnologias que promovam o incremento da produtividade, quanto na programação de ações que promovam a convergência entre o aumento da produção sustentável de

³ Remoções líquidas são situações em que a quantidade de gás de efeito estufa removida da atmosfera é realmente maior do que a quantidade que os humanos emitem em um determinado período.

alimentos e a redução das emissões de GEEs como uma abordagem de uma agricultura inteligente para o clima (*climate-smart agriculture* - CSA).

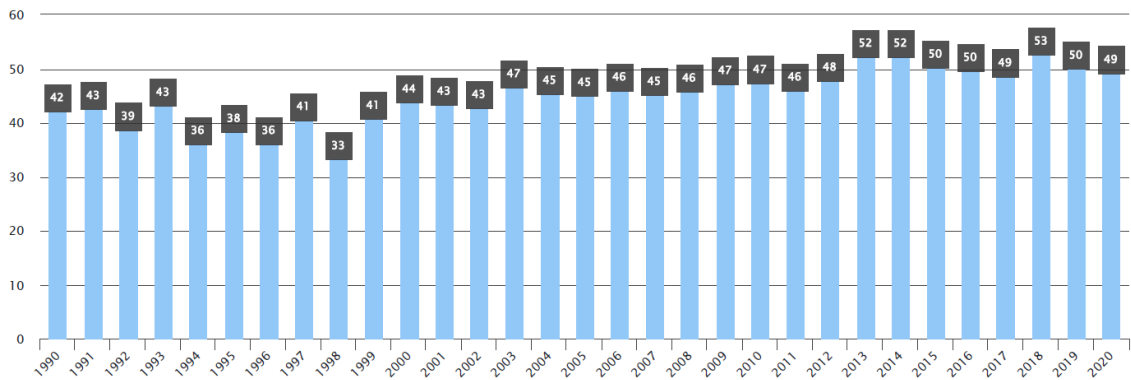
A agricultura inteligente para o clima (CSA) é uma abordagem para modificar e reorientar os sistemas agrícolas e assim apoiar a segurança alimentar sob as novas realidades da mudança climática. Essa é uma abordagem que identifica trocas e compensações entre segurança alimentar, adaptação e mitigação climática como base para informar e reorientar a política em resposta à mudança do clima (LIPPER et al., 2014). Esses mesmos autores também afirmam que os caminhos para uma abordagem de CSA são baseados na formulação de políticas fortes e coordenadas, instituições fortalecidas, planejamento baseado em evidências e um financiamento estável e escalável. Esses caminhos resultam em uma alta resiliência e baixos riscos à segurança alimentar (LIPPER et al., 2014). Os sistemas agrícolas que a CSA enfatiza utilizam serviços ecossistêmicos para apoiar a produtividade, adaptação e mitigação. Um deles é melhorar a qualidade do solo e isso pode gerar produção, adaptação e benefícios de mitigação ao regular os ciclos de carbono, acarretando no sequestro de carbono (PARFITT; BARTHEL; MACNAUGHTON, 2010).

3.2.1 Emissão de GEE na agricultura catarinense

O Estado de Santa Catarina, dentro do *ranking* de emissões por Estado brasileiro, está na 16ª posição, emitindo no ano de 2020 aproximadamente 49 megatoneladas (Mt) de CO_{2eq} (Figura 1) (SEEG, 2021) envolvendo os setores de energia, uso da terra, agropecuária, resíduos e indústria. As emissões apresentadas e o *ranking* foram calculados utilizando o gás CO_{2eq}, em toneladas, pelo GWP-AR5⁴ (IPCC, 2014).

⁴ É uma abordagem para determinar o carbono equivalente. GWP é o Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential) e considera a influência dos gases na alteração do balanço energético. É medido para um prazo de 100 anos.

Figura 1 – Emissões totais alocadas no Estado de Santa Catarina de 1990 a 2020 (CO_{2eq}), em Mt.



Fonte: SEEG, 2021.

A partir do ano de 2012, as emissões de CO₂ só tenderam a aumentar no Estado (Figura 1), e isso representa um dos maiores desafios para a população catarinense e também para a humanidade. Além disso, reforça a conjuntura do problema global, uma vez que as soluções envolvem vários setores da sociedade, a tomada de consciência da importância em questão, exigindo mudanças em muitos hábitos de consumo e comportamento (SEEG, 2021).

Quando se fala em emissões de GEEs no setor agropecuário catarinense, essa atividade é uma das principais emissoras de GEE no Estado, especialmente pelos grandes plantéis de bovinos, suínos e aves (DORTZBACH et al., 2021). O setor agropecuário catarinense corresponde aproximadamente 35% das estimativas totais de emissões de GEE do Estado (SEEG, 2021), com um total de 13 milhões de t CO_{2eq}, no qual 55% das emissões estão relacionadas a fermentação entérica, seguido pelo manejo dos solos e dos dejetos animais que contribuem com 23% e 17%, respectivamente, das emissões do setor (DORTZBACH et al., 2021). Na agricultura, Dortzbach et al. (2021) afirmam que os valores de emissão de GEEs são menores quando comparados aos da pecuária, com destaque para os solos manejados em que a aplicação de fertilizantes sintéticos, pois são responsáveis por 44% das emissões do setor da agricultura.

No setor de uso da terra e florestas houve redução nas estimativas de emissão de GEE do ano de 2017 para o ano 2018 (SEEG, 2021; DORTZBACH et al., 2021). Também nesse mesmo período também houve redução de emissões de CH₄ e N₂O resultante da queima de resíduos vegetais associados ao carbono emitido pela queima de lenha (SEEG, 2021). Dortzbach et al. (2021) e Seó, Machado Filho e Brugnara (2017) dizem que com um balanço mais conciso dessas emissões de GEE

deve incluir a avaliação do carbono estocado em diferentes sistemas de uso das terras para produção de fibras e grãos. No Estado, dentre os sistemas de produção de grãos, destaca-se o sistema plantio direto (SPD), o qual tem elevada capacidade de aumentar e armazenar o COS. Esses dados sobre emissões das atividades agrícolas permitem identificar os setores que apresentam as maiores emissões, contribuindo para orientações para a mitigação da emissão de GEEs no Estado.

3.2.2 Ações governamentais e políticas públicas brasileiras

As mudanças climáticas globais, bem como as emissões de GEEs são discutidas na esfera internacional desde meados da década de 80. Esse processo resultou com a realização da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também conhecida como *Rio 92* ou *Cúpula da Terra*, que aconteceu no Rio de Janeiro em 1992. Passados cinco anos, houve o estabelecimento do Protocolo de Kyoto que colocou metas e normas mais claras para a redução de emissões de GEEs a serem alcançadas por países que emitiram mais gases no passado (RIBEIRO, 2008). Nas discussões da CNUMAD, os primeiros estudos do IPCC foram abordados sobre as mudanças climáticas. Nesses trabalhos, já se verificou, entre outros parâmetros, uma elevação da temperatura média global e a alteração da dinâmica climática do planeta.

No ano de 2008, a lei 12187/2009 de Políticas Nacionais de Mudanças do Clima (PNMC) foi sancionada e assim estabelece os objetivos, princípios, diretrizes e instrumentos para com o clima (BRASIL, 2009). Essa lei retrata da redução à vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos frente aos efeitos atuais e esperados da mudança do clima, seus efeitos adversos, as fontes e liberação de GEEs, dentre outros parâmetros. Desse modo, o propósito é que o Brasil programe ações e busque soluções adicionais com o objetivo de aliar o crescimento econômico com medidas que são favoráveis ao clima (BRASIL, 2007).

A PNMC (BRASIL, 2007) originou o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC), para atuação no período de 2010 a 2020. Os objetivos do Plano ABC estão direcionados para o desenvolvimento de ações para mitigação de emissões de GEEs, bem como para melhoria da qualidade de solos, recuperação de áreas degradadas, redução do desmatamento, fixação de

biomassa e tratamento de dejetos, realizadas através do incentivo à adoção de sistemas de produção sustentáveis na agropecuária (GIANETTI; FERREIRA FILHO, 2021). Para a execução do Plano ABC, elaborou-se o então Programa para a Redução da Emissão de Gases de Efeito Estufa na Agricultura (Programa ABC), um programa de crédito associado ao crédito rural, com taxas de juros subsidiadas (BRASIL, 2012).

Essa lei de PNMC oficializou também um compromisso voluntário do Brasil junto à UNFCCC de redução de emissões de GEEs em contribuir com essa redução entre 2025 e 2030, de forma voluntária com o Acordo de Paris. Essa redução pretende ser de 37% até 2025 em relação a 2005 com emissão máxima de 1,3 bi t de CO₂ e 43% de redução até 2030. Para cumprir a meta agendada, os planos setoriais em ação estão pautados em prevenção e controle do desmatamento através de diversos planos, como a Amazônia Legal e Cerrado (PCDAm e PPCerrado, respectivamente) e também o Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC+) (BRASIL, 2018).

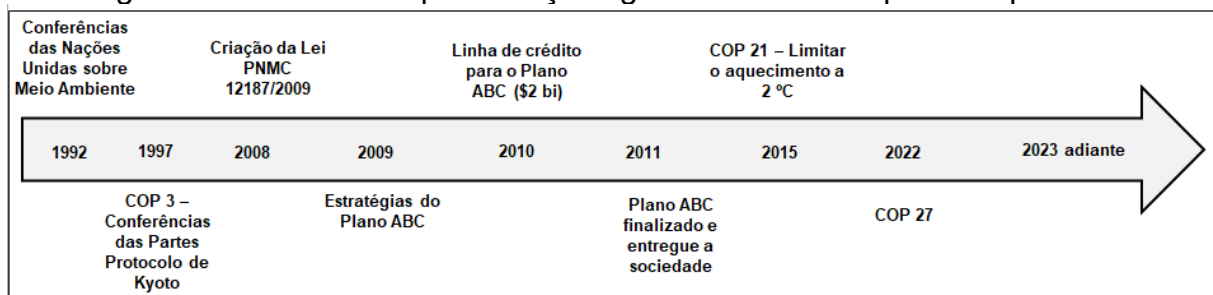
Principalmente, o Plano ABC segue sendo um plano de fomento à adoção de boas práticas agrícolas para diminuir as emissões de GEEs da agricultura, inserindo o Brasil como um dos protagonistas na discussão mundial sobre o combate às mudanças do clima (PAVÃO; ASSAD; MARTINS, 2015). Esse Plano ABC foi instituído pelo artigo 3º do Decreto nº 7.390 da PNMC e tem por finalidade a organização e a idealização das ações a serem atingidas para a adoção das tecnologias de produção sustentáveis, selecionadas com o objetivo de mitigar as emissões de GEEs (BRASIL, 2009, 2010; MANZATTO et. al., 2020). Este documento fornece diretrizes para a adoção de tecnologias sustentáveis para a produção agropecuária, a fim de cumprir com o acordo voluntário na diminuição de emissões de GEEs firmado na Conferência das Nações Unidas, Copenhague, em 2009 (GIANETTI; FERREIRA FILHO, 2021).

O Plano ABC é composto por sete programas, seis deles referentes às tecnologias de mitigação e uma última ação relacionada com adaptação às mudanças climáticas. Eles são referentes à recuperação de pastagens degradadas, ILPF, sistemas agroflorestais (SAFs), sistema plantio direto (SPD), fixação biológica de nitrogênio (FBN), florestas plantadas e tratamento de dejetos animais (MANZATTO et. al., 2020). Atualmente, o Plano ABC foi atualizado e estendido até o ano de 2030, com o olhar fixo em 2060, chamado de Plano ABC+ ou Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com Vistas ao Desenvolvimento Sustentável (BRASIL, 2012).

As negociações na 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas (ONU) sobre Mudanças Climáticas (COP21) em Paris, no ano de 2015, foram exclusivas porque o carbono do solo e a agricultura estavam na agenda pela primeira vez desde há 21 anos (LAL, 2016). Já na COP26 permaneceram os planos para 197 países signatários de como eles se propõem a cumprir os requisitos do Acordo de Paris (assinado pela COP21) para manter o aumento global da temperatura da superfície global bem abaixo de 2°C, com o objetivo de não exceder 1,5°C (O'RIORDAN, 2022). Na Figura 2 observamos essa linha do tempo dessas ações governamentais.

Outros assuntos que necessitavam de atenção na COP26 são a precificação de carbono, os investimentos em infraestrutura e compromissos financeiros para uma transição para net-zero, pois a janela para atingir a meta de 1,5°C até 2030 já está encerrando.

Figura 2 - Linha do tempo das ações governamentais e políticas públicas.



Por fim, outras ações governamentais como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e os compromissos do Acordo de Paris oferecem um roteiro mais claro de como as empresas devem liderar em relação ao clima e à inovação necessária para resolver alguns dos maiores desafios do mundo.

3.3 CARBONO E MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO

O ciclo do carbono é caracteristicamente composto por três grandes reservatórios interconectados: a atmosfera, a biosfera terrestre e o oceano (TIFAFLI; GUENET; HATTÉ, 2018; LÜTZOW et al., 2006). Este ciclo do carbono é trocado naturalmente entre a vegetação e a atmosfera por meio dos processos de fotossíntese e da respiração. Os solos, então, possuem grande importância no ciclo biogeoquímico

do carbono. Esse compartimento armazena aproximadamente quatro vezes mais carbono do que a biomassa vegetal e mais que três vezes do que a atmosfera (BERNOUX et al., 2006; LAL, 2004a).

A principal troca de carbono entre a terra e a atmosfera resulta do processo de fotossíntese, no qual a energia radiante é absorvida e transformada em energia de ligação química. Por meio dos produtos da fotossíntese, uma grande parte do carbono entra no solo através da decomposição e mineralização da matéria orgânica (MO), o que faz ser um processo importante no equilíbrio de CO₂ na atmosfera e o ciclo de carbono na Terra (AREVALO; ALEGRE; VILCAHUMAN, 2002; EMBRAPA, 2009). Dependendo do sistema de usos da terra, o carbono é liberado pelo solo depois de frequentes manejos do seu preparo, e isto ocasiona o rompimento do estado estável do carbono, o aumento na velocidade de mineralização da MO, e, conseqüentemente, a liberação do carbono que se encontra armazenado no solo (DIXON, 1995; AREVALO; ALEGRE; VILCAHUMAN, 2002).

As entradas de COS são provenientes de restos de animais e vegetais ou de microrganismos em forma de resíduos em vários estágios de decomposição, materiais carbonizados e compostos humificados, bem como a senescência desses, e atuam como fonte de COS após os processos de decomposição (ROSCOE; MACHADO, 2002; VITAL et al., 2004). Alguns outros autores destacam que os solos são um dos importantes reservatórios de carbono, responsáveis por armazenar 1.300 Gt a 2.000 Gt desse elemento até 1 metro de profundidade (SOMBROEK; NACHTERGAELE; HEBEL, 1993; BATJES, 1996).

O COS, que é um componente da matéria orgânica do solo (MOS), é o principal recurso para as atividades da biomassa microbiana do solo que propicia a decomposição e liberação de nutrientes para as plantas (SCHOLLES et al., 2009). Com o aumento dos teores de MO e a ativação de diversos processos químicos, físicos e biológicos no solo, manifestam-se propriedades com maior resistência à erosão, e favoráveis a maior taxa de infiltração e retenção de água no solo, possibilitando menos perturbações e conferindo maior resiliência e alta fertilidade aos solos (CERRI et al., 2003; CONCEIÇÃO et al., 2005). Há indicativos que correlacionam o conteúdo de carbono do solo com a biomassa microbiana do solo, uma vez que essa atividade é influenciada pelas condições bióticas e abióticas, tornando-se um bom indicador das alterações do manejo do solo e na detecção de carbono (BALOTA et al., 1998).

O COS comporta-se como referência para determinar padrões de qualidade do solo e isso se explica pela forte correlação existente entre COS e os atributos químicos, físicos e biológicos como um avaliador de sustentabilidade (REEVES, 1997). Lal et al. (2007) afirmam que a relação dos estoques de carbono com a textura do solo é positiva, uma vez que solos mais arenosos tendem a apresentar maior perda de carbono para a atmosfera. Esse fator pode ser explicado pela maior lixiviação, menor agregação das partículas do solo e baixa atividade das argilas (OLIVEIRA et al., 2015).

O ambiente também influencia na capacidade do solo em sequestrar ou emitir carbono para a atmosfera. Os fatores externos como clima, relevo, vegetação e uso do solo são condicionantes para a alteração do estoque e potencial de sequestro de COS. Autores como Dinakaran et al. (2014) destacam as influências da temperatura e precipitação como fatores do clima influenciando o COS. Já Jobbágy e Jackson (2000) e Post et al. (1982) relataram que a quantidade de carbono no solo é, em geral, inversamente proporcional à temperatura e à evapotranspiração, e diretamente proporcional à precipitação. Ou seja, quanto menor a temperatura e maior a precipitação, maior será o conteúdo de carbono no solo.

Já cobertura vegetal é uma das principais fontes de mudança de carbono no solo, uma vez que a maior parte do carbono provém da decomposição dos resíduos vegetais, sendo a vegetação é um fator de influência no COS, conseqüentemente, vai alterar com os tipos de vegetação. Por exemplo, autores como Machado et al. (2014) encontraram resultados onde os teores de CO em floresta nativa em uma profundidade de 5 cm foram superiores a um ecossistema agrícola, com valores de 61,09 g/kg e 32,87 g/kg, respectivamente. Esse fator de mudanças de COS diante da cobertura vegetal está diretamente ligado com o sistema de plantio de uma área, como por exemplo, o Sistema de Plantio Direto (SPD) e SPD em hortaliças (SPDH).

O Estado de Santa Catarina por ser uma região que tem grande produção nacional de hortaliças, principalmente cebola, (GUGEL, 2018) o SPDH vem se caracterizando como uma prática teórico-metodológica no Estado visando a transição agroecológica dos sistemas agrícolas. Entretanto, ainda existem desafios quanto ao manejo do solo, pois muitas vezes é adotado o sistema de preparo convencional (SPC), que envolve mecanização e intensa mobilização e pode gerar impactos negativos no solo, como compactação, erosão e redução níveis de MO (LOSS et al, 2015). Esse SPDH tende a reduzir a degradação física, biológica e química causada

pelo uso de arado e enxada rotativa em áreas de cultivo de hortaliças, destacando-se principalmente as áreas de declive (ARL; CHRISTOFFOLI; FAYAD, 2019).

O cultivo sob sistema de SPC caracteriza-se pelo excessivo revolvimento do solo, principalmente aração e, posteriormente, destorroamento com enxada rotativa, o que ocasiona a degradação física, química e biológica, sendo uma ação negativa frente ao estoque de COS. A redução dos danos ocasionados pelo mau uso do solo pode ser alcançada utilizando-se o SPD ou SPDH. Esse sistema corresponde àquele em que as mudas são produzidas em canteiros e, em seguida, transplantadas em sulcos preparados por semeadoras adaptadas para o corte da cobertura morta e do solo (EPAGRI, 2013; LOSS et. al., 2015; LOSS et. al., 2011).

O fator de formação relevo também é um aspecto a ser considerado, principalmente quando analisa a altitude. Na maioria dos casos, pondera-se que com o aumento da altitude, a temperatura diminui e a precipitação aumenta, o que tende a aumentar a concentração de carbono no solo (DAI; HUANG, 2006). E assim como o clima, o relevo, bem como a altitude, contribuem com a composição e produtividade da vegetação e, conseqüentemente, mais aporte de carbono ao solo (QUIDEAU et al., 2001). Essa alteração de altitude tem grande influência sobre o processo erosivo, pois atua no transporte do COS de áreas mais altas para áreas mais baixas. Lal (2003) relata profundamente a questão da erosão no ciclo do carbono e concluiu que a emissão de carbono do solo para atmosfera via erosão é de 0,8 a 1,2 petagrama (Pg) C/ano.

3.4 SEQUESTRO DE CARBONO

O conceito de sequestro de carbono firmou-se na Conferência de Kyoto, em 1997, por se tratar de uma mitigação de menor custo para reverter o CO₂ na atmosfera, como também reduzir o efeito estufa (YU, 2004). Isso implica na remoção de CO₂ atmosférico pelas plantas e o armazenamento desse carbono como MOS (JONES; DONNELLY, 2004; LAL, 2004a). Esse processo acontece de forma natural podendo ser viável para sequestrá-lo em reservatórios do solo em quantidades suficientes para moderar os efeitos da emissão de CO₂. É importante lembrar que em escalas globais, a distribuição do estoque de COS é influenciada diretamente pelas condições climáticas, como temperatura e precipitação, de modo que o aumento do

estoque de carbono ocorre, principalmente, em regiões com maiores precipitações e temperaturas mais baixas (JENNY, 1941; HENGL et al., 2015; GOMES et al., 2019).

Autores como Bernoux et al. (2006) descrevem que as entradas de carbono no solo refletem na inserção da agricultura de conservação em suas diversas maneiras para acumular estoques de COS, transformando os solos em uma fonte de acúmulo de carbono. Inteirar-se melhor do fluxo de estoque de COS é fundamental para uma melhor gestão do ambiente e isso ajuda a formalizar modelos usados para orientar as políticas públicas (LAL, 2004a; LAL, 2004b).

Esse mesmo autor afirma que o sequestro de carbono no solo é uma estratégia positiva, pois restaura solos degradados, aumenta a produção de biomassa, purifica o solo, as águas, e reduz a taxa de CO₂ atmosférico (LAL, 2004b). Tornquist et al. (2009), completando essa importância, afirmam a necessidade de se ter uma visão geral da distribuição espacial dos estoques de carbono, reforçando ainda a localização geográfica ser um fator importante para o sequestro de carbono.

Outros parâmetros vinculados ao sequestro e ao estoque de COS é a densidade do solo (DS). A DS tem uma importância na aplicação para o cálculo de atributos dos solos e isso faz os cálculos de COS se tornarem mais eficazes (FAO; CMCC, 2017). Nem sempre as medidas de DS estão disponíveis para todas as camadas do perfil do solo, assim, as funções de pedotransferência são amplamente utilizadas para estimar a DS de profundidades ou camadas ausentes (ABDELBAKI, 2018). Não obstante, o Brasil não tem uma função de pedotransferência nacional para DS e poucas funções foram publicadas para regiões específicas (GOMES et al., 2019). Para superar o problema de falta de informações sobre DS, os dados de propriedades químicas e físicas do solo são usados para calibrar uma função de pedotransferência (ABDELBAKI, 2018; GOMES et al., 2019). No Brasil, diferentes métodos de amostragem e a falta geral de medições de DS para converter COS por massa em COS por volume foi tratada de várias maneiras (BATJES, 2005).

O Acordo de Paris teve o objetivo de discutir as emissões de GEEs e as capacidades dos solos em sequestrar carbono. Essa conferência teve a possibilidade de mostrar uma estabilidade do clima por meio do desenvolvimento de tecnologias de emissão negativa (NETs), como sequestro de carbono (ANDERSON, 2015; KON KAM KING et al., 2018). Surgiu também nessa conferência como um plano de ação voluntária no âmbito da Agenda de Ação Lima Paris, a *4 per 1000 Initiative* (Iniciativa 4 por 1000). Essa ação vinda do governo francês veio para promover o sequestro de

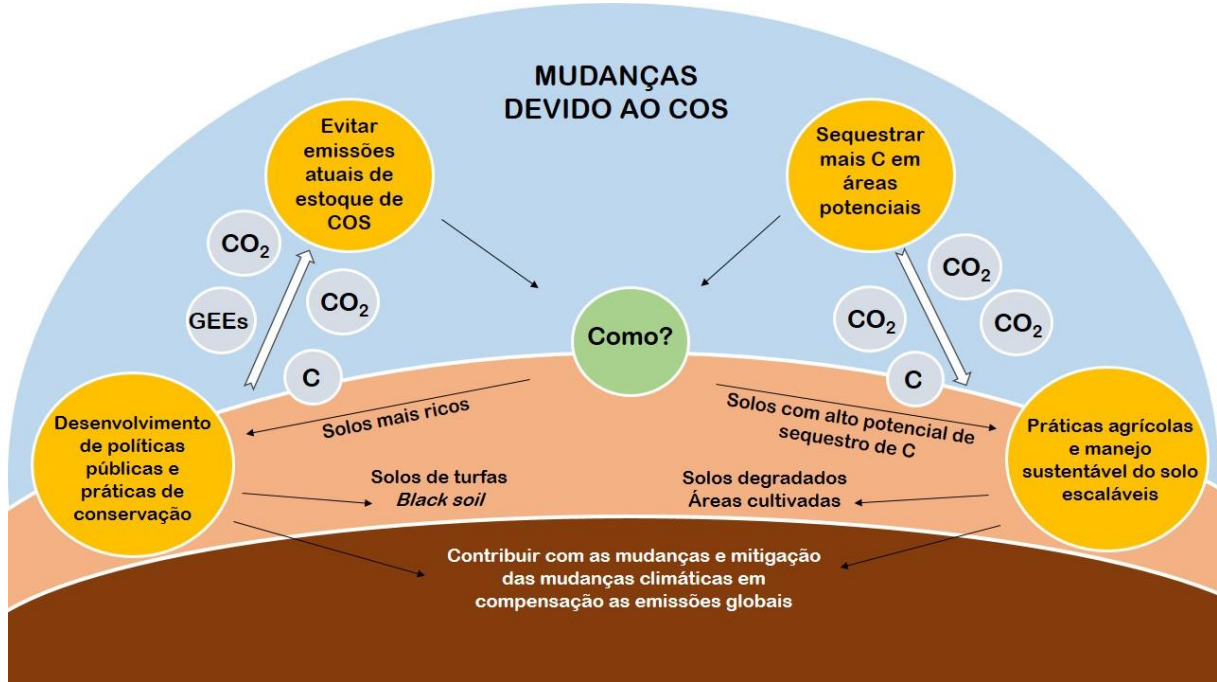
carbono do solo em escala global, pois demonstra como a agricultura pode desempenhar um papel fundamental na segurança alimentar e nas mudanças climáticas. Tal iniciativa disserta também sobre uma taxa de 0,4% de crescimento anual das reservas de carbono no solo, admitindo segurar o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (AVILLEZ; CARVALHO, 2015). A proposta “4 por mil” pede um plano de ação voluntário para aumentar o teor de COS dos solos mundiais a uma taxa de 0,4% ao ano.

É primordial fazer esse levantamento de emissões de GEEs para entender o potencial dos solos em sequestrar carbono da atmosfera (SEEG, 2021), bem como compreender melhor as lacunas existentes e mostrar onde mais investimentos e ações aceleradas são realmente necessários em determinadas regiões. Tal dinâmica do sequestro e do estoque de COS são estudos que se tornaram importantes nas pesquisas das ciências agrárias, o que leva os países a contabilizar esse sequestro como um subsídio para a redução das emissões de GEEs (JONES; DONNELLY, 2004; TORNQUIST et al., 2009).

