

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO
EM ESCALA REGIONAL: APLICAÇÃO DO MODELO CENTURY
E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

CARLOS GUSTAVO TORNQUIST
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)
MSc. Ciência do Solo (Texas A&M University)

Tese apresentada como um dos requisitos
à obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2007

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

T686s Tomquist, Carlos Gustavo
Simulação da dinâmica do carbono orgânico do solo em escala regional:
aplicação do Modelo Century e sistemas de informações geográficas / Carlos
Gustavo Tomquist. -- Porto Alegre : C.G.Tomquist, 2007.

xiv, 156f.; il.

Tese(Doutorado – Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

1. Manejo do solo : Carbono Orgânico do Solo : Dinâmica : Modelo
Century : Sistemas de informações geográficas : Integração de metodologias.
I.Título.

CDD: 631.4

CARLOS GUSTAVO TORNQUIST
Engenheiro Agrônomo - UFRGS
M.Sc. Soil Science - Texas A&M University

TESE

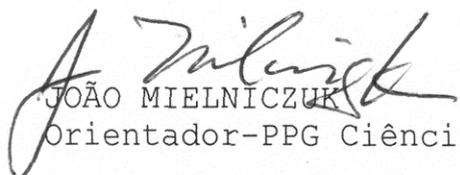
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

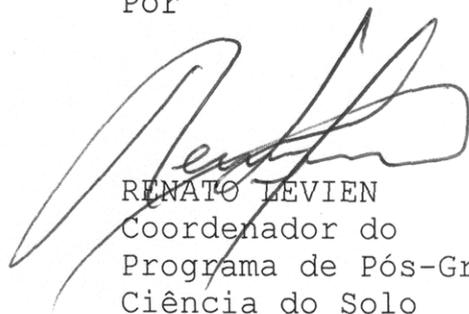
DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 14.03.2007
Pela Banca Examinadora

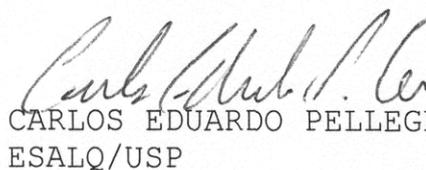
Homologado em: 25.04.2007
Por


JOÃO MIELNICZUK
Orientador-PPG Ciência do Solo


RENATO LEVIEN
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo


GUSTAVO HENRIQUE MERTEN
PPG Ciência do Solo/UFRGS


FLÁVIA FONTANA FERNANDES
Departamento de Solos/UFPel


CARLOS EDUARDO PELLEGRINO CERRI
ESALQ/USP


GILMAR A. B. MARODIN
Diretor da Faculdade
de Agronomia

*“Hence, I see soil in the context of a living, dynamic ecosystem,
either a natural, or an agricultural, or a silvicultural one”.*

Hans Jenny

em “My friend, the soil”,

publicado no Journal of Soil and Water Conservation (1984).

*Dedicado à Renata,
que desde há muito também
vem lidando com o carbono orgânico...*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor João Mielniczuk, co-autor e testemunha-chave de grandes mudanças no manejo do solo ocorridas no Rio Grande do Sul e, por conseqüência, decano do carbono do solo gaúcho, pela orientação exemplar, pela paciência e estímulo a persistir em um projeto que, mesmo tendo rumo, não seguiu a linha reta, a qual até poderia indicar o caminho mais rápido, mas com certeza não o mais gratificante.

Ao Professor Élvio Giasson, pelo incentivo em realizar o curso de doutorado, pela introdução ao mundo do geoprocessamento, pela constante disponibilidade para troca de idéias e informações e apoio na resolução das dificuldades encontradas na construção deste projeto;

A todos os colegas engenheiro agrônomos e técnicos de Ibirubá, tanto da EMATER (Chefe do Escritório Lori Baloch) quanto da COTRIBÁ (Coordenador do Dep. Técnico João Henrich), que apoiaram o trabalho de campo e levantamentos na região.

A todos os produtores visitados, por permitirem a coleta de amostras nas propriedades e por fornecerem informações históricas sobre as áreas. Em especial, à colega do PPG-Solos, Margarete Nicolodi, bem como o produtor Neri Nicolodi, seu pai, e seus irmãos, pela acolhida e por sempre estarem disponíveis para auxiliar nas amostragens de solo na região de estudo.

A Phillip Gassman do CARD (Center for Agricultural and Rural Development , Iowa State University) pela supervisão e acolhida em Ames durante o “estágio doutoral”. A Todd Campbell pelas inúmeras versões do iCentury produzidas e programação realizada;

À Anette Norgaard (Institute of Geography, University of Copenhagen) pelas sugestões e informações fornecidas sobre a integração do Century com SIG.

À Cindy Keough (Natural Resources Ecology Laboratory, Colorado State University), quem sempre atendeu prontamente as questões relativas à aplicação e parametrização do modelo Century. Da mesma forma, aos Dr. Bill Parton, Dr. K. Paustian e Dr. D. Ojima, pela atenção durante a breve visita ao NREL em setembro de 2006.

Aos Dr. Carlos E. P. Cerri e Martial Bernoux (Centro de Energia Nuclear na Agricultura/ESALQ/USP), pelas sugestões e dados fornecidos referentes ao

Inventário Nacional de Gases Efeito Estufa e para a aplicação do modelo Century;

Ao Dr. Egon Klamt pelos comentários a cerca do levantamento de solos de Ibirubá, de sua co-autoria.

Aos colegas do PPG Ciência do Solo / UFRGS, em especial aos colegas da Área de Manejo de Solos Falberni Costa, Juliana Gomes, Frederico Vieira, Nilvânia Melo, Adriana Kleinschmitt, Jeferson Diekow, Júlio Salton, Aurélio Pavinato, Paulo César Conceição, Madalena Boeni, Josi Zanatta, Elisandra Oliveira, Fabíola Lopes, pela troca de idéias e informações científicas, e também uma e outra prosa “extra-acadêmica”. Ao colega Dr. Nelson Horowitz (Roullier S.A.) pelo estímulo à realização do curso de doutorado.

Aos funcionários do Departamento de Solos da UFRGS, especialmente ao Jader Amaro na sempre eficiente manutenção dos aspectos formais do programa e a Luis da Silveira (Tonho), pela dedicação nas análises de C. À CAPES, pelas bolsas concedidas;

Aos tios Theodoro e Ana, em Entre Rios (Vera Cruz, RS), por tantas vezes terem hospedado o sobrinho “urbano” em busca de conhecer melhor as “coisas da terra” e “sintonizar” com as raízes rurais da família.

Aos meus pais, Jalmar e Helena, que sempre incentivaram o envolvimento com “as coisas da terra” já mencionadas e as atividades acadêmicas.

À Renata, além do carinho e compreensão de todos os dias, por apoiar e conviver com o desenrolar do curso, e também por auxiliar diretamente em várias etapas deste projeto.

SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM ESCALA REGIONAL: APLICAÇÃO DO MODELO CENTURY E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS¹

Autor: Carlos Gustavo Tornquist

Orientador: Prof. João Mielniczuk

Co-Orientador: Prof. Élvio Giasson

RESUMO

As crescentes evidências de mudanças climáticas em parte devidas ao incremento da concentração de CO₂ atmosférico têm provocado grande interesse no carbono orgânico do solo (COS), que constitui um dos principais compartimentos do ciclo global do C. Sabe-se que a agricultura contribuiu significativamente para o incremento do C atmosférico, mas atualmente sistemas conservacionistas de manejo do solo permitem que os solos agrícolas passem a acumular C e possam auxiliar na mitigação do incremento do CO₂ atmosférico. Este estudo teve como principais objetivos desenvolver metodologia de integração do modelo Century de dinâmica do COS com Sistema de Informações Geográficas (SIG) e aplicá-la na avaliação das mudanças de estoques de COS ocorridas na região de Ibirubá desde o início da agricultura em 1900 até 2050. Foi criada uma base de dados geoespacial com os planos temáticos: solo, uso do solo e elementos da paisagem. O modelo Century versão 4 foi calibrado com os estoques de COS obtidos pela amostragem de solos (0 a 20 cm profundidade) sob vegetação nativa e em lavouras da região de estudo. Dois cenários gerais de manejos de solo foram elaborados, diferindo quanto sistema de manejo empregado de 1993 a 2050: o cenário “Atual” com utilização do Sistema Plantio Direto (SPD) similar ao atualmente praticado na região, com média adição de biomassa devido baixa frequência de milho na rotação e o cenário “Melhorado”, com o SPD com adição C pela biomassa em torno de 30% maior. Foram realizadas simulações múltiplas com o modelo para cada combinação solo-vegetação original-relevo e ano de início da agricultura, através da interface *iCentury*. Os estoques de COS calculados pelas simulações, gravados na base de dados do *iCentury*, foram inseridos no SIG através de consultas em SQL (Structured Query Language). A abordagem empregada permitiu visualizar e analisar as dimensões espacial e temporal da dinâmica do COS na região de Ibirubá. Ocorreu significativa redução do estoque total de COS a partir da implantação da agricultura em sistema de manejo convencional, de 5,043 Tg C em 1900 até 3,737 Tg C em 1985. Após a introdução de manejos conservacionistas de solo na década de 80, houve recuperação do estoque, atingindo 4,276 Tg C no cenário “Atual”, e 4,654 Tg C no cenário “Melhorado” em 2005. As simulações preditivas indicaram que o cenário “Atual” permitiria recuperar e ultrapassar em 4% o estoque original total até 2050, enquanto o cenário “Melhorado” ultrapassaria em 26% o estoque original total da região até 2050.

¹Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (156p.) Março, 2007.

REGIONAL-SCALE SIMULATION OF SPATIAL AND TEMPORAL C STOCK DYNAMICS: APPLICATION OF CENTURY MODEL AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS ¹

Author: Carlos Gustavo Tornquist

Adviser: Prof. João Mielniczuk

Co-Adviser: Prof. Élvio Giasson

ABSTRACT

There is growing interest in soil organic carbon (SOC) – one of the key compartments of the global C cycle – due to mounting evidence of climatic changes ascribed in part to a higher atmospheric CO₂ concentration. It is suggested that agriculture played a significant role in the increase in atmospheric C. However, conservation agriculture with improved soil management practices can turn soils into sinks for atmospheric C, thus helping mitigate climatic change. The main objectives of this study were to develop a methodology to couple the Century SOC dynamics model with Geographic Information Systems and test its application to evaluate SOC stock changes in the Ibirubá region (Rio Grande do Sul state) from the onset of agriculture in 1900 to 2050. A spatially-explicit database with soils, landforms, original vegetation and land use change layers was created from available datasets and imagery. The Century model (version 4) was calibrated with SOC stock data (0 to 20 cm depth) obtained from field sampling of areas under native vegetation and agricultural fields. Two general soil management scenarios were established, which differed only in the no-till period from 1993 to 2050: the “Current” or baseline scenario, depicting soil management similar to actual practices in the study region, with moderate crop residue inputs due to rotations with corn grown every three years; the “Improved” scenario, with more frequent corn and approximately 30% higher crop residue inputs. Multiple Century simulations with soil-vegetation-landform combinations and year of conversion to agricultural use were performed through the *iCentury* interface. Simulated SOC stocks were merged into the GIS geodatabase by SQL (Structured Query Language) operations. This new SOC database allowed spatial and temporal visualization and quantitative analysis of SOC dynamics in the Ibirubá region. A major reduction of total SOC stock (from 5.043 Tg C in 1900 to 3.737 Tg C in 1985) occurred after conversion of native vegetation to cropland under conventional management. After conservation agriculture practices were introduced in the mid-1980s, a partial recovery of the original SOC stock took place, reaching 4.276 Tg C in the “Current” scenario and 4.654 Tg C in the “Improved” scenario in 2005. The simulations also predicted that total stocks would exceed original stocks by 4% in the “Current” scenario and by 26% in the “Improved” scenario in 2050.

¹Doctorate Dissertation in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (156p.) March 2007.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. O solo como compartimento do ciclo biogeoquímico do carbono.	3
2.2. A dinâmica do COS nos agroecossistemas tropicais	5
2.3. Alterações nos estoques de COS pela mudança de uso, manejo e preparo do solo.....	8
2.3.1. Importância do relevo e da erosão hídrica	10
2.3.2. Amostragem e medição do COS	12
2.4. Cenários de evolução do uso do solo	14
2.5. Os modelos de simulação	16
2.6. Simulação da dinâmica do COS.....	18
2.6.1. O modelo Century	20
2.6.2. Modelagem dinâmica espacialmente explícita.....	22
3. HIPÓTESE	28
4. OBJETIVOS	29
5. MATERIAL E MÉTODOS	31
5.1. Descrição da região de estudo.....	31
5.2. Os solos da região de Ibirubá.....	34
5.3. Histórico da agricultura.....	38
5.4. Construção da Base de Dados.....	41
5.5. Amostragem de Solo.....	45
5.5.1. Procedimento para coleta no campo	46
5.5.2. Procedimento para análises laboratoriais	47
5.5.3. Procedimento para cálculo dos estoques de COS.....	48
5.6. Elaboração dos cenários históricos e futuros	49

5.7.	Calibração do Modelo e Execução das Simulações.....	53
5.8.	Integração do Century com a Base de Dados Geoespacial	54
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
6.1.	Evolução do uso do solo	59
6.2.	Estoques de COS.....	63
6.3.	Simulação da Dinâmica do COS pelo Modelo Century	66
6.3.1.	Simulações no mesmo elemento da paisagem (topos)	66
6.3.2.	Simulações considerando os elementos da paisagem	81
6.4.	Distribuição Espacial dos Estoques de COS.....	90
6.5.	Estoques totais regionais de COS.....	109
7.	CONCLUSÕES	113
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
9.	APÊNDICES.....	131

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Cenários de manejo utilizados nas simulações com o modelo Century (1900 – 2050)	51
2. Carbono na biomassa estimado pelo Century, conforme variáveis do submodelo “produção vegetal”	55
3. Estoques de COS por classe e uso original e atual do solo nas camadas de 0 a 10, 0 a 20 e 0 a 30 cm	65
4. Estoques de COS na camada de 0 a 20 cm utilizados na calibração do Century, corrigidos para massa equivalente da vegetação original	68
5. Erosão e deposição cumulativa de COS desde o início da agricultura até 2050, em valores absolutos e relativos aos estoques originais de COS.....	89
6. Estoques totais de COS e sua variação entre 1900 e 2050 considerando a massa equivalente de solo na camada de 0 a 20 cm sob vegetação nativa para o cenário “Atual” na região de Ibirubá	110
7. Estoques totais de COS e sua variação entre 1900 e 2050 considerando a massa equivalente de solo na camada de 0 a 20 cm sob vegetação nativa para o cenário “Melhorado” na região de Ibirubá.....	111

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Estruturação do modelo Century	21
2. Fluxograma geral do Century	23
3. Formas e graus de integração de modelos de simulação e bases de dados espacialmente explícitas	25
4. Localização de Ibirubá e XV de Novembro	32
5. Mapa hipsométrico da região de Ibirubá, obtido a partir das curvas de nível de cartas topográficas	34
6. Mapa de solos compilado de Ibirubá (escala original 1:30.000)	37
7. Elementos da paisagem derivados do modelo digital do terreno criado a partir das curvas de nível e pontos cotados das cartas 1:50.000 correspondentes à região de estudo	44
8. Localização dos pontos amostrados sobre o mapa de solos	46
9. Esquema sintético do cruzamento dos planos temáticos <i>raster</i> para extração das informações para a tabela de atributos do plano "XY"	57
10. Fluxograma da integração da base de dados do <i>iCentury</i> com SIG e geração de mapas de estoques anuais de COS	58
11. Mapa de uso do solo em 1900 e 1956 obtido a partir de foto-interpretção de fotos aéreas	61
12. Mapa de uso do solo em 1977 e 1988 obtido a partir de classificação de imagens do satélite LANDSAT	62
13. Mapa de uso do solo em 2002 obtido a partir da classificação de imagem LANDSAT	63

14. Evolução dos estoques de COS (0 a 20 cm) considerando diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura média, nos topos, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	69
15. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura argilosa, nos topos, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	71
16. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura muito argilosa, nos topos, originalmente sob mata, nos topos a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	72
17. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes épocas de início da agricultura em Neossolos Regolíticos, nos topos, originalmente sob mata, nos topos a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	74
18. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes épocas de início da agricultura em Neossolos Flúvicos, nos topos, originalmente sob mata, nos topos a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	75
19. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura argilosa, nos topos, originalmente sob campo, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	77
20. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura muito argilosa, nos topos, originalmente sob campo, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	79
21. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Latossolos Vermelhos textura média, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	82

22. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Latossolos Vermelhos textura argilosa, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	83
23. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Latossolos Vermelhos textura muito argilosa, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	84
24. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Neossolo Regolítico, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	85
25. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Latossolos Vermelhos textura argilosa, originalmente sob campo, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	86
26. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Latossolos Vermelhos textura muito argilosa, originalmente sob campo, a) com cenários de manejo “Atual”; b) com cenários de manejo “Melhorado”	87
27. Distribuição dos estoques de COS em 1900 na região de Ibirubá ..	92
28. Distribuição dos estoques de COS em 1955 na região de Ibirubá ..	93
29. Distribuição dos estoques de COS em 1975 na região de Ibirubá ..	94
30. Distribuição dos estoques de COS em 1985 na região de Ibirubá ..	95
31. Distribuição dos estoques de COS em 1995 na região de Ibirubá ..	96
32. Distribuição dos estoques de COS em 2005 na região de Ibirubá ..	97

33.	Distribuição dos estoques de COS em 2050 na região de Ibirubá ..	98
34.	Distribuição dos estoques de COS em 2005 na região de Ibirubá Cenário “Melhorado” a partir de 1993	99
35.	Distribuição dos estoques de COS em 2050 na região de Ibirubá Cenário “Melhorado” a partir de 1993	100
36.	Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 1975 e 1900 (estoques originais) na região de Ibirubá	101
37.	Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2005 e 1900 (estoques originais) na região de Ibirubá	102
38.	Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2015 e 1900 (estoques originais) na região de Ibirubá	103
39.	Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2050 e 1900 (estoques originais) na região de Ibirubá	104
40.	Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2005 e 1975 na região de Ibirubá	105
41.	Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2005 e 1975 , com cenário “Melhorado”	106
42.	Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2005 e 1900 , com cenário “Melhorado”	107
43.	Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2050 e 1900, com cenário “Melhorado”	108

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Levantamentos de solos na região de Ibirubá	132
2. Evolução do uso do solo na região de Ibirubá conforme os Censos Agropecuários	139
3. Detalhamento dos locais amostrados	140
4. Taxas anuais de erosão e deposição de solo por bloco de manejo utilizadas nos cenários “Atual” e “Melhorado” para simulação com Century	142
5. Alterações nos parâmetros originais do Century ou novos parâmetros adicionados neste estudo	144
6. Concentrações de COS e densidade do solo por classe e uso original e atual do solo nas camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm	147
7. Textura, densidade do solo e carbono orgânico do solo nas camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm nos pontos amostrados	148
8. Exemplo de seqüência de blocos de eventos de manejo no Cenário “Atual” (arquivo *.SCH do Century 4). Solo-vegetação: Latossolo Vermelho textura média, sob mata	150
9. Exemplo de seqüência de blocos de eventos de manejo no Cenário “Melhorado” (arquivo *.SCH do Century 4). Solo-vegetação: Latossolo Vermelho textura média, sob mata	156

1. INTRODUÇÃO

A história da agricultura no Planalto do Rio Grande do Sul está diretamente ligada à ocupação desse espaço geográfico pelos imigrantes europeus. Até a chegada destes no fim do século XIX, a paisagem desta região era essencialmente caracterizada por grandes manchas de matas, entremeadas de zonas de campos e vegetação ciliar às margens dos rios e arroios, esparsamente utilizados em um sistema de exploração pecuária extensivo. Inicialmente, as práticas agrícolas empregadas pelos imigrantes europeus foram as mesmas utilizadas na Europa, apesar das diferenças climáticas dominantes no Sul do Brasil: temperaturas médias mais altas e precipitação mais intensa do que em seus países de origem. O sucesso da exploração agrícola nas primeiras décadas muito se deveu à fertilidade associada à matéria orgânica dos solos das matas, as áreas mais procuradas para colonização. Entretanto, a falta de um sistema de manejo adequado ao ambiente começou a comprometer os rendimentos. Em poucas décadas observou-se degradação generalizada dos solos, resultantes de uma combinação de fatores, como a falta de reposição dos nutrientes exportados com as colheitas, a desestruturação física dos solos pela intensa mobilização, associada à alta erosividade das chuvas subtropicais, a reduzida adição de biomassa, especialmente devido à queima dos resíduos culturais e ao aproveitamento destes para alimentação animal, além de sistemas de cultivo com pouca diversidade de culturas e frequência de cultivo, deixando o solo descoberto em parte do ano. Um dos aspectos marcantes desse período foi, sem dúvida, a falta de reconhecimento da matéria orgânica como um dos fatores determinantes da qualidade dos solos.

Após a conscientização de que havia necessidade de um sistema de produção agrícola adaptado às condições ambientais dominantes, as políticas

públicas passaram a fomentar a expansão da pesquisa agropecuária e a extensão rural em moldes científicos. Assim, entre 1960 e 1970, projetos multi-institucionais passaram a promover um processo interativo de reordenamento tecnológico no campo. Esta mobilização de agricultores, extensionistas e pesquisadores foi, em grande parte, bem-sucedida; seus resultados mais significativos começaram a aparecer no final da década de 60, com a recuperação da fertilidade do solo, e, na década de 80, com a redução significativa das taxas de erosão.

Em um contexto mais amplo, os avanços do conhecimento sobre o Meio Ambiente observados nestas últimas décadas colocaram em evidência a importância do solo como parte dos grandes ciclos biogeoquímicos associados à manutenção das populações humanas na Terra – uma dimensão maior que não pode ser compreendida apenas com observações pontuais ou locais. As atividades humanas sobre o planeta vêm causando alterações significativas no ciclo do C, com repercussões climáticas em grande parte desfavoráveis para a vida. Em particular, o solo é componente fundamental no funcionamento do ciclo do C. Esta perspectiva ambiental do C do solo muitas vezes é incompatível com uma visão mais tradicional, em geral marcada pelo viés produtivista e utilitarista. Ewel (1986) e Elliot e Cole (1989) pregam a compatibilização destas visões com estudos integradores em múltiplas escalas, para os quais as abordagens sistêmicas normalmente utilizadas na Ecologia seriam especialmente úteis e até mesmo essenciais. O apoio de ferramentas avançadas como os modelos de simulação, sensoriamento remoto e o geoprocessamento facilitam a execução e expandir o escopo desses estudos (Roush et al., 1995).

No presente trabalho, procurou-se examinar as modificações ocorridas nos estoques de C dos solos desde o início do uso agrícola em uma área representativa da principal região agrícola do Rio Grande do Sul. O estudo considerou a evolução histórica do uso do solo e dos sistemas de cultivo e manejo utilizados, bem como as diferentes classes de solo e paisagens existentes na região. Também foram criados cenários futuros de manejo para examinar os efeitos de práticas atuais e alternativas que poderiam incrementar os estoques de C nos solos da região.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O solo como compartimento do ciclo biogeoquímico do carbono.

Sabe-se há muito tempo que a matéria orgânica do solo é atributo essencial para a manutenção da capacidade produtiva dos solos dos ecossistemas terrestres e, em particular, dos agroecossistemas (Russel, 1961; Manlay, Feller e Swift, 2007). Trata-se de um dos principais indicadores da qualidade do solo, participando diretamente na regulação do ciclo hidrológico e dos ciclos biogeoquímicos; na estrutura do solo e sustentação das plantas; na manutenção da fauna e a biomassa microbiana do solo (Doran e Parkin, 1994; Bruce et al., 1998). De um ponto de vista produtivo, o rendimento das culturas já foi correlacionado aos teores de matéria orgânica do solo em diversas regiões (Allison, 1973; Reeves, 1997; Díaz-Zorita et al., 1999).

Apesar de essencial para a manutenção da vida na Terra, o C é um elemento relativamente pouco abundante na crosta terrestre, presente em teores médios de 3 %, portanto menor que o oxigênio (47%), o Si (28 %) ou o Al (18%) (Hamblin e Christiansen, 1998). O C é o principal componente da matéria orgânica do solo com teor médio de 56%. É o elemento químico efetivamente analisado em laboratório para o estudo da matéria orgânica do solo. Estimativas globais atribuíram um estoque de C orgânico nos solos em torno de 1,5 a 2 Pg, cerca de duas vezes maior que o estoque de C na atmosfera e cerca de três vezes maior que todo o C contido na biomassa vegetal do planeta (IPCC, 2001). Estes estoques de carbono nos solos sob vegetação natural do planeta estão em equilíbrio dinâmico com o carbono na atmosfera, na vegetação e nos mares. Esses estoques são determinados principalmente pelo clima, pelo relevo, pela vegetação e pela composição

mineralógica dos solos, além das interrelações destes fatores, como explícito na teoria pedogenética dos fatores de formação dos solos (Jenny, 1994). A amplitude de variação destes estoques sob vegetação nativa é bastante significativa: regiões de maior altitude, de climas úmidos e sob florestas apresentam maiores estoques de COS, sendo os menores estoques encontrados em regiões de clima árido (Post et al., 1982).