3.4.1 Fatores que afetam o sequestro de COS

O sequestro de COS é determinado pelo balanço entre a taxa de carbono adicionada ao solo e a taxa de perda de carbono dos solos, principalmente nos processos de decomposição e emissão de CO₂ para a atmosfera (FAO, 2022a). Alguns cientistas frisam que não existe uma prática universal e padronizada para aumentar o sequestro de COS, contudo, o sequestro de COS pode ser somado aumentando a taxa de entrada de carbono no solo (ou removendo CO₂ da atmosfera) e/ou reduzir a taxa relativa de perda, o que reduz as emissões de GEEs para a atmosfera (Figura 3) (LAL et al., 2018; LAL, 2005; PAUSTIAN et al., 2019).

Figura 3 - Mudanças entre o COS e COS centrado nas práticas de manejo do solo sustentável.



Fonte: Adaptado de FAO (2022a).

Alguns pontos precisam ser considerados em relação ao sequestro de COS, segundo Paustian et al., (2019) e Poulton et al., (2018). Um deles é que com aumento das entradas de carbono e/ou a diminuição das taxas de decomposição, os estoques de COS tendem a um novo estado de equilíbrio e, assim, após anos, os ganhos de carbono diminuiriam, tornando-se cada vez menores ao longo do tempo o sequestro desse carbono. Outro ponto a se frisar é que as mudanças no manejo do solo ocasionam ganhos ou até perdas de carbono, ou seja, se o manejo for modificado, muito ou todo o carbono que foi ganho pode ser perdido, tornando assim um processo é altamente reversível. Assim, as práticas agrícolas, por exemplo, que levaram ao aumento de carbono no solo, precisam ser mantidas em longo prazo (FAO, 2022a).

De todo modo, abarcar práticas agrícolas estratégicas leva a promoção do sequestro de COS com adoção de algumas práticas de manejo, como por exemplo, agroecologia, agricultura de conservação, cultivo de cobertura, agrossilvicultura, pastagem melhorada e restauração de solos degradados por meio de uma restauração de solo-paisagem (LAL, 2016; AVILLETZ; CARVALHO, 2015). Avillez e Carvalho (2015) também reforçam que esta iniciativa visa aumentar o teor de MO e promover o sequestro de carbono no solo, certamente, através da inserção dessas práticas agrícolas adaptadas às condições locais.

3.5 CRÉDITOS DE CARBONO E SEUS PROTOCOLOS

A urgência para soluções agrícolas climáticas, em geral, está alimentando o crescente investimento em créditos para o sequestro de carbono do solo. As apostas para as mudanças climáticas e os agricultores são altas, e há uma necessidade de avaliar os protocolos emergentes de medição, relatório e verificação de COS para garantir que resultem em créditos de alta qualidade para que identifiquem o real líquido atmosférico (OLDFIELD et al., 2021). Esses mesmos autores ainda afirmam que diferenças na forma como os protocolos e os mercados de carbono estimam o COS e as reduções líquidas de GEEs, bem como a forma como contabilizam questões como permanência e adicionalidade do carbono sequestrado, correm o risco de criar créditos não equivalentes ou mesmo comparáveis.

As diferenças de protocolos, aquisição de dados e incertezas para com o COS transparece da falta de dados sobre padrões espaciais e temporais de acúmulo de COS em áreas agrícolas em funcionamento e sob diferentes práticas de gerenciamento das culturas e solos (OLDFIELD et al., 2021). O COS pode variar significativamente no espaço, e muda muito lentamente ao longo do tempo. Isso torna difícil detectar mudanças sem coletar e analisar uma alta densidade de amostras de solos. Essas diferenças poderiam causar falta de comparabilidade e padronização, vindo a se tornar um problema caso o poder público decida usar créditos de COS para atender a contribuições determinadas nacionalmente ou se setores obrigados a reduzir emissões comprarem créditos de COS para compensar emissões em outros lugares (OLDFIELD et al., 2021).

Os protocolos do mercado de crédito de carbono vêm para ajudar os agricultores a gerar créditos para reduções de emissões verificadas e sequestro de carbono. Os agricultores podem vender esses créditos para empresas para uso em mercados voluntários de carbono como parte dos esforços de sustentabilidade ou em mercados de conformidade, se os protocolos tiverem aprovação regulatória, para atender aos requisitos de conformidade de mitigação climática. É importante relatar e projetar uma estratégia de amostragem de solo eficaz que capture ou infira adequadamente a heterogeneidade espacial e assim reduzir a incerteza nas estimativas de estoque COS, tornando essencial no âmbito de conservação, mitigação

às mudanças climática, produtividade e lucratividade dos agricultores (PAUSTIAN et al., 2019).

As oportunidades de mitigação climática na agricultura incluem a redução do consumo de combustível, a reconstrução da MOS, o aumento da biomassa acima e abaixo do solo, a melhoria da gestão de nutrientes e também a redução das emissões de CH₄ associadas à produção pecuária. Há uma falta de consenso científico, no entanto, sobre o grau de quais essas práticas podem sequestrar carbono atmosférico suficiente para ter um impacto apreciável na venda e compra de créditos de carbono no mercado agroambiental (VANDENBYGAART, 2016; SCHLESINGER; AMUNDSON, 2018; BRADFORD et al, 2019). Desse modo, torna cada vez mais necessário a compreensão do COS em profundidade e as mudanças na densidade do solo, uma vez que são questões contábeis críticas para calcular estimativas precisas de estoque de carbono (OLDFIELD et al., 2021), e consequentemente, créditos.

Uma série de protocolos (CAR SEP, VM0042, FAO GSOC, Gold Standard's Metodologia da Estrutura COS e BCarbon) empregam abordagens híbridas que combinam modelos baseados em processos com medições diretas de campo do COS para verificar as previsões do modelo e a maioria desses protocolos avaliados ainda não tem sido adotados, muitos deles só foram publicados recentemente (OLDFIELD et al., 2021).

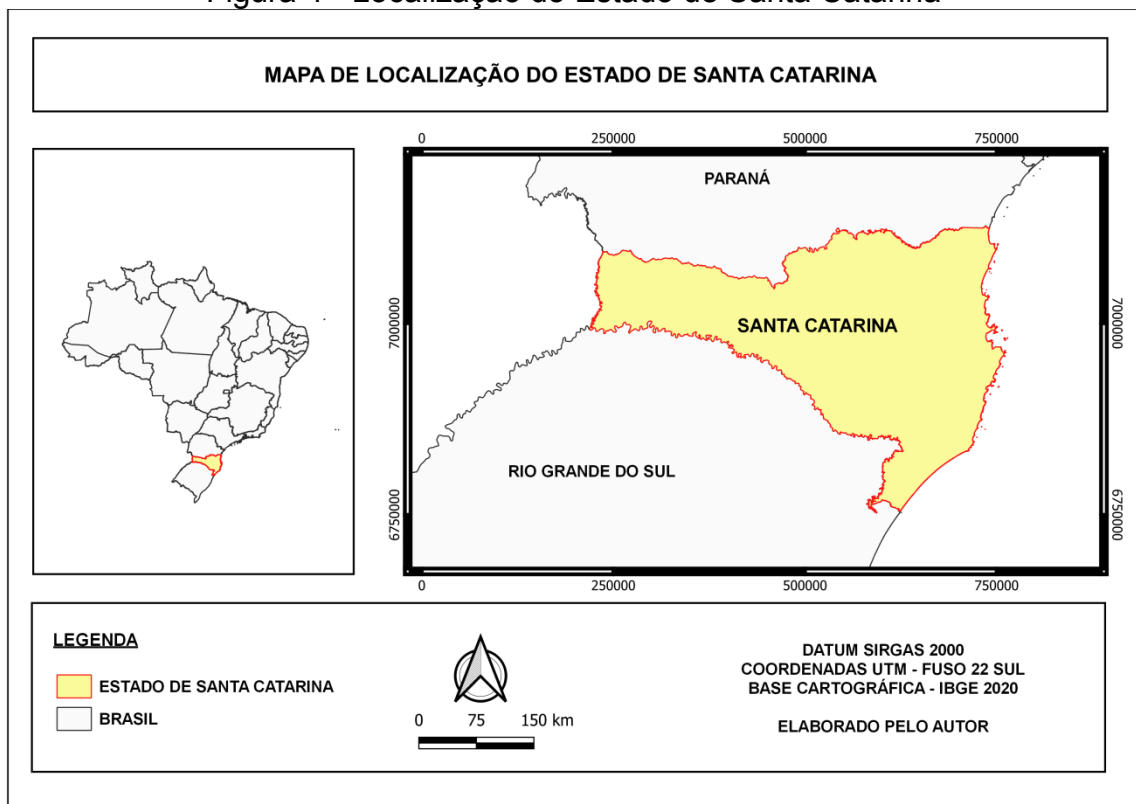
Alguns projetos mostram que as práticas que impactam o armazenamento de COS ainda não estão sendo implementadas em uma porcentagem definida de área de terra contendo um projeto. Ainda há uma lacuna nos quesitos de adicionalidade (como o estoque de COS pode entrar como adicional na conta), vazamento (resultado de quanto as emissões de GEEs aumentam fora da área do projeto como resultado das atividades do projeto), reversões (relacionada como o sequestro de carbono pode resultar de uma mudança no uso ou manejo da terra, como eventos repetidos de plantio direto após o plantio direto, ou de eventos climáticos incontrolláveis, como secas, inundações e incêndios) e a permanência (relacionado ao risco de reversão). A permanência é crítica se as reduções de emissões forem vendidas como compensações, pois grandes emissores podem estar comprando esses créditos para compensar as emissões contínuas de GEE.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O Estado de Santa Catarina está situado na região Sul do Brasil, entre os paralelos de 25°57'26" e 29°29'04" de latitude sul e os meridianos de 48°21'39" e 53°50'15" de longitude oeste de Greenwich (Figura 4). Seu limite se encontra ao norte com o Estado do Paraná, ao sul com o Estado do Rio Grande do Sul, a oeste com a República da Argentina e a leste com o Oceano Atlântico. Possui uma área de 95.442,9 km², que corresponde a 16,61% da região Sul e 1,11% da área total do Brasil composta por 295 municípios, dividido em mesorregiões e microrregiões, tendo como capital Florianópolis (IBGE, 2020; POTTER et al., 1998).

Figura 4 - Localização do Estado de Santa Catarina



Fonte: Elaborado pelo autor.

Santa Catarina apresenta clima Cfa e Cfb, conforme os critérios apresentados por Köppen, sendo Cfa um clima subtropical e com verão quente e Cfb um clima temperado, com verão mais ameno. O clima Cfa é presente na região oeste do Estado, em altitudes abaixo de 700 m. A leste, o clima desta região cobre os vales do rio

Uruguai em altitudes abaixo de 650 m. O clima Cfa também é observado em todo o litoral catarinense, nas altitudes de até 500 e 600 m. Esse tipo de clima engloba 40,1% do Estado. O clima Cfb ocupa toda a área restante do Estado de Santa Catarina, 59,9%, onde a altitude limita o Cfa e cobre as regiões mais frias do Brasil, como Urupema, Urubici e São Joaquim, onde ocorrem picos com altitudes superiores a 1.800 m (ALVARES et al., 2013).

A precipitação de Santa Catarina é associada à geomorfologia e ao relevo. A geomorfologia do Estado é caracterizada por planícies litorâneas nas zonas baixas e planalto nas zonas altas. A divisão destes dois ambientes é verificada pela Serra Geral, que também é responsável por drenar as águas (GOTADO et al., 2018). O relevo de Santa Catarina contribui na distribuição distinta da precipitação em diferentes áreas do Estado, uma vez que aquelas mais próximas às encostas de montanhas, as precipitações são mais abundantes e resultando no aumento do volume de precipitação local. Assim, são observados maiores índices de precipitação nos municípios próximos à encosta da Serra Geral, quando comparados aos da zona costeira (MONTEIRO, 2001).

4.2 SUB-ÁREAS DE ESTUDO

4.2.1 Zonas Edafoclimáticas

Uma zona edafoclimática (Figura 5) é uma unidade cartográfica de recursos terrestres, definida em termos de clima, fisiografia, características climáticas e/ou cobertura do solo, de modo que oferece um conjunto específico de limitações e potencialidades de uso do solo (EPAGRI, 1999). Há uma necessidade de caracterizar e espacializar os vários ambientes do Estado de Santa Catarina em função da diversidade dos recursos naturais e agrônômicos, pois assim possibilita a orientação de ações e investimentos do setor público agrícola (EPAGRI, 1999). Cada zona delimitada tem uma combinação parecida de limitações e potencialidades, além de servir como ponto de referência das recomendações para melhorar a situação existente do uso das terras (FAO, 1997).

Figura 5 - Localização das zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina.



Fonte: Adaptado de Epagri (1999).

Segundo a Epagri (1999), o Estado de Santa Catarina compreende em onze zonas edafoclimáticas, que apresentam características climáticas, vegetação primária predominante, geomorfológicas, geológicas, vegetação atual, aptidão de uso das terras ao nível de macroclima, mais homogêneas possível, que expressam o ambiente de maneira simples e objetiva. As zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina (Tabela 1) foram selecionadas como sub-área de estudo pois servirão como subsídios para classificar por regiões o comportamento espacial do COS, na comparação, crítica e discussão acerca das potencialidades específicas que cada localidade possui em estocar carbono no solo.

Tabela 1 - Área em km² e porcentagem das zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina.

Código das zonas edafoclimáticas	Zonas Edafoclimáticas	Área	
		km ²	%
1A	Litoral Norte, Vales dos Tijucas e Rios Itajaí	8.241,2	8,6
1B	Litoral de Florianópolis e Laguna	2.619,1	2,7
2A	Alto Vale do Rio Itajaí	10.483,5	11,0

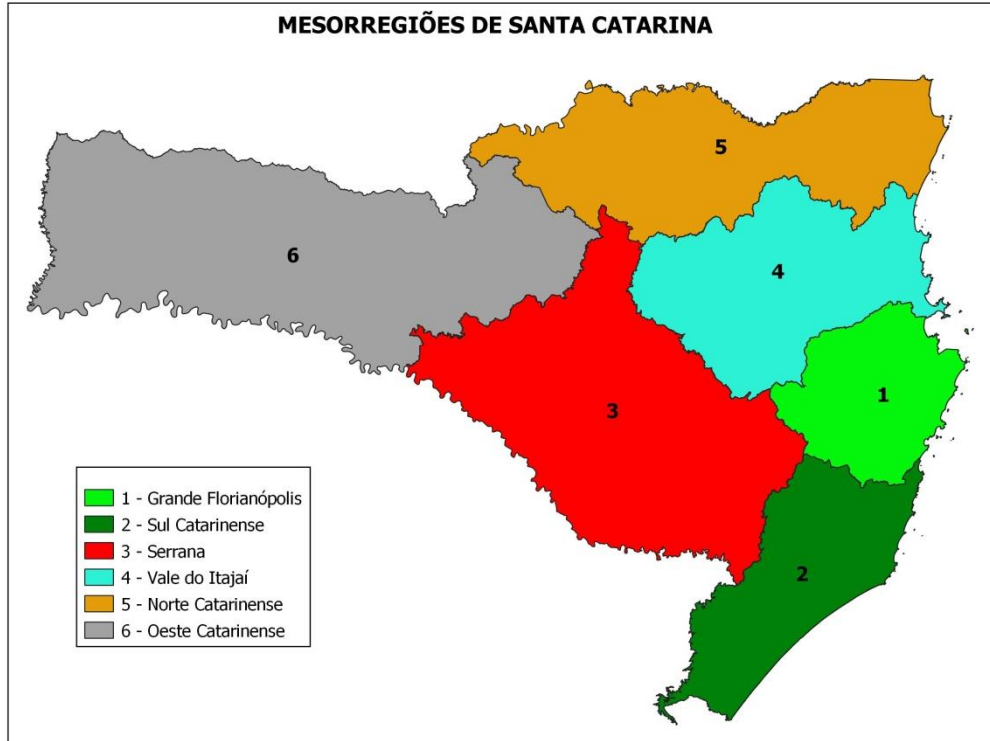
2B	Carbonífera, Extremo Sul e Colonial Serrana	8.946,2	9,4
2C	Vale do Rio Uruguai	8.051,3	8,4
3A	Vale do Rio do Peixe e Planalto Central	19.045,8	20,0
3B	Planalto Norte Catarinense	10.778,8	11,3
3C	Noroeste Catarinense	9.061,5	9,5
4A	Campos de Lages	9.768,5	10,2
4B	Alto Irani e Alto Vale do Rio do Peixe	6.263,4	6,6
5	Planalto Serrano de São Joaquim	2.183,6	2,3
Total		95.442,9	100

Fonte: Adaptado de Epagri (1999).

4.2.2 Mesorregiões

O Estado de Santa Catarina está dividido em seis mesorregiões, a saber: Grande Florianópolis, Norte Catarinense, Oeste Catarinense, Serrana, Sul Catarinense e Vale do Itajaí. Esta disposição, estabelecida pelo IBGE (2020), define as mesorregiões de Santa Catarina conforme a Figura 6.

Figura 6 - Localização das mesorregiões do Estado de Santa Catarina



Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

A Tabela 2 está configurada em demonstrar geograficamente a área de cada mesorregião em km² e em porcentagem.

Tabela 2 - Área em km² e porcentagem das mesorregiões do Estado de Santa Catarina.

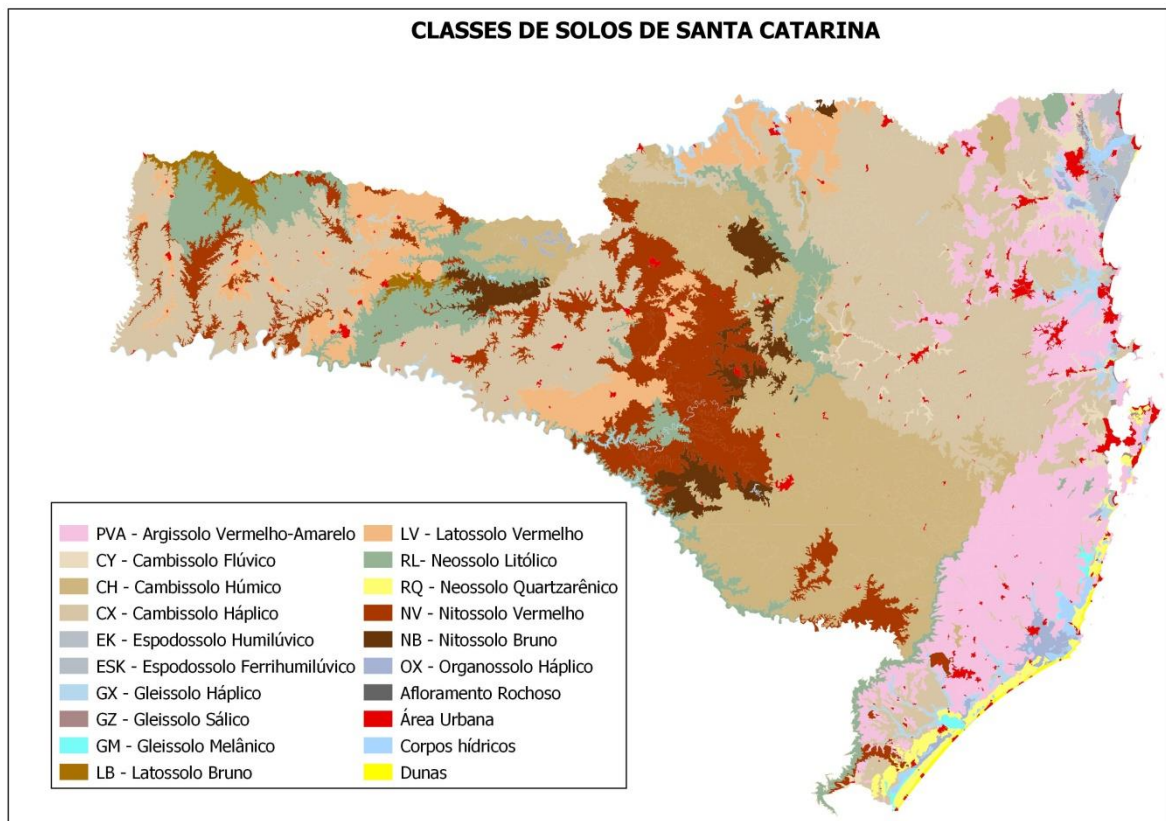
Código da Mesorregião	Mesorregião	Área	
		km ²	%
1	Grande Florianópolis	7323,9	7,6
2	Sul Catarinense	9665,0	10,1
3	Serrana	22280,0	23,3
4	Vale do Itajaí	13029,0	13,6
5	Norte Catarinense	15881,0	16,6
6	Oeste Catarinense	27264,0	28,5
Total		95.442,9	100

Fonte: Adaptado de IBGE (2020).

4.2.3 Classes de solos

As classes de solo (2º nível categórico) do Estado de Santa Catarina foram divididas em dezesseis classes (IBGE, 2018), como na figura 7.

Figura 7 - Mapa de localização classes de solo (2º nível categórico) do Estado de Santa Catarina.



Fonte: Adaptado de IBGE (2018).

Já Tabela 3 demonstra a área de cada classe de solo disposta em todo o Estado de Santa Catarina em km² e em porcentagem.

Tabela 3 - Área em km² e porcentagem das classes de solo (2º nível categórico) do Estado de Santa Catarina.

Código da Classe de Solo	Classe de Solo	Área	
		km ²	%
PVA	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	11698,0	12,2
CY	CAMBISSOLO FLÚVICO	1080,0	1,2
CH	CAMBISSOLO HÚMICO	18464,0	19,3
CX	CAMBISSOLO HÁPLICO	30237,0	31,7
EK	ESPODOSSOLO HUMILÚVICO	787,0	0,8
ESK	ESPODOSSOLO FERRIHUMILÚVICO	37,0	0,1
GX	GLEISSOLO HÁPLICO	1282,0	1,3
GZ	GLEISSOLO SÁLICO	117,0	0,2
GM	GLEISSOLO MÊLANICO	181,0	0,2
LB	LATOSSOLO BRUNO	806,0	0,8
LV	LATOSSOLO VERMELHO	6257,0	6,5
RL	NEOSSOLO LITÓLICO	7828,0	8,2
RQ	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO	979,0	1,0
NV	NITOSSOLO VERMELHO	9459,0	9,9
NB	NITOSSOLO BRUNO	2604,0	2,7
OX	ORGANOSSOLO HÁPLICO	672,0	0,7

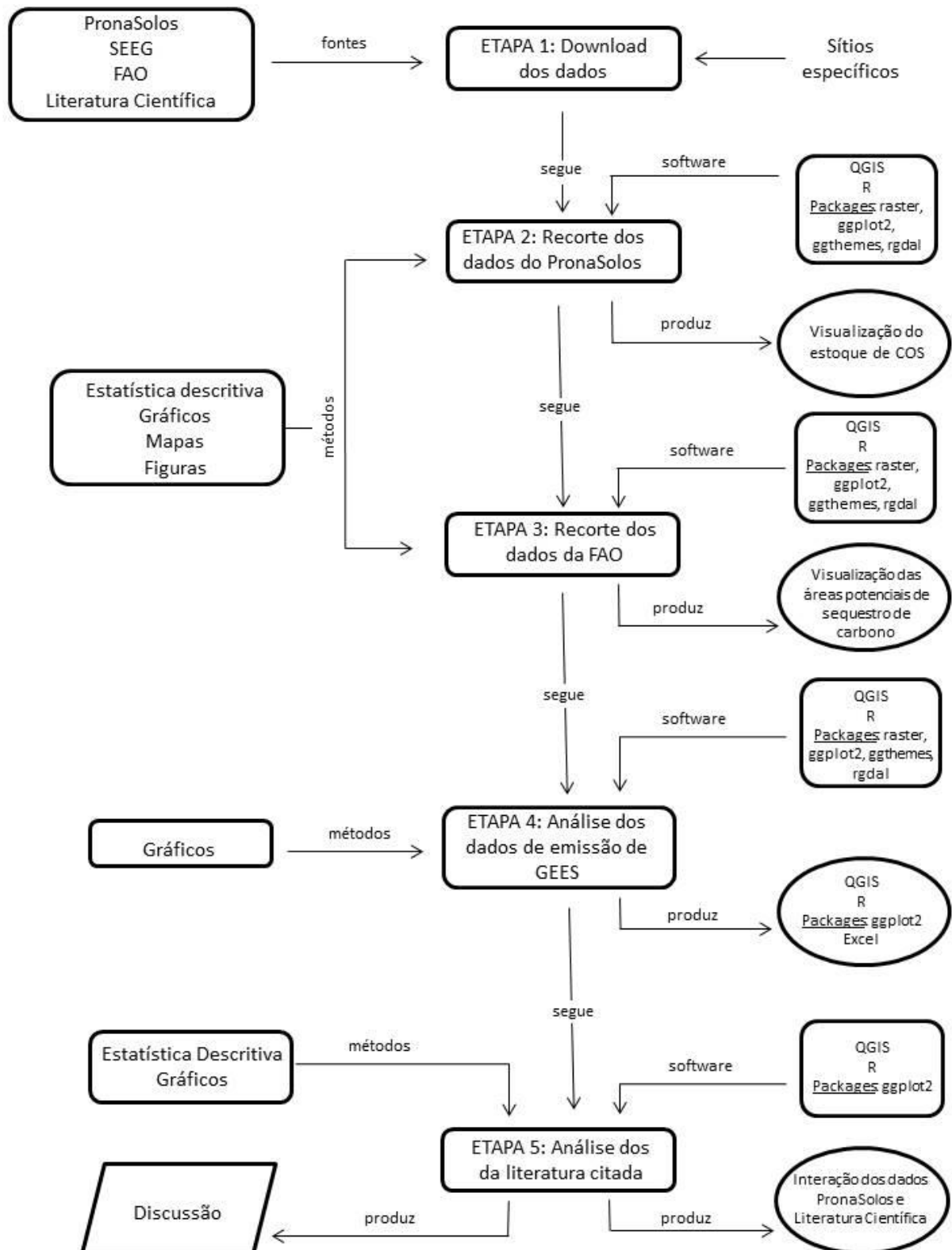
-	Rochas, área urbana, corpos hídricos e dunas	2954,9	3,2
Total		95.442,9	100

Fonte: Adaptado de IBGE (2018).