As florestas são importantes no ciclo do C não só pela grande quantidade de C na biomassa superficial (troncos, galhos e folhas), na liteira e no sistema radicular, mas também os grandes estoques de COS acumulados – especialmente nas florestas tropicais e boreais. Os ecossistemas campestres (campos, pradarias, estepes, savanas, etc.), particularmente aqueles localizados em climas mais úmidos, também armazenam importantes estoques de C, apesar de sua menor biomassa superficial, pois contêm grande quantidade de biomassa radicular, com rápida ciclagem, o que potencializa a agregação do solo e a proteção do COS (Jobbágy e Jackson, 2000).

Desde o último século tem sido observado um incremento significativo no estoque atmosférico de C, expresso nas concentrações de CO₂ e CH₄, associado a aumentos importantes de outros gases causadores do *efeito estufa* – expressão que diz respeito à retenção de parte da energia radiante solar incidente na superfície do planeta, mantendo a temperatura média global da superfície próxima a 15°C. Parte deste incremento da concentração de CO₂ na atmosfera vem sendo atribuído às atividades industriais e aos transportes baseados em combustíveis derivados de biomassa fóssil (IPCC, 2001). Entretanto, estima-se que até meados do século XX uma fração significativa do aumento de CO₂ atmosférico proveio das mudanças de uso e manejo do solo, pois a conversão da vegetação nativa para agricultura provocou a transferência de parte dos estoques de C da biomassa superficial e do solo para a atmosfera. Estas emissões foram ainda maiores quando o fogo foi utilizado como prática de manejo para remoção de vegetação (Bruce et al., 1998; Lal, 2004; Ruddiman, 2005). Também a drenagem de banhados e outras áreas úmidas para uso agrícola também foi fonte importante de CO₂ (Baker et al., 2007).

Por outro lado, o solo também pode funcionar como sumidouro (dreno) para o CO₂ atmosférico desde que sejam empregadas práticas que

promovam o aumento do COS, o que vem sendo chamado de “seqüestro de C”. O potencial desta remoção de CO₂ da atmosfera e sua armazenagem no solo é bastante variável, sendo determinado por atributos dos solos e dos sistemas de cultivo utilizados. Usualmente, é maior em solos degradados onde ocorreram perdas significativas de COS (Lal et al., 1995; IPCC, 2001; Lal, 2004). Atualmente se discute a existência de um limite para o potencial desse seqüestro: alguns pesquisadores postulam uma “capacidade de saturação” de C nos solos (Hassink, 1997; Six et al., 2002).

Uma análise mais ampla revela que os benefícios associados ao acúmulo de C orgânico nos solos vão muito além da atribuição de preço ao COS, determinado por um valor de mercado pela atenuação do incremento do CO₂ atmosférico. O “seqüestro de C” nos solos, em última análise, não pode ser dissociado de outros impactos agrônômicos e ambientais positivos dos sistemas de uso e manejo de solos acumuladores de COS. Tem-se observado que a introdução de culturas de cobertura em sistemas de rotação de culturas mais diversificados também pode reduzir a erosão do solo e diminuir a necessidade de N sintético, cuja produção está associada a significativas emissões de CO₂ (Lovato, 2001; Amado, Mielniczuk e Aita, 2002; Amado, et al., 2006). O rol de benefícios associados ao aumento do COS inclui também manutenção e até recuperação da qualidade das águas, do habitat para animais silvestres, da potencialização da degradação de poluentes, e até efeitos estéticos positivos na paisagem rural (Feng et al., 2004).

2.2. A dinâmica do COS nos agroecossistemas tropicais

A quantificação do potencial de perdas e ganhos de C em solos tropicais e subtropicais é um tópico extremamente atual, devido à existência de extensas áreas com uso agrícola existentes, além daquelas ainda sob vegetação natural com potencial para agricultura (América Latina e África) e mesmo das áreas com solos degradados (em grande parte localizadas na África e Austrália). Neste contexto, o crescimento populacional e a expansão da agricultura associado à necessidade de conservação de ecossistemas naturais e agroecossistemas, além da convivência com mudanças climáticas iminentes, trouxe o tema *dinâmica da matéria orgânica* para linha de frente das

prioridades científicas (Greenland, 1995; Bayer, 1996; Amado et al., 2001; Cerri et al., 2003; Janzen, 2004; Lal, 2004).

A intervenção do homem nos ecossistemas terrestres pela prática da agricultura – o estabelecimento de agroecossistemas – usualmente provocou decréscimo do estoque de COS originais. Para melhor compreender estas mudanças de estoques, é necessário conhecer as adições e perdas de C nos solos, o que por sua vez requer a análise dos processos biológicos envolvidos e suas interações com as condições físicas e químicas dos solos. Em condições ambientais estáveis – temperatura, precipitação, concentração de CO₂ e N na atmosfera – os ecossistemas naturais encontram-se em equilíbrio dinâmico entre adições e perdas de C, não havendo alterações significativas nos estoques de COS. Após a introdução da agricultura, se as práticas de manejo e sistemas de cultivo forem constantes, novo equilíbrio dinâmico será atingido após vários anos ou mesmo décadas. O COS é fundamental na manutenção das funções do solo quando usados para a agricultura, mas seu papel é ainda mais relevante em solos tropicais, os quais são em grande parte altamente intemperizados e com baixa fertilidade natural. Nestas regiões, as perdas dos estoques originais do COS após a implantação da agricultura intensiva são bastante altas devido às altas taxas de mineralização do COS e da biomassa (Sanchez e Logan, 1992; Lal et al., 1995). Em certas situações, como em sistemas de produção com menor mobilização do solo e alta diversidade de espécies, as taxas de mineralização mais elevadas nos solos tropicais e subtropicais podem ser contrabalançadas por maiores adições de C. Também se deve ressaltar que as taxas de mineralização do COS são afetadas pela textura do solo, principalmente devido às ligações estáveis entre compostos orgânicos e componentes da fração argila. Portanto as perdas de estoques do COS ao longo do tempo de cultivo podem ser bem menores em solos com textura mais argilosa (Bayer, 1996; Feller e Beare, 1997). Assim, os estoques de COS nestas regiões não são necessariamente menores em comparação aos solos em climas mais frios (Greenland et al., 1992).

A dinâmica do COS vem sendo estudada já há bastante tempo com o modelo empírico de decaimento exponencial, com perdas de COS maiores nos primeiros anos após a implantação da agricultura e estabilização em níveis quantitativamente menores, embora nunca chegando a zero. Na sua aplicação

mais simples, este modelo é uni-compartimental e atribui uma taxa de decomposição única ao COS (Salter e Green, 1933; Woodruff, 1949). De outra parte, considerando a heterogeneidade estrutural e composicional intrínseca do COS, com constituintes que apresentam tempos médios de permanência no solo que variam de poucos dias até milhares de anos, os modelos multi-compartimentais podem representar mais adequadamente a dinâmica do COS. As diferenças nas taxas de mineralização se devem à acessibilidade aos microorganismos decompositores (proteção física), à associação aos minerais do solo (estabilização química) e à resistência intrínseca à decomposição (recalcitrância bioquímica) dos constituintes do COS. A proteção física se dá pela localização de parte do COS no interior dos agregados do solo – onde se encontra inacessível aos microorganismos decompositores. A recalcitrância e estabilização química da COS se devem à própria composição química das moléculas orgânicas e às interações entre os grupos funcionais do COS e dos argilominerais (Jenkinson e Rayner, 1977; Jastrow e Miller, 1997; Krull et al., 2003).

Para a caracterização do COS existem vários métodos de fracionamento, os quais podem ser baseados na composição química dos componentes, na sua localização espacial na estrutura do solo ou no seu grau de estabilidade (tempo de permanência no solo) (Baldock e Nelson, 2000). A heterogeneidade da composição do COS, e a dificuldade em caracterizar seus constituintes do ponto de vista químico e físico, além da multiplicidade de métodos analíticos, levaram à definição de compartimentos conceituais (Jenkinson e Rayner, 1977; Van der Linden, 1987). *Compartimentos lábeis* são composto por resíduos de plantas e animais parcialmente decompostos, exsudatos das raízes, e pela biomassa microbiana e seus produtos. Estes compartimentos possuem um tempo de permanência no solo relativamente curto e têm como principais funções fornecer carbono e energia aos microorganismos e nutrientes às plantas, além de participar no início do processo de agregação. *Compartimentos estáveis* são composto pelo COS protegido estruturalmente ou quimicamente, com longo tempo de permanência no solo.

2.3. Alterações nos estoques de COS pela mudança de uso, manejo e preparo do solo.

Os estoques atuais de COS são definidos pelos estoques originais (de “equilíbrio”) e pelos diferentes usos e manejos do solo, os quais afetam os fluxos – as taxas de transferências – entre os compartimentos do C no solo, na vegetação, na água e na atmosfera (Lal, 2003). Na sua condição natural, os solos apresentam grande variabilidade espacial e temporal de atributos. A complexidade desta situação é aumentada pelas mudanças de uso do solo, práticas e manejos na atividade agrícola: isto decorre de inúmeras combinações de adições de nutrientes, rotações e sucessões de culturas, utilização de máquinas e implementos, entre outros fatores.

A conversão de outros usos do solo para agricultura via-de-regra provoca a redução dos estoques de COS. Entre 20 a 30% em média do COS sob vegetação original é perdido após a conversão para agricultura (Davidson e Ackerman, 1993). Em um levantamento de estudos realizados no Canadá, Van den Bygaart et al. (2003) encontram perdas médias de 24% e uma observação de 68% de perda após conversão de floresta para agricultura. Andriullo e Cordone (1998) apontaram perdas de 43% nesses estoques em 120 anos de agricultura no Pampa argentino. Nos Latossolos do Planalto Rio Grandense, estudos pioneiros observaram perdas entre 30 e 50% do estoque original de COS em cerca de 15 anos após a conversão para agricultura, sob manejo convencional (Machado, 1976; Pöttker, 1977; Cintra et al., 1983).

Guo e Gifford (2003) avaliaram alterações de estoques de COS por mudanças de uso do solo relatadas em 74 estudos. Observaram que, em geral, todas as conversões de ecossistemas naturais para sistemas manejados pelo homem, como agricultura, pastagens e florestamento, provocaram perdas entre 10 e 59% dos estoques originais de COS. Inversamente, a mudança de lavouras para outros usos do solo como reflorestamento, pastagens cultivadas e pousio associado a sucessão natural (capoeira) apresentaram incrementos entre 8 e 53% nos referidos estoques. Como este estudo não diferenciou as lavouras quanto ao sistema de manejo do solo, a interpretação dos resultados deve considerar a probabilidade de a maioria dos estudos se referirem ao sistema convencional de manejo, o qual normalmente apresenta perdas

significativas de COS se comparado a sistemas conservacionistas. Em outra revisão de estudos existentes, Post e Kwon (2000) estimaram que a reconversão de solos de lavouras para florestas e campos poderia acumular em média $0,33 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Cabe lembrar que os estoques de COS também podem ser incrementados sem mudança de uso do solo. Em campos e pastagens, a adequação do manejo através de fertilização e adequação da pressão de pastejo pode aumentar o acúmulo de COS (Conant e Paustian, 2002; Schumann et al. 2002). Em florestas cultivadas ou nativas, práticas de manejo como fertilização e desbastes (redução da população de árvores) podem contribuir para incrementar o acúmulo de COS (Jandl et al., 2007).

A dinâmica do COS nos agroecossistemas – e, em particular nos cultivos anuais de grãos – vem sendo estudada há bastante tempo. Estes são caracterizados pela significativa intervenção humana, pela biomassa em quantidade variável, com remoção de parte do C na colheita (grãos, fibras, frutos, etc.), além de perdas ou deslocamento do C pela erosão. Em uma mesma situação biogeofísica (clima, classe de solo, relevo), os principais fatores determinantes da dinâmica do COS são a intensidade de preparo do solo, os sistemas de cultivo, especialmente quanto a quantidade e qualidade da biomassa superficial e subsuperficial produzida (West e Post, 2002; Blanco-Canqui e Lal, 2004; Amado et al. 2006).

É evidente que existem diferenças importantes entre os sistemas de cultivo e práticas de manejo de solos, havendo mesmo casos de recuperação de parte ou mesmo de todos os estoques perdidos desde a introdução da agricultura. A redução ou mesmo a eliminação da mobilização do solo promovida pelos sistemas de manejo conservacionistas favorecem o acúmulo de COS. Em particular o Sistema Plantio Direto (SPD) tem apresentado o maior potencial de acúmulo (Kern e Johnson, 1993; Paustian et al., 1995; Balesdent et al., 2000; Bayer et al., 2000; West e Marland, 2002; West e Post, 2002;; Mielniczuk et al., 2003; Conceição et al., 2005; Dieckow et al., 2005; Bayer et al., 2006a). West e Marland (2002) identificaram um potencial de acúmulo de $0,34 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (média de 76 estudos) para o SPD em solos agrícolas dos EUA; Steinbach e Alvarez (2006) sugeriram uma taxa de acúmulo de $0,46 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para a região do Pampa argentino; Bayer et

al., (2006b) indicaram taxas de 0,35 e 0,48 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ para as regiões tropicais (Cerrado) e subtropicais (Sul) do Brasil respectivamente. Deve-se considerar que estas taxas médias, obtidas de experimentos de longo prazo, normalmente se referem aos primeiros 10 a 20 anos após adoção do SPD, após o que os estoques de COS usualmente estabilizam em nova situação de equilíbrio.

2.3.1. Importância do relevo e da erosão hídrica

Existem amplas evidências de que os estoques de COS são afetados pelo relevo e sua conformação. Um significativo número de estudos em escala de lavoura apresentaram uma relação direta entre elementos da paisagem e estoques de COS: normalmente a parte superior das encostas apresentaram estoques menores de COS em relação às seções inferiores e áreas deposicionais (Gessler, 2000; Tan et al., 2004; Zhang et al. 2006). Em um estudo detalhado, McCarty e Ritchie (2002) encontraram grandes quantidades de COS depositados nas zonas ripárias, próximas às drenagens, o que seria resultado não apenas de acúmulo e soterramento de C nesses locais, mas também de maiores adições de C decorrentes de incremento da produtividade primária causado pelos nutrientes depositados e maior umidade nestes locais. Ao estudar a relação paisagem, erosão e estoques de COS em duas microbacias hidrográficas na Califórnia (EUA), Yoo e Amundson (2006) observaram maiores estoques de COS nas partes côncavas e convergentes do relevo. As superfícies deposicionais, cobrindo em média 42% da área total, continham aproximadamente 70% do estoque total de COS de ambas as microbacias. Concluíram que a taxa de erosão do solo e a concentração de C orgânico determinam a taxa de perda erosional de COS, e por conseqüência, a capacidade do solo em armazenar C.

O impacto relativo do deslocamento do COS pela erosão do solo no ciclo global do C é um aspecto destacado nas discussões atuais sobre a dinâmica do COS (Jacinthe et al., 2001; Lal, 2003; Van Oost et al., 2004; Van Oost et al., 2006). O processo da erosão hídrica redistribui localmente (em lavouras e microbacias) ou regionalmente (dentro de uma bacia hidrográfica) quantidades significativas de COS (Gregorich et al., 1998; MacCarty e Ritchie,

2002; Lal, 2003; Polyakov e Lal, 2004). Harden et al. (1999) ao estudar a dinâmica do C com técnicas radioisotópicas em área agrícola cultivada por 100 anos no Mississippi (EUA), observaram que aproximadamente 80% do estoque original de COS fora perdido pela erosão e somente 20% pela decomposição .

Embora haja acordo no que se refere à relevância da erosão no estudo da dinâmica do COS, não há consenso quanto ao destino deste COS erodido. Lal (2004), em ampla revisão de estudos sobre o C associado à erosão afirma que, em média, 20% do COS redistribuído pelo processo erosivo seria emitido para atmosfera como CO₂, principalmente pela degradação dos agregados e pela mineralização do C originalmente protegido durante o transporte dos sedimentos. Assim, a erosão seria fonte de CO₂ para a atmosfera.

Uma outra perspectiva sugere uma *substituição dinâmica* do COS erodido a médio e longo prazo, quando pode haver recuperação dos estoques nas áreas erodidas pelo manejo do solo (fertilização e maiores adições de resíduos), concomitante à proteção de parte significativa do COS erodido pelo soterramento em áreas deposicionais. Nesta visão o processo erosivo constituiria um sumidouro para o C atmosférico (Stallard, 1998; Harden et al., 1999; Van Oost et al., 2006).

Os solos agrícolas do Planalto Riograndense sofreram por muito tempo taxas significativas de erosão, chegando mesmo, como a década de 70, a comprometerem os rendimentos das culturas anuais. Na época, foram realizados estudos importantes relacionando a erosão a sistemas de manejo e cultivo sob chuva natural (Cassol et al., 1984): na sucessão trigo-soja, em sistema convencional, com preparo intensivo, as taxas de erosão situaram-se entre 4 e 7 t solo ha⁻¹ ano⁻¹; neste mesmo sistema, mas com a queima da palha do trigo, chegou a 12 t solo ha⁻¹ ano⁻¹; sob preparo reduzido (escarificação com manutenção de cobertura do solo), as taxas observadas caíram para 2 e 3 t solo ha⁻¹ ano⁻¹; no SPD as taxas usualmente se situaram entre 0,5 e 1,5 t solo ha⁻¹ ano⁻¹. Estudos mais recentes corroboraram estas observações (Cogo et al., 1997; Beutler et al., 2003). Entretanto, a maior parte dos estudos de erosão no RS não consideraram a dinâmica do COS associadas ao processo erosivo.

Debarba (2002) simulou alterações nos estoques de COS e emissão de CO₂ em solos do Planalto do RS através de simulações com o modelo

Century incorporando taxas médias de erosão para a região como as citadas acima. A dinâmica do COS foi estudada a partir de estoques iniciais (de “equilíbrio”) definidos para a vegetação nativa original e aplicação de cenários de 100 anos de agricultura (nas áreas de campos) e 150 anos de agricultura (nas áreas de mata). Os cenários, estabelecidos a partir de dados censitários e outros estudos locais, contemplavam diferentes sistemas de cultivo e manejo de solos associados a taxas médias de erosão e adições de biomassa pelas culturas. Nas condições estabelecidas para as simulações, uma parte significativa - entre 30 e 70% - dos estoques originais foi perdida devido à erosão. Houve recuperação parcial dos estoques originais perdidos desde o início da agricultura pela adoção de sistemas conservacionistas como o SPD em quase todos os solos e cenários estudados.

Devido à relevância da erosão e da deposição no estudo da dinâmica do COS, alguns atributos da paisagem deveriam ser incorporados à modelagem de COS para incorporar seu impacto. Pennock e van Kessel (1997) indicam que o estudo da redistribuição do solo na paisagem é essencial para a compreensão da dinâmica do COS em escala regional.

2.3.2. Amostragem e medição do COS

Um dos pré-requisitos para os estudos de dinâmica do COS e sua participação no ciclo global do C é a estimativa da quantidade de C armazenada no solo. Apesar da carência de estudos e inventários de COS abrangendo o grande número de classes de solos e seus usos correntes, considera-se que a variabilidade espacial do COS seja de média a alta, o que implica a necessidade de grande número de amostras para estimar com acurácia o estoque de COS (Garten e Wulschleger, 1999; Mulla e McBratney, 2000; Cerri et al., 2004; Poussart e Olsson, 2004). Além disso, para a avaliação do impacto de usos e manejos no estoque de COS devido a alterações de uso e modificações de manejo, também é necessário quantificar a variabilidade temporal. Esta dinâmica temporal pode ser complexa e de difícil detecção, pois usualmente a variação anual dos estoques de COS é pequena em relação aos estoques totais, sendo necessário vários anos para identificar efetivo

incremento, estabilidade ou perda (Greenland, 1995; Ellert et al., 2001; Ellert et al., 2002).

Outro aspecto que dificulta a avaliação de estoques é a utilização de técnicas analíticas diferentes, cujos resultados nem sempre são diretamente comparáveis. Além disso, os métodos em uso normalmente não têm a acurácia necessária para medir pequenas mudanças de estoques (Greenland, 1995). As técnicas analíticas mais utilizadas para o COS estão a combustão úmida, a combustão seca e a perda na ignição. Atualmente a técnica de combustão seca e posterior detecção do CO₂ liberado tem sido recomendada, por ser menos suscetível de interferências e apresentar maior repetibilidade (McConkey et al., 1999; Skjemstad, Spouncer e Beech, 2000; Blaisdell et al., 2003).

As propostas de utilização dos solos agrícolas como sumidouros para o C atmosférico demandam procedimentos metodológicos bem definidos para verificar o efetivo seqüestro de CO₂ e permitir comparações entre locais, práticas ou sistemas (Arrouays et al., 2002; IPCC, 2006). Ainda não existem protocolos de amostragem universalmente aceitos como aqueles definidos para seqüestro de C pela biomassa pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC, 2007). Entretanto, algumas propostas têm sido sugeridas.

Para a detecção de variações temporais dos estoques de COS em escala regional, Ellert et al. (2001) sugerem um protocolo baseado na amostragem por *microparcels* de 4m x 7m, representativas da classe de solo, abrangendo as unidades da paisagem da área de interesse, da vegetação e do manejo predominante. Em cada microparcela, 6 subamostras seriam coletadas com distância mínima de 2m, sendo as amostras obtidas usadas para a medição do COS e densidade do solo. Em uma das perfurações de amostragem seria inserido um marcador magnético, possibilitando assim o retorno exatamente ao mesmo local após vários anos para reamostragem. Em cada lavoura (presumindo uma área entre 30 e 65 ha), seriam definidos entre um e seis microparcels, de acordo com a complexidade do relevo. Estes autores recomendam também que os estoques sejam determinados pela *massa equivalente* de um tratamento de referência, evitando o erro induzido pela comparação de camadas ou horizontes de mesma espessura com

densidades diferentes. Nye e Greenland (1964) já alertavam da necessidade desta correção para a quantificação de diferenças de estoques de nutrientes, decorrente da alteração da densidade do solo em sistemas de uso e manejo. Aplicações deste protocolo conseguiram detectar diferenças significativas entre tratamentos de 2 a 3,6 Mg C ha⁻¹ (Ellert et al., 2002; Conant et al., 2003). O Ministério da Agricultura do Canadá implantou um programa de monitoramento de mudanças de estoques de COS em escala regional com esta metodologia (McConkey et al., 1999).

A União Européia publicou recentemente a primeira recomendação sobre amostragem de solo com vista à verificação de mudanças de estoques de COS no âmbito de inventários nacionais requeridos pelo Protocolo de Kyoto (Stolbovoy et al., 2005). Foram estabelecidos procedimentos para a amostragem, a profundidades de amostragem para diferentes usos, algoritmos para o cálculo dos estoques e incertezas associadas às medições.

Apesar da complexidade do tema, o avanço das políticas de mitigação das emissões dos gases de efeito estufa, tanto no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática como por outras iniciativas independentes, deverá eventualmente definir protocolos de medição de COS.

2.4. Cenários de evolução do uso do solo

A construção de cenários é uma ferramenta apropriada para comparar ações alternativas intrinsecamente incertas e com alta variabilidade, constituindo uma forma de ordenação de percepções sobre ambientes e situações passadas ou futuras. Assim, cenários não são predições propriamente ditas, mas delimitações das incertezas inerentes ao que presumimos como provável (Verburg, Veldkamp e Rousevell, 2006). Kahn e Wiener (1967) definiram o termo como “uma seqüência hipotética de eventos construídos para a focalização de causalidade e derivação de decisões”. Os cenários são ficcionais por natureza, descrevendo situações, ações e suas conseqüências, contendo premissas implícitas para descrever o que poderia acontecer (cenários prospectivos ou preditivos) ou o que teria acontecido (cenários retrospectivos ou históricos).

A aplicação de cenários no estudo da evolução do uso do solo, de sistemas de cultivo e manejo e dinâmica do COS regionais, requer informações com relevância e escala apropriadas. Para sua elaboração, as fontes de informação usuais são levantamentos e mapas temáticos (topografia, geomorfologia, pedologia, vegetação); dados de sensoriamento remoto: aerofotogrametria e imagens de satélite; os censos oficiais (anúários estatísticos, relatórios dos censos agropecuários, levantamentos agrícolas); informações acessórias locais como estudos e levantamentos municipais, e registros populares sobre histórico da agricultura.

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através dos Censos Agropecuários é responsável pela produção de informação de uso do solo. Esta informação, disponibilizada em intervalos irregulares de pelo menos 10 anos, não é espacializada (ou seja, explicitamente referenciada a algum sistema de coordenadas), sendo os dados tabulados apenas por município. Dessa forma não é possível indentificar dentro dos municípios a distribuição de usos do solo e dos cultivos. Além disso, não existe acompanhamento de sistemas de manejo de solo, salvo projetos ocasionais do serviço de extensão rural.

Esta carência de informações espacializadas com atualização freqüente sobre uso do solo pode ser suprida através do *sensoriamento remoto* – a aquisição de informações relacionadas aos recursos naturais e meio ambiente através de sistemas sensores a bordo de aeronaves e satélites. As informações assim obtidas são posteriormente referenciadas a outros estudos pré-existentes e medições realizadas na área de interesse que estabelecem a *verdade de campo*. O sensoriamento remoto permite a estimativa de áreas sob cultivo atual e a reconstrução histórica de uso do solo pela aplicação de técnicas de classificação digital às imagens (cenas) de sensores remotos como o MSS (Multispectral Scanner) e o TM (Thematic Mapper), a bordo dos satélites da série LANDSAT (Richards et al., 1999). Apesar destas técnicas já serem bem estabelecidas, no Brasil elas vêm utilizadas de forma sistemática na análise apenas na Amazônia.

Outra aplicação de sensoriamento remoto é a identificação espacializada das práticas de manejo de solos em regiões agrícolas – por exemplo, estimativa de áreas sob preparos conservacionistas e preparo

convencional. (Leblon et al., 1996; Van Deventer et al., 1997; Chen et al., 2000; Brickleyer et al., 2002; Brickleyer et al., 2006). Esta abordagem tem apresentados resultados promissores, mas não há registro de sua aplicação no Brasil.

2.5. Os modelos de simulação

Os ecossistemas naturais são intrinsecamente complexos o que dificulta a análise integral e a representação de seu funcionamento, tornando-a às vezes até impossível devido ao grande número de variáveis intervenientes e mecanismos de interações e retroações não-lineares (Jørgensen e Bendorochio, 2002). Os agroecossistemas, que surgiram a partir do início da agricultura há cerca de 12.000 anos, podem ser entendidos como um tipo particular de ecossistema, originados a partir de alterações dos ecossistemas naturais (Elliot e Cole, 1989).

O solo é o compartimento fundamental destes agroecossistemas, e o COS um de seus componente-chave, como discutido anteriormente. A extrapolação do conhecimento adquirido sobre o COS a partir de experimentos agronômicos controlados ou levantamentos locais para a paisagem agrícola é um desafio permanente da Ciência do Solo. Os *modelos de simulação*, são ferramentas cada vez mais empregadas na prática científica para explicitar associações entre as relações empíricas estabelecidas pelo processo reduccionista e para simular estoques e fluxos nos ecossistemas (Greenland, 1995; Bruce et al., 1998; Krull et al., 2003). A aplicação dos modelos de simulação é corriqueira na Climatologia e Ecologia, mas sua aplicação na Ciência do Solo é mais recente, com exceção dos modelos preditivos de erosão do solo (Arnold et al., 2002; Rose, 2002). A preocupação com os impactos das mudanças climáticas levou ao desenvolvimento do acoplamento entre modelos climáticos e modelos de ecologia terrestre – de uso do solo e produção vegetal – espacialmente localizados (Scholze et al., 2005). No contexto científico e ambiental atual, a utilização de modelos e suas interligações deverão seguir tendo lugar destacado.

Um modelo é uma forma de síntese e integração do conhecimento, intrinsecamente associado ao estudo de sistemas, constituindo uma

aproximação virtual para os ecossistemas terrestres. Silvert (2001) afirma que a utilização de modelos é “uma parte essencial e inseparável” da prática científica. A modelagem permite estabelecer um referencial conceitual para a formulação de hipóteses, proporcionar um ambiente adequado e acessível para testar hipóteses complexas e integrar o conhecimento obtido com a pesquisa reducionista. Por outro lado, se os modelos forem aceitos como fato estabelecido ou representação absoluta da realidade, podem limitar o avanço do conhecimento (Smeck et al., 1983).

Logan (1994) afirma que muitas vezes “sistemas complexos requerem modelos complexos”. Entretanto, modelos simplificados têm contribuído muito para o avanço das Ciências, apesar da limitação intrínseca de não considerarem a heterogeneidade espacial e variabilidade de seus componentes (Van Nes e Scheffer, 2005). Assim, é evidente que a aplicação de modelos se defronta com um dilema permanente: simplificar o problema científico no interesse da generalização ou admitir e trabalhar a complexidade do tema de interesse para atingir maior realismo (Clark, 2005).

Jørgensen e Bendoricchio (2001) definem três etapas críticas no processo de modelagem:

- *verificação*: é a análise da lógica interna do modelo, para estabelecer se o modelo se comporta como esperado, se é estável a longo prazo, se suas unidades são coerentes. Normalmente esta fase acontece quando o usuário faz os primeiros testes com o modelo. Um procedimento que pode ser associado à verificação é a análise de sensibilidade.

- *calibração*: é a tentativa de estabelecer coincidência entre os dados observados e os dados de saída do modelo pela variação de parâmetros internos do modelo. Este procedimento pode ser baseado em tentativa e erro ou em protocolos computacionais e estatísticos de estimação de parâmetros;

- *validação*: consiste em aplicar testes objetivos para avaliar o quanto o modelo se aproxima dos dados observados. Idealmente, deve ser aplicada usando dados independentes daqueles utilizados para calibrar o modelo. Bookstaller e Girardin (2003) sugerem alguns procedimentos de validação: *visual*, uma abordagem gráfica onde os dados medidos e modelados são inseridos no mesmo gráfico para comparação; *estatística*, usando

estatísticas descritivas; *juízo de especialista*, no qual cientistas com notório conhecimento sobre o tema avaliam os dados modelados e medidos.

A grande maioria dos usuários utiliza modelos pré-existentes, dispensando os conhecimentos temáticos muito específicos, além das ferramentas matemáticas e de programação normalmente necessárias para a implementação de um modelo. No processo de seleção de modelos existentes, é razoável que se utilize aqueles já validados e aplicados em situações ambientais similares a que se pretende estudar. Este cuidado é essencial porque o modelo pode ter sido desenvolvido com objetivos diferentes e validado em ambientes muito diversos. Mesmo assim, a utilização de modelo pré-existente requer ajuste de parâmetros para a nova aplicação, através da análise de sensibilidade, calibração e validação local. Além disso, o conhecimento da fundamentação conceitual – a “espinha dorsal” do modelo – e a avaliação criteriosa do comportamento do mesmo na aplicação em vista são necessários (Silvert, 2001).

2.6. Simulação da dinâmica do COS

Dentre as muitas abordagens para estimar as alterações regionais dos estoques de COS, a mais simples é aquela que utiliza informações de inventários (bases de dados de solos) já existentes. A aplicação desta abordagem em escala nacional na China, utilizando levantamentos de solos disponíveis, indicou decréscimo de 1 Pg no COS entre 1960 e 1980, correspondendo a cerca de 1% do estoque total calculado para 1960. Entretanto os autores observaram que esta diferença não deve ser estatisticamente significativa, dada a grande variabilidade dos dados disponíveis nos levantamentos (Wang et al., 2003). Lettens et al. (2005) avaliaram os estoques e fluxos de COS na Bélgica entre 1990 e 2000 pela compilação de seis bases de dados. A principal dificuldade encontrada, e que pode ser generalizada para a presente abordagem, foi compatibilizar os dados de COS das bases, pois normalmente os procedimentos metodológicos são diferentes (profundidade de amostragem, técnica analítica, número de amostras).

Apesar da estimativa de estoques de COS e sua variação no espaço e tempo pela análise de base de dados obtidas pela amostragem dos solos ser desejável, sua execução prática é custosa e demorada. Assim, quando é necessário relacionar estoques históricos e atuais, além do potencial de acúmulo futuro de COS, a modelagem pode complementar a amostragem dos solos com vantagens evidentes por (Ardö e Olsson, 2003; Izaurre et al., 2003):

- permitir as estimativas de efeitos de mudanças climáticas, usos e manejos do solo;
- possibilitar extrapolação regional da distribuição dos estoques de COS observados localmente;
- quantificar as mudanças temporais e espaciais dos estoques.

Os modelos de simulação são particularmente úteis no estudo das interações entre as mudanças ambientais e o COS, porque permitem vislumbrar cenários históricos e futuros a partir da integração do conhecimento atual sobre a dinâmica do COS. Os modelos empíricos, como os modelos de regressão, tradicionalmente utilizados nas Ciências Ambientais e na Agronomia, são robustos para estudo e entendimento dos processos em condições controladas, mas limitados na extrapolação para paisagens agrícolas em estudos regionais (Turner et al., 2002).

Existem dezenas de modelos propostos para simulação de processos do solo e uma grande parte destes trata da dinâmica do C e do N (Shaffer et al., 2001; GCTE-SOMNET, 2007). Estes modelos apresentam alguns pressupostos básicos comuns (Paustian, 2001; Six et al., 2002):

- o COS é dividido em diferentes compartimentos conceituais, que são similares, porém não equivalentes ou diretamente comparáveis às frações obtidas pelos métodos de caracterização e fracionamento (conforme item 2.2);
- estes compartimentos são definidos por diferentes taxas de mineralização ou pelo tempo médio de permanência do COS, e diferentes relações C/N.
- a decomposição é representada matematicamente por modelo cinético de primeira ordem, descrito por funções exponenciais, cujos parâmetros são determinados em situações explicitamente definidas de clima, solo e sistema de manejo.

2.6.1. O modelo Century

O “Modelo Century de Matéria Orgânica do Solo” (Century) é um dos mais antigos, e tem sido amplamente utilizado pela sua consistência e facilidade de aplicação no estudo da dinâmica do COS (Parton et al., 1987; Metherell et al., 1993; NREL, 2005). Foi testado em diversos ecossistemas e sistemas de uso e manejo de solos (Smith et al., 1997; Gilmanov, 1997). Da mesma forma, muitas aplicações deste modelo já foram feitas no Brasil e no RS. (Silveira et al., 2000; Fernandes, 2001; Vezzani, 2001; Debarba, 2002; Cerri et al., 2004; Leite et al., 2004; Oliveira; 2004; Lopes, 2005).

Century é um modelo dinâmico, que representa a dinâmica de nutrientes (C, N, P e S) e da água no solo, além do crescimento vegetal, em diferentes ecossistemas, com ciclo mensal, em uma camada superficial do solo de 20 cm. Foi originalmente concebido para avaliar o impacto de mudanças climáticas na produtividade primária vegetal, matéria orgânica do solo e ciclagem de nutrientes nas pradarias norteamericanas (Centro-Oeste dos Estados Unidos), representando efeitos de clima, solos e características da vegetação por períodos longos de tempo (50 a 2.000 anos). Desenvolvimentos posteriores da formulação inicial do modelo incluíram a simulação de florestas, savanas e agroecossistemas, além da ampliação da simulação de práticas de manejo, como sistemas de preparo e cultivo, erosão, fertilização, irrigação, colheita, pastejo, queimadas e remoção física de biomassa (desmatamento). Uma das reconhecidas vantagens no modelo Century é a possibilidade de simular mudanças de uso e manejo de solos bastante complexas. Vale lembrar que o Century já foi calibrado e validado em um grande número de zonas climáticas e sistemas de manejo (Metherell, 1993).

A implementação do modelo mais utilizada ainda é a versão DOS de 1998 (Century 4.0). Existem algumas compilações alternativas criadas em função do tipo de projeto em que foi aplicado o modelo, como o Century 4 “Agroecozona”. Versões mais recentes, como o Century 4.5 e 5.0, encontram-se em etapas intermediárias de desenvolvimento. Além do programa propriamente dito – “century.exe”, arquivo executável – é necessário um conjunto de arquivos de entrada com os parâmetros e variáveis do modelo. A

execução do modelo cria um arquivo com variáveis de saída selecionáveis pelo usuário (Figura 1). Os parâmetros calibráveis – ajustáveis às singularidades da área em estudo – podem ser divididos em dois grande grupos: a) parâmetros biogeofísicos locais; b) parâmetros de manejo do solo e de culturas (plantas cultivadas ou vegetação nativa). A situação geográfica da simulação de

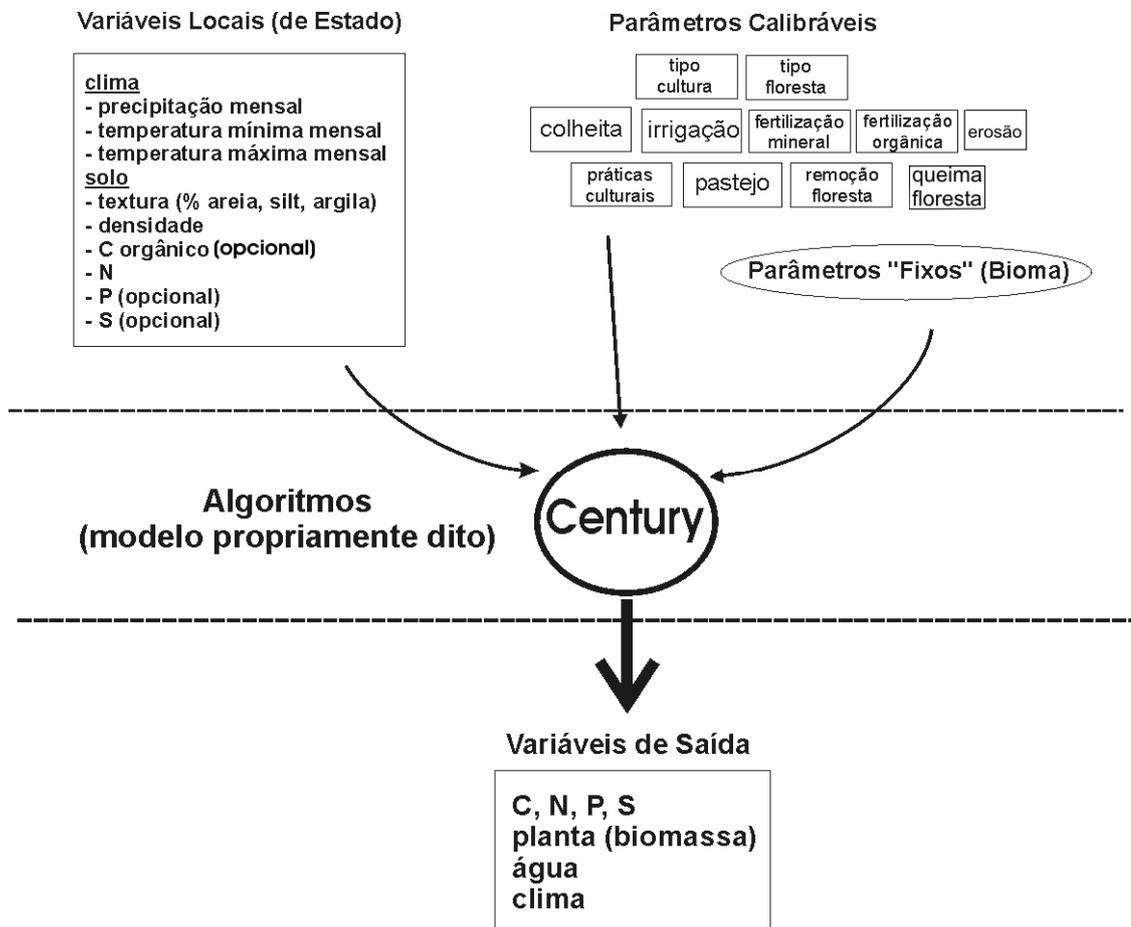


Figura 1. Estruturação do modelo Century (modificado de Parton et al., 1987; Metherell et al., 1993; Norgaard, 2004).

interesse é descrita explicitamente pelas variáveis locais, que incluem atributos do clima e do solo, definidas no arquivo "<site>.100". A caracterização do clima requer, pelo menos, médias mensais para temperatura e precipitação. A série histórica, com dados por mês e ano, pode ser utilizada diretamente, ou o próprio modelo pode realizar uma simulação estocástica da variabilidade climática por meio de um algoritmo próprio. Os valores iniciais para COS são normalmente definidos por simulação "de equilíbrio", na qual o modelo é executado por um período longo, normalmente entre 3.000 a 6.000 anos, com valores iniciais próximos a zero. O manejo do solo permite detalhamento do uso do solo, sistemas de cultivo e práticas de manejo, descritas explicitamente

em dez arquivos apropriados: pastejo (*graz.100*) ; tipo de floresta (*tree.100*); remoção da floresta (*trem.100*); tipo de cultura (*crop.100*); práticas de manejo (*cult.100*); colheita (*harv.100*); queima de floresta pelo fogo (*fire.100*); irrigação (*irri.100*); fertilização mineral (*fert.100*) e orgânica (*omad.100*).

O modelo contém parâmetros internos *default*, ditos “fixos”, que estão incluídos no arquivo *fix.100*. Ocasionalmente é necessário alterar estes parâmetros para calibração adequada do modelo em aplicações locais diferentes daquelas da concepção do modelo.

A estrutura geral do algoritmo usado para simular a dinâmica dos nutrientes apresenta três submodelos principais acoplados: solo e decomposição, água e planta (Figura 2). Para fins de simulação, os submodelos solo e decomposição e planta são restritos aos 20 cm superficiais, enquanto o submodelo de água pode ser estendido até 2 m de profundidade.

2.6.2. Modelagem dinâmica espacialmente explícita

A maior parte dos modelos da dinâmica de nutrientes foi concebida para simulações pontuais, aplicáveis a parcelas experimentais ou pontos “virtuais” representativos de uma situação ambiental média, pois variáveis como temperatura, precipitação e atributos do solo são normalmente obtidas em área de estudo bem delimitadas: estações meteorológicas, parcelas experimentais ou pontos de coleta em levantamentos de campo. Assim, modelos de simulação como Century, RothC, EPIC e DNDC utilizam a estruturação de “parâmetros agregados”, na qual as variáveis de entrada e parâmetros se referem a um local ou ponto abstrato, que sintetiza os atributos da região de estudo. A modelagem pontual, por não considerar explicitamente a variabilidade espacial de seus parâmetros e variáveis, apresenta importantes limitações: a) os processos descritos em um ponto não são necessariamente os mesmos em outras escalas; b) a expansão de escala (*upscaling*) a partir de um ponto para área assumida como homogênea constitui uma simplificação da realidade de campo, que é intrinsecamente variável; c) a utilização de informação espacialmente delimitada, se disponível, é laboriosa; d) a incorporação e avaliação da variabilidade espacial não é facilmente implementada. Em síntese, a aplicação de uma análise pontual pode

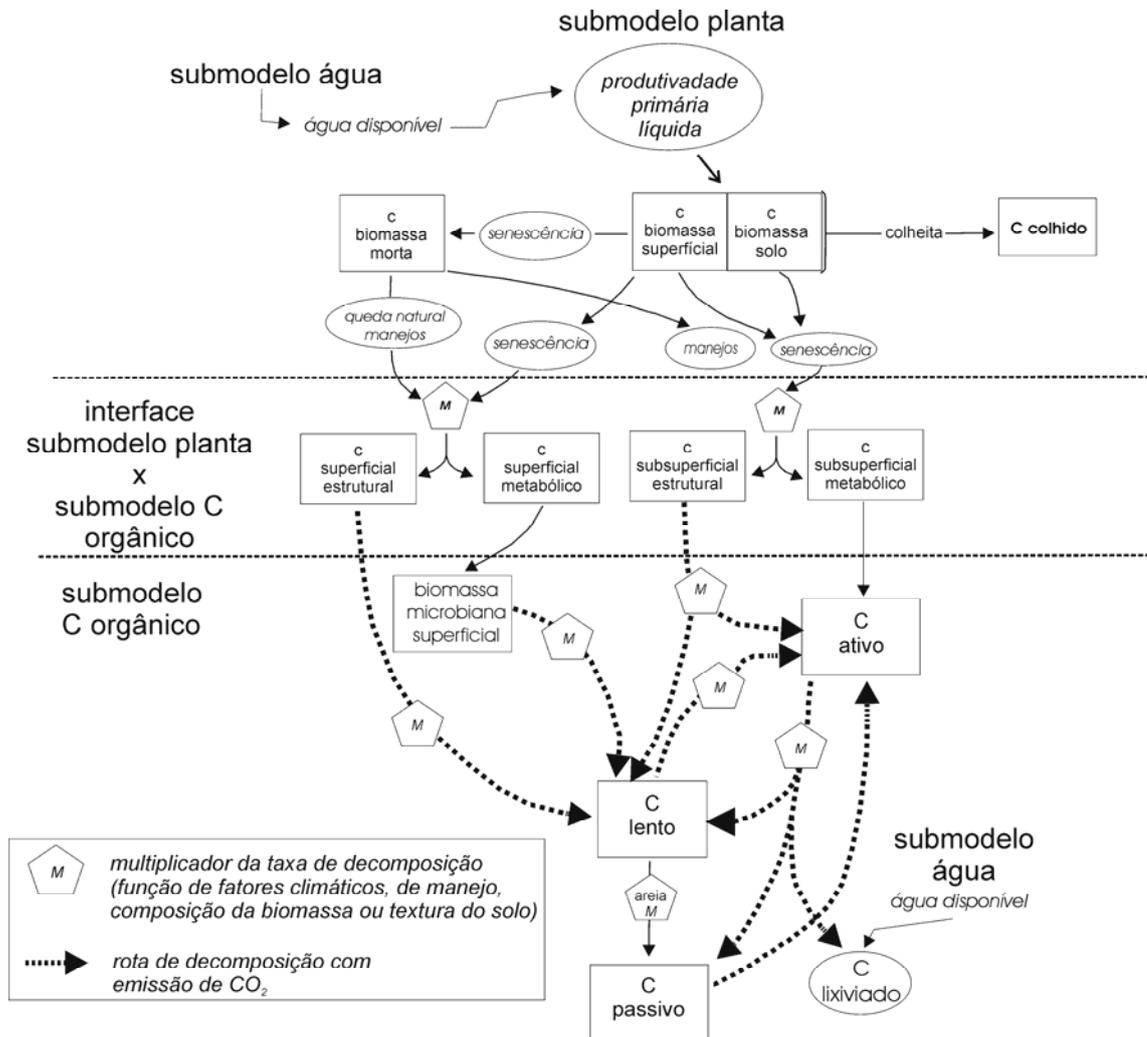


Figura 2. Fluxograma geral do Century (modificado de Parton et al., 1987; Metherell et al., 1993; Norgaard, 2004).

desconsiderar aspectos relevantes do sistema em estudo (Longley et al., 2001). As estimativas mais exatas da distribuição dos estoques, fontes e drenos do COS em escala regional, requerem novas abordagens que possibilitem simular mudanças nos estoques de C associadas à diferentes formas do relevo e usos do solo, sistemas de manejo de solos, e mesmo mudanças climáticas. A *modelagem dinâmica espacialmente explícita* – também chamada de modelagem georeferenciada (Burke et al., 1990) – é uma alternativa para a análise de estoques e dinâmica de nutrientes e a simulação destes processos e suas interrelações em outras escalas, além do ponto ou da parcela, incorporando sua variabilidade espacial e temporal. Para esta integração são utilizadas ferramentas de geoprocessamento, atualmente bastante acessíveis pelo desenvolvimento e popularização dos computadores

personais (Ortiz, Formaggio e Epiphano, 1997). O geoprocessamento, materializado em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), permite o acoplamento de modelos pontuais como o Century a modelos da paisagem que podem incluir levantamentos de solo, de uso do solo e de elementos da paisagem (formas do relevo).

Conforme Jørgensen e Bandorocho (2001), conceitualmente a integração espaço-temporal de modelos dinâmicos com SIG se situa entre duas situações opostas (Figura 3):

- *acoplamento livre*. O modelo utiliza informações de uma base de dados geoespacial (BDGE) externa, separada estruturalmente. Os dados são carregados manualmente ou por um aplicativo (interface) de extração e inserção específico para o modelo e a BDGE utilizada. As simulações são realizadas seqüencialmente e independentemente. Esta forma de implementação é a mais comum justamente pela simplicidade, facilidade de desenvolvimento e aplicabilidade. A desvantagem principal é a dificuldade de expansão da base de dados e do número de simulações, pois nestas situações a aplicação pode se tornar extremamente laboriosa – o principal fator limitante passa a ser o usuário (operador). Um exemplo desta aplicação foi o estudo de dinâmica do COS no Norte do Sudão, no qual a extração das variáveis de entrada para simulações Century feita manualmente a partir da base de dados geoespacial (Ardö e Olsson, 2003; Ardö e Olsson, 2004). O procedimento é laborioso e demorado, com execução viável apenas para base de dados de tamanho reduzido, em áreas geográficas restritas.