4.3 METADADOS

O trabalho foi realizado através de recortes políticos administrativos e classes de solos referentes a utilização de dados legados de estoque e potencial de sequestro de COS, emissões de GEEs e literatura citada publicados online, conforme exposto no fluxograma (Figura 8).

Figura 8 – Fluxograma de trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Etapa 1 consistiu no *download* dos dados em sítios específicos, bem como a organização dessas informações no computador. Na Etapa 2 foram realizadas os

recortes dos dados do PronaSolos (VASQUES et al., 2021) a partir das área e sub-áreas de estudo. Na Etapa 3 o mesmo procedimento foi utilizado na Etapa 2 aplicado aos dados da FAO (2022b) para áreas potenciais de sequestro de carbono em Santa Catarina. Na Etapa 4 foi trabalhado os dados de emissão de GEEs a partir do SEEG (2021) no entendimento das mesorregiões do Estado. Na Etapa 5 foi utilizado dados da análise de literatura citada (FOGAÇA, 2021) para o contraste da fonte de dados do PronaSolos (VASQUES et al., 2021).

Para produção gráfica, utilizamos o *software* aberto e livre R. O respectivo código da programação está no apêndice (ver APÊNDICE A). Para realização dos recortes pré-estabelecidos dos dados de estoque e potencial de sequestro de COS utilizamos o *software* aberto e livre QGIS.

4.3.1 Origem dos metadados

A fonte de dados de estoque de COS foi obtida pelo Programa Nacional de Levantamentos de Solos (PronaSolos) (VASQUES et al. 2021) vinculado à Embrapa de âmbito do governo federal. O download dos dados, tanto para mapas de estoque preditos e de incertezas de COS, foi realizado no sítio < <https://geoportal.cprm.gov.br/pronasolos/> > em camadas de profundidades de 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm e 60-100 cm para o pré-processamento dos dados.

Os mapas preditos do solo são as imagens *rasters* que contém os valores pixel a pixel dos estoques de COS para o Estado de Santa Catarina, bem como os mapas de incerteza do solo são imagens *rasters* que foram obtidas calculando-se os limites de predição inferior e superior cada pixel (VASQUES et al. 2021).

4.3.2 Pré-processamento dos metadados

O banco de dados de sistemas coordenadas (EPSG) foi reprojetoado para SIRGAS 2000, UTM 22S, bem como o recorte das sub-áreas de interesse foi feito a partir do comando *Raster* para mapas preditos e de incerteza.

Devido ao processamento, alguns arquivos ficaram com valores negativos e foram excluídos dentro do pré-processamento. Esse procedimento foi realizado usando o comando *Raster Calculator*, a partir da equação 1, dessa forma, deixando

apenas os *pixels* que possuem valores maiores ou igual a 0. Esse procedimento foi realizado para imagens de profundidade do solo 0-30 cm, 0-60 cm e 0-100 cm.

$$(\text{raster}) / (\text{raster} \geq 0) \quad (1)$$

Onde:

raster é a imagem que contém o valor do estoque de COS, pixel a pixel.

4.3.3 Mapas preditos

Para realizar o somatório pixel a pixel e obter apenas um mapa da profundidade de interesse, como 0-30 cm e 0-100 cm, utilizou o comando *Raster Calculator*, segundo a equação 2 para as duas profundidades desejadas.

$$\text{raster}_{\text{predito}} = \text{raster}_{\text{profundidade 1}} + \text{raster}_{\text{profundidade 2}} + \dots + \text{raster}_{\text{profundidade n}} \quad (2)$$

Onde:

$\text{raster}_{\text{predito}}$ é a imagem que contém o valor do estoque de COS médio, pixel a pixel;

$\text{raster}_{\text{profundidade n}}$ é a imagem que contém o valor do estoque de COS médio na profundidade específica, pixel a pixel;

4.3.4 Mapas de incerteza

Os mapas de incerteza foram trabalhados, segundo Lindberg (2000), para a propagação de erros de duas ou mais grandezas medidas em direção Dx e Dy, pixel a pixel. Essa propagação foi determinada pela equação 3. Para adição ou subtração dos pixels assumimos que as incertezas estão dispostas de modo a tornar o valor de Dz o mais distante possível do seu valor verdadeiro, ou seja, o cenário mais pessimista possível.

$$Dz = |Dx| + |Dy| + \dots + |Di| \quad (3)$$

Onde:

Dz = raster com a incerteza somada;
 Dx = raster com a incerteza no eixo x;
 Dy = raster com a incerteza no eixo y;

Cada mapa trará a incerteza pixel a pixel da profundidade do solo em específico, equivalente aos Dx e Dy (equação 3), assim para propagar a incerteza fizemos a soma simples dos mapas de incerteza (*raster incerteza*) (resultado da equação 4).

$$\text{raster incerteza profundidade } n = (\text{raster predito} \pm \text{limite inferior ou superior}) / 1,96 \quad (4)$$

Onde:

raster incerteza profundidade n é a imagem que contém o valor da incerteza do estoque de COS em uma profundidade específica, pixel a pixel.

Desse modo, geramos uma imagem do mapa de incerteza de cada profundidade do solo de interesse a partir dos mapas preditos e limite inferior e superior da predição da camada, respectivamente, a partir da equação 4. Assim, para gerar um mapa propagando as incertezas nos limites inferiores e/ou superior, usamos a equação 5.

$$\text{raster incerteza inferior ou superior} = \text{raster incerteza profundidade } 1 + \text{incerteza incerteza profundidade } 2 + \dots + \text{incerteza } n \quad (5)$$

Onde:

raster incerteza inferior ou superior é a imagem somada que contém o valor da incerteza superior ou inferior do estoque de COS em uma profundidade específica, pixel a pixel.

Para o conhecimento da equação 4, para definição de *limite inferior ou superior*, usamos a equação 6 e 7, respectivamente.

$$\text{limite inferior} = \text{raster predito} - 1.96 * \text{raster incerteza inferior} \quad (6)$$

$$\text{limite superior} = \text{raster}_{\text{predito}} + 1.96 * \text{raster}_{\text{incerteza superior}} \quad (7)$$

4.4 DADOS DO POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO

Os dados de potencial de sequestro de carbono, proposto pela FAO (2022b), é um produto global que projeta qual será o estoque de COS para os próximos 20 anos futuros (até 2040) para áreas agrícolas em diferentes cenários de manejo do solo. Dessa forma, o produto abordado e apresentado nesse trabalho não trata de áreas nativas. Importante relatar que o tempo de 20 anos foi assumido, segundo a FAO (2022b), como um período de tempo predeterminado após as ações de manejo de COS se aproximarem de um novo estado estacionário, sendo este período descrito nas diretrizes do IPCC (IPCC, 2019a; 2019b). Este produto trata de uma resolução espacial de 1 x 1 km e para profundidade do solo de 0-30 cm.

Os diferentes cenários de manejo do solo proposto (FAO, 2022b) estão destacados no Manual Técnico de Práticas de Manejo para Recarbonização de Solos Globais (FAO; ITPS, 2021), que incluem abordagens agrícolas e sistemas integrados, por exemplo, cultivo regenerativo e orgânico, bem como rotação de culturas, sistemas integrados de lavoura-pecuária (ILP) e lavoura-pecuária-floresta (ILPF), agricultura agroecológica e sintrópica, *climate-smart agriculture* dentre outros. Dada a multiplicidade e possível combinação dessas práticas nos diferentes sistemas de produção em todo o mundo, a FAO (2022b) dita três cenários (MSS) quais foram considerados as entradas de C a partir do modelo *business as usual (BAU)*. O cenário de manejo sustentável dos solos (MSS) adotado para esse trabalho foi o cenário 1, que trata do cenário mais baixo e pessimista proposto na metodologia (FAO, 2022b), onde representa uma taxa média anual na mudança de estoque de COS com um aumento nas entradas de 5% de carbono, a partir das práticas de manejo sustentável adotadas no solo. Os outros cenários 2 e 3 permitem um aumento nas entradas de C definidos como intermediário e alto com valores de aumento nas entradas de C no solo 10% e 20%, respectivamente.

Os dados de potencial de sequestro de carbono orgânico foram obtidos na plataforma *Global Soil Sequestration Potential Map (GSOCseq)* no sítio <<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-soil-organic-carbon-sequestration-potential-map-gsocseq/en/>> (FAO, 2022). Para a área de estudo, o comando *Raster* foi realizado para delimitar o recorte de interesse.

4.5 DADOS DE EMISSÃO DE GEE

Os dados de emissão de GEEs para o Estado de Santa Catarina foram obtidos na Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021) e são gerados segundo as diretrizes do IPCC, com base na metodologia dos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases do Efeito Estufa, elaborado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, e em dados obtidos junto a relatórios governamentais, institutos, centros de pesquisa, entidades setoriais e organizações não governamentais. Desse modo, a utilização dos dados da SEEG é fundamental e coerente, pois é o conjunto de dados que provavelmente é o mais abrangente em termos de transparência, número de registros, tempo e cobertura geográfica.

Os quantitativos de emissão de GEEs foram utilizados a partir do sítio <<https://seeg.eco.br/>> (SEEG, 2021) do ano de 2018 e organizados em Excel e para a análise espacial.

4.6 DADOS DA LITERATURA CITADA

Utilizamos uma busca de dados de solos disponíveis relacionados ao estoque de COS no Estado de Santa Catarina para corroborar a eficiência dos metadados. Essa ação teve como finalidade encontrar informações disponíveis em bibliotecas, portais e *sites* com potencial de serem utilizadas no estudo da relação dos estoques de carbono do solo *in situ* (FOGAÇA, 2021) (ver ANEXO B) para correlacionar e apoiar as quantificações dos valores de estoque de COS a partir da fonte de dados (VASQUES et al., 2021). Do total de arquivos encontrados, foram selecionados aqueles que continham obrigatoriamente a coordenada geográfica, profundidade e o valor do estoque de COS. Para os dados inexistentes do estoque de COS foram utilizados como referência a literatura do mesmo local ou região em que o ponto se encontrava. Em específico para a variável de estoque de COS que era inexistente, foram realizados cálculos através da equação 8, proposta por Fernandes e Fernandes (2009):

$$\text{Estoque de COS} = (\text{CO} \times \text{Ds} \times \text{E})/10, \quad (8)$$

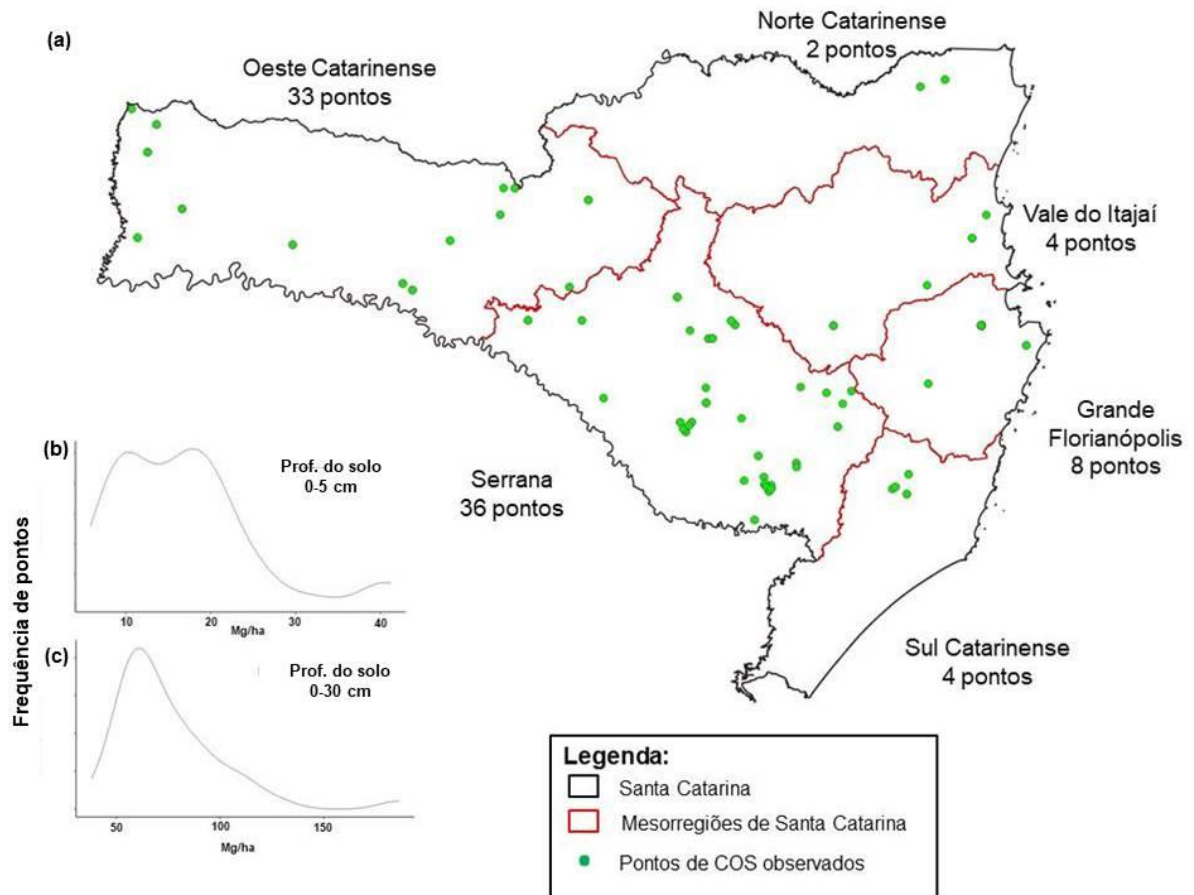
Onde:

Estoque de COS = estoque de carbono orgânico em determinada profundidade ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$); CO = teor de carbono orgânico total na profundidade amostrada ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); Ds = densidade do solo da profundidade ($\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$); e E = espessura da camada considerada (cm).

Os dados de perfis de solo foram tabulados no Excel, processados no *software* livre e aberto QGIS para análise de dados espaciais, visualização e edição. Os pontos amostrados abrangeram 30 municípios no Estado de Santa Catarina (Figura 9a), que representam cerca de 10% dos municípios distribuídos em todas as mesorregiões. Foram encontrados 134 perfis de solo entre estes municípios do Estado e 461 dados de estoque de COS tabulados em profundidade de até 0-100 cm. As profundidades de solo utilizadas foram até 0-5 cm e 0-30 cm, com 59 e 39 observações, respectivamente (ver ANEXO A). Foram descartadas as demais profundidades (entre 30-100 cm) devida a pouca quantidade de pontos observados no levantamento.

Com o arquivo de pontos levantados pelas bibliotecas e geoespacializados (Figura 9a), juntamente com as imagens de COS nas profundidades de solo (0-5 cm e 0-30 cm), extraímos os valores dos respectivos mapas de COS através do comando *Exportar*, no programa QGIS. Esses dados foram obtidos em planilha no Excel e utilizamos o programa estatístico livre e aberto R para análise dos dados e produção de gráficos para interpretação visual.

Figura 9a - Espacialização dos pontos de estoque de COS levantados em bibliotecas. 9b e 9c – Histogramas dos estoques de COS em profundidade de solo 0-5 cm (b) e 0-5 cm (c).



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao inteirar-se do conteúdo até então exposto, e facilitar o leitor dentro dos resultados e discussões, primeiro será exposto às informações encontradas diante de todo o Estado de Santa Catarina. Já os outros resultados chegam sob a forma de descrição a partir das diferentes zonas edafoclimáticas, depois as mesorregiões e por fim as classes de solo (2º nível categórico) objetivando aproximar ao máximo as discussões entre elas.

5.1 ESTOQUE DE COS

Os valores do mapa de estoque de COS em uma profundidade de até 0-30 cm variaram de $21,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (1 Mg equivale a 1000 kilos ou 1 tonelada ou 0,000 001 Megatoneladas) até $220 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e apresentaram um valor médio de $68,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, valor de mediana $70,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e estoque total de 651,8 Mt. Para o mapa de profundidade até 0-100 cm, o estoque de COS variou de $47,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ até $454,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

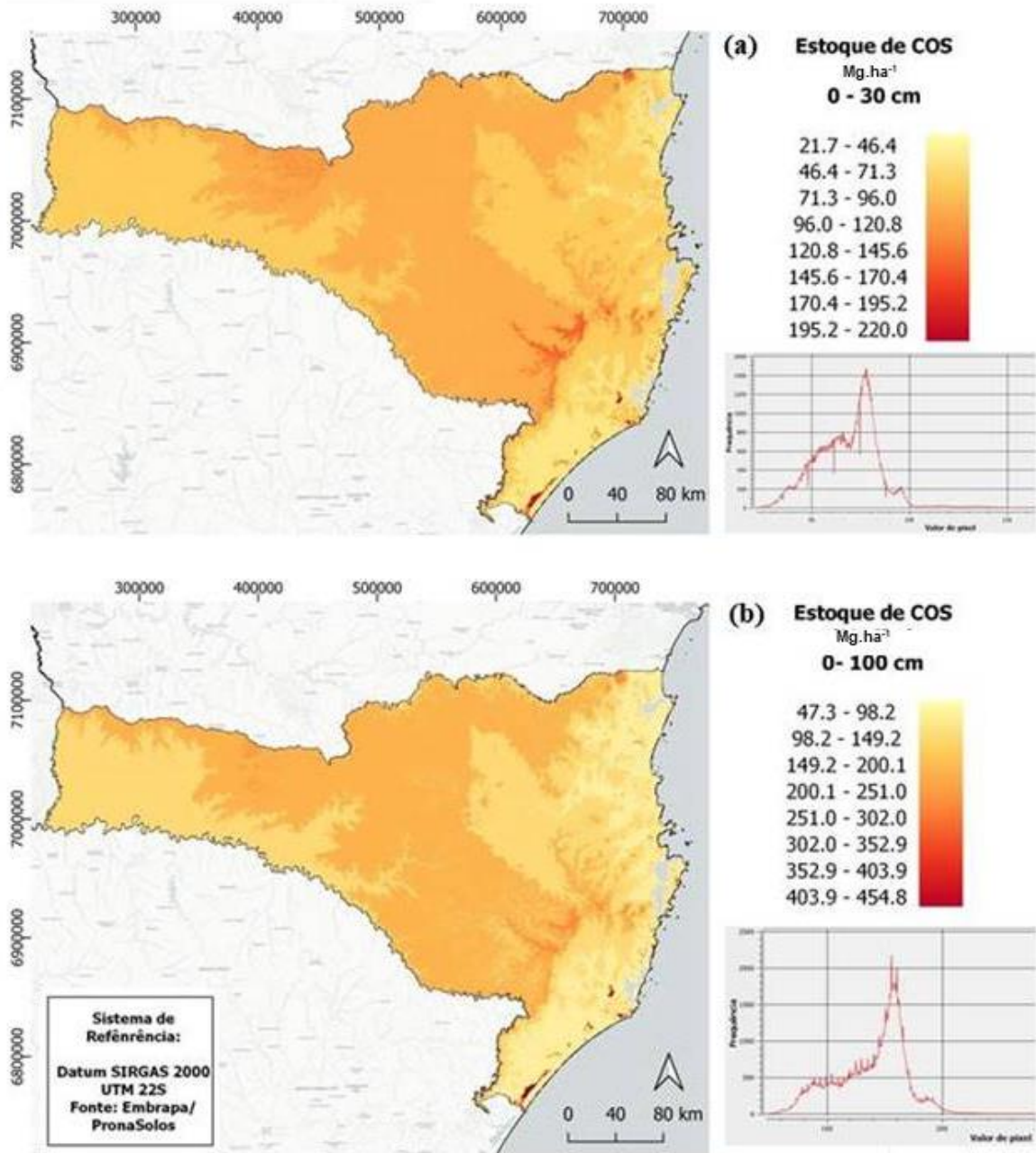
¹ e apresentou valores de média de 139,2 Mg.ha⁻¹, mediana 147,2 Mg.ha⁻¹ e estoque total de 1328,5 Mt (Tabela 4 e Figura 10). As estatísticas descritivas do COS, para as profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas do estoque de COS para o Estado de Santa Catarina nas profundidades do solo de 0-30 cm e 0-100 cm.

Profundidade do solo (cm)	Estoque COS total (Mt)	Média	Mediana	Valor mínimo (Mg.ha ⁻¹)	Valor máximo	1º quartil	3º quartil
0-30	651,8	68,3	70,1	21,7	220,0	57,0	79,0
0-100	1328,5	139,2	147,2	47,3	454,8	118,0	160,0

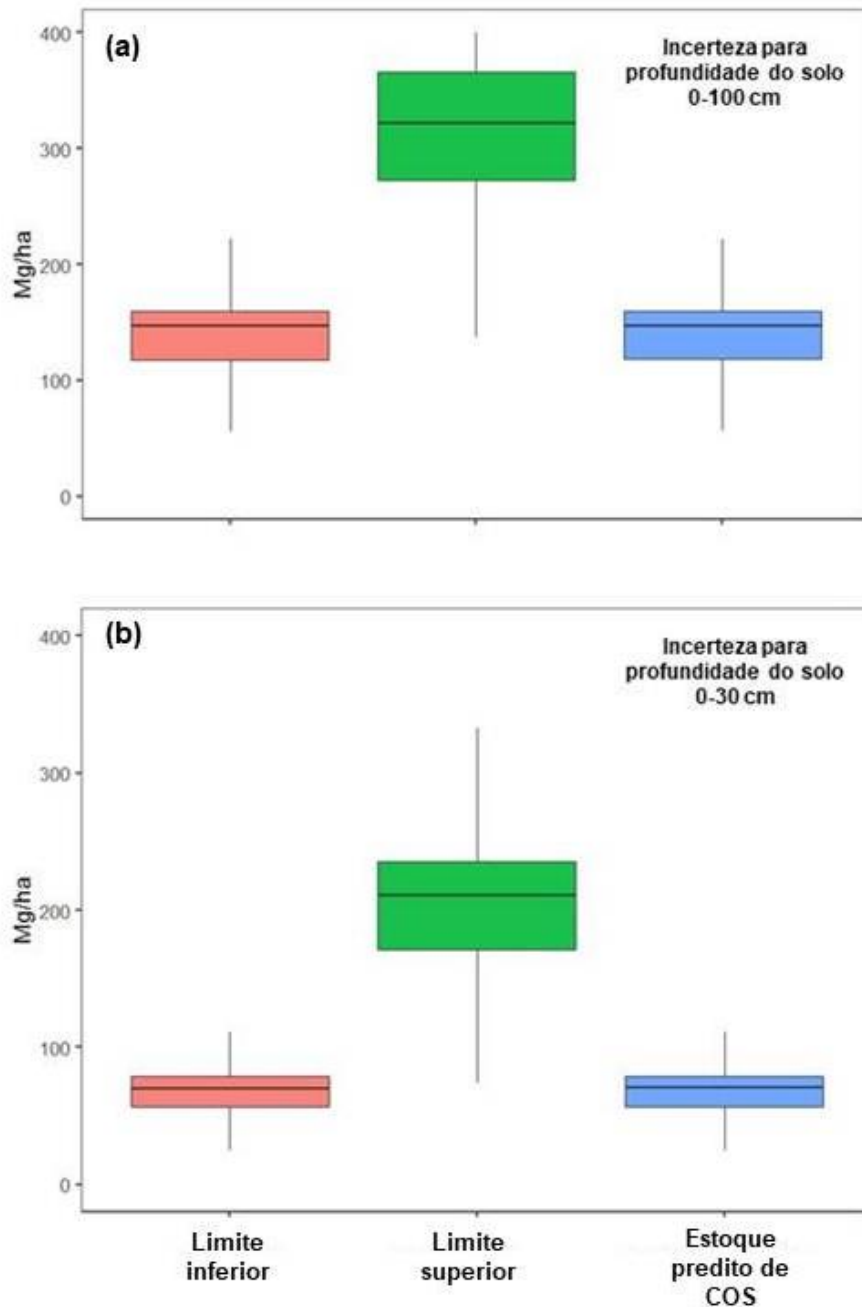
Na Figura 10 observamos os mapas de estoque de COS para as profundidades do solo de 0-30 cm e 0-100 cm.

Figura 10 - Mapas de estoque de COS para o Estado de Santa Catarina em uma profundidade do solo até 30 cm (a) e até 100 cm (b).



Na Figura 11, são apresentadas graficamente as incertezas dos mapas preditos de estoque de COS para Santa Catarina.

Figura 11- Incerteza dos mapas de estoques preditos de COS para o Estado de Santa Catarina para profundidade de solo de 0-100 cm (a) e 0-30 cm (b).



Observando outras regiões pelo Brasil e do mundo, alguns trabalhos foram encontrados em relação ao estoque de COS, priorizando o tamanho das áreas que fosse semelhante ao Estado de Santa Catarina. Desse modo, o Estado do Pernambuco, que possui área de aproximadamente 98 mil km², o estoque total de carbono na profundidade de solo de 0-30 cm foi de 352,7 Mt C (JESUS et al., 2019), sendo aproximadamente 50% menor que o valor encontrado para o Estado de Santa Catarina com valor total de 651,8 Mt C. É importante frisar que Jesus et al. (2019) utilizaram dados de artigos científicos para o cálculo de estoque de COS.

Os Estados de Santa Catarina e Pernambuco estão localizados em classificações climáticas (ALVARES et al., 2013), biomas e vegetação distintas. Desse modo, é compreensível entender que os valores de estoque de COS para Santa Catarina sejam maiores, uma vez que as questões climáticas estão inerentes nessa problemática, sendo mais propícios a decomposição da MOS em regiões quentes, como o Nordeste do Brasil. Já em regiões de clima semelhantes a Santa Catarina, como o Rio Grande do Sul, que possui área quase três vezes maior que Santa Catarina, o estoque total de COS foi 1510,3 Mt C em profundidade do solo 0-30 cm (TORQUINST et al., 2009), sendo, de certa forma, diretamente proporcional ao encontrado neste trabalho.

Para países que possuem área semelhante à Santa Catarina, como a Coréia do Sul, com aproximadamente 100 mil km², o estoque médio previsto de COS foi de 35 Mg.ha⁻¹, para 0-30 cm de profundidade de solo e 87 Mg.ha⁻¹ para profundidade do solo de 0-100 cm. No estoque total, o solo sul-coreano foi relatado com armazenamento de aproximadamente 330 Mt de COS para 0-30 cm de profundidade e 842 Mt de COS para 0-100 cm de profundidade (PARK et al., 2021). Esses valores de estoque de COS são aproximadamente 50% menores que encontrados para Santa Catarina. Outro trabalho apresentado por Szatmari et al. (2019), onde avaliaram o estoque de COS para a Hungria em profundidade de 0-30 cm, o valor encontrado foi de 424,4 Mt C, usando algoritmos de aprendizado de máquina. Isso reforça a valoração do Estado na preservação dessas áreas e dos solos catarinenses, pois são valores superiores até então apresentados aqui (ver ANEXO C).