- *acoplamento completo*. O modelo e a BDGE são integrados estruturalmente num ambiente SIG. Tanto a manipulação (adição, edição, deleção) dos dados analíticos quanto as simulações são feitas na mesma plataforma ou interface. A principal vantagem desta abordagem é a possibilidade de se ter maior controle sobre a base de dados e sobre as simulações, além do fator restritivo na manipulação de uma base de dados expandida e execução das simulações recair sobre o equipamento (*hardware*), e não mais

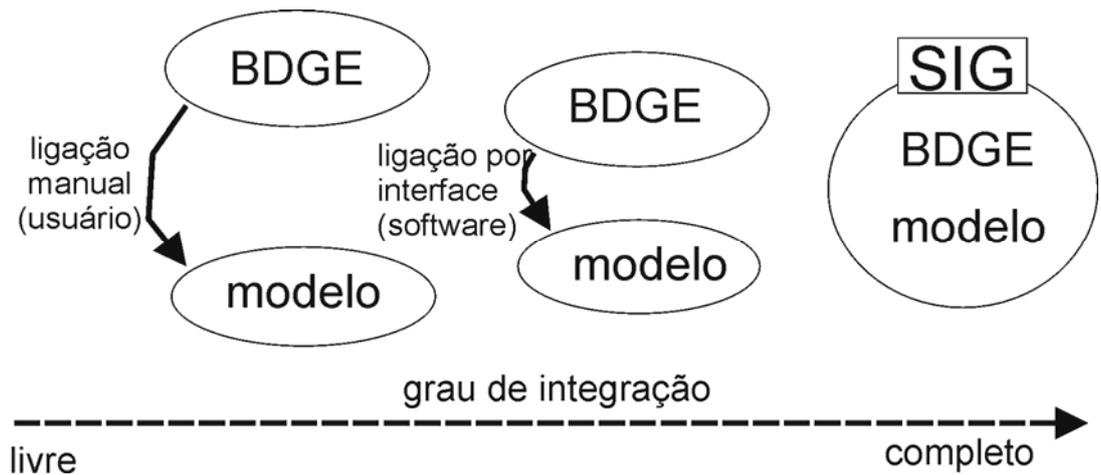


Figura 3. Formas e graus de integração de modelos de simulação e bases de dados espacialmente explícitas

sobre o usuário. A desvantagem se encontra na complexidade da construção, pois conhecimentos de programação, gerenciamento de base de dados e SIG avançados são necessários. Cabe ressaltar que estas dificuldades são essencialmente uma questão de desenvolvimento (da integração SIG-modelo), as quais poderiam ser resolvidas por manuais e guias para usuários, além de suporte técnico dedicado por especialistas.

Uma das primeiras aplicações desta abordagem com Century em contexto similar foi o estudo da dinâmica do C das pradarias do Nordeste do estado do Colorado, EUA (Burke et al., 1990). As variáveis de entrada para o Century foram extraídas de um SIG contendo os planos de informação clima e solos, gerando 160 combinações diferentes (unidades de simulação), configurando um acoplamento livre. Os estoques de COS, a produtividade primária e os fluxos gasosos de N obtidos a partir das simulações foram inseridos no SIG para geração de mapas e comparados com dados de levantamentos de campo. De uma forma geral, esta aplicação conseguiu detectar a variabilidade regional dos atributos estudados, mas os autores concluíram da necessidade de considerar o efeito de escala, especialmente quanto aos solos. Outra aplicação espacialmente explícita utilizando o acoplamento livre foi o VEMAP (Vegetation-Ecosystem Modeling and Analysis Project), na qual foram testados Century e outros modelos biogeoquímicos

quanto à capacidade de identificar impactos das mudanças climáticas sobre os biomas da América do Norte. A partir da criação de uma base de dados geoespacial de solos, clima e vegetação foram extraídas as variáveis de entrada para simulações de cenários futuros desenvolvidos a partir de modelos climáticos (Mellilo et al., 1995; McKeown et al., 1996).

Donigian et al. (1995) realizaram um estudo para a EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA) contemplando cenários atuais e alternativos de sistemas de manejo de solos sobre as emissões de CO₂ e seqüestro de COS. Esta foi uma aplicação de acoplamento livre de modelo e BDGE, na qual as variáveis de entrada para o Century foram extraídas de uma BDGE de clima e solos e os cenários atuais e futuros de sistemas agrícolas, gerados por um modelo de alocação de uso do solo a partir de cenários agrícolas e econômicos.

Uma abordagem intermediária de acoplamento em escala maior foi desenvolvida por pesquisadores do Rothamsted Research Institute (Inglaterra), associando os modelos Century e RothC a um SIG (Falloon et al., 1998; Falloon et al., 2002). O acoplamento entre estes foi feito por uma interface específica desenvolvida para automatizar a extração das variáveis de entrada da BDGE requeridas pelos modelos, permitindo assim múltiplas simulações seqüenciais, seguidas da extração das variáveis de saída para visualização gráfica, interpretação e mapeamento. Esta abordagem foi também utilizada na avaliação das mudanças de estoques regionais de COS na Bélgica (van Wesemael et al., 2004). Também na Bélgica, um estimativa das mudanças nos estoques de COS em solos agrícolas acoplou o modelo DNDC, cuja versão atual apresenta uma interface para múltiplas simulações, à base de dados de solos existente (Sleutel et al., 2006a, Sleutel et al., 2006b)

Norgaard (2004) adotou solução similar de acoplamento com a aplicação da interface *iCentury* para estudar a evolução dos estoques de COS no Senegal. A interface desenvolvida por Todd Campbell (Center for Agricultural and Rural Development – Iowa State University, Ames, Iowa, EUA), permitiu realizar simulações múltiplas a partir da extração das variáveis de entrada para o Century de uma BDGE contendo informações de solo, clima, uso e manejo de solos para uma base de dados em formato MS Access[®] – gerenciada pelo *iCentury*. Após as simulações, as variáveis de saída de

interesse foram exportadas para o SIG para visualização de mapas de estoques de COS. A principal vantagem desta abordagem é a ampla disponibilidade e facilidade da integração do ambiente SIG com bases de dados em MS Access®.

Apesar do sucesso obtido nestas aplicações de integração de modelos de simulação e base de dados geoespaciais, ainda não foi estabelecido programa, sistema ou metodologia amplamente recomendada e disponível, diretamente aplicável a qualquer escala de estudos regionais. O que mais se aproxima disto é o recente GEFSOC Modeling System® (Milne et al, 2006), desenvolvido por grupo internacional de especialistas especificamente para simulações de alterações nos inventários nacionais de C. O sistema permite a integração de base de dados georeferenciadas para simulações de COS com os modelos Century e RothC, além da aplicação da metodologia do IPCC para avaliação de mudanças de estoque. Considerando que este sistema teve participação decisiva do Brasil e que foi validado, entre outras regiões, na Amazônia, pode-se especular que venha a ser adotado como padrão para este tipo de estudo. Entretanto, antes de poder ser amplamente recomendado, faz-se necessária uma validação em escalas maiores.

3. HIPÓTESE

A utilização de modelo de simulação do COS integrado com SIG permite estimar a evolução temporal dos estoques de C orgânico em âmbito regional, ao representar as interações entre atributos distribuídos espacialmente como classe de solo, uso do solo, taxa de erosão, estoque original de COS e, principalmente, os cenários de manejo do solo.

4. OBJETIVOS

Este projeto propôs estimar os estoques originais à época da colonização, os estoques atuais e futuros de carbono nos solos agrícolas nos municípios de Ibirubá e XV de Novembro. Apoiados em informações secundárias (solos, dados censitários, sensoriamento remoto) e amostragem de solos foram construídos cenários retrospectivos e prospectivos, recriando virtualmente os sistemas de uso e manejo de solos que existiram e vislumbrar os efeitos dos usos e manejos atuais e alternativos sobre os estoques futuros de C orgânico nos solos na região de estudo. O estudo considerou o período compreendido entre o início da colonização da região em 1900 até a atualidade. Adicionalmente foram realizadas simulações de cenários futuros de uso e manejo do solo até o ano de 2050.

Para atingir estes objetivos gerais, foram executados os seguintes objetivos específicos:

1. estabelecer cenários que representem adequadamente a evolução temporal dos sistemas de uso e manejo de solos na região de Ibirubá-XV de Novembro, apoiados em levantamento de dados censitários, sensoriamento remoto e informações colhidas localmente;
2. estimar os estoques de C orgânico do solo desde a situação original (anterior ao uso do solo para agricultura) até a atualidade nos solos da região de Ibirubá e XV de Novembro, por avaliações a campo e por simulações com o modelo Century, de acordo com os cenários históricos estabelecidos;
3. desenvolver a metodologia de integração de modelo de simulação de COS e SIG;

4. quantificar as alterações em escala regional dos estoques de COS, a partir da espacialização dos estoques medidos e simulados desde o início da agricultura (1900) até 2050.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Descrição da região de estudo

Os municípios de Ibirubá (611,8 km²) e XV de Novembro (223,6 km²) estão localizadas na borda sul do Planalto Riograndense (Fig. 4). A região está situada em uma área de transição entre duas das principais regiões fitoecológicas do Rio Grande do Sul: a parte central e leste do município de Ibirubá e todo XV de Novembro estão situadas na região da *Floresta Ombrófila Mista*, que originalmente recobria grande parte do Planalto Rio Grandense e apresentam dominância do pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*) no estrato superior. A parte oeste do município situa-se na região da *Savana*, popularmente conhecida como região dos *campos*. Esta região é dominada por vegetação herbácea, com ocorrência esparsa de formações arbóreas, especialmente nas margens dos cursos d'água – as matas de galeria – e também de capões isolados, com predominância de Mirtáceas e Lauráceas, com presença ocasional de *Araucaria* (IBGE, 1986; Marchiori, 2002).

Sabe-se que o clima e a vegetação do planeta, particularmente no que se refere ao Rio Grande do Sul, passaram por mudanças significativas desde o fim da última glaciação, há cerca de 10.000 anos. Um clima mais árido e frio, com domínio de vegetação campestre havia predominado até 3.000 anos antes da atualidade. Desde então houve aumento da precipitação e temperatura média anual, com avanço das florestas sobre os campos, sendo os campos existentes considerados remanescentes deste período mais seco (Pillar e Quadros, 1997; Marchiori, 2002; Behling et al., 2005)

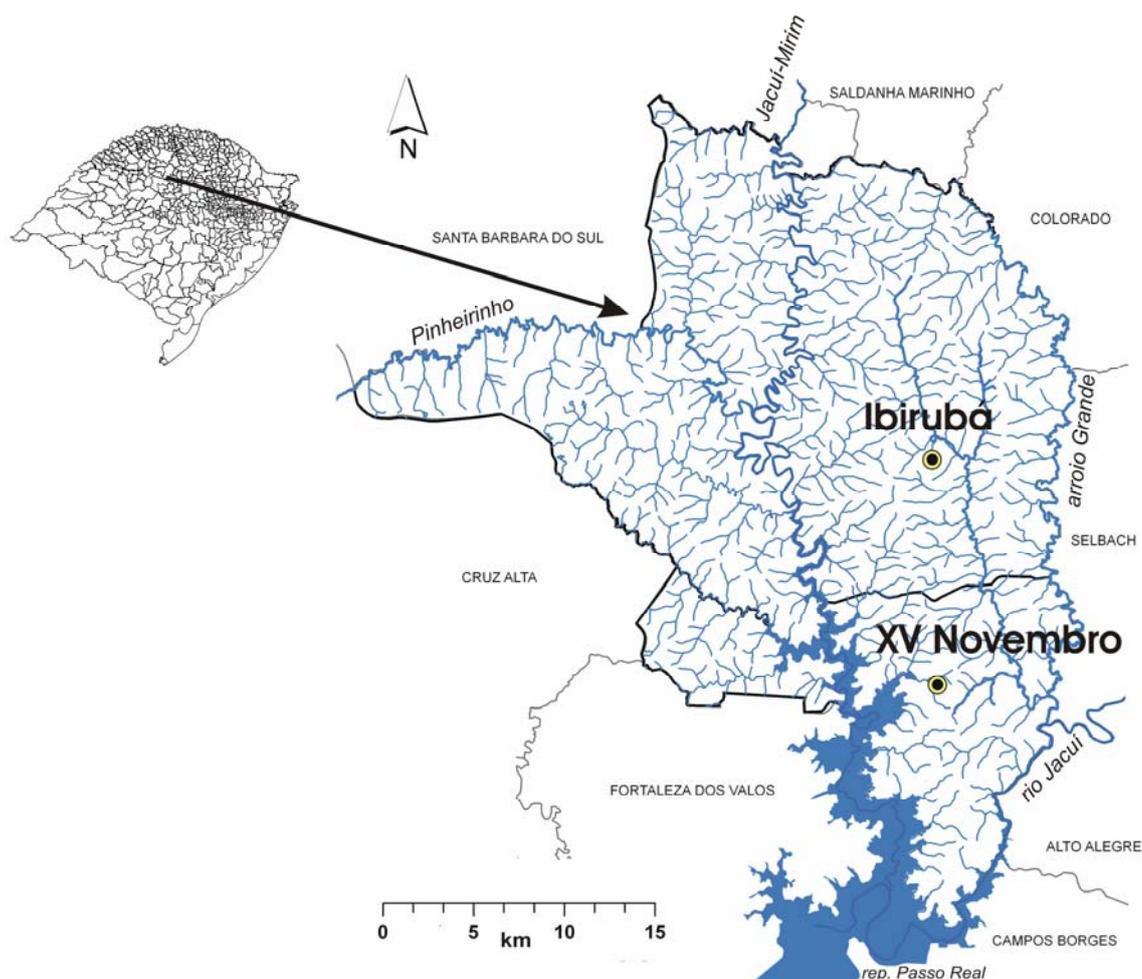


Figura 4. Localização de Ibirubá e XV de Novembro.

Ao longo da história do RS, numerosos levantamentos e estudos procuraram identificar e mapear a vegetação original e as alterações ocorridas a partir da ocupação humana. Havia interesse especial nas áreas de florestas, pelo seu alto valor econômico e por ser a região onde as mudanças foram mais notáveis e intensas. Entretanto, esses estudos tiveram amplitude estadual, com escala pequena, sem a preocupação em identificar detalhes pertinentes a municípios ou micro-regiões. Foi a partir da década de 70 que projetos governamentais como o “Levantamento e Avaliação de Recursos Naturais” do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) começaram a utilizar técnicas mais avançadas como a foto-interpretação para caracterização da vegetação atual. Silva (1979) realizou em Ibirubá um dos estudos mais detalhados disponíveis sobre desmatamento em âmbito municipal, utilizando a técnica de foto-interpretação de fotos aéreas de 1956, 1965 e 1975. Este

trabalho estabeleceu uma linha divisória entre a região de matas e de campos originais em Ibirubá, as quais ocupavam respectivamente 74,2% e 25,8% da área municipal em 1899, quando do início do processo de colonização. A área florestal estimada, incluindo capões e matas ciliares na região dos campos, diminuiu para 19,4% em 1956, 15,1% em 1965 e 10,4% em 1975. Desde então não foram realizados mais estudos com esta intensidade na região. O Censo Agropecuário do Brasil mais recente (1995-1996), baseado em enquetes, estabeleceu a área remanescente sob matas originais em 2,3% e sob campos em 2,1%.

A geologia e geomorfologia da região de Ibirubá são similares àquelas predominantes em grande parte do Brasil: superfícies antigas, que remontam aos períodos Pré Cambriano e Triássico, dissecadas e erodidas em maior intensidade na periferia dos planaltos. As feições mais comuns são colinas de relevo suave ondulado, arredondadas, conhecidas por *coxilhas*, desenvolvidas sobre rochas basálticas da Formação Serra Geral, dissecadas por um sistema de drenagem retangular. Ao sul e a oeste de Ibirubá, há indicações de ocorrência da Formação Tupanciretã – uma sequência sedimentar de conglomerados e arenitos sobrepostos à Formação Serra Geral – a qual atualmente aparece em uma linha descontínua de Santiago até Passo Fundo, em posições relativas de maior elevação na paisagem, associada a superfícies menos dissecadas, com relevo mais suave. Nos interflúvios e junto às nascentes dos rios e arroios ocorrem depressões locais arredondadas ou elípticas, como “anfiteatros”, normalmente com presença de vegetação de banhado (IBGE, 1986). As maiores declividades estão na parte inferior do curso do rio Jacuí Mirim, as quais constituem geomorfologicamente um vale em “V” bem definido (Klamt, 1969). Grande parte destes vales ao sul do município estão atualmente inundados pela bacia de acumulação da Represa (Usina Hidrelétrica) Passo Real, construída em meados da década de 1960 (Figura 5).

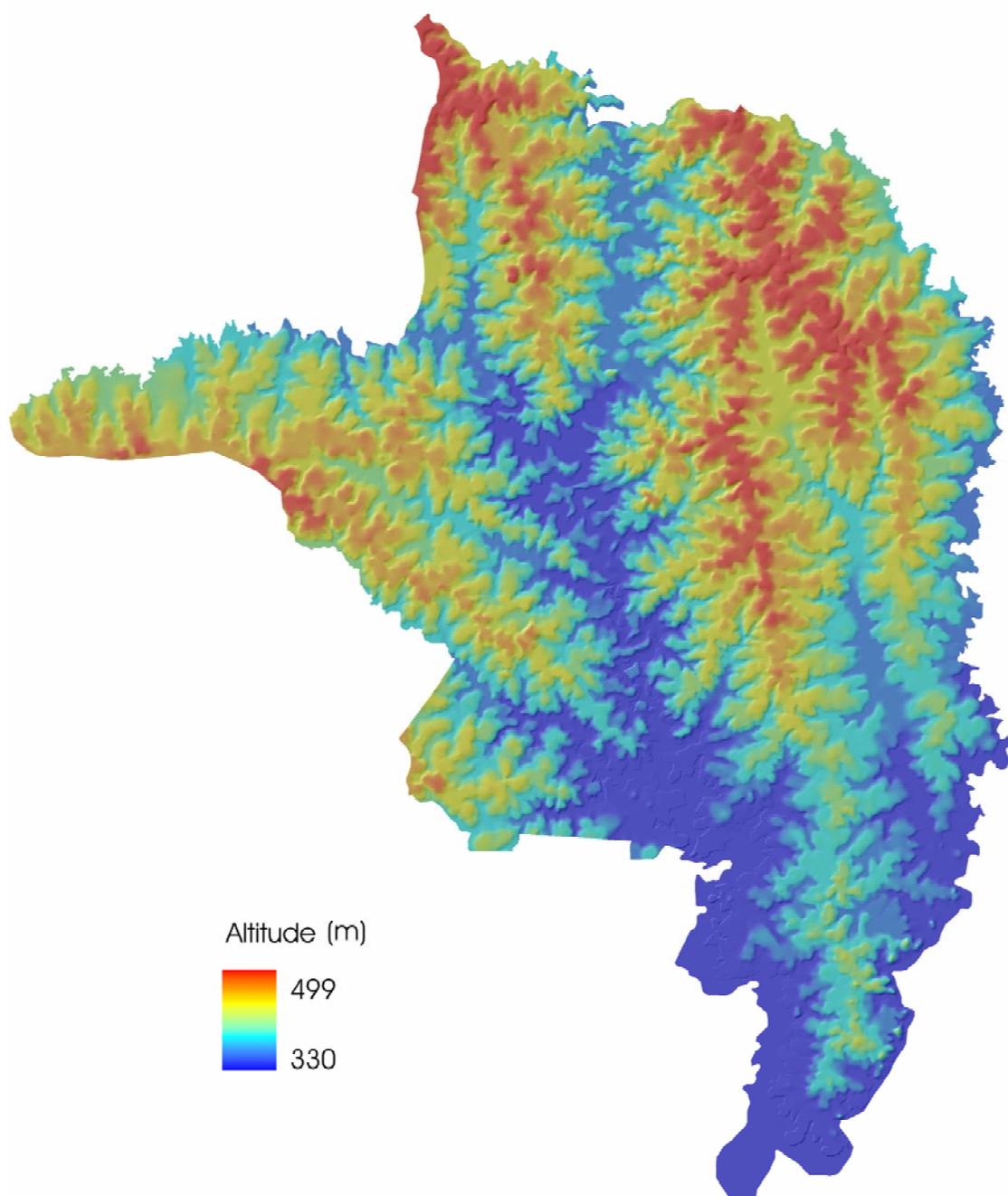


Figura 5. Mapa hipsométrico da região de Ibirubá, obtido a partir das curvas de nível de cartas topográficas (escala 1:50.000).

5.2. Os solos da região de Ibirubá

Diversos levantamentos de solos realizados no Rio Grande do Sul abrangeram a região de Ibirubá (Apêndice 1). O presente trabalho demandava um mapa de solos que atingisse integralmente os municípios do estudo.

Utilizando os levantamentos existentes, foi gerado mapa de solos compilado, considerado uma solução intermediária entre a abordagem simplificada baseada em mapas de escala pequena como o Levantamento de Reconhecimento de Solos do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973) e o Levantamento de Recursos Naturais do Rio Grande do Sul (IBGE, 1986), e uma abordagem ideal, utilizando levantamento detalhado de solos. Esta última demandaria um novo levantamento para atualização e complementação do levantamento semidetalhado existente (Santos et al., 1970), especialmente quanto à metodologia analítica para o COS, a medição da densidade do solo, além do maior detalhamento da classificação dos solos quanto às condições dos ambientes onde ocorrem.

Para a elaboração do mapa do presente trabalho foi utilizado principalmente o mapa do levantamento semidetalhado de 1970 (Santos et al., 1970). O mapa original em papel foi convertido em formato digital utilizando *scanner* de rolo e a imagem digital obtida foi georeferenciada à base cartográfica na projeção UTM (zona 22S, *datum* SAD69). Os delineamentos de classes de solos foram vetorizados no *software* ArcView 3.2 (ESRI, 1999). A legenda foi atualizada para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), com base nas descrições originais dos perfis modais e observações posteriores durante a etapa de campo do projeto (Apêndice 1). Em vista da pequena extensão dos Nitossolos remanescentes após a inundação da bacia de acumulação da Represa Passo Real, os polígonos correspondentes a esta classe foram incorporados aos Latossolos Vermelhos aluminoférricos. Da mesma forma, os Latossolos Vermelhos distróficos “Intergrade” foram unidos aos Latossolos Vermelhos aluminoférricos, visto apresentarem atributos muito semelhantes para o horizonte superficial, de maior interesse para este estudo. Para simplificar a identificação dos solos, os Latossolos Vermelhos distróficos e aluminoférricos foram identificados pela textura do horizonte superficial, sendo referidos como Latossolos Vermelhos textura média, argilosos e muito argilosos, e a associação Neossolos Regolíticos/Litólicos-Chernossolos Argilúvicos referida apenas pela classe dominante, os Neossolo Regolíticos.

Considerando a forma de obtenção deste mapa, a legenda deve ser interpretada com atenção, pois a paisagem da região sofreu alterações

significativas nas últimas décadas, com alterações importantes sobre as características dos solos apresentadas nos levantamentos originais. A erosão intensa ocorrida na década de 1970 provocou grandes perdas de solo no horizonte mais superficial e acúmulo de parte destes sedimentos em posições inferiores da paisagem (terraços aluviais, popularmente chamados de “várzeas”), provocando uniformização do relevo local. Pela deposição destes sedimentos avermelhados, em muitas situações Chernossolos, os Gleissolos e os Neossolos Flúvicos originalmente descritos nestas áreas têm atualmente maior espessura do que na época do levantamento semidetalhado. Em particular, nas áreas mapeadas como Chernossolo-Neossolo (UM Associação Ciríaco-Charrua), localizadas respectivamente nos sopés e encostas das elevações, encontramos atualmente grande parte dos Chernossolos soterrados por sedimentos. Considerando que, nesta associação, predominam os Neossolos em relação a estes Chernossolos alterados, para os objetivos deste estudo tratamos esta unidade de mapeamento como constituída apenas por Neossolos Regolíticos. As manchas identificadas como Gleissolos (Unidade de Mapeamento Batu no levantamento semidetalhado, ocorrente na região oeste do município de Ibirubá) sofreram forte ação antrópica, como drenagem ou açudagem, além de acúmulo de sedimento conforme descrito acima. Esta unidade de mapeamento, dispersa em delineamentos de pequena extensão, não foi considerada neste estudo por abranger uma área total reduzida em relação às outras unidades. Os polígonos obtidos foram individualmente comparados e corrigidos quando necessário, tendo como referência o mapa original e fotos aéreas de 1956. Os limites municipais foram atualizados com os polígonos da malha municipal oficial (IBGE, 2001). Foram adicionados delineamentos constantes do mapa exploratório (IBGE, 1986) para o Distrito de Santa Clara do Ingaí, cuja área aproximada de 5.000 ha não havia sido incluída nos estudos anteriores, por pertencer na época do levantamento ao município de Cruz Alta. Também foi incluído o polígono correspondente à área de acumulação de água da Represa Passo Real, não existente na época do levantamento semidetalhado, obtido por vetorização dos limites da área de inundação constantes nas cartas topográfica atuais (BRASIL, 1980a; BRASIL, 1980b; BRASIL, 1980c; BRASIL, 1980d).