De acordo com os dados de estoques de carbono do solo (FOGAÇA, 2021) disponíveis em bibliotecas para correlacionar e apoiar as quantificações dos valores de estoque de COS da fonte de dados, a estatística descritiva dos dados da literatura citada (FOGAÇA, 2021) e do PronaSolos (VASQUES et al., 2021) para profundidade de 0-5 cm e 0-30 cm, está descrita na Tabela 5 (ver ANEXO A).

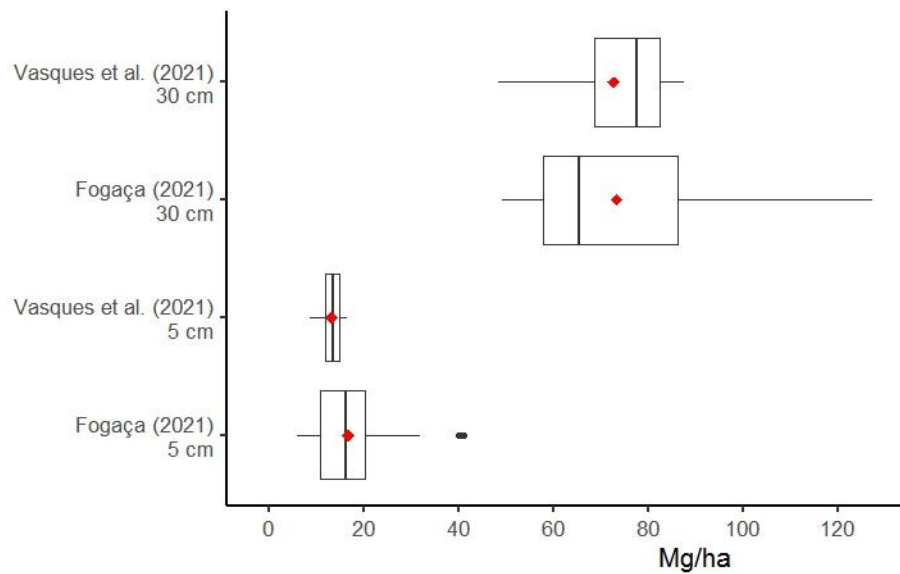
Tabela 5 - Estatísticas descritivas dos dados levantados em literatura e mapa de COS para o Estado de Santa Catarina nas profundidades do solo de 0-5 cm e 0-30 cm.

Fonte de dados	Profundidade do solo (cm)	Média	Mediana	Valor mínimo	Valor máximo	1º quartil	3º quartil
-	(cm)	_____ (Mg.ha ⁻¹) _____					
Vasques et al., (2021)	0-30	72,7	77,5	48,4	87,5	68,6	82,4

Fogaça (2021)	0-30	76,3	65,7	49,2	186,1	57,9	88,2
Vasques et al., (2021)	0-5	13,2	13,5	8,7	16,4	11,7	14,7
Fogaça (2021)	0-5	16,6	16,2	5,8	41,2	10,7	20,2

Na Figura 12 é apresentada graficamente essa estatística descritiva.

Figura 12 - Dados literatura citada e do PronaSolos nas profundidades de 0-5 cm e 0-30 cm.



5.2 ESTOQUE DE COS PARA SUB-ÁREAS

5.2.1 Zonas Edafoclimáticas

Observando a Figura 10, bem como as suas respectivas zonas edafoclimáticas (Figura 13 e 14) do Estado de Santa Catarina, a zona que demonstrou maiores estoques de COS para profundidade do solo de 0-30 cm entre as demais foi o Planalto Serrano de São Joaquim (zona 5) com valor médio de 98,8 Mg.ha⁻¹. Para a profundidade de solo de 0-100 cm, esta zona apresentou valor médio de COS de 172,1 Mg.ha⁻¹, ficando apenas atrás da zona edafoclimática Alto Vale do Rio do Peixe e Alto Irani (zona 4B). Essa zona edafoclimática 4B mostrou valores médios de COS de 86,9 Mg.ha⁻¹ e 173,8 Mg.ha⁻¹ para profundidades de solo de 0-30 cm e 0-100 cm, respectivamente.

Um aspecto que observamos, está diretamente relacionado com a proporção de área geográfica das respectivas zonas edafoclimáticas. As zonas 5 e 4B ocupam somadas apenas 8,9% de toda a área do Estado, reforçando a necessidade de narrativas importantes relacionadas a essas zonas, uma vez que são as zonas edafoclimáticas que se mostraram com maiores estoques de COS por todo o Estado. Essa relação pode estar relacionada ao clima, pois ambas as zonas edafoclimáticas estão em clima temperado constantemente úmido, com menores temperaturas médias anuais e com temperatura do mês mais frio entre 0° e 10°C (EPAGRI, 1999), oferecendo e favorecendo a manutenção dos estoques de COS. Em escala regional, por exemplo, as variáveis climáticas, como temperatura e precipitação pluvial, exercem grande importância nessa dinâmica (OLIVEIRA et al, 2015), uma vez que essas zonas possuem as maiores precipitações do Estado.

As zonas edafoclimáticas Campos de Lages (zona 4A), Planalto Norte Catarinense (zona 3B) e Vale do Planalto Central e Rio do Peixe (zona 3A) (Figura 13 e 14) obtiveram um comportamento semelhante entre si em relação ao estoque de COS, mostrando valores de média de 80, 77 e 74 Mg.ha⁻¹, respectivamente, para profundidade de solo de 0-30 cm. Para profundidade de solo de 0-100 cm, essas áreas tiveram médias, respectivamente, de 158, 154,9 e 154Mg.ha⁻¹.

As zonas 4A, 3B e 3A possuem 19,02%, 22,06% e 25,10%, respectivamente, menos estoques médios de COS comparados com a zona 5 em profundidade do solo de 0-30 cm, o que leva a refletir que essas zonas edafoclimáticas ainda possuem altos estoques de COS comparados com as demais. Dito isso, apenas a zona 4A possui área maior que àquelas zonas somadas, com 10,2% de área. Mesmo que o conteúdo de estoque médio de COS seja relativamente menor, é necessário olhar atentamente para essa zona 4A, uma vez que ela também está localizada em regiões climáticas semelhantes com estas mencionadas. A relação dessa diferença de estoque médio de COS entre a zona 5 e zona 4B pode estar relacionado com o maior crescimento urbano, principalmente o município de Lages/SC, grande pólo urbano do Estado de Santa Catarina. Outro ponto pode estar relacionado devido ao desmatamento de áreas nativas para agropecuária como para implantação de monoculturas ou culturas cíclicas (VIBRANS et al., 2011), uma vez que com o manejo inadequado de áreas agrícolas esse estoque de COS tende a diminuir.

A região de Campos de Lages, onde há presença da Floresta Ombrófila Mista (FOM), e sendo uma área fitoecológica de marcante pressão antrópica e de maior

cobertura florestal em Santa Catarina, a FOM atualmente cobre menos de 25% da sua área original (GASPER et al., 2013), revelando alto grau de alteração de sua cobertura original. Com isso, é fatídico relacionar as diferenças de estoques de COS entre da zona 4B com as demais, uma vez que áreas nativas estão sendo convertidas para áreas de agroecossistemas. Com relação a essa ideia, Cassol et al., (2019) avaliaram alterações no carbono orgânico do solo de área natural submetido ao plantio de *Pinus taeda* em três idades no sul do Estado de Santa Catarina, e concluíram que em áreas de monocultivo com idades de cinco e dezesseis anos os estoques médios de COS foram maiores que em áreas de pastagem nativa. Já em áreas com monocultivo, com 21 anos de idade, esse valor foi superior aos demais reforçando que o estoque de COS aumenta ao longo do tempo durante a fase de crescimento das florestas de pinheiros (CASSOL et al., 2019). Em outros trabalhos, como de Baldotto et al. (2015), áreas de mata foram mais propícias à humificação da MOS, seguida pelos sistemas integrando florestas à pastagem, do que nos sistemas de monocultura, corroborando que, além de maiores estoques, os sistemas envolvendo florestas causam maior estabilidade do carbono, e conseqüentemente, o sequestro e estoque de COS.

As zonas edafoclimáticas Noroeste Catarinense (zona 3C) e Alto Vale do Rio Itajaí (zona 2A) estão localizadas dentro do Estado em regiões onde o estoque de COS foi determinado como valores intermediários, apresentando valores de média de 68,7 Mg.ha⁻¹ e 65,2 Mg.ha⁻¹, respectivamente para profundidade de solo de 0-30 cm (Figura 13). Para profundidade de solo de 0-100 cm, essas zonas edafoclimáticas mostraram valores médios de 152,9 e 130,6 Mg.ha⁻¹, respectivamente (Figura 14).

Figura 13 - Estoque médio de COS para as zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina em profundidades do solo 0-30 cm.

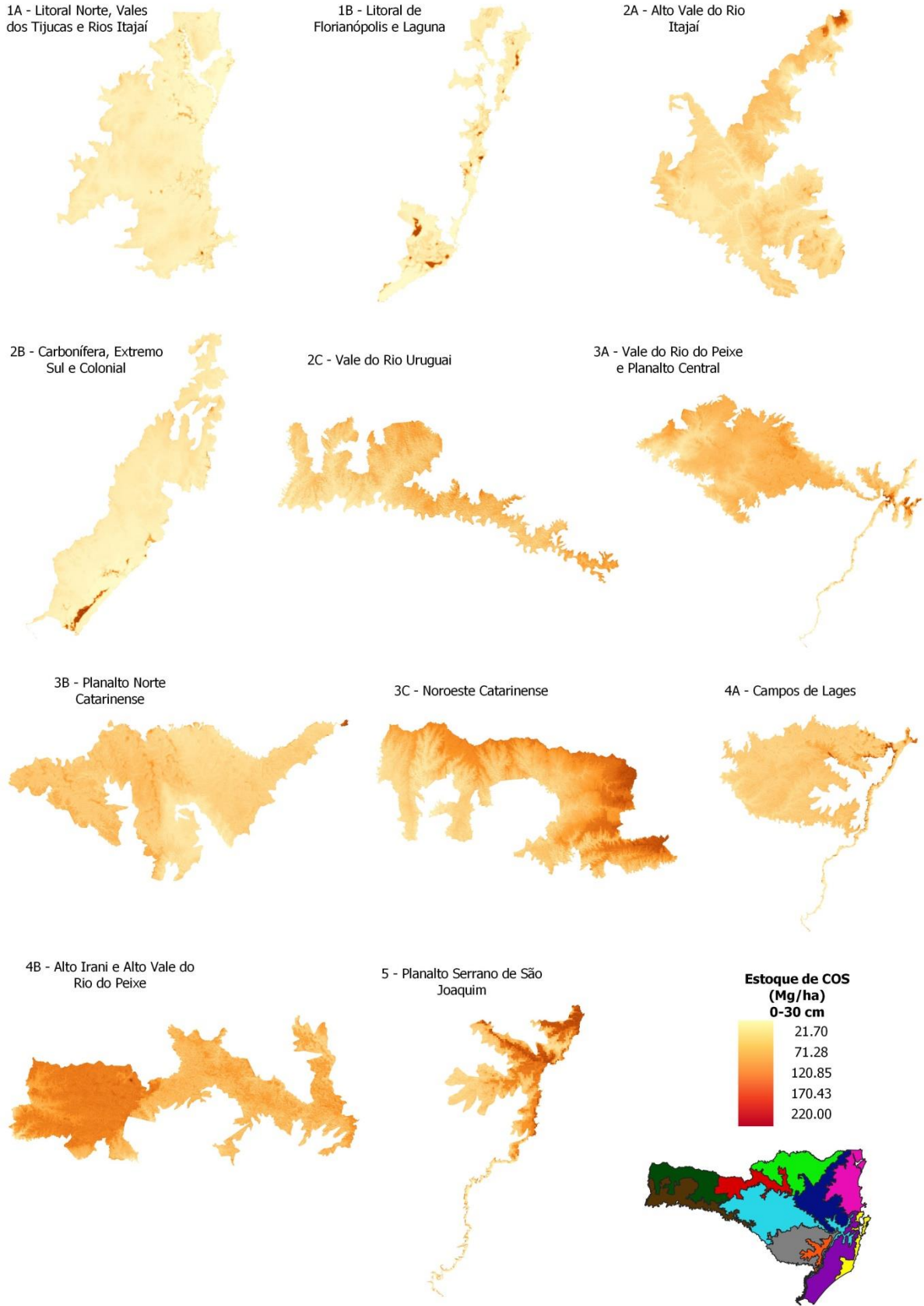
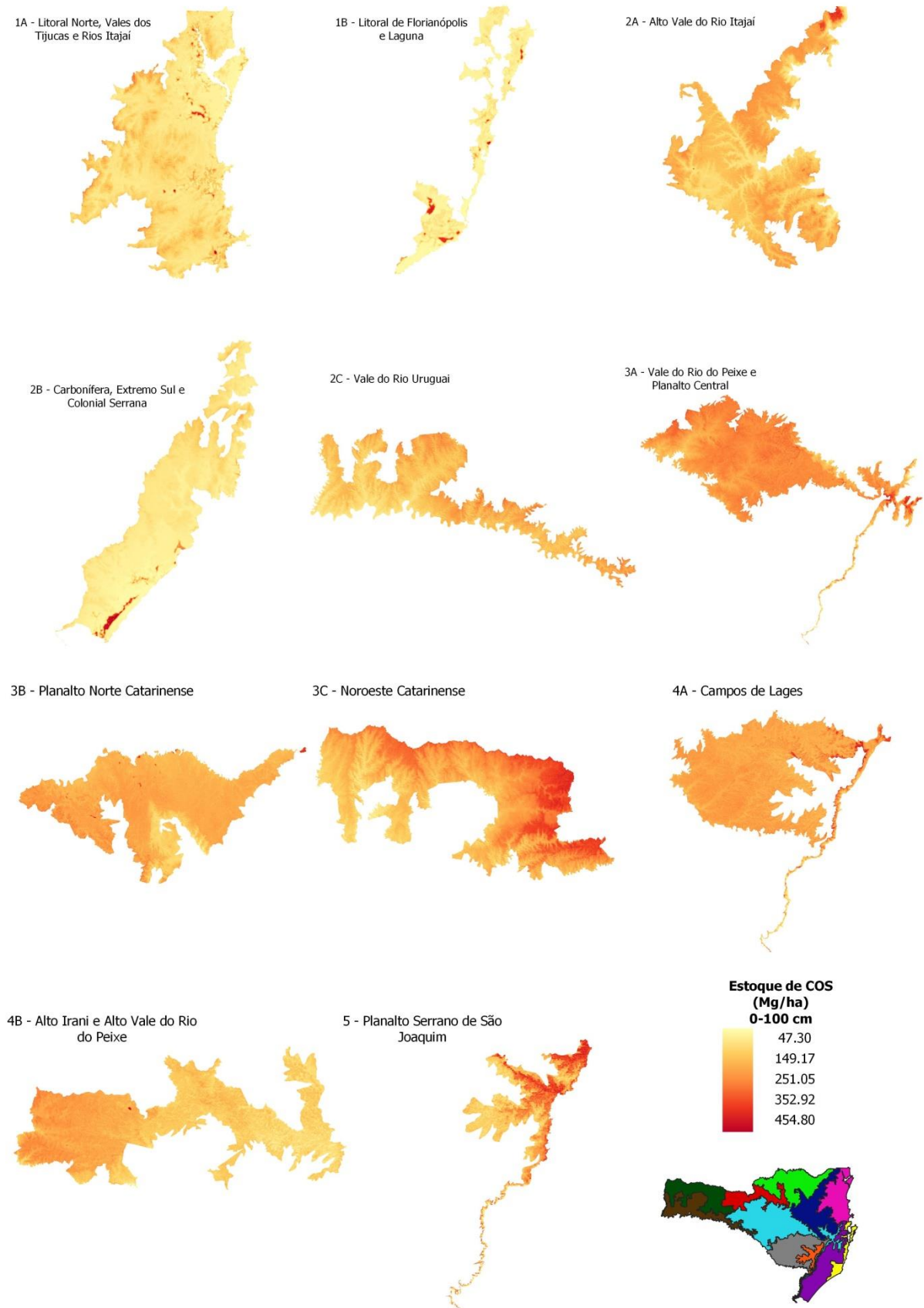


Figura 14 - Estoque médio de COS para as zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina em profundidades do solo 0-100 cm.



As zonas edafoclimáticas Vale do Rio Uruguai (zona 2C), Litoral de Florianópolis e Laguna (zona 1B), Litoral Norte, Vales do Rio Itajaí e Tijucas (zona 1A), e Carbonífera, Extremo Sul e Colonial Serrana (zona 2B) apresentaram teores médios de estoque de COS, para profundidade de solo de 0-30 cm, mais baixos por todo o Estado (Figura 13). A zona 2C obteve média de $56 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, a zona 1B com média $53 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, a zona 1A com média de $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e o estoque de COS mais baixo foi a zona 2B com média de $48,2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Para profundidade de solo de 0-100 cm, os valores médios foram $122 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, $100,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, $95,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $97,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente (Figura 14).

A zona 2C está localizada em uma tipologia florestal conhecida como Floresta Estacional Decidual (FED) ou Matas Secas, tipicamente decídua, com perda das folhas superior a 50% na estação seca do ano, sendo essa definição bastante ampla, referindo-se às formações arbóreas que ocorrem em regiões com duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa (GONÇALVES, 2015). As áreas de FED's constituem-se, na maioria das vezes, em zonas de intensa utilização humana, de modo que as ações antrópicas atravessam imensas áreas de vegetação nativa de FED's (GONÇALVES, 2015). Desse modo, as questões antrópicas relacionadas aos processos de uso e ocupação do solo são atuantes sobre esses ambientes, sobretudo em todo o Brasil. Portanto, isso pode estar relacionado como essa zona edafoclimática está no *ranking* das menores zonas edafoclimáticas de estoque de COS em Santa Catarina, uma vez que ações humanas em vegetação nativa tendem a diminuir esse acúmulo de carbono no solo, e sendo perdido para a atmosfera a partir de processos exploratórios.

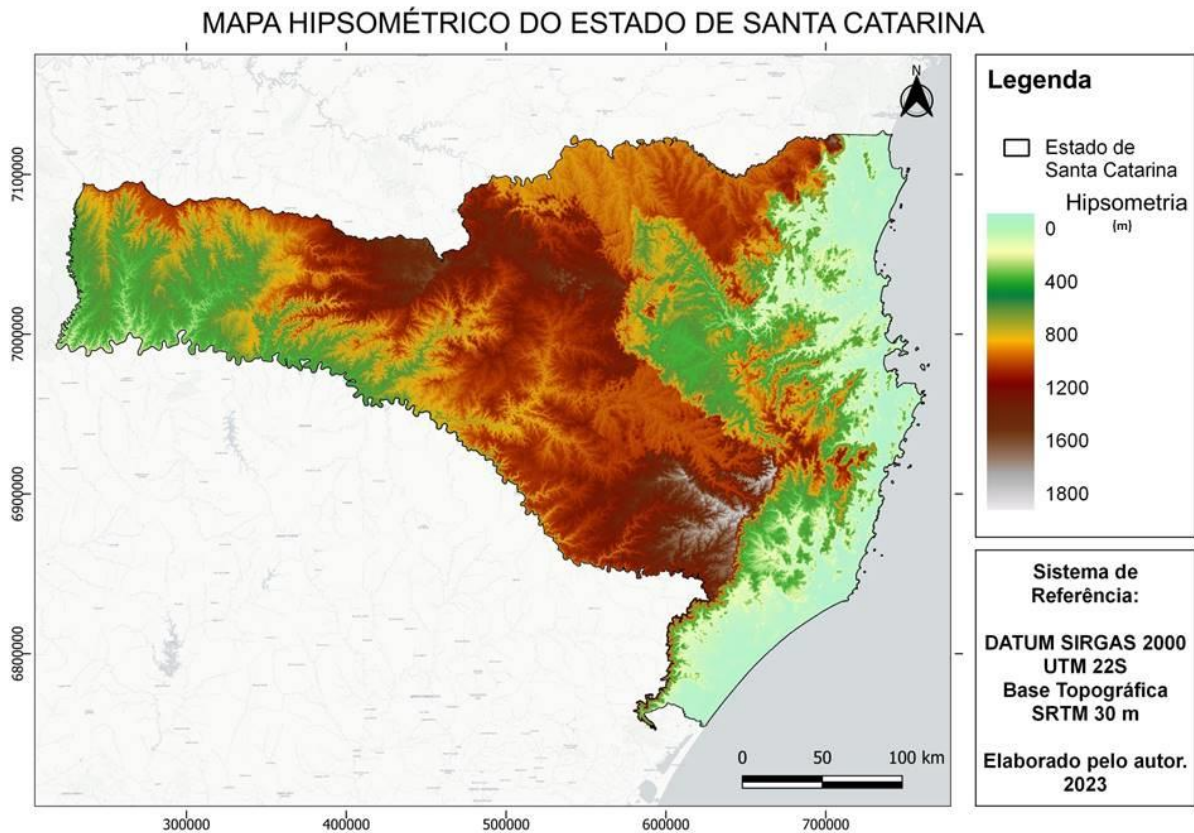
As regiões Sul do Brasil, sobretudo, áreas de florestas naturais foram desmatadas para produção agrícola em função do aumento dessa necessidade, sobrando partes de remanescentes de matas de modo que o carbono permaneça o seu ciclo (DENARDIN et al., 2014). Nesse sentido, o papel das florestas naturais e plantios florestais são úteis no sequestro de COS mesmo representando um potencial de mitigação temporário, contudo, significativo. Nessa avaliação de estoque de carbono no solo, Denardin et al. (2014) relataram, em profundidade do solo 0-30 cm, um valor médio de estoque de COS de $79,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ na região de Chapecó/SC, região localizada dentro da zona 2C, em mata nativa que possuía elevado grau de preservação, e $38,01 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de estoque médio de COS para área de manejo do solo em sistema convencional com histórico de aplicação periódica de herbicidas. Esse

valor de estoque de COS no sistema convencional é menor que mata nativa também pelo fato dessas áreas estarem submetidas às ações de mobilização periódica do solo (aração e gradagem), com quebra de agregados, aumento da oxidação da MOS, portanto, relacionar essa perda aos processos erosivos do solo caso esse manejo esteja acontecendo de forma equivocada. Assim, ficam notórias as perdas de carbono estocado no que tange a alteração da cobertura florestal e o manejo utilizado. Esses valores são semelhantes ao encontrados neste trabalho em função de estarem em localidades sobrepostas.

A zona edafoclimática 1B já está posicionada em regiões do litoral do Estado, e atualmente toda área encontra-se descaracterizada e com dominância de vegetação secundária sem palmeiras e com agricultura com culturas cíclicas (EPAGRI, 1999). Isso corrobora o aspecto a ser considerado na determinação dos baixos teores de COS nessa zona edafoclimáticas, pois as transformações de ecossistemas nativos, como floresta ombrófila densa (FOD) antes presente na área, para agroecossistemas tendem a diminuir o estoque de COS. Dito isso, segundo a Epagri (1999), aproximadamente 13,2% da zona 1B está situada em solos com textura arenosa (Neossolos Quartzarênicos), uma vez que é a granulometria dos solos, estes apresentam em média teores de argila inferiores a 15%, que contribui para diminuição da estabilidade da MO beneficiando a atividade microbológica no solo e acelerando a ciclagem do carbono (LAL, 2005), se esse solo for de boa drenagem. Solos arenosos têm baixa capacidade de proteção e alto teor de carbono não protegido em parte porque a proteção dessa MO dentro dos agregados é favorecida pelo incremento do conteúdo da argila (PLANTE et al., 2006; BALESIDENT et al., 2000). Outra reflexão é o maior diâmetro das frações granulométricas, como areia, possuem uma correlação negativa com a área de superfície específica, a densidade de cargas e a formação de ligações organominerais, o que torna as partículas minerais mais expostas à decomposição no solo (TORN et al., 1997).

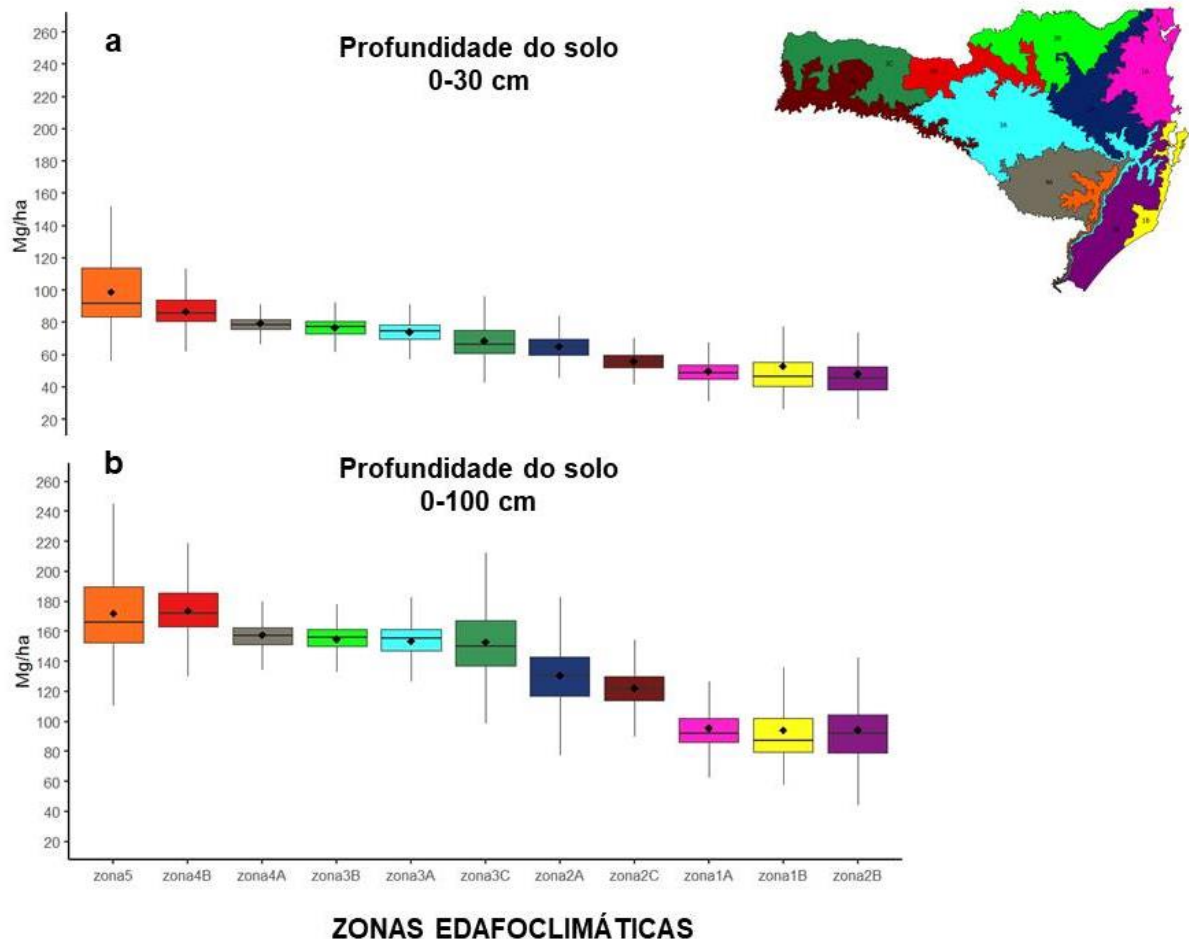
A zona 1A apresentou valores médios de COS semelhantes com as zonas 1B e 2B variando de 5% no seu estoque entre zonas. Essas duas zonas estão localizadas ao leste e em altitudes mais baixas do Estado (Figura 15), e com isso, presente em áreas climáticas diferentes àquelas que possuem maiores estoque de COS, como as zonas 5, 4B e 4A. Outro ponto é a vegetação natural que está, atualmente, fortemente descaracterizada frente às ações antrópicas e crescimento urbano.