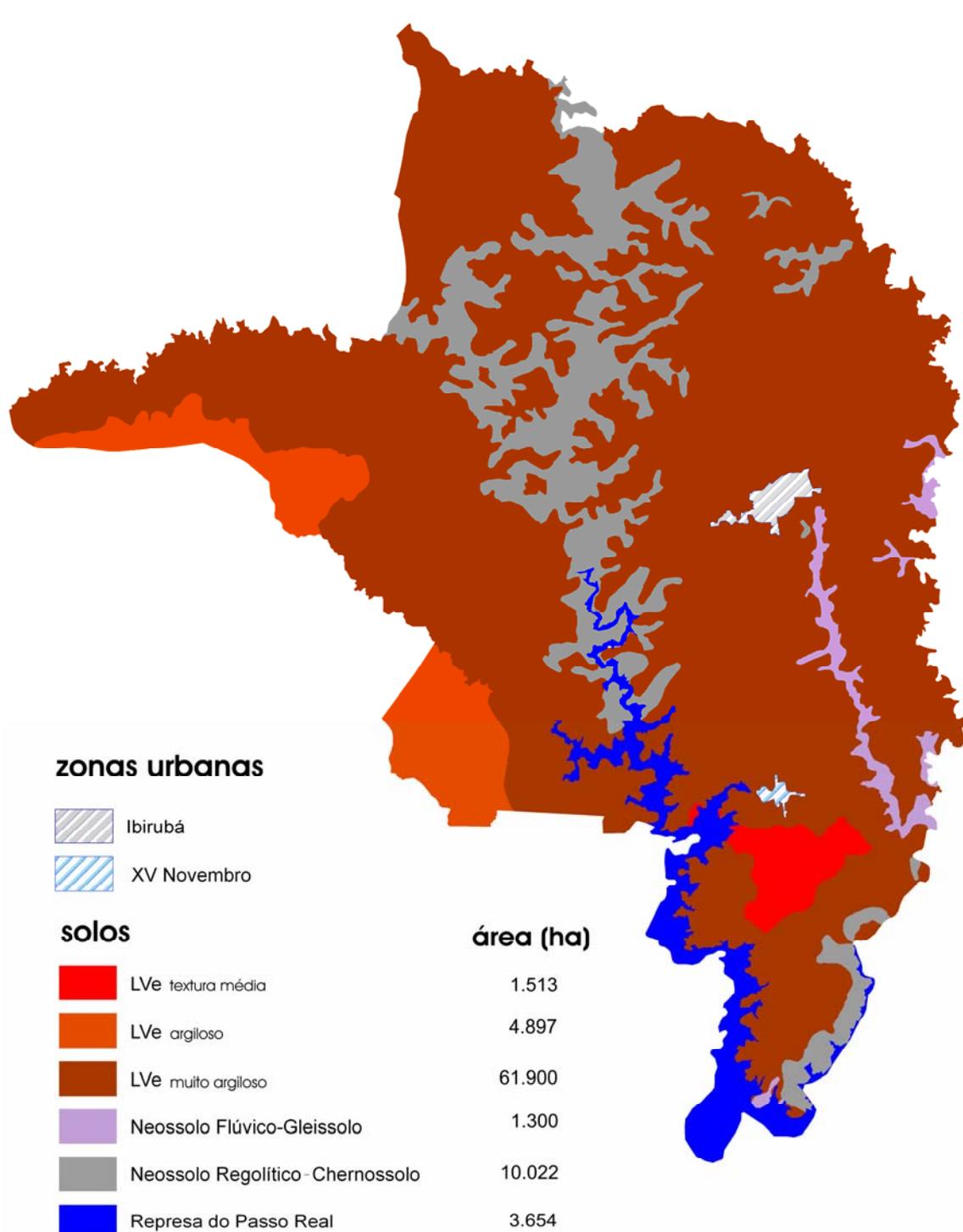


Figura 6. Mapa de solos compilado de Ibirubá (escala original 1:30.000).

5.3. Histórico da agricultura

A prática da agricultura no Rio Grande do Sul foi iniciada pelos habitantes pré-históricos. Utilizavam formas de agricultura itinerante – um período de manejo intensivo do solo seguido por longo período de pousio, durante o qual ocorria a regeneração da vegetação original na área abandonada. Próximo à região de Ibirubá, a partir de 1627 os jesuítas implantaram a prática da agricultura perene, para fins de subsistência e comércio, com lavouras anuais de milho, mandioca e cereais de inverno, além da exploração da erva-mate e pecuária extensiva (nas chamadas *vacarias*). Este cenário de uso e manejo dos solos foi praticamente abandonado quando da expulsão dos jesuítas, a partir de 1767, exceção feita à exploração extensiva da pecuária. Como relatam os naturalistas que percorreram a região no século XIX, rebanhos de gado *alçado* (criado livre, sem dono, em estado semi-selvagem) remanescente das *vacarias* podiam ser encontrado nas região. Esses rebanhos ocupavam os campos em baixíssimas lotações: “30 cabeças por quadra de sesmaria” (Gomes, 1965) – aproximadamente 0,03 animais por hectare. Remonta a esta época a prática sistemática da queimada dos campos para remoção da biomassa senescente e promoção de rebrota mais vigorosa. Entretanto, a presença recorrente do fogo de ocorrência espontânea ou provocada pelos indígenas, como elemento determinante da comunidade florística, já fora relatada pelos naturalistas (Avé-Lallemant, 1980; Saint-Hilaire, 1999) e foi comprovada mais recentemente em estudos paleoecológicos (Behling et al., 2005).

A partir de 1824 imigrantes europeus ocuparam os solos com maior fertilidade natural, às margens dos rios e sob florestas, inicialmente na Depressão Central do RS. Este período colonial foi caracterizado como uma “corrida à mata virgem, causando a exploração impiedosa e o esgotamento dos solos” (Rambo, 1994). No início do século XX, o crescimento populacional das colônias e a perda da capacidade produtiva dos solos levou à ocupação de novas áreas no Planalto Médio, Missões e Vale do Uruguai – as chamadas *Colônias Novas* (Mielniczuk et al., 2003). A área dos atuais municípios de Ibirubá e XV de Novembro foi loteada como "Colônia General Osório" pelo Estado do Rio Grande do Sul em 1899 (IBIRUBÁ, 1965).

A agricultura praticada pelos colonos consistia no corte e queima da floresta derrubada (a *coivara*), seguida do preparo intensivo do solo pelo emprego de implementos de tração animal. Este sistema de produção estava alicerçado na fertilidade natural dos solos, com aplicação ocasional de esterco. A partir da década de 1950, a difusão da fertilização mineral, das novas cultivares e introdução de equipamentos mecânicos de preparo, semeadura e colheita possibilitaram a incorporação à agricultura de grandes extensões dos campos nativos - até então quase exclusivamente ocupados pela pecuária extensiva. Estes fatores, inseridos num contexto político-econômico favorável, permitiram a implantação de um sistema empresarial intensivo de exploração agrícola, o qual teve o impulso inicial nas culturas de arroz e trigo e alcançou seu ápice na década de 1970 com a cultura da soja (Schilling, 1961; Rückert, 2003). As práticas de manejo de solos empregadas ao longo desta expansão de área e volume de produção, determinadas pela base tecnológica e cultural com viés europeus trazida pelos colonos, provocaram um processo acelerado de perda de qualidade dos solos. Assim, também nas Colônias Novas, por volta de 1950 áreas significativas de lavouras estavam abandonadas. Um cronista da região afirmava: “O Alto Jacuí, terra da promessa outrora, tornara-se espetáculo desolador” (Battistela, 1972).

O sistema de manejo que vinha sendo empregado se mostrava inapropriado para a prática sustentável de agricultura intensiva em ambiente subtropical como o existente nesta região. A partir dos anos 60, várias iniciativas buscaram reverter o cenário de degradação dos solos do RS: a Operação Tatu com o objetivo principal de recuperar a fertilidade dos solos pela utilização de corretivos e fertilizantes e o Projeto Integrado de Uso e Conservação do Solo (PIUCS), buscando divulgar as práticas conservacionistas de manejo com vistas à redução do preparo do solo, a eliminação da queima da palha de trigo e na introdução de culturas de cobertura nas áreas sob pousio no inverno (Mielniczuk et al., 2003). Foram introduzidas novas práticas de manejo, as quais propiciaram gradual recuperação dos solos degradados e manutenção da qualidade nos solos mais preservados. Estes projetos provocaram uma mudança de paradigma agrônomo: de uma agricultura essencialmente "extrativista" para uma agricultura conservacionista.

A consagração desta mudança veio com o adaptação do *sistema plantio direto* (SPD) que havia sido desenvolvido nos Estados Unidos por volta de 1960 (Phillips e Young, 1973). O SPD começou a ser testado na região a partir da década de 70, mas não alcançou maior expressão devido à existência de limitações técnicas importantes, como a disponibilidade de herbicidas e seu manejo apropriado, e de semeadoras adaptadas ao plantio sobre resíduos culturais. A partir de 1992 o Projeto METAS desencadeou a adoção generalizada do SPD (Denardim, 1997). A expansão foi apoiada principalmente na constatação, por parte dos produtores rurais, de que, após alguns anos no sistema, os solos agrícolas apresentavam modificações significativas em vários atributos, recuperando estoques de matéria orgânica e nutrientes e o potencial produtivo.

A região de Ibirubá é bastante representativa deste processo histórico. A implantação de lavouras anuais, em grande escala, teve seu início com a colonização desencadeada pela Empresa Colonizadora Diaz & Fagundes em 1898. A ocupação das terras foi iniciada nas áreas de mata, justamente pela maior fertilidade natural. O centro de irradiação do processo foi a região da sede municipal, a partir da chegada dos primeiros colonos na primavera de 1899. Conforme relatos, as principais culturas eram o milho, o trigo e a mandioca, além de várias outras de consumo local. Até a década de 1950 a região era conhecida como pólo de produção suína, passando a cultivar mais intensivamente o trigo a partir dos programas governamentais do fim dos anos 50 (Ibirubá, 1965).

Estatísticas específicas e detalhadas para esta região com relação às áreas cultivadas até esse período são publicadas apenas após a emancipação de Ibirubá do município de Cruz Alta em 1954. O município de XV de Novembro foi criado em 1992, a partir da emancipação dos 3^o e 4^o distritos de Ibirubá (XV de Novembro e Sede Aurora) e anexação da região de Santa Rita do Ingaí, distrito de Cruz Alta. Assim, o Censo Agropecuário mais antigo disponível com dados referentes a Ibirubá (incluindo o distrito de XV de Novembro) é o de 1960, a partir do qual existem dados aproximadamente a cada dez anos sobre áreas em diferentes usos do solo (Apêndice 2).

5.4. Construção da base de dados

A integração de informações relevantes espacialmente definidas foi realizada pela construção de um SIG de trabalho implementado em ambiente ArcGIS 9 (ESRI, 2003). As informações inseridas neste sistema foram essencialmente aquelas necessárias para a aplicação do Century (Metherell et al., 1993). A integração e a manipulação destas informações foram organizadas em diferentes planos de informação temáticos na forma de mapas digitais com tabelas de atributos associadas, configurando uma base de dados espacializada (BDGE) como referida no item 2.6.:

- base cartográfica – para visualização de atributos cartográficos, foram digitalizadas as cartas topográficas Ibirubá, Lagoão, XV de Novembro e Fortaleza dos Valos com escala 1:50.000 (BRASIL, 1980a; BRASIL, 1980b; BRASIL, 1980c; BRASIL, 1980d) correspondentes à região de estudo. Em seqüência, foram georeferenciadas ao *datum* SAD 69, sistema de coordenadas UTM zona 22S. Os planos de informação vetoriais correspondentes à malha viária, curvas de nível e hidrografia destas cartas foram obtidos em formato vetorial da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (Porto Alegre, RS), já projetados no sistema UTM Zona 22S, datum SAD 69.
- vegetação original – reconhecimento prévio da vegetação da região obtido a partir de estudos, relatórios e mapas (Prefeitura Municipal de Ibirubá, 1965; Silva, 1979; RIO GRANDE DO SUL, 1983; IBGE, 1986). Como estes estudos não permitiram a definição incontroversa da localização e limites das formações vegetais originais na região, procurou-se estabelecer a vegetação original da região, a partir do registro aerofotogramétrico mais antigo disponível - aerofotos de 1956, com escala aproximada de 1:30.000, utilizadas no Levantamento de Reconhecimento de Solos do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973). Aerofotos cobrindo a região de estudo foram digitalizadas em *scanner* de mesa e georeferenciadas à base cartográfica. A partir da identificação visual de feições (fotointerpretação) da vegetação, foram definidos polígonos representando a vegetação em 1956. O limite original entre a região de campos e região de matas foi estabelecido pelo delineamento dos contornos originais da transição entre matas e campos, a

partir de feições similares na vegetação remanescente, como feito por Silva (1979). O arquivo vetorial obtido foi convertido em formato *raster* com pixel de 30 m.

- uso do solo – identificação espacializada das mudanças de uso e manejo de solos, a partir de dados satelitais do LANDSAT (sensor MSS de 1972 até 1983 e sensores TM/ETM+ até a atualidade). Inicialmente foi feita uma tentativa de classificação digital das imagens MSS, mas a qualidade destas e a resolução espacial nativa de 80m não possibilitaram uma identificação adequada. Foi feita então uma composição colorida das bandas MSS 7, 5 e 4, seguida de fotointerpretação, utilizando uma imagem de 1977. A partir da disponibilidade de imagens com resolução espacial de 30m - sensor TM do LandSAT 5, lançado em 1984 - foram utilizadas técnicas de classificação digital não supervisionada das imagens, para caracterizar a vegetação em 1988 e 2002. Estas datas foram determinadas pela disponibilidade de imagens anteriormente adquiridas ou disponibilizadas pelo Centro Estadual de Sensoriamento Remoto e Previsão Meteorológica da UFRGS. As imagens classificadas foram produzidas em formato *raster* com pixel de 30 m. Foi realizado um pós-processamento nas imagens classificadas de forma a remover pixels não classificados e pixels cujo atributo de uso do solo não fosse consistente com os cenários de mudanças assumido na etapa de simulação deste estudo. Por exemplo, não foi considerado o retorno de áreas de lavoura ou campo para mata (reflorestamento ou sucessão natural). Assim, até 14% dos 930.405 pixels de cada imagem foram reclassificados usando o recurso de “álgebra de mapas” do ArcGIS, de forma a remover pixels com inconsistências nas mudanças de uso do solo, considerando que os pixels classificados como “lavoura” em 1956 permanecessem como tal nas imagens de datas posteriores. Com o mesmo objetivo, foram adicionados às imagens classificadas de 1977, 1988 e 2002, pixels classificados como área inundada pela Represa de Passo Real definidos a partir das cartas topográficas 1:50.000.

- solos - foi utilizado o mapa de solos na escala aproximada 1:50.000 do levantamento semi-detalhado de 1970 (Santos et al., 1970), obtido conforme descrito no item 5.2, convertido em formato *raster*.

- clima - para a caracterização do clima da região, foi utilizada a série de dados climatológicos disponíveis de 1974 até 2003 da estação meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta, localizada a cerca de 50 km de distância e em altitude similar à da região em estudo.

- relevo e geomorfologia - foi produzido um modelo numérico do terreno (MNT) em formato *raster* com resolução espacial de 20 m obtido a partir da interpolação das curvas de nível com espaçamento vertical de 20 m e de pontos cotados das cartas 1:50.000 referidas acima. A partir deste MNT, as superfícies foram classificadas em elementos da paisagem (topo ou interflúvio, encostas e superfícies deposicionais) aplicando o algoritmo TPI (Topographic Position Index) implementado como uma extensão para o ArcGIS (Jennessent, 2006). Para esta aplicação específica, conforme recomendação do autor do algoritmo, para cada pixel foi usada uma operação de busca de vizinhança com padrão de “rosca” (*annulus*) com 960 m e 300 m de raio externo e interno respectivamente, adotando o seguinte critério para separação dos elementos da paisagem (Figura 7):

- topos (interflúvios): pixel com declividade entre 0 a < 8%;
- encostas: pixel com declividade > 8%;
- superfícies deposicionais: pixel com declividade próxima a zero que não sejam interflúvios.

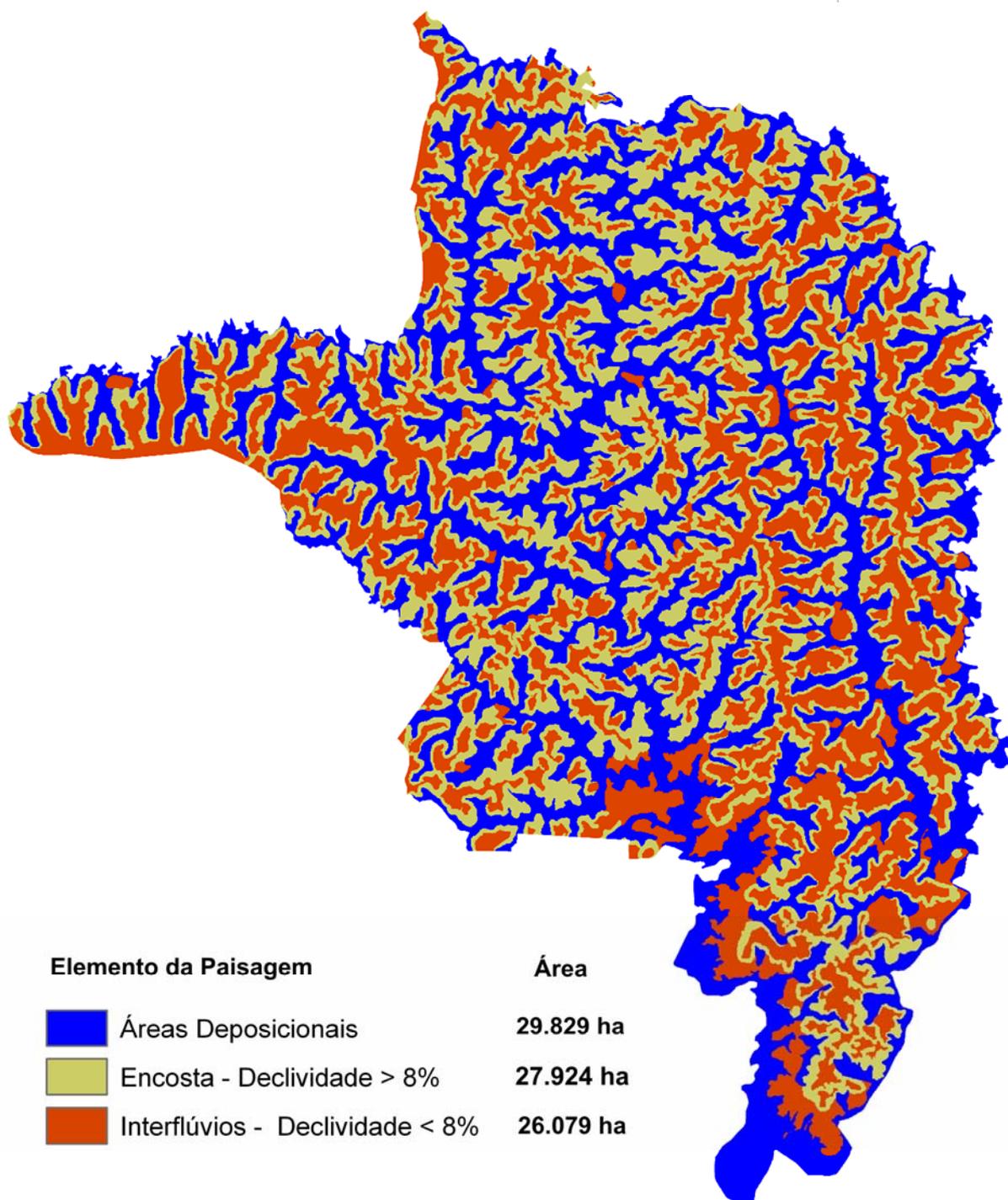


Figura 7. Elementos da paisagem derivados do modelo digital do terreno criado a partir das curvas de nível e pontos cotados das cartas 1:50.000 correspondentes à região de estudo.

5.5. Amostragem de solo

A amostragem de solos procurou caracterizar os estoques de COS e o histórico de uso e manejo de solos considerando a diversidade biogeofísica existente em uma área de mais de 800 km² e os requisitos para simulação da dinâmica do COS com o modelo Century. Os critérios para a seleção dos locais de amostragem foram: vegetação original, classe de solo, declividade, tempo de uso agrícola e disponibilidade de dados históricos do uso agrícola. A informação histórica de uso e manejo do solo mostrou-se um dos aspectos mais críticos para o trabalho de seleção, tendo em vista sua influência direta no estabelecimento dos cenários de uso e manejo de solo do Century. A seleção de propriedades rurais para amostragem foi feita a partir da discussão dos objetivos e necessidades do projeto com técnicos do escritório local da EMATER (Escritórios Municipais de Ibirubá e XV de Novembro) e da COTRIBÁ (Cooperativa Mista General Osório, Ibirubá). Com o auxílio do SIG de projeto, foram identificadas propriedades rurais nas diferentes combinações solo-vegetação (Figura 8). Foram selecionados produtores com áreas representativas de vegetação original e com lavouras antigas, que representassem o período mais longo sob agricultura, portanto entre 80 e 100 anos nas áreas de mata e 50 anos nas áreas de campo. Foram amostrados apenas o elemento da paisagem topo ou interflúvio, definido como as áreas de declividade menor que 8%, por ser esta uma situação de menor variabilidade quanto à erosão ocorrida. A amostragem foi mais intensa na situação solo-vegetação de maior área, ou seja, nos Latossolos Vermelhos muito argilosos sob mata. Cada ponto amostrado foi tratado como uma unidade amostral, não sendo caracterizada a variabilidade dentro de cada local amostrado. Trinta e nove pontos (mini-trincheiras) foram amostrados em 28 locais (propriedades rurais) considerados representativos tanto das associações solo-vegetação quanto dos sistemas de uso e manejo selecionados (Apêndice 3).

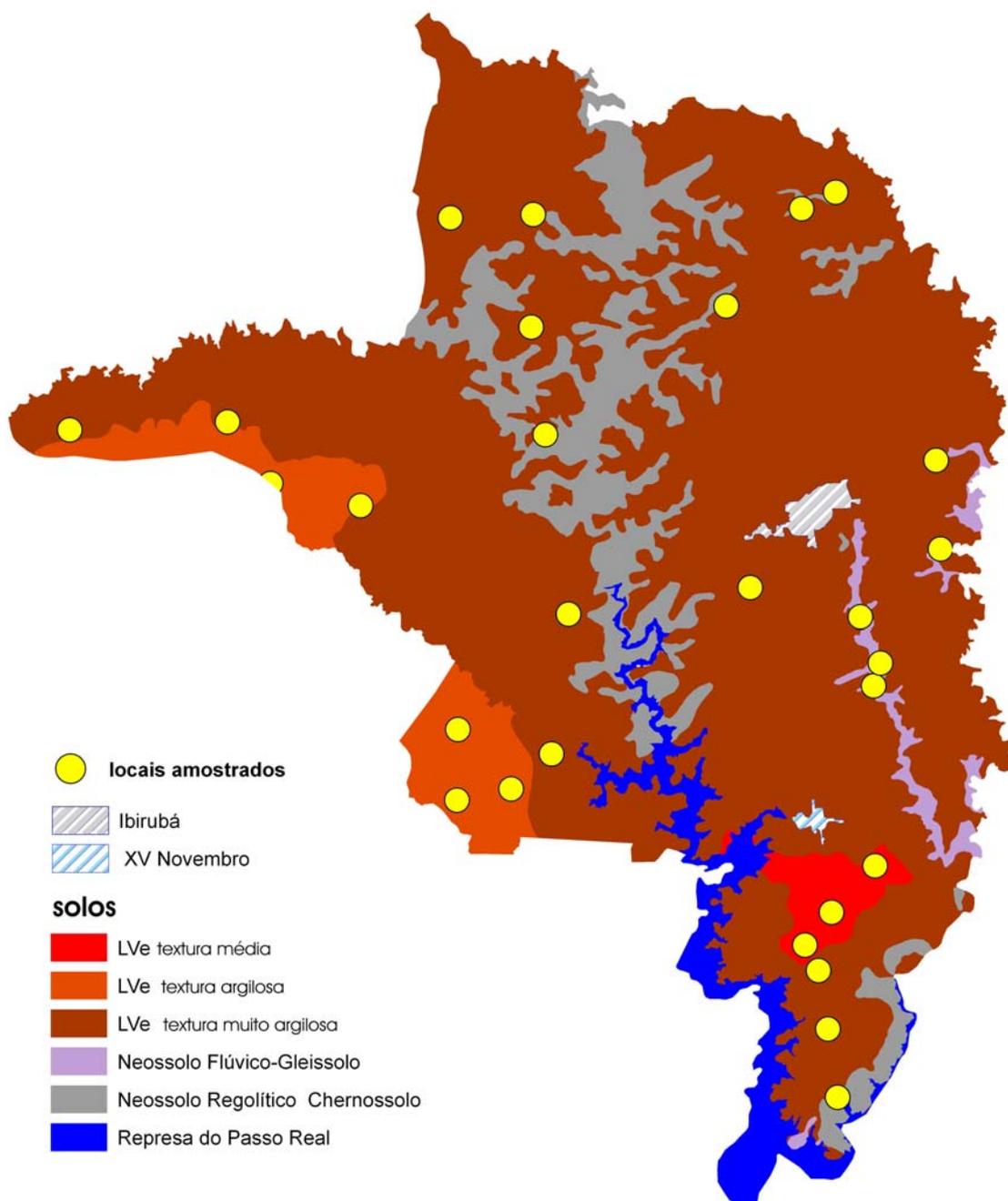


Figura 8. Locais amostrados sobrepostos ao mapa de solos da região de estudo.