Figura 15 - Mapa hipsométrico do Estado de Santa Catarina.



Dentro da zona 1A, essa área é coberta por FOD, e em muitos locais, foi suprida por outros usos do solo, como pastagens, ou até mesmo foram descaracterizadas pela extração de espécies arbóreas de interesse econômico. Na região de Camboriú e Balneário Camboriú, onde está inserida a Bacia Hidrográfica do Rio Camboriú, Dortzbach et al. (2015) relatam que os maiores valores de estoques de COS encontrados, em profundidade de 0-100 cm, foram para áreas que estão ocupadas por florestas, mesmo que no passado em algum momento tenham sido utilizadas pastagens, com estoque de COS de $154 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e ainda assim sendo superiores a áreas que o uso sempre foram florestas (com mais de 70 anos), com estoque de COS de $148 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Esses valores são superiores aos encontrados nesse trabalho para a mesma profundidade, uma vez que ainda existem pontos dentro da zona 1A que podem ser superiores ao relatado por esses autores. Entende-se que essas áreas tenderam a um novo equilíbrio, mesmo que superiores às áreas que o uso sempre foi utilizado por florestas, possivelmente por consequência de fatores ambientais e antrópicos. Na Figura 16 é apresentado graficamente as médias e medianas dos estoques de COS para as profundidades de solo de 0-30 cm e 0-100 cm.

Figura 16 - Box plot do estoque de COS para profundidades de solo de 0-30 cm (a) e 0-100 cm (b) para zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina.



Legenda: zona5 = Planalto Serrano de São Joaquim; zona4B = Alto Irani e Alto Vale do Rio do Peixe; zona4A = Campos de Lages; zona3C = Noroeste Catarinense; zona3B = Planalto Norte Catarinense; zona3A = Vale do Rio do Peixe e Planalto Central; zona2C = Vale do Rio Uruguai; zona2B = Carbonífera, Extremo Sul e Colonial Serrana; zona2A = Alto Vale do Rio Itajaí; zona1B = Litoral de Florianópolis e Laguna; zona1A = Litoral Norte, Vales dos Tijucas e Rios Itajaí.

5.2.2 Mesorregiões

Os estoques de COS para profundidades de solo de 0-30 cm e 0-100 cm das mesorregiões do Estado de Santa Catarina são mostrados nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

A mesorregião Serrana apresentou a maior média de estoque de COS para profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm, com valores médios de 79 Mg.ha⁻¹ e 158 Mg.ha⁻¹, respectivamente. Já a mesorregião Oeste Catarinense mostrou valores em seguida com estoques médios de COS de 70,4 Mg.ha⁻¹ para profundidades de 0-30 cm e

148,6 Mg.ha⁻¹ para profundidade de 0-100 cm (Figuras 18 e 19). Esses valores conversam diretamente com as zonas edafoclimáticas que apresentaram os maiores estoques de COS nas duas profundidades descritas, como por exemplo, as zonas 5, 4B, 4A e 3A.

Em seguida, a mesorregião Norte Catarinense mostrou valores médios de COS de 70,4 Mg.ha⁻¹ e 140,4 Mg.ha⁻¹ para 0-30 cm e 0-100 cm de profundidade do solo, respectivamente. A mesorregião Grande Florianópolis apresentou 63,6 Mg.ha⁻¹ e 125,9 Mg.ha⁻¹ para 0-30 e 0-100 cm, respectivamente (Figuras 18 e 19).

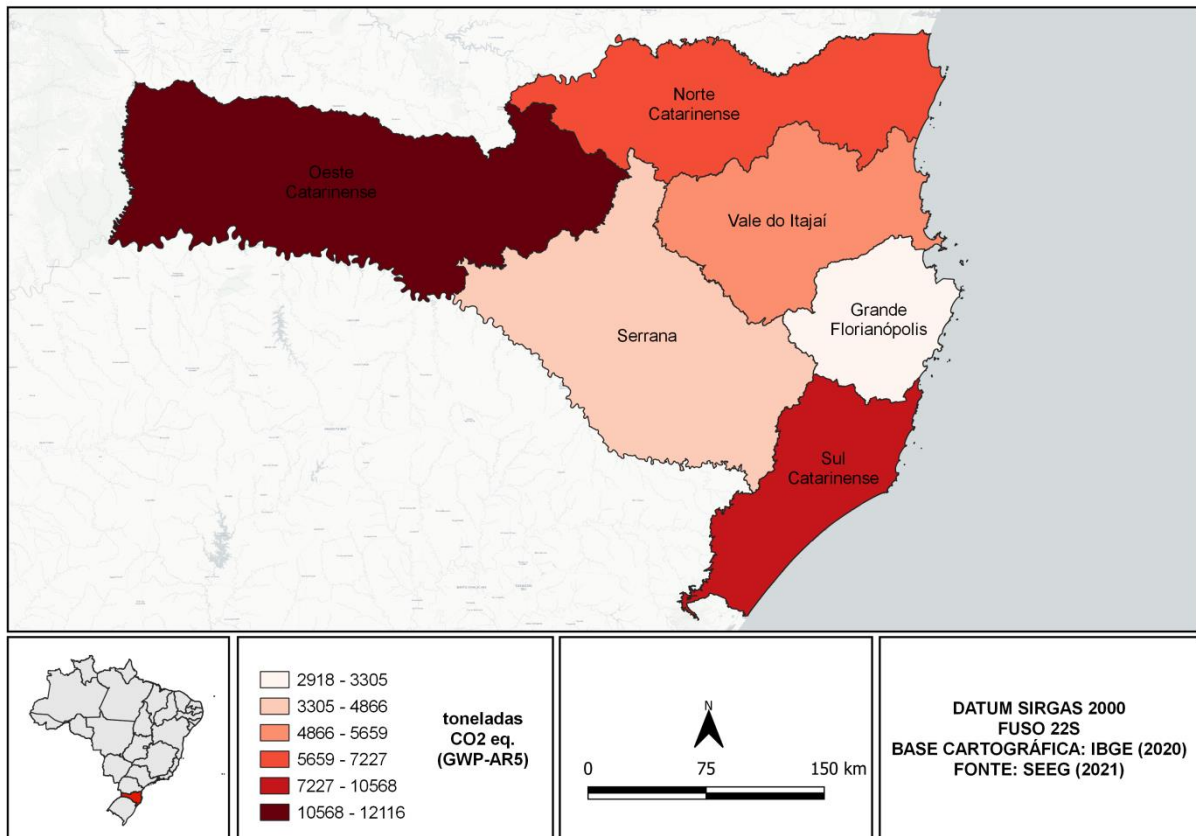
A região Sul do Estado, certamente onde está localizada a mesorregião Sul Catarinense, apresentou as menores médias de COS de todas as mesorregiões com valores de 49,8 Mg.ha⁻¹ para 0-30 cm e 100,7 Mg.ha⁻¹ para 0-100 cm. Nessa mesorregião é importante frisar as áreas alagadas e/ou turfas de Organossolos, principalmente nas cidades de Tubarão, Araranguá, Santa Rosa do Sul e Sombrio onde os teores de COS nos 40 cm são altos, porém não interferindo na discussão de médias e medianas dos dados (Figura 19). A mesorregião do Vale do Itajaí mostrou valores médio de 60,8 Mg.ha⁻¹ para profundidade de solo de 0-30 cm e 120,6 Mg.ha⁻¹ para profundidade de solo de 0-100 cm (Figuras 18 e 19). Essas duas mesorregiões estão incluídas dentro da zona 1B, localizadas em altitudes abaixo de 600 m.

Nessa mesma mesorregião Sul Catarinense encontramos a segunda mesorregião com as maiores emissões de CO_{2eq} registradas em Santa Catarina, segundo SEEG (2021), no ano de 2018 (Figura 17), ficando apenas atrás da mesorregião Oeste Catarinense. A microrregião que mais emitiu CO_{2eq} para a atmosfera foi a microrregião de Tubarão, aproximadamente 6 mil toneladas, possivelmente devido a essa região estar instaladas grandes jazidas de carvão mineral, onde são realizadas intensas atividades de mineração, causando emissões de gases para a atmosfera e contribuindo com a acentuação do efeito estufa, e consequentemente, aquecimento do planeta. O município Capivari de Baixo, região próxima a Tubarão e localizado nessa microrregião do Estado, lidera o *ranking* de emissões de CO_{2eq} com mais de 4,5 mil toneladas comparadas com os demais municípios de Santa Catarina.

Essa região Sul, ainda apesar de demonstrar os menores estoques de COS e as maiores emissões de GEEs para a atmosfera fica em evidência frente a uma narrativa de créditos de carbono, processos de descarbonização e mudanças urgentes na matriz energética do Estado. É importante fazer essa relação, pois não

somente manejos sustentáveis do solo e agricultura conservacionistas podem contribuir para atingir acordos climáticos feitos pelas entidades políticas e civis nas conferências ocorridas nos últimos anos no planeta.

Figura 17 - Emissão de toneladas de CO₂ eq. das mesorregiões do Estado de Santa Catarina.



Nessas regiões também se localizam áreas de turfas, que são regiões que possuem restos vegetais em maior ou menor estado de decomposição que se acumularam em ambiente saturado de água, em especial na região costeira do extremo sul do Estado de Santa Catarina, com a presença maior de Organossolos Háplicos. Apenas nessa área teve um elevado teor de estoque de COS, possivelmente, devido essas características.

Figura 18 - Estoque de COS para as mesorregiões de Santa Catarina na profundidade do solo de 0-30 cm.

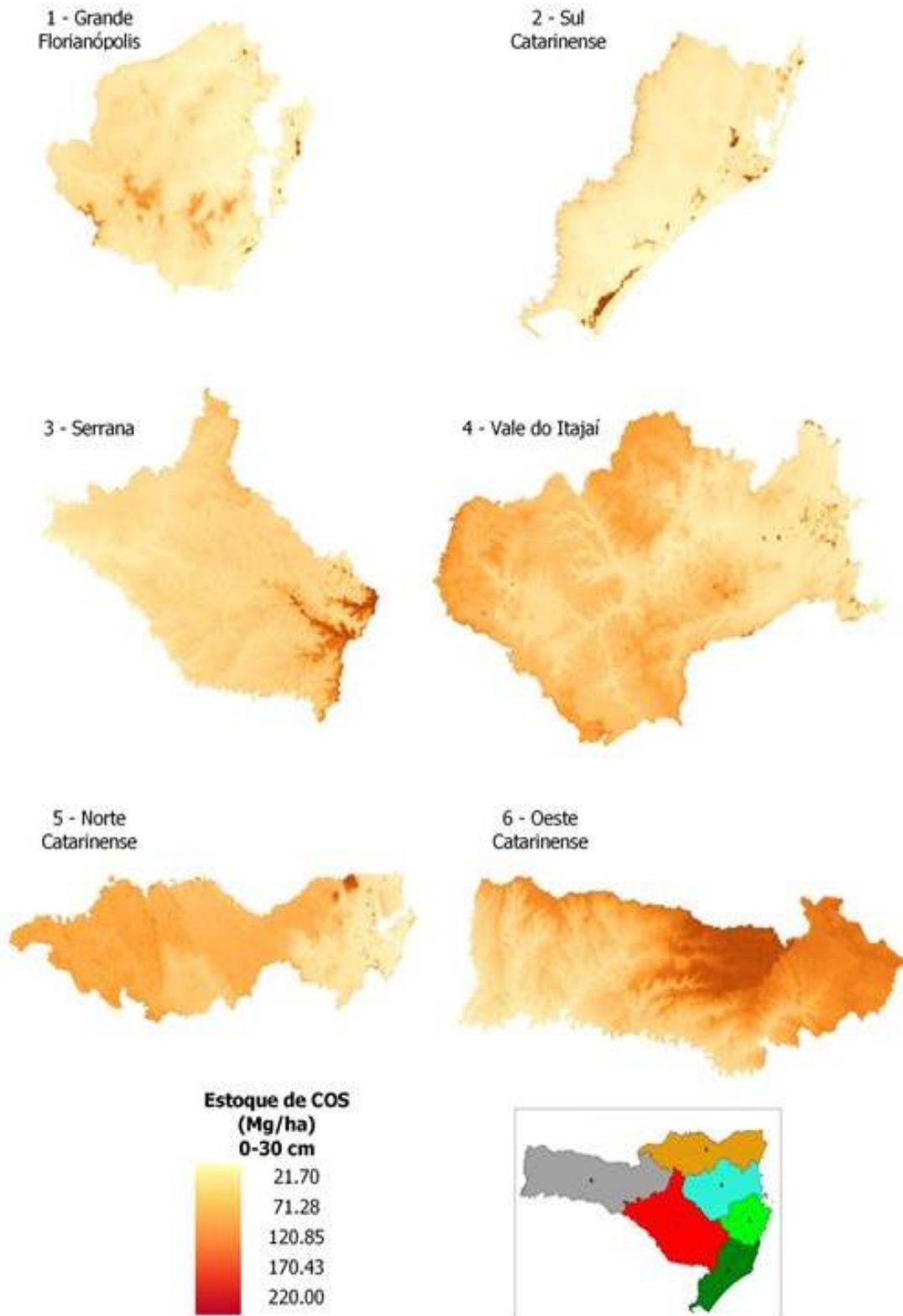
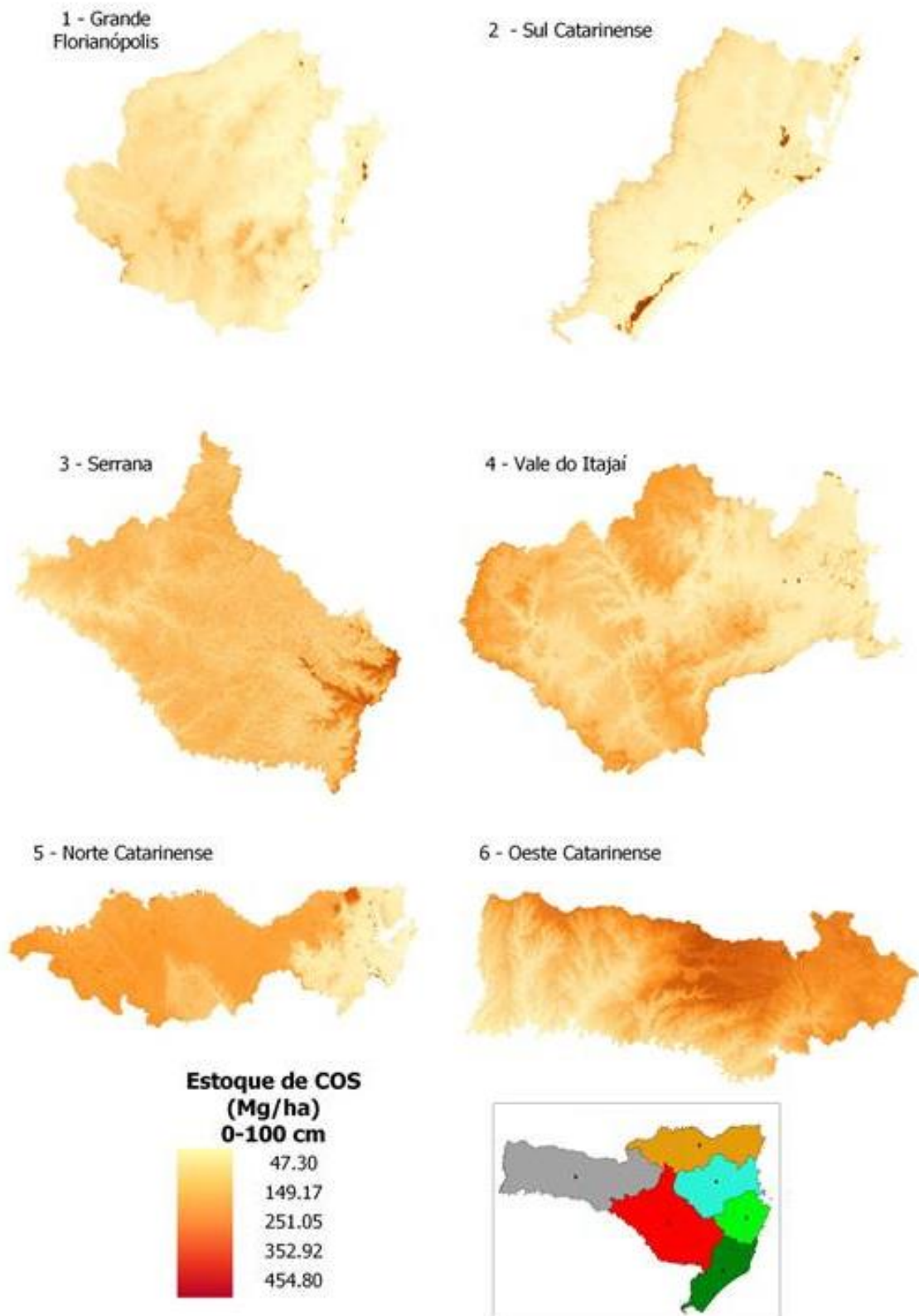
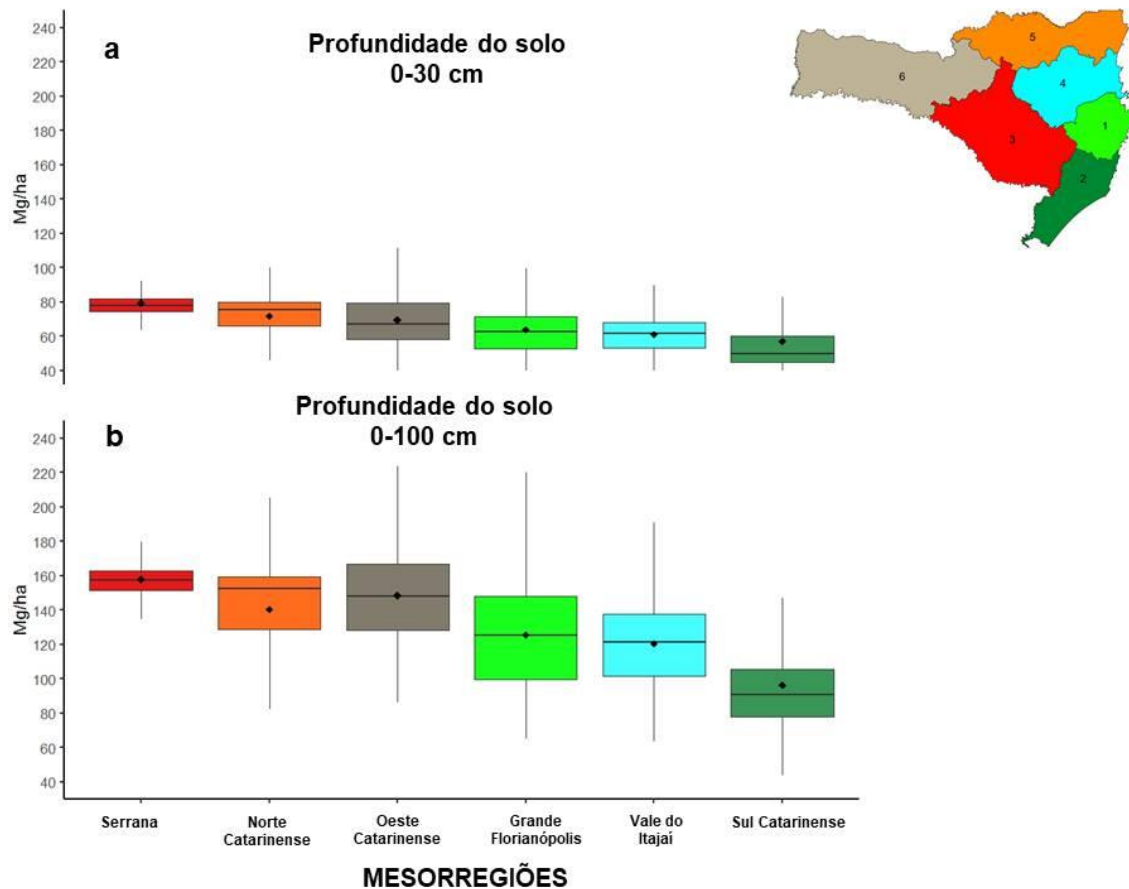


Figura 19 - Estoque de COS para as mesorregiões de Santa Catarina na profundidade do solo de 0-100 cm.



A figura 20 ilustra graficamente as médias e medianas dos estoques de COS para as profundidades de solo de 0-30 cm e 0-100 cm.

Figura 20 - Box plot do estoque de COS para profundidades de solo de 0-30 cm (a) e 0-100 cm (b) para as mesorregiões do Estado de Santa Catarina.



5.2.3 Classes de solos

Para profundidade de solo de 0-30 cm, as classes de solos que apresentaram maiores estoques de COS foram Cambissolo Húmico e Nitossolo Bruno com média de $83 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, seguidos de Latossolo Bruno, Gleissolo Melânico, Latossolo Vermelho e Neossolo Litólico, com $77,8$, $76,8$, 73 e $73 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente. Para profundidade de 0-100 cm, as classes de solos que apresentaram maiores estoques de COS foram Latossolo Bruno, Nitossolo Bruno e Cambissolo Húmico com valores médios de $172,5$, 168 e $162 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. O Latossolo Vermelho, Neossolo Litólico e Nitossolo Vermelho, para 0-100 cm de profundidade de solo, aparecem em seguida com valores médios de COS de 155 , 154 e $152 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

O horizonte A húmico é uma característica presente na maioria desses solos (EMBRAPA, 2018) e os maiores valores de COS encontrados nestas classes podem ser parcialmente explicados também pelas suas grandes proporções de argila. Desse

modo, entende-se que, as argilas conferem grandes áreas superficiais e quantidades de cargas, possibilitando um grande volume de interações organominerais. A argila, portanto, tem uma das propriedades físicas determinantes na estabilização de matéria orgânica no solo, e conseqüentemente, os estoques de COS possuem relação direta com ela, corroborando sua importância no controle desses estoques (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003).

Já as classes de solos, Nitossolo Vermelho, Organossolo Háplico, Cambissolo Háplico e Gleissolo Háplico, apresentaram média de estoque de COS de 72, 65, 64 e 60 Mg.ha⁻¹, para profundidade de 0-30 cm e em relação às demais apresentaram um valor intermediário de estoque de carbono. A classe de Organossolo Háplico possivelmente ficou entre o *ranking* intermediário comparado com as demais classes devido os pontos de estudo serem em menor observação que as outras classes ou até mesmo pela ausência da densidade do solo, causando um baixo teor de estoque de COS para essa classe. Os valores intermediários encontrados para as classes de solos em profundidade de 0-100 cm foram Gleissolo Melânico, Cambissolo Háplico, Organossolo Háplico e Gleissolo Háplico com valores médios de estoques de COS de 139, 132, 122 e 114 Mg.ha⁻¹.

Os Nitossolos Vermelhos apresentam também textura argilosa e muito argilosa, sendo de característica de clima subtropical úmido dos planaltos alto-montanos do sul do Brasil (EMBRAPA, 2018). É importante reforçar a ideia que o potencial para estocar carbono no solo sofre influência por diversos fatores, como por exemplo, condições climáticas locais, tipo de relevo e de manejo de solo adotado, dentre outros fatores que definem as taxas de aumento do COS, sendo complexa a narrativa diante da paisagem como um todo (LAL, 2005; SMITH, 1985). Já os Gleissolos Melânicos são solos com possibilidade de apresentar horizonte H hístico, e de acordo com a Embrapa (2008), horizonte H hístico é característica relacionada ao elevado teor de matéria orgânica, resultado do acúmulo de resíduos vegetais e em variados graus de decomposição.

As classes de solos que fecham a lista com menores teores de COS para o Estado de Santa Catarina são os Gleissolos Sáfico, Argissolos Vermelho-Amarelo, Espodossolos Ferrihumilúvico, Cambissolos Flúvico, Espodossolos Humilúvico e Neossolos Quartzarênico, apresentando valores médios de COS, para profundidade de solo 0-30 cm, de 59,2, 53, 52,8, 51, 41,5 e 37 Mg.ha⁻¹, respectivamente e para 0-100 cm 106,2, 106, 97,9, 97, 81,1 e 74 Mg.ha⁻¹, respectivamente.

Os Neossolos Quartzarênicos são solos com textura muito arenosa, com areia ou areia franca, assim apresenta baixa capacidade de estocar carbono (ARAUJO FILHO et al, 2000; EMBRAPA, 2018), se em condições de boa drenagem. Essa relação dos estoques de carbono com a textura do solo é corroborada diretamente com solos mais arenosos que tendem a apresentar maior perda de carbono (LAL, 2007), sendo justificado, portanto, através de uma maior lixiviação, menor agregação das partículas do solo e área superficial menor que argila, bem como sua baixa atividade.

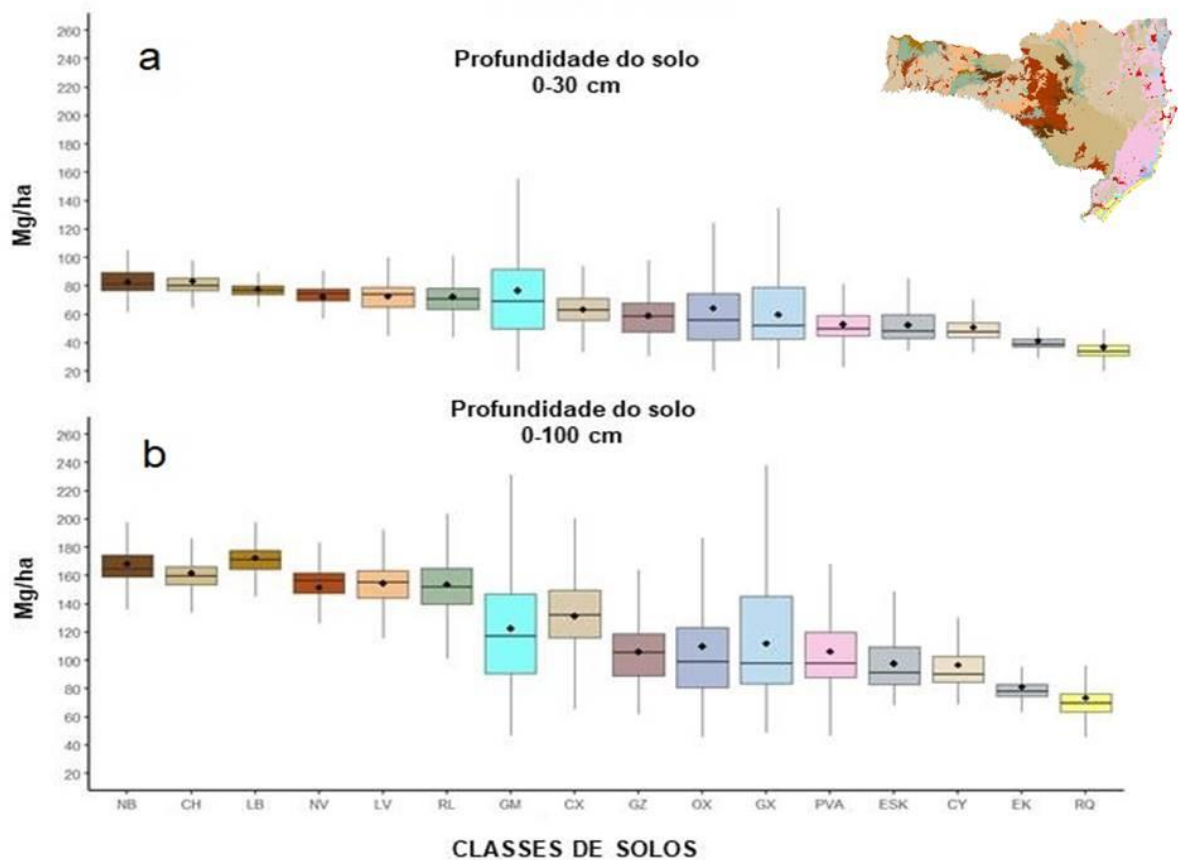
Entretanto, os maiores estoques de COS em Neossolos Quartzarênicos de todas as classes de solos do Estado do Rio Grande do Sul (RS) foi relatado com valor médio de 162 Mg.ha⁻¹ (TORQUINST et al., 2009). Esse resultado é o inverso para essa mesma classe e profundidade de solo (0-30 cm) para o Estado de Santa Catarina, que obteve uma média de 37 Mg.ha⁻¹, sendo a classe de solo que apresentou a menor média em relação às demais, mesmo que o tamanho das áreas, tanto para o RS e para SC, 829 e 979 km², respectivamente, são semelhantes.

Para a classe dos Latossolos Bruno, Torquinst et al. (2009) encontraram uma média de 9,1 ± 2,7 kg/m² (aproximadamente 91 Mg.ha⁻¹) para esse solo no RS, sendo valores maiores que encontrados neste trabalho, com valor médio de 77,8 Mg.ha⁻¹, para as mesmas profundidades de solo (0-30 cm). Já Bayer et al. (2002) relatam em profundidade de solo de 0-250 cm valores de 128,3 Mg.ha⁻¹ em áreas de florestas e 122 Mg.ha⁻¹ em pastagem nativa. Esses valores também são muito menores comparados com este trabalho, pois o valor médio encontrado na profundidade do solo 0-100 cm foi de 172,5 Mg.ha⁻¹, sendo altamente superior. Nossos valores divergem dessa literatura citada, mesmo ambos os trabalhos ocorrendo em altitudes mais elevadas (> 800 m) no Sul do Brasil. O mais importante é entender que o efeito das temperaturas médias mais baixas e precipitações anuais mais altas nessas áreas têm um efeito acentuado na diminuição das taxas de decomposição do COS, levando ao seu acúmulo no solo, de modo que argilominerais de carga variável, como óxidos de Fe, que são predominantes em Latossolos, favoreçam a estabilização do COS (TORQUINST et al., 2009).

Levando em conta a área coberta pelas classes de solo de Santa Catarina, mais COS está presente em Cambissolos Húmicos, Nitossolos Brunos e Latossolos Brunos, que correspondem somadas 27,84% do estoque total estimado de carbono do Estado. Outra observação é que somente as classes de Cambissolos somadas

apresentam uma área total de 52,15% de todo o Estado, aproximadamente 49,7 mil km², com um estoque total de 433,9 Mt de carbono no solo, sendo valores superiores ao que Torquinst et al. (2009) encontraram 173,3 Mt, na profundidade do solo 0-30 cm no Estado do RS. Na figura 21 ilustra graficamente as médias e medianas dos estoques de COS para as profundidades de solo de 0-30 cm e 0-100 cm para as classes de solo no Estado de Santa Catarina.

Figura 21 - Box plot do estoque de COS para profundidades de solo de 0-30 cm (a) e 0-100 cm (b) para as classes de solos (2º nível categórico) do Estado de Santa Catarina.



Legenda: CX = Cambissolo Háplico; CH = Cambissolo Húmico; CY = Cambissolo Flúvico; LB = Latossolo Bruno; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; NB = Nitossolo Bruno; RL = Neossolo Litólico; RQ = Neossolo Quartzarênico; GM = Gleissolo Melânico; GZ = Gleissolo Sáfico; GX = Gleissolo Háplico; PVA = Argissolo Vermelho-Amarelo; ESK = Espodossolo Ferrihumilúvico; EK = Espodossolo Humilúvico; OX = Organossolo Háplico.

5.3 POTENCIAL DE SEQUESTRO DE COS

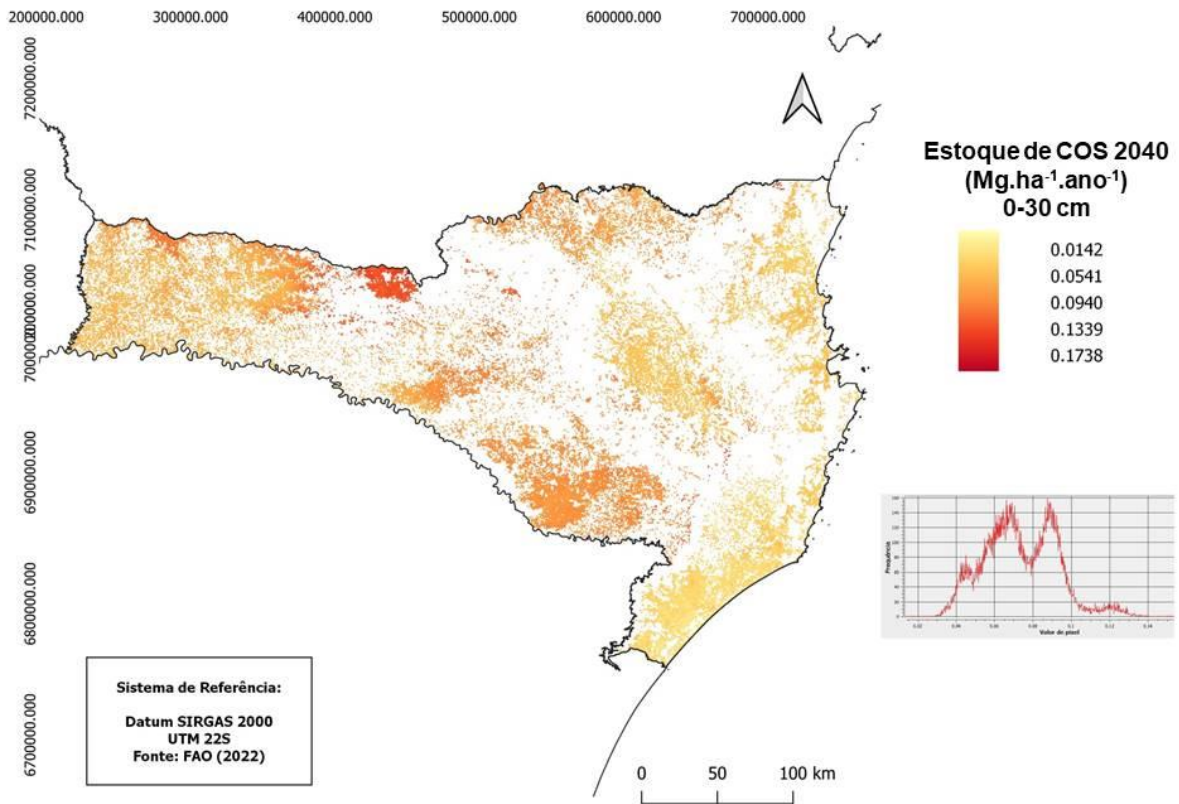
Nesse item, os resultados e discussões virão debater acerca das potencialidades que o Estado de Santa Catarina tem em sequestrar carbono

atmosférico, partindo da premissa de áreas agricultáveis e possíveis intervenções e manejo de solo para áreas específicas, segundo a FAO (2022b).

Essa implementação de práticas de manejo sustentável do solo (MSS) (FAO, 2022b) centrada no estoque de COS para a manutenção de solos que são mais ricos em carbono e para o sequestro em áreas potenciais direcionam uma mudança na compensação de emissões globais de GEEs. Contudo, as práticas de MSS centradas em COS não somente vão mitigar as emissões de GEEs, mas também trará múltiplos benefícios como a melhoria da segurança alimentar, uma maior chance de crédito agrícola, provisão de serviços ecossistêmicos, bem como com a contribuição dos ODS na construção de uma resiliência no combate a eventos extremos de mudanças climáticas.

Baseado nos dados legados da FAO (2022b), geramos um mapa que traz as áreas potenciais para sequestrar carbono atmosférico. Na figura 22, o mapa representa os estoques de COS projetados ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$) em 2040, após 20 anos de implementação de práticas de manejo sustentável do solo (MSS) que geram um aumento de 5% nas entradas de carbono, em uma profundidade do solo de 0-30 cm.

Figura 22 - Potencial de estoque de COS para profundidades de solo de 0-30 cm para do Estado de Santa Catarina.



Os valores da Figura 22 variaram de taxa média anual de estoque de COS de 0,0142 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ até 0,1738 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹.

Para a FAO (2022b), existem grandes evidências científicas que afirmam em conservar os atuais estoques de COS e promover seu sequestro onde exista potencial, e assim colaborar na mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Contudo, o SSM acontece diretamente no agricultor, o que demanda mais investimentos em solos e ações reais em nível de campo para liberar o potencial do COS. O aumento de COS é uma das opções mais econômicas para adaptação e mitigação das mudanças climáticas e para combater a desertificação, a degradação dos solos e a insegurança alimentar (IPCC, 2019).

5.4 POTENCIAL DE SEQUESTRO DE PARA SUB-ÁREAS

5.4.1 Zonas Edafoclimáticas

Para a discussão dos resultados em função das sub-áreas e suas potencialidades de sequestrar carbono atmosférico são apresentados graficamente nas figuras 23, 24 e 25 em relação as taxas médias anuais. Esse gráfico das zonas edafoclimáticas está apresentado na figura 23.

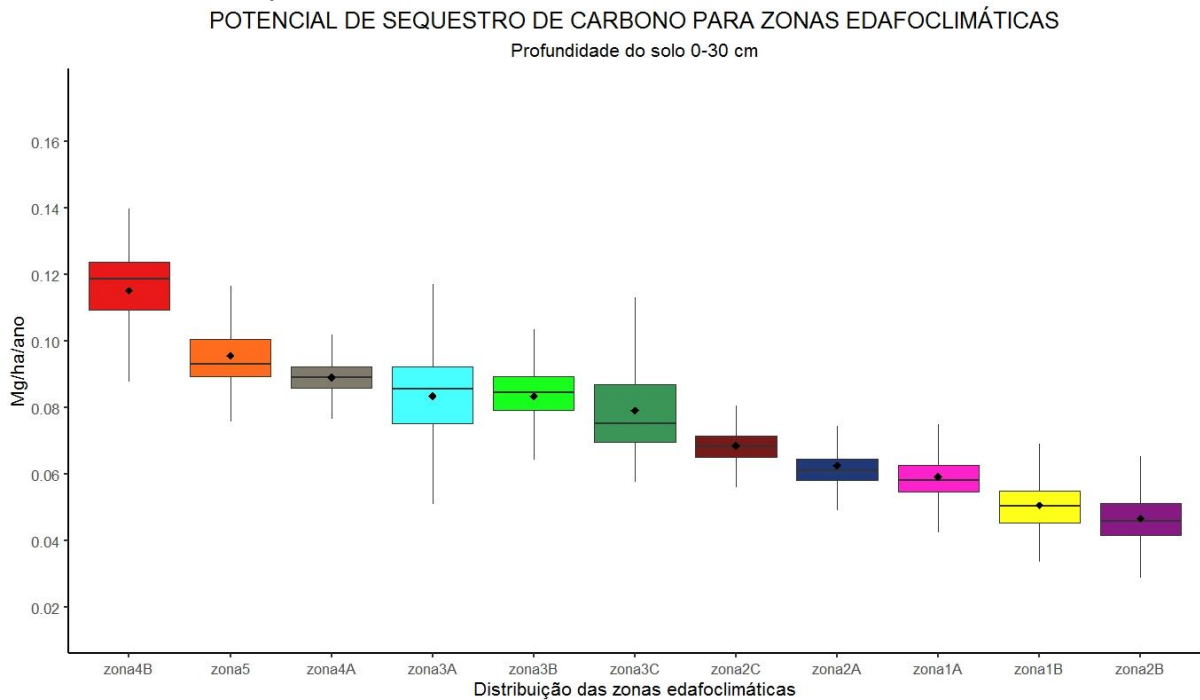
As zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina que apresentaram as maiores médias de taxa relativa ao ano de potencialidade para sequestrar COS foram as zonas edafoclimáticas Alto Irani e Alto Vale do Rio do Peixe (zona 4B), Planalto Serrano de São Joaquim (zona 5) e Campos de Lages (zona 4A), respectivamente com médias de 0,115, 0,095 e 0,089 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (Figura 22). Ao mesmo tempo, comparando essas informações com o estoque de COS (VASQUES et al., 2021), onde a zona 5 apresentou a maior média por todo o Estado, seguido da zona 4B, assim, entende-se que essas duas zonas edafoclimáticas são os holofotes para trabalhar com SSM, uma vez que estão em destaque com potencialidades para sequestrar carbono atmosférico. Essas zonas edafoclimáticas também estão localizadas no Estado em altitudes próximas e/ou maiores que 1000 m (Figura 15), o que confere características de comportamento típico de regiões de altitude do Sul do Brasil (BARETTA et al, 2005), e que pode favorecer o acúmulo de MOS, e conseqüentemente, a manutenção e/ou aumento dos estoques de COS.

Em seguida, as zonas edafoclimáticas Vale do Rio do Peixe e Planalto Central (zona 3A), Planalto Norte Catarinense (zona 3B), Noroeste Catarinense (3C) e Vale do Rio Uruguai (zona 2C) apresentam na sequência decrescente de suas médias de zonas com potencialidade de sequestrar carbono com valores de 0,084, 0,083, 0,079 e 0,068 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente, comparadas com as demais. Essas zonas também estão de acordo com as áreas de estoque de COS (Figura 22).

As zonas edafoclimáticas Alto Vale do Rio Itajaí (zona 2A), Litoral Norte, Vales dos Rios Itajaí e Tijucas (zona 1A), Litoral de Florianópolis e Laguna (zona 1B) e Carbonífera, Extremo Sul e Colonial Serrana (zona 2B) mostraram com as menores médias de taxa relativa anual do Estado de Santa Catarina comparada com as demais zonas edafoclimáticas com valores de 0,062, 0,059, 0,050 e 0,0456 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente (Figura 22).

Na figura 23 ilustra graficamente as médias e medianas do potencial de sequestro de COS para as profundidades de solo de 0-30 das zonas edafoclimáticas no Estado de Santa Catarina.

Figura 23 - Box plot do potencial de sequestro de COS para profundidades de solo de 0-30 cm para as zonas edafoclimáticas do Estado de Santa Catarina.



Legenda: zona5 = Planalto Serrano de São Joaquim; zona4B = Alto Irani e Alto Vale do Rio do Peixe; zona4A = Campos de Lages; zona3C = Noroeste Catarinense; zona3B = Planalto Norte Catarinense; zona3A= Vale do Rio do Peixe e Planalto Central; zona2C = Vale do Rio Uruguai; zona2B = Carbonífera, Extremo Sul e Colonial Serrana; zona2A = Alto Vale do Rio Itajaí; zona1B = Litoral de Florianópolis e Laguna; zona1A = Litoral Norte, Vales dos Tijucas e Rios Itajaí.

Os sistemas de uso e manejo da terra em diferentes zonas edafoclimáticas em Santa Catarina, como o sistema de plantio direto (SPD), os sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) sob plantio direto e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), a adoção de reflorestamentos, o manejo das pastagens, entre outros, podem modificar consideravelmente os estoques de C e a emissão de GEE do solo para a atmosfera e, conseqüentemente, ser importante no que se refere à mitigação do aquecimento global do Estado.

O elevado potencial de estocar C nas zonas, principalmente, 4B, 5 e 4A, inseridas concomitante no bioma Mata Atlântica apresentam positividade para os próximos 20 anos, mesmo considerando que a maior parte desse bioma e/ou zonas edafoclimáticas já se encontram sob intervenção antrópica, sob uso agrícola e sem a vegetação nativa original (CARAVALHO et al., 2010). Em sistemas de manejo como

reflorestamento, Fearnside (2001) e Carvalho et. al (2010) já ressaltavam uma grande contribuição do setor florestal tanto brasileiro como catarinense na mitigação do efeito estufa não está somente no potencial de áreas para sequestro de C, mas também na manutenção dos estoques atuais de C, ou seja, evitar a emissão de CO₂ por meio da degradação acelerada ou queima do material orgânico.

5.4.2 Mesorregiões

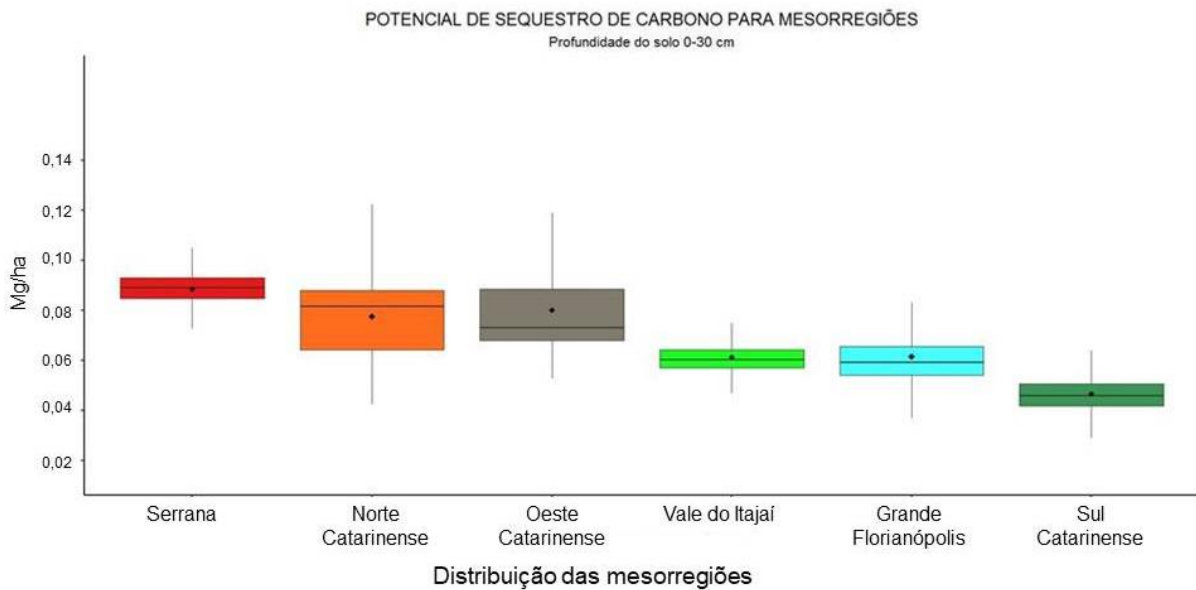
As médias e medianas do potencial de estoque de COS das mesorregiões do Estado de Santa Catarina são mostrados na figura 24. As mesorregiões apresentaram a mesma distribuição decrescente tanto para estoques de COS e para as potencialidades de sequestrar carbono atmosférico.

A mesorregião Serrana foi a sub-área que apresentou a maior média de taxa relativa anual para potencialidade de sequestrar carbono em Santa Catarina em comparação com as demais sub-áreas das mesorregiões com valor de 0,088 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e, seguida da mesorregião Oeste Catarinense que apresentou valor de 0,080 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (Figura 24).

A mesorregião Norte Catarinense demonstrou valores de média de taxa relativa anual de 0,077 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, sendo a terceira mesorregião comparada com as demais para potencialidades em sequestrar carbono atmosférico. Já a mesorregião Vale do Itajaí apresentou valores de média de 0,061 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (Figura 24).

As mesorregiões que apresentaram menores médias de taxa relativa anual para potencialidade de sequestrar carbono foram Grande Florianópolis e Sul Catarinense, com valores de 0,061 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,046 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente (Figura 24).

Figura 24 - Box plot do potencial de sequestro de COS para profundidades de solo de 0-30 cm para as mesorregiões do Estado de Santa Catarina.

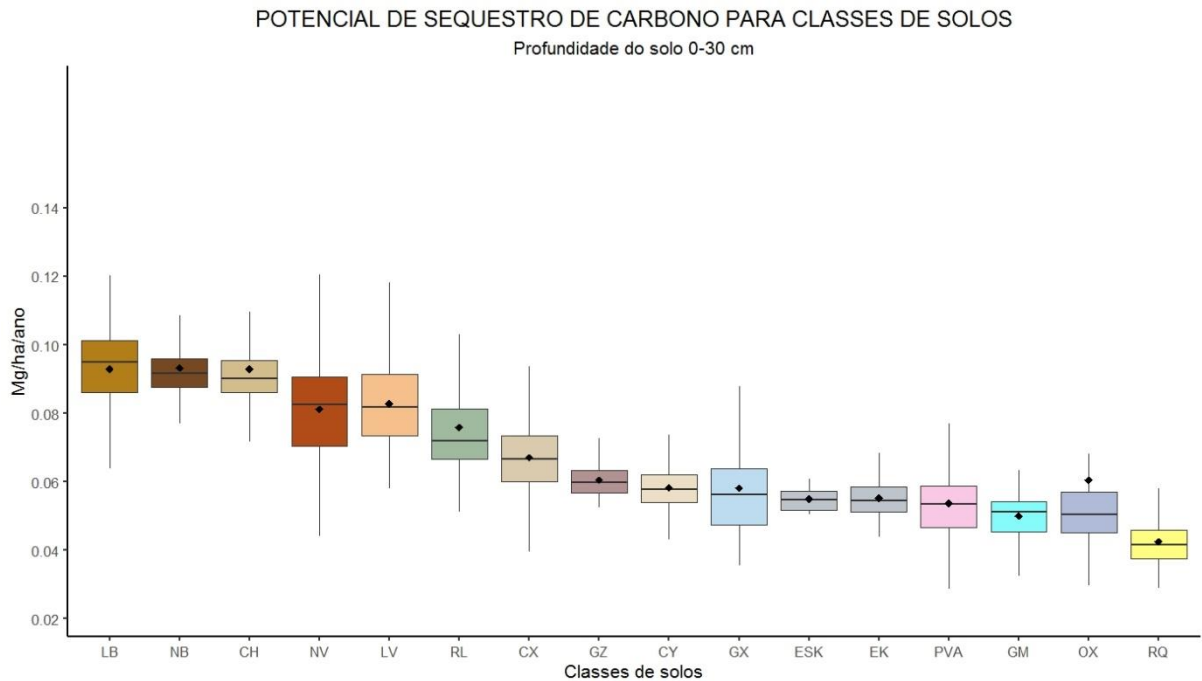


5.4.3 Classes de solos

As médias e medianas do potencial de estoque de COS para as classes de solos do Estado de Santa Catarina são mostrados na figura 25. As classes de solos do Estado de Santa Catarina que apresentaram as maiores médias de taxa relativa ao ano de potencialidade para sequestrar COS foram Latossolo Bruno (LB), Nitossolo Bruno (NB) e Cambissolo Húmico, todas as classes apresentando valor de $0,092 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Em seguida, as classes de solo Latossolo Vermelho (LV), Nitossolo Vermelho (NV), Neossolo Litólico (RL) e Cambissolo Háplico (CX) aparecem em seguida com médias de taxa relativa ao ano, respectivamente, de 0,082, 0,081, 0,075 e $0,067 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ (Figura 25).

Figura 25 - Box plot do potencial de sequestro de COS para profundidades de solo de 0-30 cm para as classes de solos do Estado de Santa Catarina.



Legenda: CX = Cambissolo Háplico; CH =Cambissolo Húmico; CY Cambisslo Flúvico; LB = Latossolo Bruno; LV = Latossolo Vermelho; NV = Nitossolo Vermelho; NB = Nitossolo Bruno; RL = Neossolo Litólico; RQ = Neossolo Quartzarênico; GM = Gleissolo Melânico; GZ = Gleissolo Sáfico; GX = Gleissolo Háplico; PVA = Argissolo Vermelho-Amarelo; ESK = Espodossolo Ferrihumilúvico; EK = Espodossolo Humilúvico; OX = Organossolo Háplico.

As classes de solo Gleissolo Sáfico (GZ) e Organossolo Háplico (OX) ambas apresentaram médias de taxa relativa ao ano com valor de $0,060 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, Cambissolo Flúvico (CY) e Gleissolo Háplico (GX) ambas apresentaram valor de $0,058 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ e as classes de solo Espodossolo Humilúvico (EK) e Espodossolo Ferrihumilúvico (ESK) ambas demonstraram valores de média de $0,055 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$. A classe de solo que possui alto teor de carbono orgânico como OX apresentou no ranking de medianas comparadas com as demais classes de solo em valores intermediários, uma vez que a área geográfica dessa classe é menor comparada com as demais (Tabela 3), mas com uma alta concentração de potencial e estoque de COS devido a áreas de turfas onde essa classe de solo está localizada. Outro ponto a se frisar é que esse mapa de potencial de estoque de COS (FAO, 2022b) trata de áreas agricultáveis, e possivelmente esses pontos de C observados estão inseridos em áreas nativas.