5.5.1. Procedimento para coleta no campo

- COS e textura: foram escavadas mini-trincheiras com pá de corte, com dimensões aproximadas de 30 cm de largura, 20 cm comprimento e 30 cm de profundidade. O solo foi coletado com espátula em três camadas (0 - 10, 10 - 20 e 20 - 30 cm), cobrindo

uma superfície de 25 cm x 20 cm, totalizando uma amostra de aproximadamente 5 L. Este volume foi homogeneizado e uma subamostra de aproximadamente 1L separada para análise em laboratório. Posteriormente estas sub-amostras foram secadas ao ar, desagregadas em moinhos de martelos, passadas por peneira de malha 2 mm.

- densidade do solo: foram coletadas amostras pelo método do anel volumétrico (\varnothing 5 cm, aprox. 5 cm profundidade), inseridos em uma das paredes laterais da mini-trincheira referida em 5.2.1. Os anéis foram inseridos de maneira a amostrar a parte central das camadas. Após limpeza foram acondicionados em sacos plásticos identificados para posterior determinação.

5.5.2. Procedimento para análises laboratoriais

As análises laboratoriais foram realizadas nos laboratórios de Biogeoquímica Ambiental e Física de Solos do Departamento de Solos da UFRGS.

- COS: foi determinado pelo método da combustão seca (Nelson e Sommers, 1996), em analisador CH Shimadzu, no laboratório de Manejo de Solos da UFRGS.

- Textura: as amostras foram analisadas segundo o método da pipeta (Gee e Bauder, 1986), com modificações. Todas as amostras foram submetidas ao pré-tratamento de remoção da matéria orgânica pela adição de H_2O_2 . A dispersão do solo foi feita em solução NaOH 1N por 24h seguido de agitação em agitador horizontal recíproco a 200 RPM por 3,5 horas.

- Densidade: os anéis de volume conhecido com a amostra de solo úmida foram levados à estufa de convecção a 105°

C por 24 h. Amostras secas foram pesadas para determinação da massa de solo (Blake e Hartge, 1986).

5.5.3. Procedimento para cálculo dos estoques de COS

Os estoques de C orgânicos originais foram definidos como aqueles existentes nos solos sob vegetação nativa até a introdução da agricultura. O estoque de COS por área (Mg C ha^{-1}), em uma determinada profundidade, é normalmente calculado pela equação (Ellert e Bettany, 1995):

$$\text{Estoque} = C \times \text{prof} \times \rho \times 10$$

onde Estoque = estoque de COS (Mg C ha^{-1})

C = concentração de COS (kg Mg^{-1})

prof = espessura da camada (m)

ρ = densidade do solo (Mg m^{-3})

Como discutido anteriormente, as comparações entre estoques de COS em usos e manejos que provoquem mudanças substanciais na densidade do solo podem ser inapropriadas se for utilizada uma profundidade de amostragem padrão – a chamada abordagem da “camada equivalente” (Nye e Greenland, 1964; Noble et al., 2000). Estudos recentes sobre a dinâmica dos estoques de COS vêm aplicando este conceito, muito embora a metodologia de cálculo não seja sempre a mesma (Veldkamp, 1994; Moraes et. al, 1996; Yang e Wander, 1999; Bayer, 2003; Cerri et al., 2003; Gifford e Rodderick, 2003; Sisti et al, 2004; Steinbach e Alvarez, 2006). É importante considerar que a aplicação do conceito de massa equivalente requer ausência de perda ou remoção de solo no local de estudo, como pela erosão (Ellert et al., 2001).

O Century simula a dinâmica do COS com base em massa, mas não modela alterações na densidade do solo. Para evitar que a camada superficial de simulação de 20 cm seja exaurida pela erosão em blocos de longa duração, é realizada a reposição do COS perdido por erosão, definida pela quantidade de solo erodida na camada de simulação e pelos os estoques de COS subsuperficiais (abaixo de 20 cm). O modelo calcula estes estoques subsuperficiais como frações dos compartimentos ativo, lento e passivo da

superfície, definidos pelos parâmetros fixos do modelo $lhzf(1)$, $lhzf(2)$ e $lhzf(3)$ respectivamente. Os valores *default* destes parâmetros, mantidos neste estudo, são 0,2, 0,4 e 0,8 para $lhzf(1)$, $lhzf(2)$ e $lhzf(3)$ respectivamente. Este algoritmo permite que o Century represente a situação bastante usual de se obter uma amostra de solo à profundidade de 20 cm para o cálculo de estoque de COS e, após determinado período de tempo, durante o qual tenha ocorrido erosão, reamostrar no mesmo local à mesma profundidade. Raramente seria possível aplicar algum procedimento para separar o impacto da erosão e da mineralização sobre o estoque de COS, pois seria necessário conhecer a quantidade de solo perdida por erosão, e calculada a profundidade para reamostragem de maneira a descontar a camada erodida, não incluindo parte da subsuperfície. Assim, como o Century neutraliza a perda de massa de solo causada pela erosão, entendeu-se como razoável aplicar o conceito de “massa equivalente”.

Estabeleceu-se como referência, para cada combinação solo-vegetação, a média das massas de solo de 0 a 20 cm das amostras de vegetação nativa (Ellert e Bettany, 1995; Moraes et. al, 1996; Ellert e Bettany, 2002). Os estoques médios de COS das amostras sob lavoura, para cada combinação solo-vegetação, foram recalculados para “massa equivalente”. Considerando que os solos na camada de 0 a 20 cm sob vegetação nativa normalmente apresentaram densidade menor que em lavouras, a correção consistiu em subtrair dos estoques médios dos pontos sob lavoura uma quantidade de C contida em uma camada de massa necessária para igualar a massa de solo sob lavoura à de referência.

5.6. Elaboração dos cenários históricos e futuros

Para aplicação do Century na simulação da dinâmica de estoques de COS desde o início da agricultura em 1900 até a atualidade e a extrapolação até 2050 foi necessário estabelecer cenários históricos representativos constituídos de blocos de eventos de manejo de solo similares. Como certamente não seria possível reconstituir com detalhes mais de 100 anos de agricultura na região, foi inferido um padrão médio de manejos e sua evolução temporal com ênfase naqueles aspectos que influenciam mais

diretamente os estoques de COS. Essa abordagem consistiu em simulações a partir de estoques originais, definidos pelos pontos amostrados sob vegetação original (mata e campo) e dos estoques atuais em 2005 pelos pontos de lavoura amostrados na etapa de campo deste estudo.

Foram estabelecidos 94 unidades de simulações – combinações solo–elemento da paisagem–vegetação), originadas de cinco classes de solo; duas classes de vegetação original, três de elementos da paisagem. Os manejos foram padronizados em cinco épocas de início da agricultura (1900, 1955, 1971, 1988 e 1993), correspondentes a blocos de eventos do Century. Combinações inexistentes foram excluídas, como por exemplo Latossolos Vermelhos textura média com vegetação original campo e Neossolos Flúvicos em elemento da paisagem topo.

Foram aplicados dois cenários gerais a cada 94 unidades de simulação, perfazendo então 188 simulações individuais (Tabela 1). Os cenários se diferenciaram apenas no período prospectivo (desde a atualidade até 2050), para o qual foram estabelecidas duas seqüências contrastantes de manejo dentro do SPD:

- cenário “Atual” - manutenção do sistema de cultivo utilizado atualmente em termos de rotação e sucessão de culturas. Este corresponderia ao cenário “status quo” ou “business as usual” na região, no qual a freqüência do milho na rotação é menor. Esta situação tem ocorrido na região mesmo com o conhecimento por parte dos agricultores da importância do milho (ou outra cultura com grande adição de resíduos) no sistema de produção, devido a freqüentes perdas de safra por estiagem e pelo baixo retorno econômico da cultura, especialmente se comparado à soja.

- cenário “Melhorado” - implementação de um sistema de manejo de solos com maior fertilização e presença mais freqüente da cultura do milho. Neste caso, apenas foi simulada maior fertilização nitrogenada e maiores adições de biomassa pela maior freqüência de milho na rotação. Considerou-se este cenário plausível desde que haja maior incentivo econômico ao cultivo do milho e outras culturas com maior adições de biomassa.

TABELA 1 . Cenários de manejo utilizados nas simulações com o modelo Century (1900 – 2050)

Cenário	Blocos - Período	Descrição
"Atual"	I Colonial (1900 – 1955)	2 anos de milho com pousio outono/inverno e 1 ano de trigo com pousio verão/outono; lavração com tração animal; adubação orgânica (0,6 Mg C ha ⁻¹ , relação C/N 30) a cada 3 anos; cultivares de baixo potencial de rendimento;
	II Convencional "Leve" (1956 – 1970)	Milho com pousio outono/inverno e trigo com pousio verão/outono; preparo do solo mecanizado com lavração e gradagem; N sintético (40 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹); cultivares de baixo potencial de rendimento;
	III Convencional "Intensivo" (1971 – 1980)	Sucessão trigo/soja; preparo do solo mecanizado com lavração e gradagem; N sintético (70 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹); queima da palha de trigo; cultivares de médio potencial de rendimento;
	IV Preparo Reduzido (1981 – 1992)	Trigo/soja e aveia/soja, sem queima de palha da cultura de inverno; preparo do solo mecanizado com escarificação e gradagem; N sintético (trigo 75 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ ; aveia 40 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹); cultivares de médio potencial de rendimento;
	V – i Plantio Direto "Atual" (1993 – 2050)	2 anos de trigo/soja e 1 ano de aveia/milho, sem queima de palha da cultura de inverno; dessecação da aveia, plantio direto; N sintético (trigo 75 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ ; aveia 40 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ ; milho 90 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) cultivares de alto potencial de rendimento;
"Melhorado"	I a IV	idênticos ao cenário anterior
	V – ii Plantio Direto "Melhorado" (1993 – 2050)	Trigo/soja alternado com aveia/milho, sem queima de palha da cultura de inverno; dessecação da aveia, plantio direto; N sintético (trigo 85 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ ; aveia 60 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ ; milho 115 kg ha ⁻¹ ano ⁻¹); cultivares de alto potencial de rendimento (maior que em V-i).

Para a definição dos cenários, as culturas, os rendimentos médios e adições de biomassa, os tipos de preparo, a fertilização, e as taxas de erosão desde o início da agricultura nesta região foram estabelecidos mediante consulta a estudos anteriores, aos Censos Agropecuários e a documentos históricos (Ibirubá, 1965; Bastistela, 1972), aos técnicos da EMATER (Escritório Municipal de Ibirubá), COTRIBÁ e aos produtores visitados. Para a estimativa de erosão nos diferentes sistemas de manejo, foram consultados estudos anteriores no Plantalto do Rio Grande do Sul (Cassol et al., 1984). Como estes estudos não abrangeram declividades maiores que 8% como explicitadas neste estudo, as taxas de erosão médias para encostas foram estabelecidas arbitrariamente em valores até 100% maiores daqueles de declividades menores. Da mesma forma, dada a inexistência de dados sobre deposição, as taxas médias para as áreas deposicionais também foram estimadas arbitrariamente. Como as áreas totais para os elementos topo e encosta são similares (Figura 7), a deposição foi estimada por um valor definido pela soma das taxas de erosão dos topos e encostas, considerando as indicações de que cerca de 90% dos sedimentos permanece em pequenas bacias por longo tempo (Stallard, 1998). As taxas de erosão aplicadas na construção dos cenários estão detalhadas no Apêndice 4.

Como o Century não trata explicitamente de deposição, foi utilizado o artifício aplicado por Pennock e Frick (2001), que consiste na definição de uma taxa de erosão com sinal invertido, entendida fisicamente como deposição, simulando o acúmulo de sedimentos a taxas mensais pré-definidas (Apêndice 4). Julgou-se que a utilização deste artifício seria razoável, considerando que foram atribuídos os mesmos estoques iniciais de COS para cada classe de solo, nos três elementos da paisagem (topo, encosta e áreas deposicional). Como no início das simulações os solos nas três situações eram idênticos, ao invés de receber sedimentos das posições topo e encosta, os solos nas áreas deposicionais, acumulam “sedimentos” com estoques de COS calculados a partir dos próprios estoques. Para manter a massa original de solo na camada de simulação (de 0 a 20 cm), uma quantidade de COS contida na massa de solo depositada é transferida para o compartimento subsuperficial.

5.7. Calibração do modelo e execução das simulações

Para a implementação do modelo Century foram seguidos os procedimentos indicados no manual do Century 4 (Metherell, 1983; NREL, 2007), com as modificações sugeridas em estudos similares (Manies et al., 2000; Manies et al., 2001) e por consulta aos desenvolvedores do modelo (Dr. W. J. Parton, Colorado State University, Fort Collins, EUA).

Não foi considerada necessária a verificação e a validação do Century já que várias aplicações anteriores foram bem sucedidas em situações muito similares do ponto de vista ambiental e agrônômico, um vez que foram realizadas no Brasil (Leite et al, 2004a; Leite et al, 2004b; Cerri et al., 2004b) e especificamente no Setor de Manejo de Solos do Departamento de Solos, UFRGS (Fernandes, 2002; Vezzani, 2001; Debarba 2002; Oliveira, 2004).

Diferentemente de outros estudos que selecionaram a variável de saída *somtc* para representar o COS, para este trabalho foi utilizada a variável de saída *somsc*. Esta variável corresponde à soma dos compartimentos ativo, lento e passivo, não incluindo a "liteira de solo" (*soil litter*), correspondente aos compartimentos C estrutural de solo (variável de saída *strucc(2)*) e C metabólico de solo (variável de saída *metabc(2)*), que incluem raízes mortas e biomassa enterrada por manejos. Pela sua definição, a variável *somsc* se aproxima do COS efetivamente medido, pois tanto na separação da amostra no campo quanto na preparação pré-análise são removidos resíduos vegetais e de raízes visíveis, as quais constituem grande parte da "liteira de solo". Outra vantagem da utilização da variável *somsc* é a menor variação mensal, ao contrário de *somtc*, muito influenciada por eventos de manejo que transfiram resíduos da superfície para o solo, o que torna crítica a escolha do mês para extração da variável de saída.

O modelo foi calibrado iterativamente pela alteração de parâmetros fixos (fix.100), de planta (crop.100), floresta (tree.100) e cultivo (cult.100) da seguinte forma:

- foi criada a opção "floresta subtropical" para cada classe de solo simulada a partir da opção *default* "Luquillo - floresta tropical". Os parâmetros PRDX (produção potencial de biomassa) foram alterados até que a variável de saída *somsc* após simulação de 4.000 anos estabilizasse coincidindo com o

valor médio do estoque de COS obtido na amostragem de solo em locais de floresta na respectiva classe do solo;

- foram criadas opções de planta "campo nativo", a partir das opções *default* "grasslands" e seus PRDX alterados até que a variável de saída *somsc* após simulação de 4.000 anos estabilizasse coincidindo com valor médio do estoque de COS obtido na amostragem de solo em locais de campo nativo;
- os parâmetros HI e PRDX das culturas utilizadas foram alterados para que as variáveis de saída *aglivc* (carbono na biomassa viva superficial), *bglivc* (carbono na biomassa viva subsuperficial) e *cgrain* (carbono nos grãos colhidos) aproximassem valores considerados compatíveis com estas culturas na situação do Planalto Riograndense (Tabela 2);
- foram necessárias alterações nos parâmetros fixos DEC5 e a criação do evento de cultivo DDEC (utilizado apenas no bloco referente ao SPD), em cada combinação de solo e vegetação, para coincidir a variável *somsc* no ano 1900 (início da agricultura) com o valor médio do estoque de COS obtido na amostragem em vegetação nativa e no ano de 2005 em lavouras.

As modificações realizadas nos parâmetros default do Century e outras alterações utilizadas neste estudo estão listadas no Apêndice 5.

5.8. Integração do Century com a Base de Dados Geoespacial

Para realização deste estudo foi aplicado um acoplamento intermediário entre livre e integrado conforme discutido anteriormente. Os planos temáticos em formato *raster* (solos, elementos da paisagem, e uso do solo 1900, 1956, 1977, 1988 e 2002) foram reamostrados para a resolução de trabalho de 30 m, equivalente ao pixel do Landsat TM. Todos os planos raster foram incluídos em um arquivo de projeto do ArcGIS, configurando assim a BDGE do projeto. Adicionalmente, foi criado um plano de pontos "XY" contendo

Produção vegetal".	Grãos	
	\bar{x}	s
.....	0,6	0,1
	0,5	0,3
	0,3	-
	1,1	0,3
	0,7	0,1
	0,4	-
	1,0	0,1
	0,5	0,2
	0,9	0,1
	0,6	0,1
	0,8	-
	0,7	0,1
	0,6	0,5
	1,9	0,1
	0,9	-
	0,8	0,0
	0,6	0,1
	1,5	0,0
	1,1	-

as coordenadas centrais de cada pixel de 30m. Em seqüência, foi realizado um cruzamento múltiplo de maneira a inserir na tabela de atributos do plano de pontos "XY, os valores correspondentes nos sete planos *raster* em cada ponto (Figura 9). Este plano "XY" sintetiza em cada ponto os atributos de classe de

solo, elemento da paisagem e evolução do uso do solo ocorrida – neste caso identificando mata, campo ou lavoura para os anos de 1900, 1956, 1977, 1988 e 2002. Todas estas operações foram realizadas no ArcGIS 9 (ESRI, 2003).

A realização das simulações na forma usual de operação em ambiente DOS demandaria 188 conjuntos de arquivos .100 e .sch contendo as variáveis de entrada e parâmetros, além de arquivos de variáveis de saída (*.lis), configurando um procedimento demorado e tedioso, e conseqüentemente propenso a erros. Além disso, a visualização gráfica das variáveis de saída demandaria a importação das variáveis de saída e formatação destas em outro *software* – usualmente o MS Excel®.

Utilizamos alternativamente uma abordagem similar à aplicada por Norgaard (2004), baseada na interface *iCentury* – Interactive Century - desenvolvida por Todd Campbell (Center for Agricultural and Rural Development – Iowa State University, Ames, Iowa, EUA). Esta interface armazena variáveis e parâmetros do Century em banco de dados MS Access®.

A utilização do *iCentury* não modifica o funcionamento do Century, pois ao iniciar uma simulação todos os arquivos usuais do Century - *.100 e *.sch são criados em tempo de execução e o executável original (arquivo *century.exe*) é invocado. As variáveis de saída são também armazenadas no banco de dados MS Access®, a partir da qual o *iCentury* permite exibir janelas gráficas para uma rápida inspeção e comparação de simulações.

Além destas facilidades, foi possível integrar os dados armazenados em formato MS Access® com a BDGE, permitindo a visualização na forma de mapas e a realização de manipulações e operações usuais em SIG como “álgebra de mapas”. A pesquisa na base de dados e a extração de variáveis para inserção no SIG foi feita a partir de consultas SQL (Structured Query Language) no próprio MS Access®, baseadas no relacionamento das tabela Control Record e Output Annual do *iCentury* e a tabela de atributos do plano “XY” pelos campos comuns “solos”, “elemento da paisagem”, “uso do solo1900”, “uso do solo1956”, etc. (Figura 10).

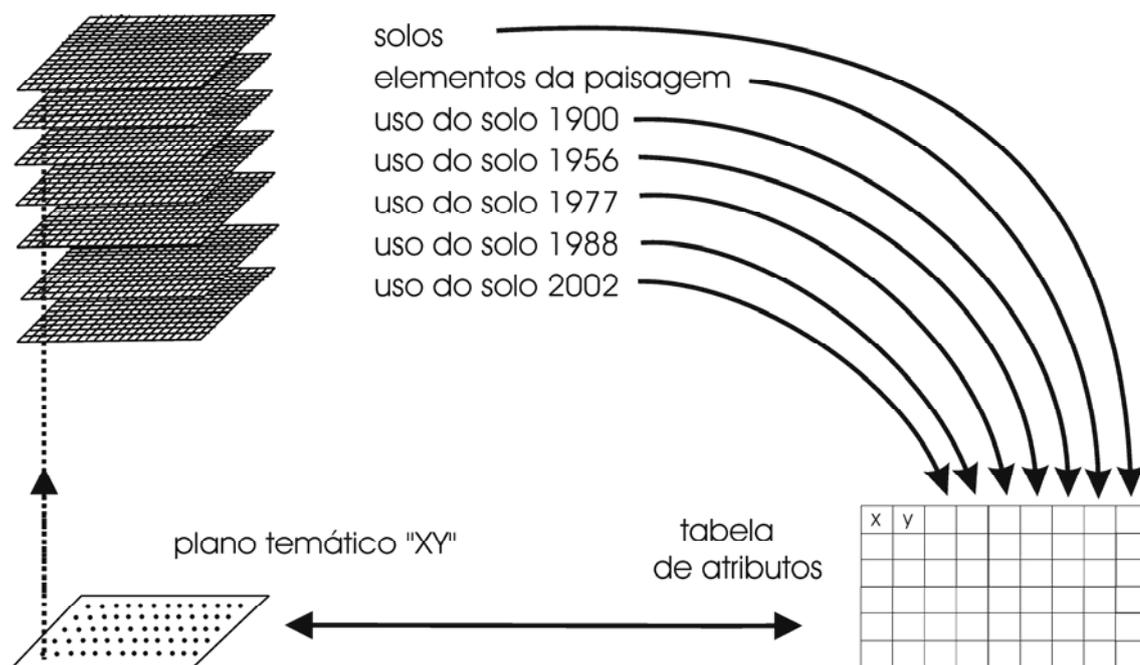


Figura 9. Esquema sintético do cruzamento dos planos temáticos *raster* para extração das informações para tabela de atributos do plano "XY".

Tabelas iCentury

CONTROL RECORDS

1. Simulação 1
2. Simulação 2
(...)
94. Simulação 188



OUTPUT ANNUAL

SIMULAÇÃO 1	SIMULAÇÃO 2	(...)	SIMULAÇÃO 94
ANO 1900	ANO 1900		ANO 1900
(...)	(...)		(...)
ANO 1955	ANO 1955		ANO 1955
(...)	(...)		(...)
ANO 2050	ANO 2050		ANO 2050
SOMSC (1900)	SOMSC (1900)		SOMSC (1900)
...
SOMSC (1955)	SOMSC (1955)		SOMSC (1955)
...
SOMSC (2050)	SOMSC (2050)		SOMSC (2050)

Tabela de Atributos "XY"

X e Y: coordenadas do centro de cada um dos 930.405 pixel

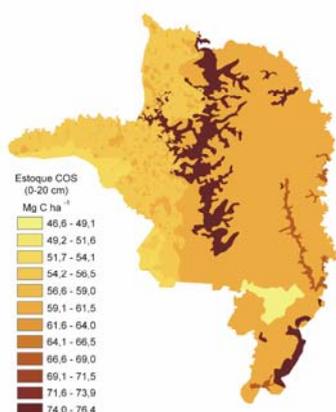


extração das variáveis de saída por unidade de simulação e ano e inserção na tabela georeferenciada

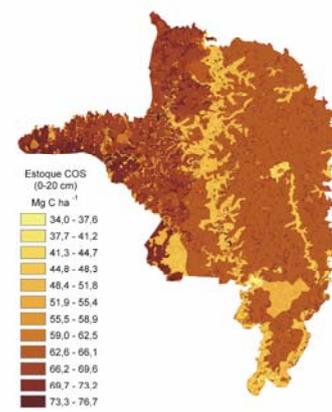
ID	X	Y	LU1900	LU1955	COS1900	COS1955	(...)	COS2050
1	298100	6499100	forest	cropland	SOMSC 1900	SOMSC 1955		SOMSC 2050
2	298130	6499100	forest	cropland	SOMSC 1900	SOMSC 1955		SOMSC 2050
3	298160	6499100	grassland	grassland	SOMSC 1900	SOMSC 1955		SOMSC 2050
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)		(...)



criação dos mapas de estoques pela plotagem dos pixel com valores de COS para cada ano de interesse



Estoque COS 1900



Estoque COS 1955

Figura 10. Fluxograma da integração da base de dados do *iCentury* com SIG para produção de mapas de estoques anuais de COS.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Evolução do uso do solo

A classificação das fotos aéreas e imagens de satélite disponíveis possibilitaram a construção de um modelo espacializado de evolução do uso do solo na região de estudo. As estimativas da cobertura florestal obtidas para 1955 e 1977 foram similares às apresentadas no estudo de Silva (1979) e nos Censos Agropecuários do IBGE (Apêndice 2). A análise da evolução do uso do solo na região evidencia a drástica redução da cobertura vegetal original do solo pela colonização e expansão da agricultura: em 55 anos, 55,6 % da mata nativa havia sido removida, processo que persistiu nos 46 anos seguintes (entre 1956 e 2002) e atingindo a área atual de apenas 10% sob matas (Figuras 11,12 e 13). Cabe ressaltar que esta estimativa por classificação de imagens não buscou separar a mata nativa remanescente de áreas reflorestadas (usualmente com *Eucaliptus*), estimada pelo Censo Agropecuário em 1.089 ha em 1995 (Apêndice 2), devendo atualmente a área remanescente com mata representativa da vegetação original certamente ser menor que 10%. Estes remanescentes de mata nativa são bastante fragmentados, restando apenas alguns maciços com mais de 50 ha em toda a região, como é facilmente visualizável na imagem classificada de 2002. Além disso, a maior parte destes remanescentes é bastante alterada em relação à mata original, pela remoção ocasional de madeira ou trânsito de animais, como observado no trabalho de campo. As áreas de campo, que começaram a ser exploradas mais intensivamente com a agricultura quase 50 anos após as matas, sofreram redução igualmente drástica. De uma cobertura original em torno de 23% de toda a região, a qual ainda permanecia em 22,5% em 1956, apenas 3,7% da área total restou sob campo em 2002, uma redução de cerca de 85% – e

certamente menos ainda atualmente, como constatado na etapa de amostragem à campo. Também esta estimativa por classificação de imagens não permite separar os campos nativos remanescentes de pastagens exóticas implantadas e áreas de campo que foram utilizadas para agricultura por um curto período seguido da regeneração de campos e outras vegetações arbustivas esparsas. As poucas áreas remanescentes com campos originais também são bastante diversas em termos de cobertura e composição florística, principalmente em função das diferentes lotações de bovinos utilizadas e manejos aplicados. A comparação da evolução da área agrícola pelas imagens classificadas e pelos Censos Agropecuários (Apêndice 2) sugere uma tendência à estabilização. Isto certamente se deve à indisponibilidade de áreas novas para expansão, refletindo a aplicação da legislação ambiental vigente e a conscientização dos agricultores em manter os remanescentes florestais. O mesmo parece não ocorrer com relação aos escassos remanescentes de campo, que tendem a desaparecer em futuro próximo.

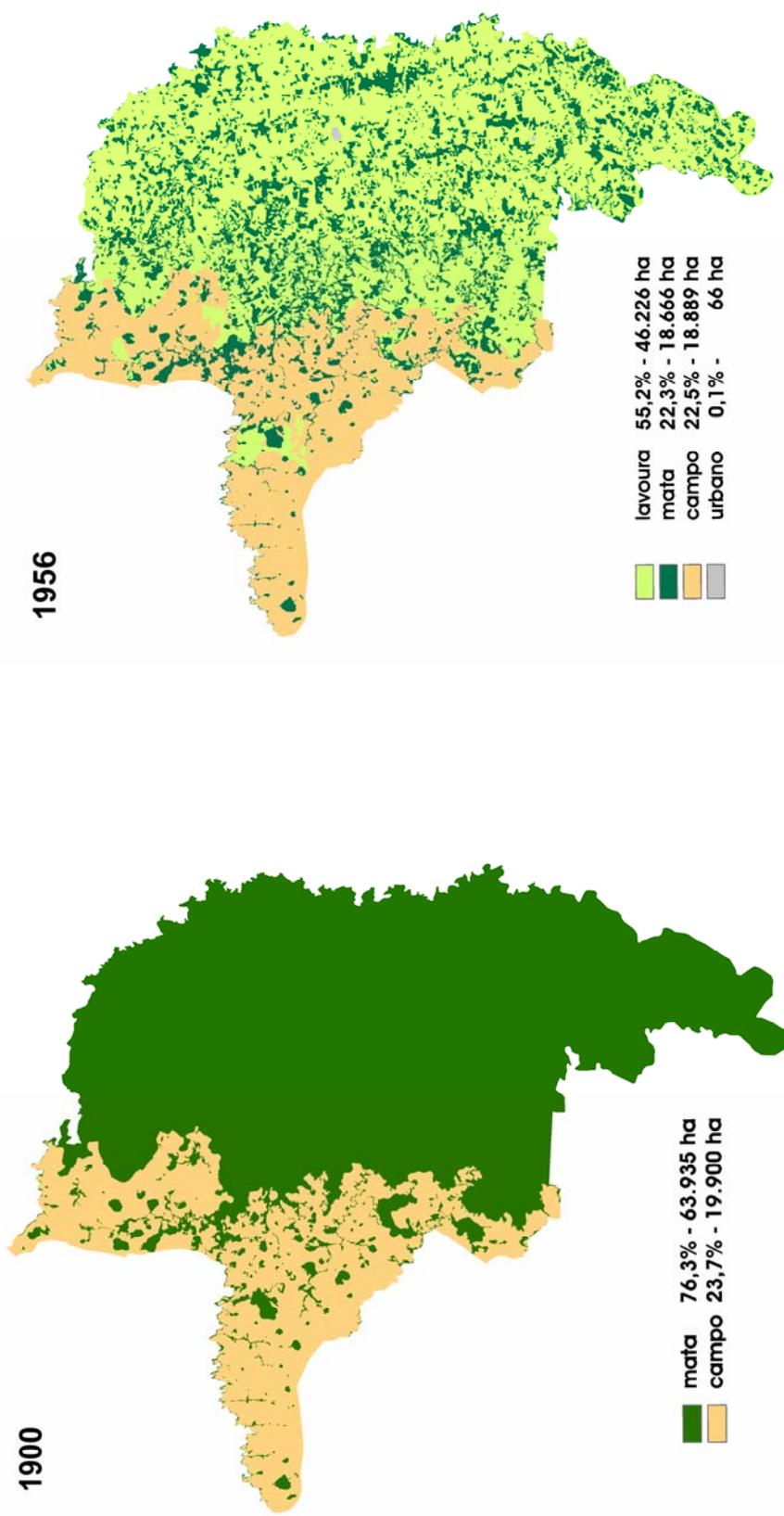


Figura 11. Mapa de uso do solo em 1900 e 1956 obtido a partir de foto interpretação de fotos aéreas.

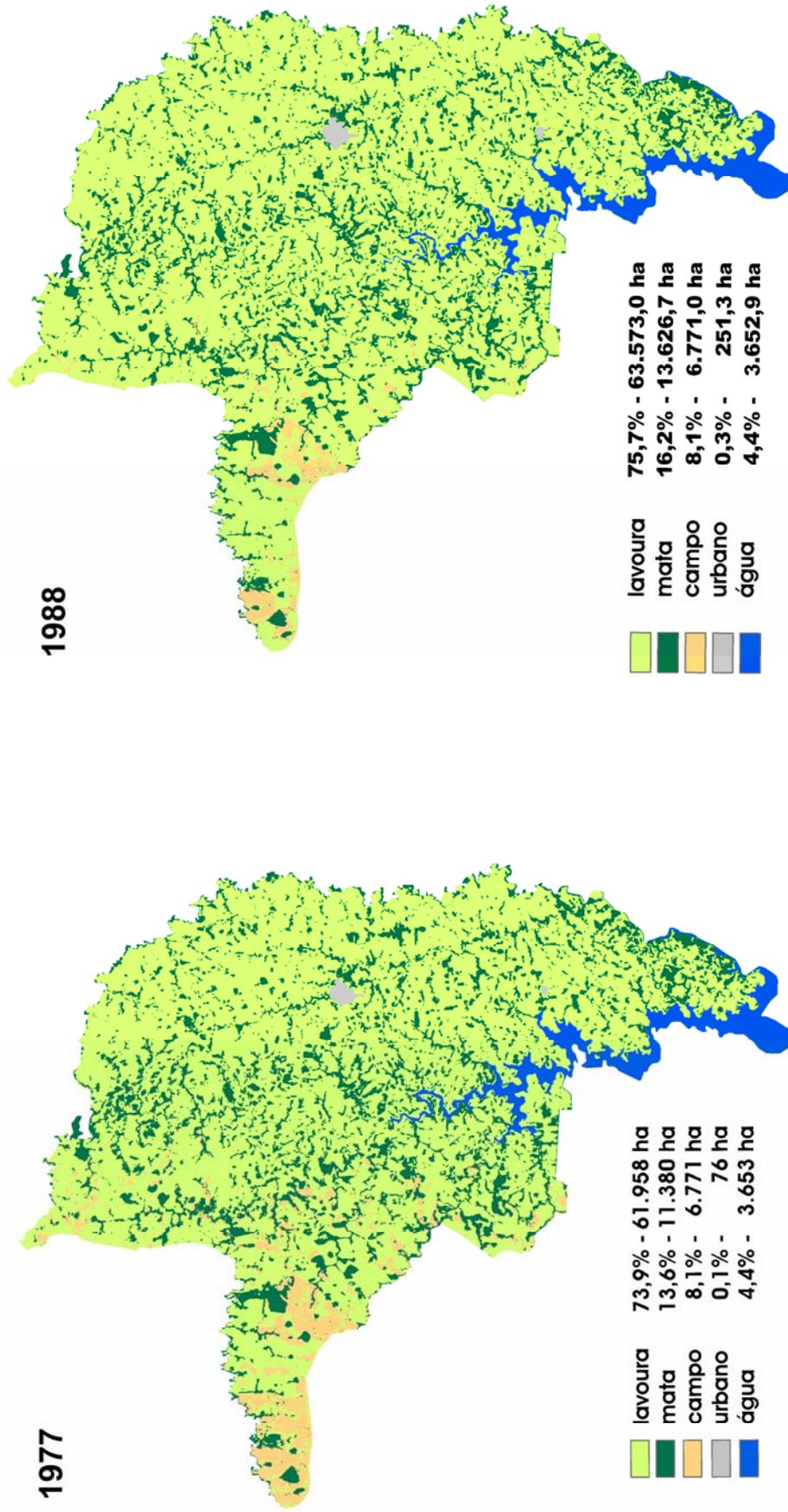


Figura 12. Mapa de uso do solo em 1977 e 1988 obtido a partir de classificação de imagens do satélite LANDSAT.

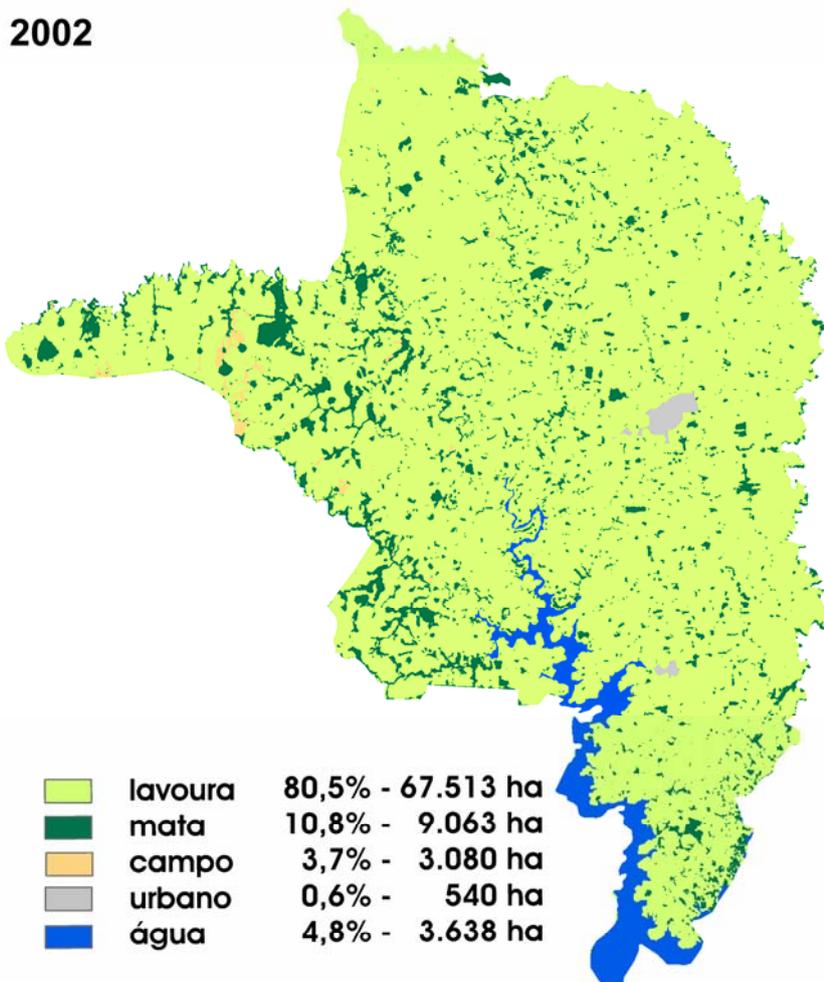


Figura 13. Mapa de uso do solo em 2002, obtido a partir da classificação de imagem LANDSAT.

6.2. Estoques de COS

Como o objetivo principal deste estudo não era a quantificação exata dos estoques de COS na região de estudo, as estimativas de estoques de COS por classe de solo e vegetação obtidas devem ser analisadas com cuidado, dado o pequeno número de amostras e a grande variabilidade dos estoques em algumas classes de solos (Tabela 3). Também deve ser considerado que os solos sob lavouira e vegetação nativa, especialmente aqueles sob mata, apresentavam densidades muito diferentes (Apêndices 6 e 7). Neste caso, conforme mencionado no item 5.5 acima, a comparação de estoques calculados para a mesma profundidade de amostragem (em “camada equivalente”) não se refere à mesma massa de solo, o que pode induzir a uma

interpretação errônea da magnitude de alteração dos estoques. Para a comparação mais robusta entre estoques em situações onde o manejo implicou em alteração significativa da densidade seria então recomendada a utilização de massas equivalentes de solo. Entretanto, é notório que estas lavouras, como de resto no Planalto Riograndense, passaram por períodos com erosão significativa (Cassol et al., 1984). Isto prejudicaria a aplicação do conceito de "massa equivalente", uma vez que a massa de solo não permaneceu constante desde o início da agricultura na região. De outra parte, os estoques de COS calculados em "camada equivalente" como apresentados na Tabela 3 permitem comparações com outros estudos e levantamentos, desde que não sejam feitas inferências quanto a ganhos ou perdas de estoques.

Os estoques sob vegetação nativa observados foram menores que os calculados por Bernoux et al. (2002) para esta região — entre 90 e 110 Mg C ha⁻¹ para a camada de 0 a 30 cm — apresentados em inventário nacional de estoques de COS. Entretanto, foram maiores que os estimados em inventário regional (Tornquist et al., 2005) e em estudos anteriores em condições similares de solos e vegetação na região (Machado, 1976; Pöttker, 1977; Cintra et al., 1983; Sisti et al., 2004). Estas diferenças se devem provavelmente às metodologias analíticas para o C e densidade do solo utilizadas, bem como a variabilidade espacial dos estoques de COS, e reforçam a necessidade de se utilizar protocolos padronizados na realização de inventários regionais ou nacionais.

Os estoques de COS nos Neossolos Regolíticos configuraram uma situação especial: nas áreas sob vegetação nativa foi encontrada pedregosidade significativa, distribuída em manchas (afloramentos rochosos). Portanto os estoques médios reais sob mata devem certamente ser menores que os calculados. Nas áreas de lavoura, especialmente nas mais antigas, como as amostradas neste estudo, houve remoção manual dos calhaus e matações no decorrer da história do uso agrícola. Neste estudo não se considerou a pedregosidade no cálculo dos estoques porque a versão 4 do Century utilizada não trata explicitamente da pedregosidade.

TABELA 3. Estoques de COS por classe e uso original e atual do solo nas camadas equivalentes de 0 a 10, 0 a 20 e 0 a 30 cm.

Classe de Solo e Uso Atual	Estoque de COS						
	n	0-10 cm		0-20 cm		0-30 cm	
		\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
<u>LV textura média</u>							
mata	4	28,4	6,1	46,5	6,7	59,9	6,7
lavoura (mata)	3	30,4	5,9	53,4	9,3	69,3	17,5
<u>LV textura argilosa</u>							
campo	2	28,4	6,3	52,6	8,9	74,3	8,5
lavoura (campo)	3	30,0	3,5	55,3	3,3	77,8	3,2
mata	3	34,9	1,9	56,5	1,9	73,3	1,3
lavoura (mata)	3	28,7	1,1	51,4	1,2	72,8	4,7
<u>LV textura muito argilosa</u>							
campo	1	30,9	-	55,1	-	76,8	-
lavoura(campo)	4	30,3	2,6	54,7	4,1	75,8	4,6
mata	7	34,3	4,2	59,3	4,6	80,2	5,2
lavoura(mata)	3	31,4	5,9	57,1	9,0	79,6	9,5
<u>Neossolo flúvico</u>							
mata	1	32,7	-	68,6	-	96,2	-
lavoura(mata)	2	25,6	5,5	50,4	0,1	84,2	20,8
<u>Neossolo regolítico</u>							
mata	1	40,5	-	76,2	-	105,0	-
lavoura(mata)	2	29,6	5,2	55,3	5,2	76,8	5,3

Os altos estoques nas lavouras em Latossolos de textura média, maiores inclusive que solos sob mata, podem ser atribuídos ao manejo de solo utilizado, à adoção do SPD nos últimos 15 anos e especialmente ao maior aporte de nutrientes e resíduos orgânicos de origem animal. Na região central do município de XV de Novembro, onde ocorre esta classe de solo, existem criatórios de matrizes para suinocultura de grandes dimensões, cujos efluentes são em sua totalidade aplicados nas lavouras próximas. Estoques de COS maiores em áreas cultivadas por muitos anos sob SPD, em comparação com estoques sob vegetação nativa, já haviam sido observados em outros locais, com sistemas de cultivo com alta adição de biomassa e nutrientes (Sá et al, 2001; Dieckow et al., 2005).

6.3. Simulação da Dinâmica do COS pelo Modelo Century

6.3.1. Simulações no mesmo elemento da paisagem (topos)

As simulações realizadas consideraram diferentes anos para o início da agricultura, pois mesmo havendo a colonização iniciado em 1900, encontramos indicações históricas de períodos de maior expansão da agricultura nas décadas de 1920 e 1930, e depois na década de 70, além de uma taxa de crescimento “natural” associada ao aumento da população da região e da pressão socioeconômica para incremento da área cultivada. A notória expansão da agricultura no Planalto Riograndense na década de 70 – o chamado “boom da soja” – foi observada na interpretação das fotos aéreas e imagens, mas a dinâmica do uso do solo anterior a 1956 não pode ser capturada pela inexistência de qualquer informação espacializada sobre uso do solo (como levantamentos, mapas ou croquis) nesse período. Assim, o período de agricultura colonial foi estabelecido como ocorrendo desde 1901 até 1955 em todas as áreas originalmente sob mata, classificadas como lavoura no mapa de uso de 1956 (Figura 11). O modelo Century foi calibrado para cada unidade de simulação (combinação classe de solo–vegetação–elemento da paisagem) de forma a refletir os estoques de COS, observados sob vegetação nativa ao fim do bloco de equilíbrio e sob lavouras na atualidade.

Os estoques médios de COS de 0 a 20 cm observados na amostragem dos pontos sob vegetação nativa foram assumidos como em

equilíbrio, equivalentes à situação original anterior à prática da agricultura (1900 para mata e 1955 para campo). As áreas de mata e campo que permaneceram inalteradas entre 1900 até a atualidade foram consideradas similares, e os estoques de COS observados em mata e campo atribuídos também a estas. Adicionalmente, as calibrações utilizaram os estoques médios das lavouras medidos entre 2004 e 2006, assumidos como iguais ao ano 2005, nas unidades de simulação com elemento da paisagem “topos”. Estes estoques de COS sob lavoura foram recalculados para “massa equivalente” da respectiva vegetação original (Tabela 4).

A simulação dos Latossolos Vermelhos textura média nos topos, originalmente sob mata, com conversão para agricultura em 1900, mostrou decréscimo de 33% (de 46,5 Mg C ha⁻¹ até 31,1 Mg C ha⁻¹) do estoque original até o fim do bloco “Convencional Intensivo” em 1980 (Figura 14). Com a adoção de sistemas conservacionistas como o Preparo Reduzido, houve inicialmente uma estabilização dos estoques e a adoção do SPD a partir de 1993 demonstrou uma recuperação de até 39,2 Mg C ha⁻¹ observado em 2005, o que corresponde a um incremento do estoque de 26%. A simulação do cenário “Atual” indicou que até 2050 os estoques de COS poderiam atingir 51,9 Mg ha⁻¹, 11% maiores que os estoques originais, configurando um incremento de 66% em relação aos menores estoques simulados em 1980, correspondendo a uma taxa de acúmulo de COS de 0,30 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. As simulações referentes a outros anos de início da agricultura mostraram decréscimos sucessivamente menores dos estoques de COS, seguidos de acúmulos também sucessivamente maiores, que implicaram em estoques finais em 2050 de 53,5, 54,1, 55,7 e 57,2 Mg C ha⁻¹ para anos de início 1956, 1971, 1981 e 1993, respectivamente. No cenário “Melhorado”, os estoques finais atingiram 66,2 Mg C ha⁻¹, 42% maiores que os estoques originais e 112% maiores que os estoques de 1980. Este incremento de 1980 até 2050 correspondeu a uma taxa de acúmulo de COS de 0,70 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. As simulações da adoção do SPD diretamente após a conversão para agricultura foram as únicas situações que não apresentaram decréscimo de estoque de COS nos dois cenários.

A simulação dos Latossolos Vermelhos textura argilosos nos topos, originalmente sob mata, com conversão para agricultura em 1900, mostrou

TABELA 4. Estoques de COS utilizados na calibração do Century, corrigidos para massa equivalente, considerando a massa de solo na camada de 0 a 20 cm sob vegetação original como referência.