As menores médias de taxa relativa anual para potencialidade de sequestrar carbono foram as classes de solos Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Gleissolo Melânico (GM) e Neossolo Quartzarênico (RQ) com valores de $0,053$, $0,050$ e $0,042$

Mg.ha⁻¹.ano⁻¹. Como os RQ são solos de textura arenosa, e em condições de boa drenagem, essa classe apresenta baixa capacidade de estocar carbono. A entrada de sistemas agrícolas e abordagens integrativas (FAO, 2022b) poderão contribuir na mudança desse estoque e potencial de sequestrar carbono em classes de solos como essa.

6 CONCLUSÃO

A partir de técnicas de geoprocessamento foi possível identificar as áreas que possuem os maiores estoques de COS e áreas potenciais de sequestro de carbono atmosférico, bem como identificar quais são essas áreas a redor do Estado. As áreas com maiores estoques de COS apresentaram as maiores potencialidades de sequestro de carbono atmosférico, rejeitando a hipótese de que as menores áreas seriam os potenciais para os sumidouros de carbono no solo.

Desse modo, as zonas edafoclimáticas que apresentaram as maiores potencialidades de sequestrar carbono no Estado de Santa Catarina em profundidade do solo de 0-30 e 0-100 cm foram Alto Irani e Alto Vale do Rio do Peixe (zona 4B), Planalto Serrano de São Joaquim (zona 5) e Campos de Lages (zona 4A).

Já as mesorregiões Serrana e Norte Catarinense foram as sub-áreas que demonstraram as maiores potencialidades em sequestrar carbono atmosférico ao redor do Estado de Santa Catarina e os maiores estoques de COS, para as profundidades 0-30 cm e 0-100 cm.

As classes de solos (2º nível categórico) Latossolo Bruno, Nitossolo Bruno e Cambissolo Húmico demonstraram as potencialidades mais altas para sequestrar carbono. Os maiores estoques de COS foram as classes de solo Nitossolo Bruno, Cambissolo Húmico e Latossolo Bruno para profundidade de solo 0-30 cm e 0-100 cm.

REFERÊNCIAS

- ABDELBAKI, A. M. Evaluation of pedotransfer functions for predicting soil bulk density for U.S. soils. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, n. 4, p. 1611–1619, 2018.
- ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres - o caso do cerrado brasileiro. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 30 p. (Documentos, 105).
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDERSON, K. Duality in climate science. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 12, p. 898–900, 2015.
- ARANTES, A. E., FERREIRA, L. G., COE, M. T. (2016). The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 117, 66–78. Disponível em: <[https:// doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008)>.
- ARAÚJO FILHO, J. C. et al.. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. Rio de Janeiro: Embrapa solos, Boletim de Pesquisa 11, 382. 2000.
- AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. (Embrapa Florestas. Documentos, 73).
- ARL, V.; CHRISTOFFOLI, P. I.; FAYAD, J. A. Sistema de plantio direto de hortaliças: sistema de plantio direto de hortaliças: Uma práxis da transição agroecológica com a agricultura familiar. In: Fayad, J.A.; ARL, V.; Comim, J.J.; Mafra, A.L.; Marchesi, D.R. (Orgs.). Sistema de plantio direto de hortaliças, 2019. v. 1, p. 39-54.
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; PINTO, H. P. **Sustentabilidade no agronegócio brasileiro**. [S.l.]: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2012. 51 p.
- AVILLETZ, F.; CARVALHO M. A importância de uma gestão sustentável do solo para o crescimento futuro da agricultura portuguesa. **Cultivar Cadernos de Análise e Prospetiva**, N.2, GPP do MAP, 27-40, 2015.
- BALDOTTO, M. A. et al. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 301–309, 2015.

BALESDENT, J.; CHENU, C. & BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil Tillage Res.**, 53:215-230, 2000.

BALOTA, E. L. et al. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 641–649, 1998.

BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; FIGUEIREDO, S.R. & KLAUBERG FILHO, O. Efeito do monocultivo de Pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no planalto sul catarinense. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:715- 724, 2005.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soil of the world. **Eur. J. Soil. Sci.** 47, 151-163, 1996.

BATJES, N. H. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. **Soil Use and Management**, v. 21, n. 1, p. 22–24, 2005.

BATJES, N. H. Technologically achievable soil organic carbon sequestration in world croplands and grasslands. **Land Degradation and Development**, v. 30, n. 1, p. 25–32. 2019.

BAYER, C., D.P. DICK, G.M. RIBEIRO, K.K. SCHEUERMANN. 2002. Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no-tillage effect. **Ciencia Rural** 32:401–406.

BRADFORD, M. A., C. J. CAREY, L. ATWOOD, D. BOSSIO, E. P. FENICHEL, S. GENNET, J. FARGIONE, J. R. B. FISHER, E. FULLER, D. A. KANE, J. LEHMANN, E. E. OLDFIELD, E. M. ORDWAY, J. RUDEK, J. SANDERMAN, S. A. WOOD. 2019. Soil carbon science for policy and practice. **Nature Sustainability** 2:1070:1072.

BRASIL. Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União, 29 dez. 2009. Seção 1, p. 109. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Lei/L12187.htm. Acesso em: 10 jul. 2021.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa: informações gerais e valores preliminares. 2009a. Disponível em: http://ecen.com/eee75/eee75p/inventario_emissoes_brasil.pdf. Acesso em: 27 jul. 2022.

BRASIL. Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010. Regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências. Diário Oficial da União, 10 dez. 2010. Seção 1, p. 4.

BRASIL. Decreto nº 6263, de 21 de novembro de 2007. Plano Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC. Disponível em: <https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/pdf/plano-nacional-sobre-mudanca-do-clima-brasil-pnmc.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. (2012). Plano setorial de mitigação e adaptação às mudanças climáticas para consolidação da economia de baixa emissão de carbono na agricultura (173 p.). Brasília: MAPA/ACS. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudança do Clima e Florestas. Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado (PPCerrado) e Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm): fase 2016-2020. Brasília, DF : MMA, 2018. Publicações apresentadas em 3 volumes com títulos intendentos e paginações sequenciadas. Disponível em: http://combateaodesmatamento.mma.gov.br/images/conteudo/Planos_ultima_fase.pdf. Acesso em: 11 ago. 2022..

BERNOUX M. et al. Cropping Systems, Carbon Sequestration and Erosion in Brazil: A Review. **Sustainable Agriculture**, v. 23, n. 2006, p. 1–8, 2006.

CALDAS, E. L. Políticas de Mudanças Climáticas. *Confins* [Online], 46, 2020. Acessado em 28 de julho de 2022. Disponível em > < <http://journals.openedition.org/confins/31687>> DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.31687>.

CARVALHO, J.L.N.; AVANZI, J.C.; SILVA, L.M.N.; MELLO, C.R. de; CERRI, C.E.P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.277-289, 2010

CASSOL, P. C. et al. Changes in organic carbon in soil of natural grassland converted to *Pinus taeda* plantations at three ages. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 545-558, 2019.

CERRI, C. E. P. et al. Modeling Soil Carbon from Forest and Pasture Ecosystems of Amazon, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 6, p. 1879–1887, 2003.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 777–788, 2005.

DAI, W.; HUANG, Y. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China. **Catena**, v. 65, n. 1, p. 87–94, 2006.

DENARDIN, R. B. N. et al. Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó - SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 59-69, 2014.

DHILLON, R. S.; VON WUEHLISCH, G. Mitigation of global warming through renewable biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 48, p. 75–89, 2013.

DINAKARAN, J. et al. The chronological advancement of soil organic carbon sequestration research: A review. Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - **Biological Sciences**, v. 84, n. 3, p. 487–504, 2014.

DIXON, R. K. Sistemas agroforestales y gases de invernadero. **Agroforesteria en las Américas**, v. 2, n. 7, p. 22-26, jul./set. 1995.

DORTZBACH, D. et al. Estoque de C e abundância natural de ¹³C em razão da conversão de áreas de floresta e pastagem em bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 6, 2015.

DORTZBACH, D.; VIEIRA, V. F.; TRABAQUINI, K.; BLAINSKI, E.; FRONZA, E.; LOSS, A. Estimativa das emissões de gases de efeito estufa do setor agropecuário de Santa Catarina, Brasil. **Agroindustrial Science**, v.11, p.305-313, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.03.08>>.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: 2018.

EMBRAPA, 2009. **Transformações do carbono no solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. 36p. – (Documentos/Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN Online 2176-5081; 264).

EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina). **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico do Estado de Santa Catarina**, 1999. (CD).

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA - EPAGRI. Sistema de produção para cebola: Santa Catarina (4ª revisão). Florianópolis: 2013

FAO. **Zonificación agroecológica: guia general**. Roma, 1997. 82p. (FAO. Boletín de Suelos, 73).

FAO; CMCC, 2017. **Global Soil Organic Carbon Database (at 30 arcsec) Technical Report**. 47p.

FAO; ITPS, 2018. **Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap) Technical Report**. Rome. 162 pp.

FAO & ITPS. 2021. **Recarbonizing Global Soils - A technical manual of recommended sustainable soil management. Volume 3: Cropland, Grassland, Integrated systems, and farming approaches - Practices Overview**. Rome, FAO. Disponível em:
<https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb6595en/>.

FAO, 2022a. **Global Soil Partnership**. Disponível em:
 <<https://www.fao.org/global-soil-partnership/intergovernmental-technical-panel-soils/>> Acesso em: 12 ago. 2022.

FAO. 2022B. GLOBAL SOIL ORGANIC CARBON SEQUESTRATION POTENTIAL MAP – SOCSEQ V.1.1. TECHNICAL REPORT. ROME.
 Disponível em: < <https://doi.org/10.4060/cb9002en> >.

FEARNSIDE, P.M. The potential of Brazil's forest sector for mitigating global warming under the Kyoto Protocol. **Mitig. Adapt. Strat. Global Change**, 3:355-372, 2001.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. 4 p. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 69).

FERREIRA, P. D. S. et al. As perspectivas e divergências acerca do aquecimento global antropogênico / The perspectives and divergences about anthropogenic global warming. **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 51, p. 728, 2017.

FIDALGO, E. C. C. et al. (2007) **Estoque de carbono nos solos do Brasil – Dados eletrônicos**. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892 ; 121).

FOGAÇA, G. B. **Relação do estoque de carbono do solo com a cobertura do solo**. (2021). Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/226715>.

GASPER, A. L. et al. Inventário florístico florestal de Santa Catarina: espécies da Floresta Ombrófila Mista. **Rodriguesia** 64, 201–210 (2013).

GIANETTI, G. W.; FERREIRA FILHO, J. B. DE S. O Plano e Programa ABC: uma análise da alocação dos recursos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 59, n. 1, p. 1–15, 2021.

GOMES, L. C. et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, n. January, p. 337–350, 2019.

GONÇALVES, T. S. A floresta estacional decidual no Brasil: distribuição geográfica e influência dos aspectos pedogeomorfológicos na vegetação. **Revista Monografias Ambientais**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 144–153, 2015. DOI: 10.5902/2236130815213. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/15213>. Acesso em: 17 ago. 2022.

GOTADO, R. et al. Distribuição espacial e temporal das chuvas no estado de Santa Catarina. **Geosul**, v. 33, n. 67, p. 253–276, 2018.

GRANDY, A. S., G. P. ROBERTSON. 2007. Land-Use Intensity Effects on Soil Organic Carbon Accumulation Rates and Mechanisms. **Ecosystems** 10:59-74.

GUGEL, J.T.; Cebola. In: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - Epagri, Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola - Cepa. Síntese anual da agricultura de Santa Catarina 2016-2017. Florianópolis: Epagri; Cepa, 2018. p. 47-52. Disponível em: https://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/publicacoes/Sintese_2016_17_site.pdf

HABERMANN, E. et al. Efeito das Mudanças Climáticas em Plantas Cultivadas e Nativas: Atual Estado das Pesquisas Brasileiras. **Avanços e Atualidades na Botânica Brasileira, Stricto Se**, p. 109-124, 2020.

HENGL, T. et al. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. **PLoS ONE**, v. 10, n. 6, p. 1–26, 2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Área Territorial Oficial - Consulta por Unidade da Federação, 2020.

IEA, 2022. International Energy Agency. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: 22 dez. 2022.

INSTITUTO DE MANEJO E CERTIFICAÇÃO FLORESTAL E AGRÍCOLA (IMAFLOA). **Análise de evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012)**. São Paulo: Observatório do Clima, 2014, 32 p.

IPCC. 2019a. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Switzerland, IPCC.

IPCC 2019b. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Switzerland, IPCC.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

JENNY, H., 1941. Factors of soil formation. **McGraw-Hill**, New York.

JESUS, K.N., ALBUQUERQUE, E.R.G.M., SAMPAIO, E.V.S.B., SALES, A., 2019. Estoques de carbono em solos de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física** 12, 714-721.
<http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p714-721>

JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. the Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 423–436, 2000. Disponível em: < [http://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](http://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2) >.

JONES, M. B.; DONNELLY, A. Carbon sequestration in temperate grassland ecosystems and the influence of management, climate and elevated CO₂. **New Phytologist**, v. 164, n. 3, p. 423–439, 2004.

KON KAM KING, J. et al. Soil sciences and the French 4 per 1000 Initiative—The promises of underground carbon. **Energy Research and Social Science**, v. 45, n. June, p. 144–152, 2018.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Glob Change Biol.** 1–17. 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1111/gcb.14054> >.

LAL, R. Beyond COP21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 71, n. 1, p. 20A–25A, 2016.

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 (12), p. 943-956., 2007.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, n. 1-3, p. 242-258, dez. 2005.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 1-22, 2004a.

LAL, R. Carbon emission from farm operations. **Environment International**, v. 30, n. 7, p. 981-990, 2004b.

LAL, R. Soil erosion and the global carbon budget. **Environment International**, v. 29, n. 4, p. 437-450, 2003.

LAL, R.; KIMBLE, J. M. Conservation tillage for carbon sequestration. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 49, n. 1-3, p. 243-253, 1997.

LEMOS, A. L. F.; VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. **As florestas e o painel de mudanças climáticas da ONU**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 32, p. 153-192, set. 2010.

LINDBERG, V. 2000. LSU Geology & Geophysics. Disponível em: <https://www.geol.lsu.edu/jlorenzo/geophysics/uncertainties/Uncertaintiespart2.html#addsub>. Acesso em: 03 mai. 2022.

LIPPER, L.; THORNTON, P.; CAMPBELL, B.M.; BAEDEKER, T.; BRAINMOH, A.; BWALYA, M.; CARON, P.; CATTANEO, A.; GARRITY, D.; HENRY, K.; et al. Climate-smart agriculture for food security. **Nat. Clim. Chang**. 2014, 4, 1068-1072.

LOSS A, PEREIRA MG, ANJOS LHC, GIACOMO SG, PERIN A. AGREGAÇÃO. Carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesq Agropec Bras**. 2011;46:568-76.

LOSS, A.; BASSO, A.; OLIVEIRA, B. S.; KOUCHER, L. P.; OLIVEIRA, R. A.; KURTZ, C.; LOVATO, P. E.; CURMI, P.; BRUNETTO, G.; COMIN, J. J. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1212-1224, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140718>.

LOVATO, L. G.; SCHULTZ, G.; REVILLION, J. P. P. Agricultural credit to mitigate climatic changes: Analysis of the ABC program. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 3, p. 897-913, 2020.

LÜTZOW, M. V. et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions - A review. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.

MACHADO, L. V. et al. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 289–299, 2014.

MANZATTO, C. V. et al. **Mitigação das emissões de gases de efeitos estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas parciais** /– Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. PDF (35p.) – (Documentos / Embrapa Meio Ambiente, 1516-4691; 122).

MARRIOTT, E. E., M. M. WANDER. 2006. Total and Labile Soil Organic Matter in Organic and Conventional Farming Systems. **Soil Science Society of America Journal** 70:950-959.

MINASNY, B., B. P. et al. 2017. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma** 292:59- 86.

MONTANARELLA, L.; VARGAS, R. Global governance of soil resources as a necessary condition for sustainable development. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 559–564, 2012.

MONTEIRO, A. M. Caracterização climática do Estado de Santa Catarina: Uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. **Geosul**, v. 16, n. 31, p. 69–78, 2001.

OLDFIELD, E.E., et al. 2021. Agricultural soil carbon credits: Making sense of protocols for carbon sequestration and net greenhouse gas removals. **Environmental Defense Fund**, New York, New York. Disponível em: edf.org/sites/default/files/content/agricultural-soil-carbon-credits-protocolsynthesis.pdf. Acesso em: 10 jun. 2022.

OLIVEIRA, E.S. et al. 2015. Estoques de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. **Cadernos de Ciência & Tecnologia** 32: 71-93.

O'RIORDAN, T. COP 26 and Sustainability Science. **Environment**, v. 64, n. 1, p. 2–3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00139157.2022.1999748>.

PACHAURI, R. K., M. R. ALLEN, V. R. BARROS, J. BROOME, W. CRAMER, R. CHRIST, J. A. CHURCH, L. CLARKE, Q. DAHE, P. DASGUPTA, N. K. DUBASH. 2014. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (p. 151). IPCC.

PARFITT, J., BARTHEL, M. & MACNAUGHTON, S. Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. **Phil. Trans. Roy. Soc. B** 365, 3065–3081 (2010).

- PARK, S.J., S.I. KWON, S.H. KIM, J. SHIM, Y.H. LEE, T.K. OH. 2021. Estimation of soil organic carbon (SOC) stock in South Korea using digital soil mapping technique. **Korean J. Soil Sci. Fert.** 54(2):247-256.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P. & Smith, P. 2016. Climate-smart soils. **Nature**, 532(7597): 49-57.
- PAVÃO, E. M; ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C. **Agricultura de baixa emissão de carbono: a evolução de um novo paradigma**. Eduardo de Moraes Pavão Observatório ABC (204 p.), 2015.
- PLANTE, A.F.; RICHARD, T.C.; CATHERINE, E.S.; PAUSTIAN, K. & SIX, J. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 70:287-296, 2006.
- POST, W. M. et al. Soil carbon pools and world life zones. **Nature**, v. 298, n. 5870, p. 156– 159, 1982.
- POTTER R.O. et al. **Levantamento de reconhecimento de solos do estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa; 1998. (EMBRAPA-CNPS. Boletim de Pesquisa; n. 6).
- POULTON, P., JOHNSTON, J., MACDONALD, A., WHITE, R., AND POWLSON, D.: Major limitations to achieving “4 per 1000” increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom, **Glob. Change Biol.**, 24, 2563–2584, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1111/gcb.14066> >.
- PRIMIERI, S.; MUNIZ, A. W.; LISBOA, H. DE M. Dinâmica do Carbono no Solo em Ecossistemas Nativos e Plantações Florestais em Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, n. 0, p. 1–9, 2017.
- QUIDEAU, S. A. et al. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. **Geoderma**, v. 104, n. 1–2, p. 41–60, 2001.
- REEVES, D. W.: The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems, **Soil Till. Res.**, 43, 131–167, 1997.
- RIBEIRO, W. C. Políticas públicas ambientais no Brasil: mitigação das mudanças climáticas. **Scripta Nova**, v. XII, n. June, 2008.
- ROCHA, H. R. et al. **As relações entre a vegetação e o meio físico no Cerrado Pé-de-Gigante: ciclo do carbono**. O Cerrado Pé-de Gigante: ecologia e conservação, p. 312, 2005.
- RODRIGUES, A. A., MACEDO, M. N., SILVÉRIO, D. V., MARACAHIPES, L., COE, M. T., BRANDO, P. M., & BUSTAMANTE, M. M. (2022). Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. **Global Change Biology**, 28(22), 6807–6822.

ROSCOE, R. & MACHADO, P.L.O.A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2002. 86p.

SANDERMAN, J., T. HENGL, and G. J. FISKE. 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 114:9575-9580.

SCHLESINGER, W. H., R. AMUNDSON. 2018. Managing for soil carbon sequestration: Let's get realistic. **Global Change Biology**:gcb.14478.

SCHOLES, R. J.; MONTEIRO, P. M. S.; SABINE, C. L.; CANADELL, J. G. Systematic long-term observations of the global carbon cycle. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam, v. 24 , n. 8, p. 427-430, 2009.

SCURLOCK, J. M. O.; HALL, D. O. The global carbon sink: a grassland perspective. **Global Change Biology**, v. 4, n. 2, p. 229–233, 1998.

SEEG. **Sistema de Estimativa de Emissões de Gases do Efeito Estufa**, 2019. Disponível em: < <https://seeg.eco.br/contexto>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

SEÓ, H.L.S, MACHADO FILHO, L.C.P., & BRUGNARA, D. (2017). Rationally Managed Pastures Stock More Carbon than No-Tillage Fields. **Front. Environ. Sci.** 5, 00087.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS et al., Fertilidade do Solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. 1017p.

SMITH, C. W. Shrinkage and atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel. **Geoderma**, v. 35, n. 1, p. 47-65, 1985.

SMITH, P. Soils and climate change. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 539–544, 2012.

SOMBROEK W.G.; NACHTERGAELE F.O.; HEBEL A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. **Ambio** 22:417–426, 1993.

SZATMÁRI, G.; PIRKÓ, B.; S. KOÓS, A. LABORCZI, Z. BAKACSI, J. SZABÓ, L. PÁSZTOR. 2019. Spatio-temporal assessment of topsoil organic carbon stock change in Hungary. **Soil Tillage Res.**, 195 (2019), p. 104410.

TIFAFI, M.; GUENET, B.; HATTÉ, C. Large Differences in Global and Regional Total Soil Carbon Stock Estimates Based on SoilGrids, HWSD, and NCSCD: Intercomparison and Evaluation Based on Field Data From USA, England, Wales, and France. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 32, n. 1, p. 42–56, 2018.

TORN, M. S. TRUMBORE, E. S.; CHADWICK, O. A.; VITOUSEK, M.V.; HENDRICKS, D. M. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. **Nature**, v. 389, p. 170-173, 1997.

TORNQUIST, C. G. et al. Soil Organic Carbon Stocks of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 3, p. 975–982, 2009.

USSIRI, D. A. N.; JOHNSON, C. E. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ¹³C NMR spectroscopy and chemical methods of organic matter could account for variations in the structure and chemistry of organic matter in these forest soils. **Geoderma**, v. 111, p. 123–149, 2003.

VANDENBYGAART, A. J. 2016. The myth that no-till can mitigate global climate change. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 216:98-99.

VASQUES, G.M., COELHO, M.R., DART, R.O., CINTRA, L. C., BACA, J.F.M., MENDONÇA-SANTOS, M.L. (2021). **Soil Organic Carbon Stock Maps for Brazil at 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 and 100-200 cm Depth Intervals with 90 m Spatial Resolution**. Version 2021. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, Brazil.

VIBRANS, A.C.; SEVEGNANI, L.; UHLMANN, A.; SCHORN, L.A.; SOBRAL, M.; GASPER, A.L.; LINGNER, D.V.; BROGNI, E.; KLEMZ, G.; GODOY, M.B. e VERDI, M. 2011. Structure of mixed ombrophylous forests with *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae) under external stress in Southern Brazil. **Revista de Biologia Tropical** 59: 1371-1387.

VISCARRA ROSSEL, R. A. et al. Using legacy soil to develop mid-IR spectral library. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, p. 1–16, 2008.

VITAL, A. R. T. et al. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 793–800, 2004.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M.. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

YU, C. M. Sequestro florestal do carbono no Brasil: dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas. São Paulo: **Annablume**, IEB, 2004. 280 p.

WEI, X., M. SHAO, W. GALE, and L. Li. 2014. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. **Scientific Reports** 4:1-6.

WOOMER, P. L.; PALM, C. A.; ALEGRE, J. C.; CASTILLA, C.; CORDEIRO, D. G.; HAIRIAH, K.; KOTTO-SAME, J.; MOUKAM, A.; RICSE, A.; RODRIGUEZ, V.; NOORDWIJK, M. van. Slash-and-burn effects on carbon stocks in the humid tropics. **In:** LAL, R.; KIMBLE, J. M.; STEWART, B. A. (Ed.). Global climate change and tropical ecosystems. Boca Raton: CRC Press, 2000 p. 99-115. (Advances in Soil Science).

APÊNDICE A – Códigos R

#instalar os pacotes

```
install.packages("raster") #para ler, manipular, analisar e modelar dados espaciais
install.packages("ggplot2") #para visualização dos dados
install.packages("ggthemes") #fornece temas e escalas linkadas ao pacote'ggplot2'
para replicar a aparência dos gráficos
install.packages("rgdal") #fornece ligações à biblioteca de dados geoespaciais
```

#leitura dos pacotes

```
library(ggthemes)
library(raster)
library(ggplot2)
library(rgdal)
```

```
setwd() #informar e alterar o diretório de trabalho
getwd() #informar e alterar o diretório de trabalho
```

```
raster("variavel.tif") #buscar o arquivo raster no diretório
variavel <- raster("variavel.tif")
variavel <- values(variavel) # atribuir um valor a uma variável para gravá-la na
memória
```

```
rasterlist <- list( #serve para listar a imagem raster e permite armazenar qualquer
número de itens
  variavel1 = raster(matrix(variavel)),
  variavel2 = raster(matrix(variavel)),
  .
  .
  .
  variaveln = raster(matrix(variavel)))
```

```
df <- lapply(names(rasterlist), function(i) {
  data.frame(rastername = i, value = as.vector(rasterlist[[i]])) #colocar os
dados raster de forma que o 'ggplot' entenda, ou seja, colocamos cada observação,
no caso raster, cada célula deve estar em sua própria linha em um data.frame (df).
Fazemos isso transformando cada raster com as.vector() e indicamos o raster de
origem.
```

```
df <- do.call(rbind, df) #função rbind dá a possibilidade de unir as linhas e colunas
antes de executá-las
```

```
head(df) #retornar a minha matriz, quadro de dados ou função
```

```
ggplot(df, aes(x = value, fill = rastername)) + #visualizar o
gráfico
```

```

geom_boxplot(width= .8, alpha= .9, outlier.alpha = 0) +           #definir a estética
do gráfico
stat_summary(fun=mean, colour="black", geom="point",             #definir estética da
variável em questão
              shape=18, size=3, show.legend = FALSE) +
scale_fill_manual(values = c()) +                                #organizar a ordem das
variáveis
scale_y_continuous(breaks = seq(40, 120, 20), lim = c(40, 120)) + #definir limites
de escala
theme_classic(base_size = 16) +                                  #definir a
tema do gráfico
labs(x = "Nome do eixo",                                         #definir nome
no eixo X
     y = "Nome do eixo",                                         #definir
nome no eixo Y
     title = "Nome do título",                                    #definir nome do Título do
gráfico
     subtitle = "Nome do subtítulo") +                            #definir nome do Subtítulo
do gráfico
guides(fill="none") +                                           #definir legenda
theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5), plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5))
#definir tamanho de Título e subtítulo

```

ANEXO A – Dados tabelados conforme Fogaça (2021)

prof do solo 5 cm	ECOT 5 cm	COS 5 cm	prof do solo 30 cm	ECOT 30 cm	COS 30 cm
0-5	16,00	14,00	0-30	88,85	80,80
0-5	10,20	14,70	0-30	64,50	81,30
0-5	11,40	13,80	0-30	78,30	87,50
0-5	16,60	13,40	0-30	111,14	75,10
0-5	21,60	13,70	0-30	56,07	82,04
0-5	16,10	13,70	0-30	58,01	82,04
0-5	19,90	14,20	0-30	56,75	82,04
0-5	20,50	14,10	0-30	59,94	82,04
0-5	8,19	15,00	0-30	56,99	82,04
0-5	8,10	15,00	0-30	58,74	82,04
0-5	8,48	15,00	0-30	59,02	82,04
0-5	8,63	15,00	0-30	57,92	82,04
0-5	9,50	15,00	0-30	65,01	67,00
0-5	8,86	15,00	0-30	38,01	67,00
0-5	8,21	15,00	0-30	79,80	67,00
0-5	8,82	15,00	0-30	70,00	48,40
0-5	8,50	15,00	0-30	72,31	48,40
0-5	12,93	12,20	0-30	66,00	48,40
0-5	8,39	12,20	0-30	50,00	48,40
0-5	16,61	12,20	0-30	64,00	48,40
0-5	17,50	11,10	0-30	56,00	48,40
0-5	14,80	11,10	0-30	62,00	48,40
0-5	16,32	14,40	0-30	89,25	75,60
0-5	10,71	14,70	0-30	65,38	81,30
0-5	11,85	13,80	0-30	77,25	87,50
0-5	17,80	14,00	0-30	110,50	77,70
0-5	19,20	10,80	0-30	100,00	73,60
0-5	17,92	10,80	0-30	127,38	77,40
0-5	21,70	14,30	0-30	56,30	81,40
0-5	15,90	13,70	0-30	49,24	82,20
0-5	20,40	14,20	0-30	109,98	80,80
0-5	20,00	14,20	0-30	56,76	55,40
0-5	18,00	12,90	0-30	186,10	78,40
0-5	20,00	12,90	0-30	95,23	74,50
0-5	18,00	12,90	0-30	77,36	74,50
0-5	19,00	12,90	0-30	75,83	74,50
0-5	31,86	12,40	0-30	90,44	74,50
0-5	23,95	12,00	0-30	86,24	74,50
0-5	26,40	10,60	-	-	-
0-5	22,10	11,60	-	-	-
0-5	24,70	10,70	-	-	-
0-5	26,08	11,20	-	-	-
0-5	11,30	8,70	-	-	-
0-5	12,03	8,70	-	-	-
0-5	16,82	8,70	-	-	-
0-5	11,13	8,70	-	-	-

0-5	20,17	10,30	-	-	-
0-5	14,53	16,40	-	-	-
0-5	6,24	16,40	-	-	-
0-5	5,82	16,40	-	-	-
0-5	13,49	16,40	-	-	-
0-5	7,54	16,40	-	-	-
0-5	21,86	11,30	-	-	-
0-5	39,98	11,30	-	-	-
0-5	10,80	13,40	-	-	-
0-5	11,42	13,40	-	-	-
0-5	40,47	13,40	-	-	-
0-5	41,48	13,40	-	-	-

Unidade de medida: Mg C ha⁻¹

Legenda = ECOT 5 cm: dados de estoque de carbono orgânico do solo em profundidade do solo 0-5 cm (FOGAÇA, 2021); ECOT 30 cm: dados de estoque de carbono orgânico do solo em profundidade do solo 0-30 cm (FOGAÇA, 2021); COS 5 cm: dados de estoque de carbono orgânico do solo em profundidade do solo 0-5 cm (VASQUES et. al., 2021); COS 30 cm: dados de estoque de carbono orgânico do solo em profundidade do solo 0-30 cm (VASQUES et. al., 2021).

ANEXO B – Listas de trabalhos científicos extraídos os valores tabulados conforme Fogaça (2021)

ALEXANDRE, M. R. Caracterização química do extrato orgânico dos sedimentos recentes da Baía da Babitonga - SC. **Tese** (Doutorado). Pós-Graduação em Química do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

ANDRADE, A. P. Estoque e frações de carbono e atributos físicos em Nitossolo Vermelho relacionados à aplicação de esterco em sistemas de produção. 2013. 86 f. **Tese** (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, 2013.

ASSUNÇÃO, S. A. et al. Influence of parent material on organic phosphorus fractions in vineyard soils in Santa Catarina, Brazil. **Rev. Ambient. Água**, v. 15, n. 5, 2020.

BARETTA, D. et al. Efeito do monocultivo de pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no Planalto Sul Catarinense. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, p. 715-724, 2005.

BAYER, C.; BERTOL, L. Características químicas de um Cambissolo Húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 23, p. 687-694, 1999.

BAYER, B. et al. Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no tillage effect. **Ciência Rural**, v. 32, n. 3, p. 401-406, 2002.

BAYER, C. et al. Incremento de carbono e nitrogênio num latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. **Ciência Rural, Santa Maria**, v.33, n.3, p.469-475, 2003.

BENEDET, L. Efeitos de aplicações de dejetos suínos por 10 anos sobre a matéria orgânica do solo e a biodisponibilidade de Cu e Zn. **Tese** (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agrossistemas, Florianópolis, 2018. 194 p.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 1, p. 91-95, 2000.

BERTOL, I. et al. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada de perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 1045-1054, 2004.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 28, p. 155-163, 2004.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 30, p. 605-614, 2006.

BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 477-485, 2008.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 131–139, 2010.

CASSOL, P. C., FACHINI, L., MAFRA, Á. L., BRAND, M. A., SIMONETE, M., & COIMBRA, J. L. M. Changes in organic carbon in soil of natural grassland converted to Pinus taeda plantations at three ages. **Ci. Fl., Santa Maria**, v. 29, n. 2, p. 545-558, abr./jun. 2019.

CORRÊA, J. C., RÓDIO, L. C., RIGO, A. Z., GROHSKIPF, M. A., REBELLATO, A., MAFRA, Á. L. Carbon fractions and stock in response to solid and fluid organomineral fertilizers in highly fertile soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 54, 2019.

COUTO, R. R. Dinâmica do carbono e rendimento de culturas em solo com histórico de aplicação de dejetos suínos e fertilizante nitrogenado mineral. **Dissertação** (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas. Florianópolis, SC, 2010.

DERNARDIN, R. B. N., MATTIAS, J. L., WILDNER, L. D. P., NESI, C. N., SORDI, A., KOLLING, D. F., BUSNELLO, F. J., CERUTTI, T. Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó-SC. **Ciência Florestal**, 24(1), 59-69.B2, 2014.

DORTZBACH, D. et al. Carbono e nitrogênio no solo e na biomassa microbiana em glebas com diferentes usos e períodos de aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Revista Agropecuária Catarinense, Florianópolis**, v. 26, n. 2, p. 69-73, 2013.

DORTZBACH, D., PEREIRA, M. G., BLAINSKI, É., GONZALES, A. P. Estoque de C e abundância natural de ^{13}C em razão da conversão de áreas de floresta e pastagem em bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39(6), 1643-1660, 2015.

DORTZBACH, D. Caracterização dos Solos e Avaliação da Aptidão Agrícola das Regiões Produtoras de Vinhos Finos de Altitude de Santa Catarina. **Tese** (doutorado) – Universidade Federal Rural do Rio de

Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2016. f. 170-191.

DORTZBACH, D. et al. Fractions of soil organic matter in the vineyards of altitude regions in Santa Catarina. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 4, p. 1799-1812, 2017.

DORTZBACH, D. et al. Compartimentos da matéria orgânica do solo em vinhedos altomontanos de Santa Catarina. **Braz. J. of Develop.**, v. 6, n. 3, p. 10677-10691, 2020.

FACHINI, L. Frações e estoques de carbono orgânico em solo do planalto catarinense cultivado com pinus. 2012. 51f. **Dissertação** (Mestrado) Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages.

FERREIRA, G. W. Atributos físicos e químicos de agregados e da terra fina seca ao ar em solo sob cultivo de aveia/milho adubado com dejetos suínos e fertilizantes químicos. **Dissertação** (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2018. 111 p.

FILHO, L. A. Z.; Carbono orgânico sob diferentes sistemas de manejo do solo e plantas de cobertura de inverno no Planalto Catarinense. 2019. 32f. **Trabalho de conclusão de curso** - UFSC, Curitibanos, 2019.

GOMES, G. Plantio direto de hortaliças orgânicas: estudo de caso em uma propriedade periurbana em Florianópolis, SC. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Agrossistemas, Centro de Ciências Agrárias - Florianópolis, 2004.

LOCATELLI, J. L.; Plantas de cobertura em sucessão ao milho e sua contribuição no carbono orgânico do solo. 2018. 32f. **Trabalho de conclusão de curso** - UFSC, Curitibanos, 2018.

LODONO, D. M. M. Respostas da comunidade microbiana do solo a sucessivas aplicações de uréia e dejetos suínos em solo sob plantio direto. **Dissertação** (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agrossistemas. Florianópolis, 2012. 65 p.

LOSS, A. et al. Carbono Orgânico Total e Agregação do Solo em Sistema de Plantio Direto Agroecológico e Convencional de Cebola. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 39, p. 1212-1224, 2015.

LOSS, A. Recuperação do carbono orgânico total e das frações húmicas da matéria orgânica em diferentes usos do solo. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. 1-11, 2020.

LUCIANO, R. V. et al. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v. 9, n. 1, p. 09-19, 2010.

LUCIANO, R. V. et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 36, p. 1733-1744, 2012.

MACHADO, L. N.; LOSS A.; DORTZBACH, D. Teores e Estoques de Carbono Orgânico Total do Solo Sob Diferentes Tipos de Uso das Terras. **XII Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo**, Xanxerê, 2018.

MAFRA, Á. L., GUEDES, S. D. F. F., FILHO, O. K., SANTOS, J. C. P., ALMEIDA, J. A. D., ROSA, J. D. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, 32(2), 217-224, 2008.

MAFRA, M. S. H.; Estoque e fracionamento físico do carbono orgânico em Latossolo sob plantio direto com aplicação de dejetos suíno. 2013. 88f. **Tese** (doutorado) – Centro de Ciências Agroveterinárias/ UDESC, Lages, 2013.

MAFRA, M. S. H. et al. Acúmulo de carbono em Latossolo adubado com dejetos líquidos de suínos e cultivado em plantio direto. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 49, n. 8, p. 630-638, 2014.

MAFRA, M. S. H. et al. Organic Carbon Contents and Stocks in Particle Size Fractions of a Typic Hapludox Fertilized with Pig Slurry and Soluble Fertilizer. **R. Bras. Ci. Solo**, n. 39, p.1161-1171, 2015.

MULLER JUNIOR, V. SISTEMA DE PLANTIO DIRETO AGROECOLÓGICO DE CEBOLA E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Dissertação** (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2017. 85 p.

PEREIRA, M. G. et al. Estimativa da acidez potencial através do método do pH SMP em solos de altitude de Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 33, n. 1, p. 50-55, 2020.

POCAI, L. H. Teor e estoque de carbono em sistemas agroflorestais da serra catarinense. **Trabalho de Conclusão de Curso** (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Curitibanos. Graduação em Agronomia. Curitibanos, SC, 2014. 36 p.

PRIMIERY, S. et al. Impacto da mudança no uso da terra sobre o estoque de carbono no solo. **Fertibio**, 2008.

PRIMIERY, S. Impacto da mudança no uso do solo sobre o sequestro de carbono e seus atributos microbiológicos. **Dissertação** (mestrado) -

universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, SC, 2008. 114 p.

PRIMIERY, S.; MUNIZ, A. W.; LISBOA, H. M. Dinâmica do carbono no solo em ecossistemas nativos e plantações florestais em Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

RAUBER, L. P. Atributos físicos, químicos e frações granulométricas da matéria orgânica de um solo em sistemas de uso com fertilizantes orgânicos. **Dissertação** (Mestrado) - Centro de Ciências Agroveterinárias/UDSC. Lages, 2011. 64 p.

RODIO, L. C. Frações de carbono orgânico em Nitossolo e Cambissolo com fertilizantes organominerais. 2014. 96f. **Dissertação** (mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, 2013.

ROTTERS, D. F. Carbono e nitrogênio em cultivo de pinus em Cambissolo Húmico no Planalto Catarinense. 2016. 97f. **Dissertação** (mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, 2016.

RUTHNER R. R.; SEVEGNANI, L. Teores de carbono armazenado no solo e na serapilheira sob floresta ombrófila densa de terras baixas e submontana do Vale do Itajaí, SC. **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, ano MMXII, Nº. 000008, 2013.

SANTOS, K. F. dos, BARBOSA, F. T., BERTOL, I., WERNER, R. de S., WOLSCHICK, N. H., & MOTA, J. M. Teores e estoques de carbono orgânico do solo em diferentes usos da terra no Planalto Sul de Santa Catarina. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18(2), 222-229. 2019.

SANTOS, C., MACHADO, L. N., LOSS, A., & DORTZBACH, D. Densidade do solo e estoques de carbono sob diferentes sistemas de uso do solo. **In X Seminário de Pesquisa Interdisciplinar-ISSN 2178-2121.2019.**

SANTOS, K. F. Determinação de atributos físicos e do carbono orgânico do solo em diferentes tipos de uso da terra no Planalto Sul Catarinense. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, 2014.

SEÓ, H. L. S.; Avaliação do ciclo de vida e estoque de carbono da produção de leite em Pastoreio Racional Voisin. 2015. 148f. **Dissertação** (Mestrado) - UFSC, Florianópolis, 2015.

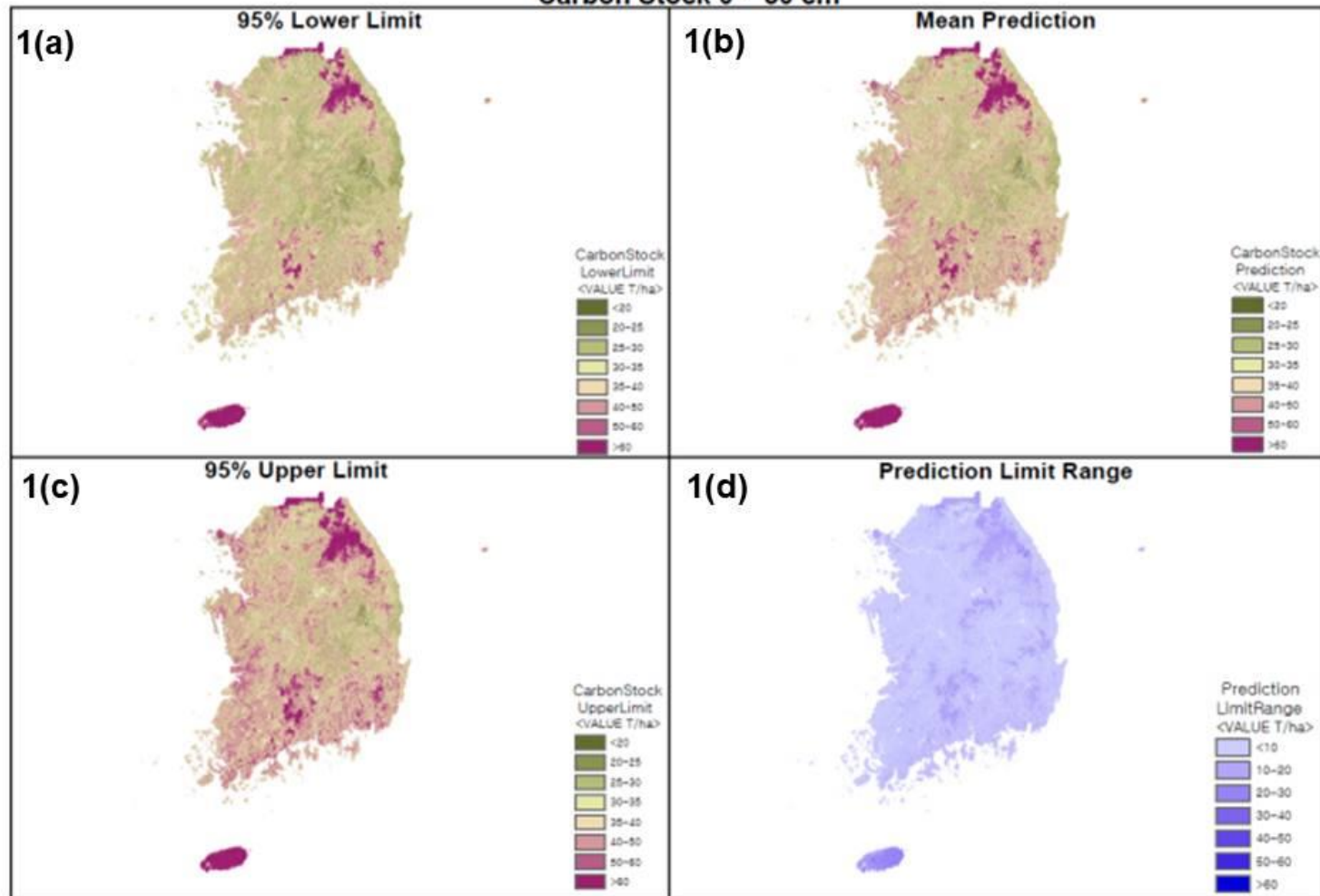
SILVA, W. C. Avaliação, em profundidade, dos atributos do solo: carbono orgânico, argila, silte e areia. **Trabalho de Conclusão de Curso** (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Curitibanos. Graduação em Agronomia. Curitibanos, SC, 2015.

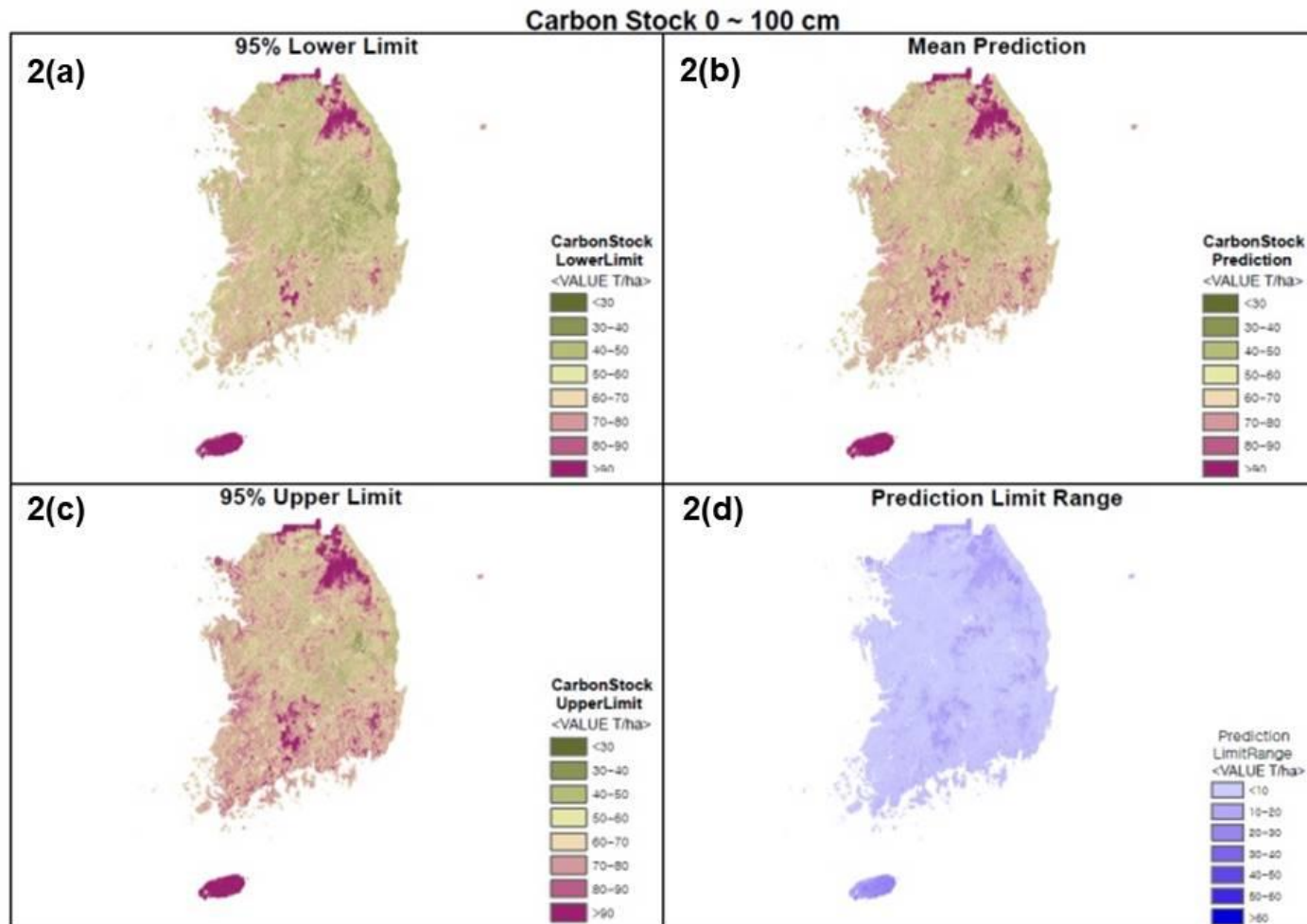
SILVA, J. C. S. Estoques e fluxos de carbono e nitrogênio acima e abaixo do solo em fragmentos da Floresta Atlântica no Sul do Brasil. **Dissertação** (Mestrado - Programa de Pós Graduação em Ciências). Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2017.

ZANATTA, J. A. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em solos florestais e agrícolas na região de Caçador, SC. Colombo : **Embrapa Florestas**, 2013.

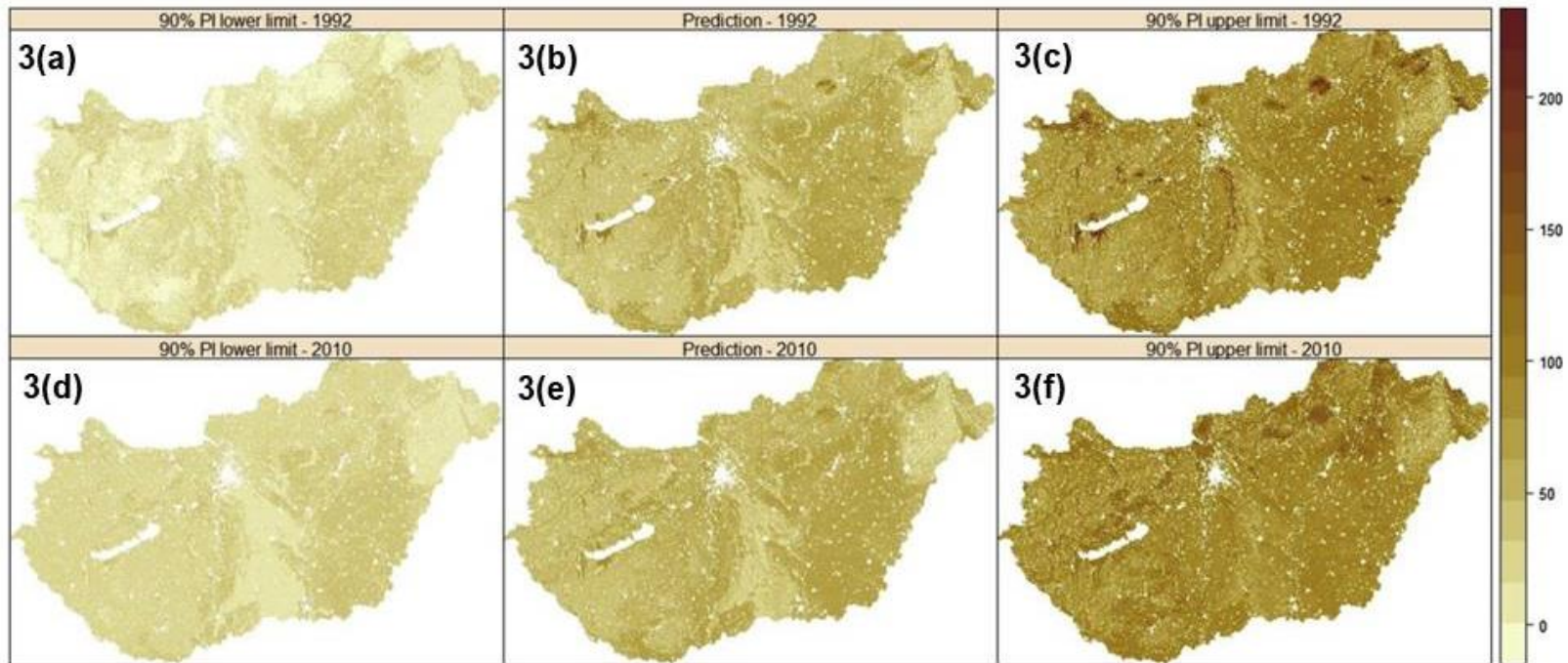
ANEXO C – Mapas de estoque de COS de outros países

Carbon Stock 0 ~ 30 cm





Legenda: Incerteza (95%) e distribuição espacial do mapa de previsão de estoque de COS (Mg C ha^{-1} , 0-30 e 0-100 cm profundidade do solo, (1a) até (1d) e (2a) até (2d)) na Coreia do Sul. Na figura (1b) e (2b) estão as previsões das médias de estoque de COS para 0-30 cm e 0-100 cm, respectivamente. Fonte: Adaptado de Park et al., (2021).



Legenda: Incerteza (90%) e distribuição espacial do mapa de previsão de estoque de COS (Mg C ha⁻¹, 0-30 profundidade do solo) na Hungria. Na figura (3b) e (3e) estão as previsões das médias de estoque de COS para 0-30 cm. Fonte: Adaptado de Szatmári et al., (2019).