Solos	Estoque COS			
		Vegetação Original	Lavouras	
			camada e massa equivalente ¹	camada equivalente
		Mg ha ⁻¹
LV textura média	mata	46,5	53,4	39,2
LV textura argilosa	campo	52,6	55,3	54,2
	mata	56,5	51,4	36,9
LV textura muito argilosa	mata	59,3	57,1	46,0
	campo	55,1	54,7	53,5
Neossolo flúvico	mata	68,6	50,4	41,1
Neossolo regolítico	mata	76,2	55,4	45,5

¹por definição, os estoques em camada e massa equivalente são iguais para a situação de referência.

decréscimo de 46,7% (de 55,3 Mg C ha⁻¹ até 29,5 Mg C ha⁻¹) dos estoques originais até o fim do bloco “Convencional Intensivo” em 1980 (Figura 15). A partir da utilização do Preparo Reduzido, iniciou-se a recuperação dos estoques, acelerada pela adoção do SPD a partir de 1993, que chegou a 36,9

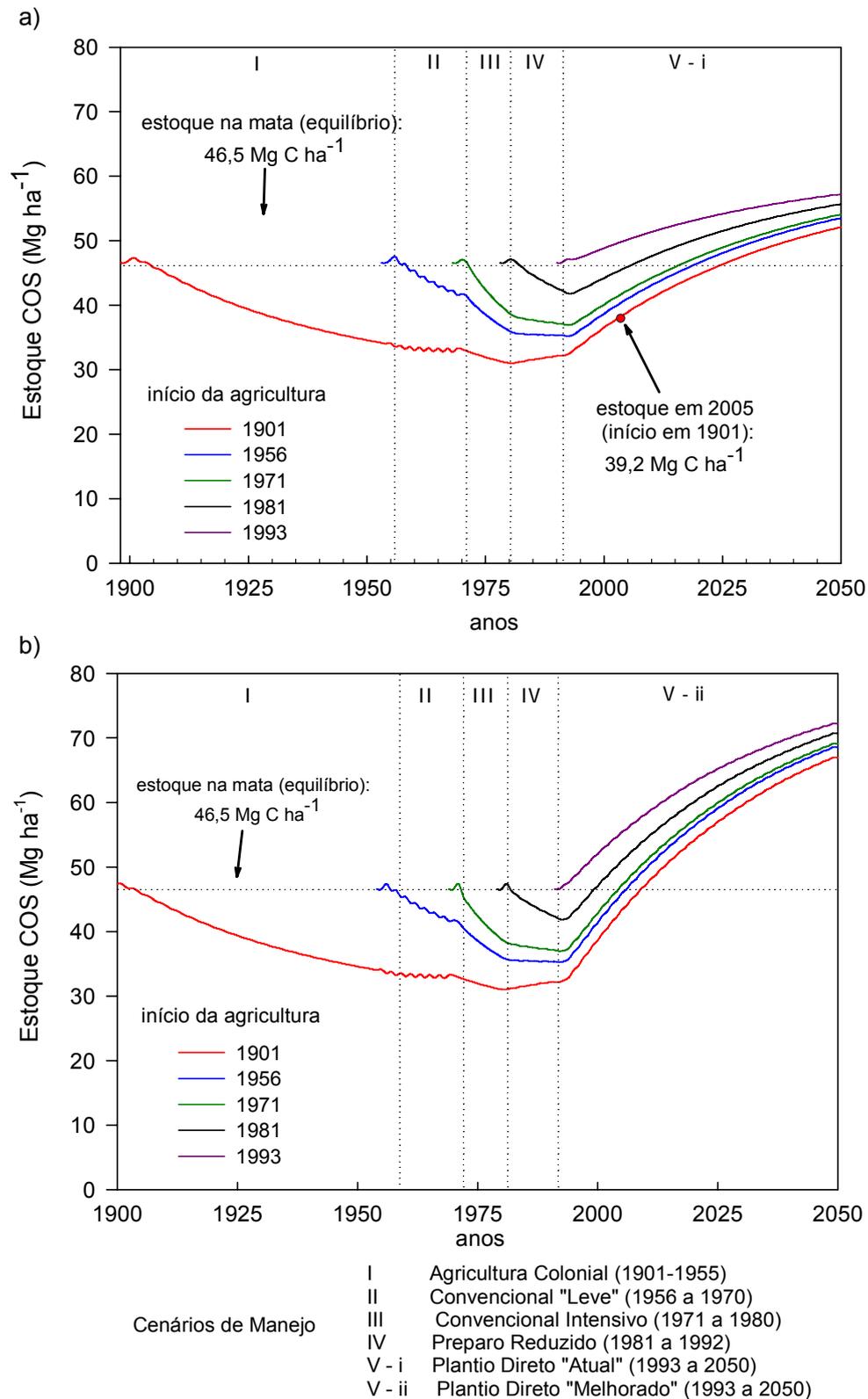


Figura 14. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) considerando diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura média, nos topos, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

Mg C ha⁻¹ observado em 2005, o que corresponde a um incremento de estoques de 25%. A simulação do cenário “Atual” indica que, até 2050, os estoques poderiam atingir 48,5 Mg ha⁻¹, ainda 12% menores que os estoques originais, mas com um incremento de 25,1% em relação aos estoques simulados em 1980, refletindo uma taxa de acúmulo de COS de 0,30 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. As simulações referentes a outros anos de início da agricultura mostraram decréscimos sucessivamente menores dos estoques de COS, seguidos de acúmulos também sucessivamente maiores, que implicaram em estoques finais em 2050 de 49,7, 50,1, 51,6 e 53,1 Mg C ha⁻¹ para anos de início 1956, 1971, 1981 e 1993, respectivamente. No cenário “Melhorado”, os estoques finais atingiriam 59,6 Mg C ha⁻¹, 7% maiores que os originais e 102% maior que os estoques simulados para o fim do período com agricultura convencional (1980). Este incremento a partir de 1981 até 2050 representa uma taxa de acúmulo de COS de 0,60 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

A simulação dos Latossolos Vermelhos textura muito argilosa nos topos, originalmente sob mata, com conversão para agricultura em 1900, mostrou decréscimo de 33,4% (de 59,3 Mg C ha⁻¹ até 39,5 Mg C ha⁻¹) do estoque original até o fim do bloco “Convencional Intensivo” em 1980 (Figura 16). A partir da utilização do Preparo Reduzido, iniciou-se a recuperação dos estoques, acelerada pela adoção do SPD a partir de 1993, que chegou a 46,0 Mg C ha⁻¹ observado em 2005, o que corresponde a um incremento do estoque de 16,5%. A simulação do cenário “Atual” indica que até 2050 os estoques poderiam atingir 63,5 Mg ha⁻¹, ainda 7% maiores que os estoques originais, e um incremento de 60,8% em relação aos estoques simulados em 1980, correspondendo a uma taxa de acúmulo de COS de 0,34 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. As simulações referentes a outros anos de início da agricultura mostraram decréscimos sucessivamente menores dos estoques de COS, seguidos de acúmulos também sucessivamente maiores, que implicaram em estoques finais em 2050 de 65,9, 66,1, 67,9 e 69,6 Mg C ha⁻¹ para anos de início 1956, 1971, 1981 e 1993 respectivamente. No cenário “Melhorado”, os estoques finais atingiriam 77,3 Mg C ha⁻¹, 30,1% maiores os originais e 95,7% maior que os estoques simulados para o fim do período com agricultura convencional (1980). Este incremento a partir de 1981 até 2050 representa uma taxa de acúmulo de COS de 0,75 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

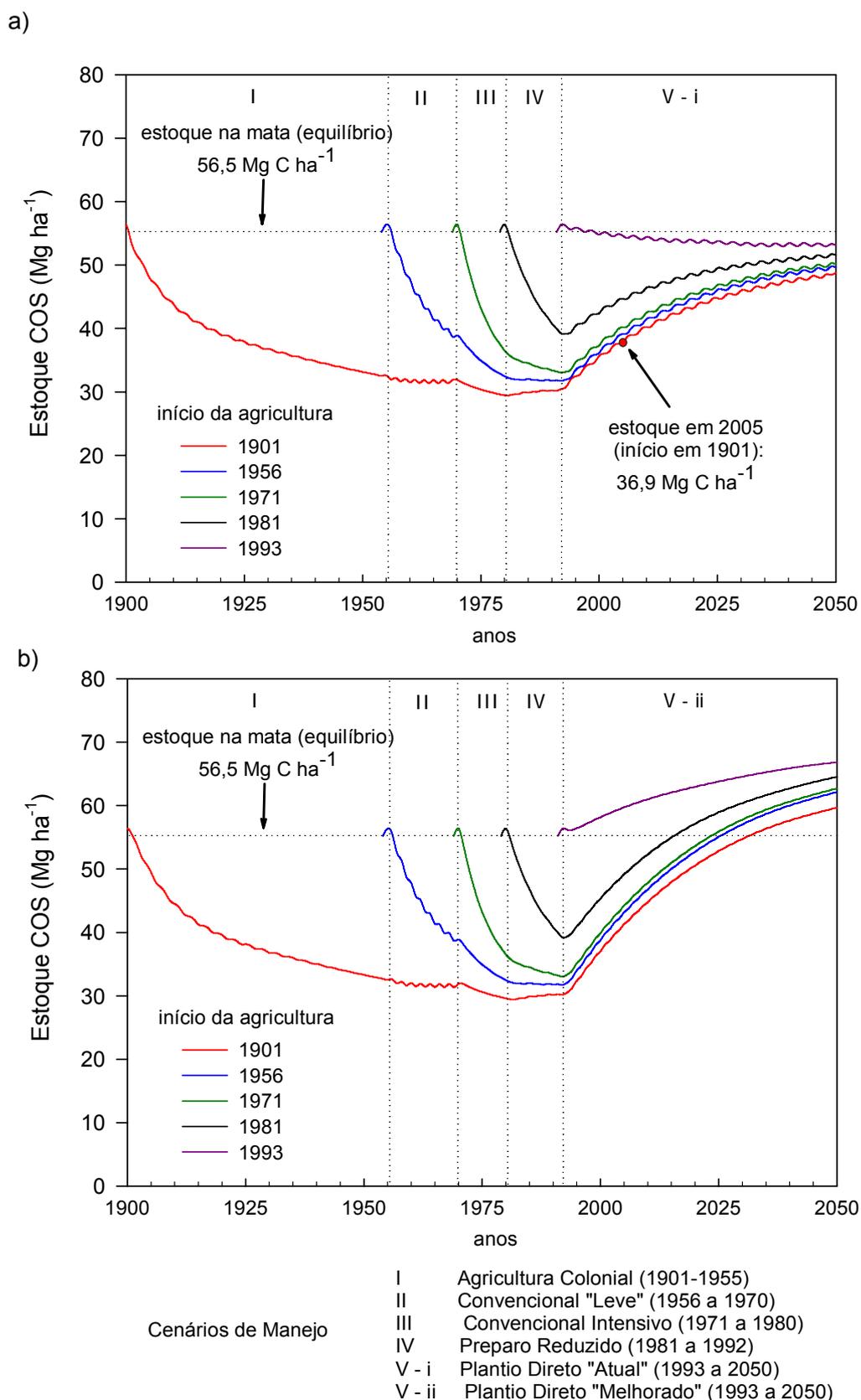


Figura 15. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura argilosa, nos topos, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado"

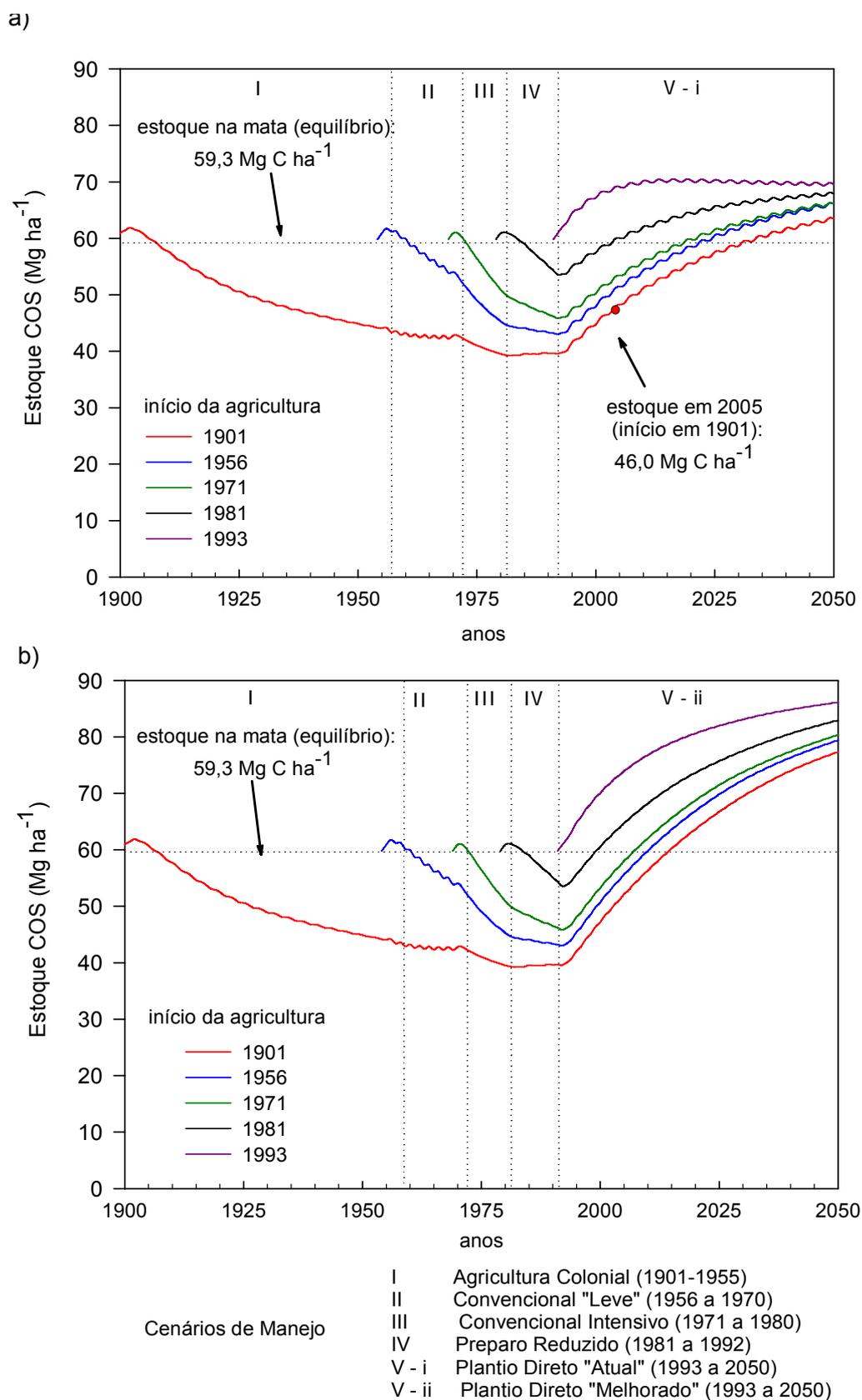


Figura 16. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura muito argilosa, nos topos, originalmente sob mata, nos topos a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

Nos Neossolos Regolíticos nos topos, originalmente sob mata, os estoques de COS apresentaram comportamento diverso das outras combinações solo-vegetação simuladas, pois em nenhuma situação foi constatada recuperação dos estoques originais observados de $76,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Os 80 anos de agricultura convencional provocaram decréscimo de 46,2% (de até $41,0 \text{ Mg C ha}^{-1}$) até o fim do bloco “Convencional Intensivo” em 1980 (Figura 17). A partir da utilização do Preparo Reduzido, iniciou-se a recuperação dos estoques, acelerada pela adoção do SPD a partir de 1993, que chegou a $46,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ observado em 2005, o que corresponde a um incremento do estoque de 13,4%. A simulação do cenário “Atual” indica que até 2050 os estoques poderiam atingir $48,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$, ainda 36,5% inferiores aos estoques originais, mas representando um pequeno incremento de 18,1% em relação aos menores estoques observados no fim do período sob agricultura convencional em 1980, correspondendo a uma taxa de acúmulo de COS de $0,15 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Considerando outros anos de início da agricultura, evidenciaram-se decréscimos sucessivamente menores dos estoques de COS, seguidos de acúmulos também sucessivamente maiores, o que implicou em estoques finais em 2050 de 49,7, 50,7, 52,2 e $53,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para anos de início 1956, 1971, 1981 e 1993 respectivamente. No cenário “Melhorado”, mesmo com os grandes aportes de biomassa simulados, os estoques finais atingiriam apenas $59,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$, ainda 21,1% menores que os originais, mas 45,3% maiores que os estoques simulados para o fim do período com agricultura convencional (1980). Este incremento a partir de 1981 até 2050 representa uma taxa de acúmulo de COS de $0,37 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

A dinâmica dos estoques de COS nos Neossolos Flúvicos, originalmente cobertos por matas, os quais ocorrem apenas em áreas deposicionais foi similar aos Neossolos Regolíticos (Figura 18). Também não foi observada recuperação dos estoques de COS originais de $68,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Na simulação com início da agricultura em 1901, os manejos de solo convencionais provocaram decréscimo de 48,7% (de até $35,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$) até 1980. A partir da utilização do Preparo Reduzido, recuperação dos estoques, acelerada pela adoção do SPD a partir de 1993, que chegou a $41,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$ em 2005 — um incremento de 16,8%. A simulação do cenário “Atual” indica que até 2050 os estoques poderiam atingir $49,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$, ainda 28,3% inferiores aos

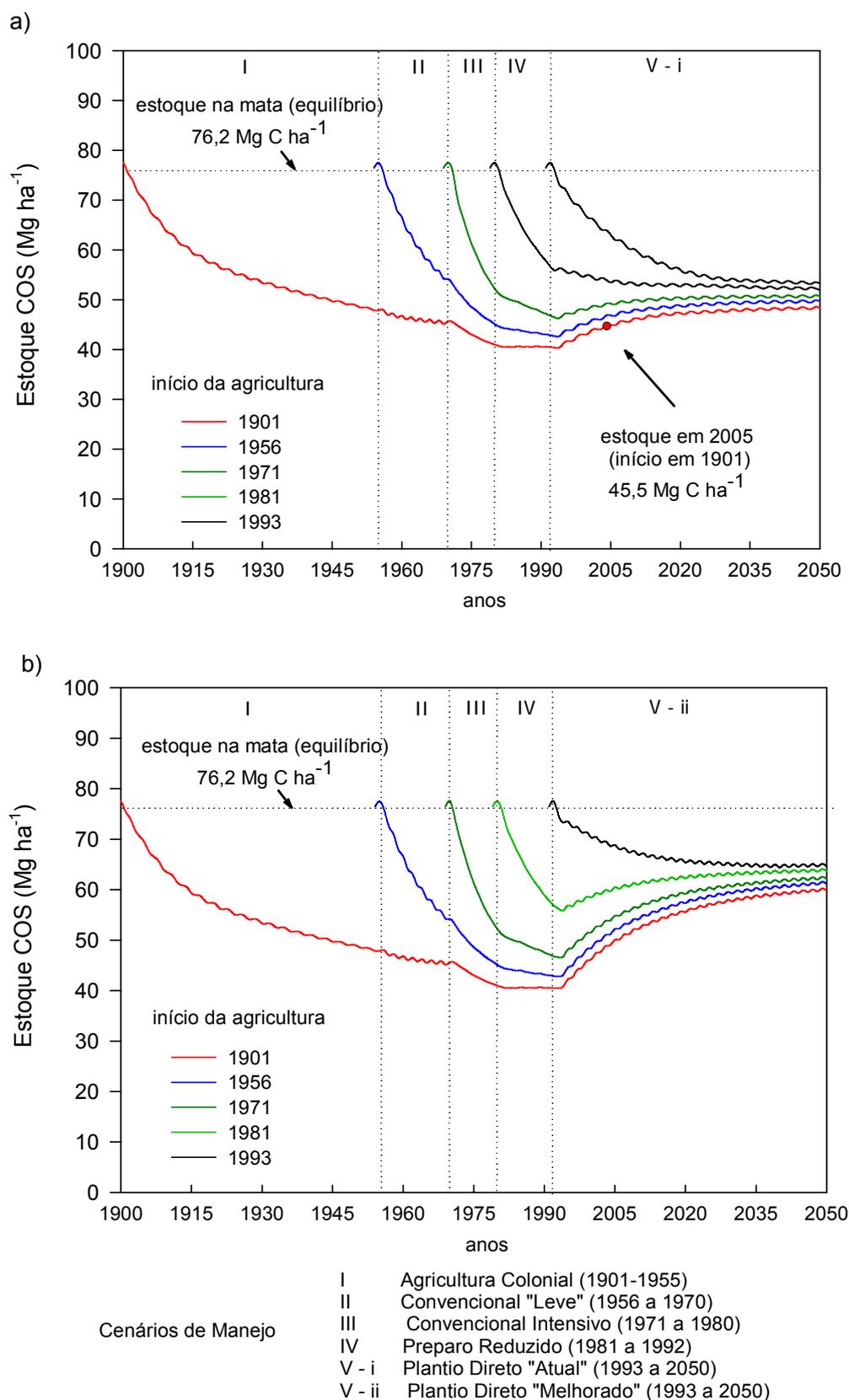


Figura 17. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes épocas de início da agricultura em Neossolos Regolíticos, nos topos, originalmente sob mata, nos topos a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

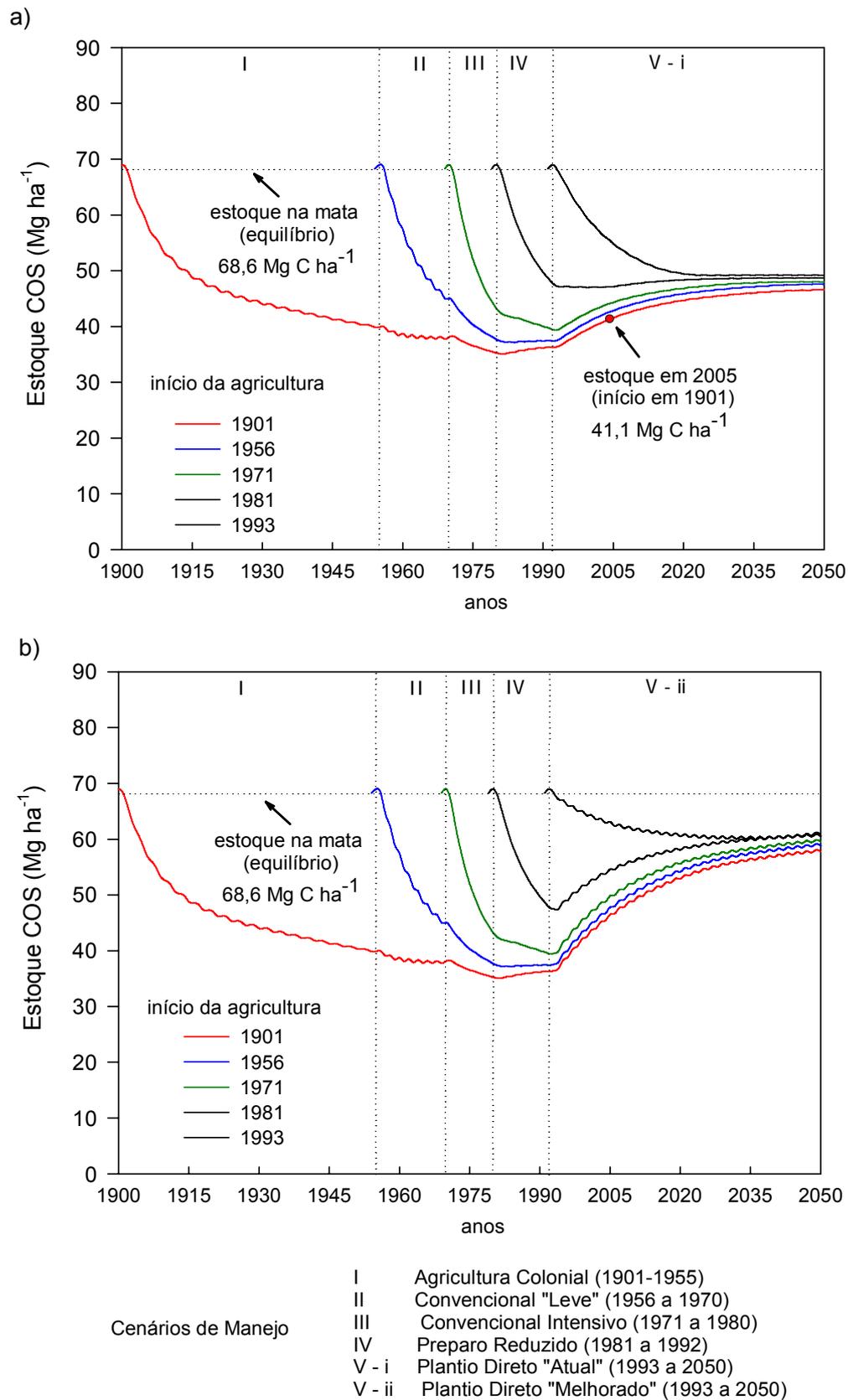


Figura 18. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes épocas de início da agricultura em Neossolos Flúvicos, nos topos, originalmente sob mata, nos topos a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

estoque originais, mas representando um pequeno incremento de 18,1% em relação aos menores estoques observados ao fim do período sob agricultura convencional em 1980, correspondendo a uma taxa de acúmulo de COS de $0,15 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Considerando os outros períodos com diferentes durações para a prática da agricultura, os estoques finais 2050 foram de 46,6, 47,6, 48,0 e $49,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para anos de início 1956, 1971, 1981 e 1993, respectivamente. No cenário “Melhorado” com agricultura iniciando em 1901, os estoques em 2050 foram $57,8 \text{ Mg C ha}^{-1}$, ainda 15,8% inferiores aos originais. Este incremento a partir de 1981 até 2050 correspondeu a recuperação de 64,3% dos estoques simulados para o fim do período com agricultura convencional (1980) e representa uma taxa de acúmulo de COS de $0,32 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Os dois solos cuja vegetação original era campo apresentaram comportamento bastante similar em relação às mudanças de estoques de COS. Em ambos os casos houve menores perdas de estoques, principalmente porque a agricultura iniciou a partir de 1956. A recuperação também foi rápida após a adoção de sistemas conservacionistas. No Latossolo Vermelho textura argilosa, em topos, os estoques iniciais de $52,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ foram reduzidos e estabilizaram em 12,3% ($46,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$) até 1992 durante o bloco “Preparo Reduzido” (Figura 19). Apenas a adoção do SPD a partir de 1993 permitiu a recuperação de estoques, que chegaram $54,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ observados em 2005 – um incremento do estoque de 17,5%. O cenário “Atual” permitiu atingir $71,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ onde a agricultura iniciou em 1956, o que constitui um incremento de 35,3% além dos estoques originais, mas representando um ganho de 54,4% em relação aos menores estoques observados no fim do período sob preparo reduzido em 1992, correspondendo a uma taxa de acúmulo de COS de $0,44 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Considerando outros anos de início da agricultura, os estoques de COS finais em 2050 de 71,2, 71,7, 73,4 e $74,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para anos de início 1971, 1981 e 1993, respectivamente. No cenário “Melhorado”, o cenário simulado com agricultura a partir de 1956 levou a estoques finais de $87,0 \text{ Mg C ha}^{-1}$, 65,4% maiores que os originais e 88% maiores que em 1992, quando ocorreram os menores estoques. Este incremento a partir de 1992 até 2050 representou uma taxa de acúmulo de COS de $0,71 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. No Latossolo Vermelho textura muito argilosa nos topos, os estoques iniciais de

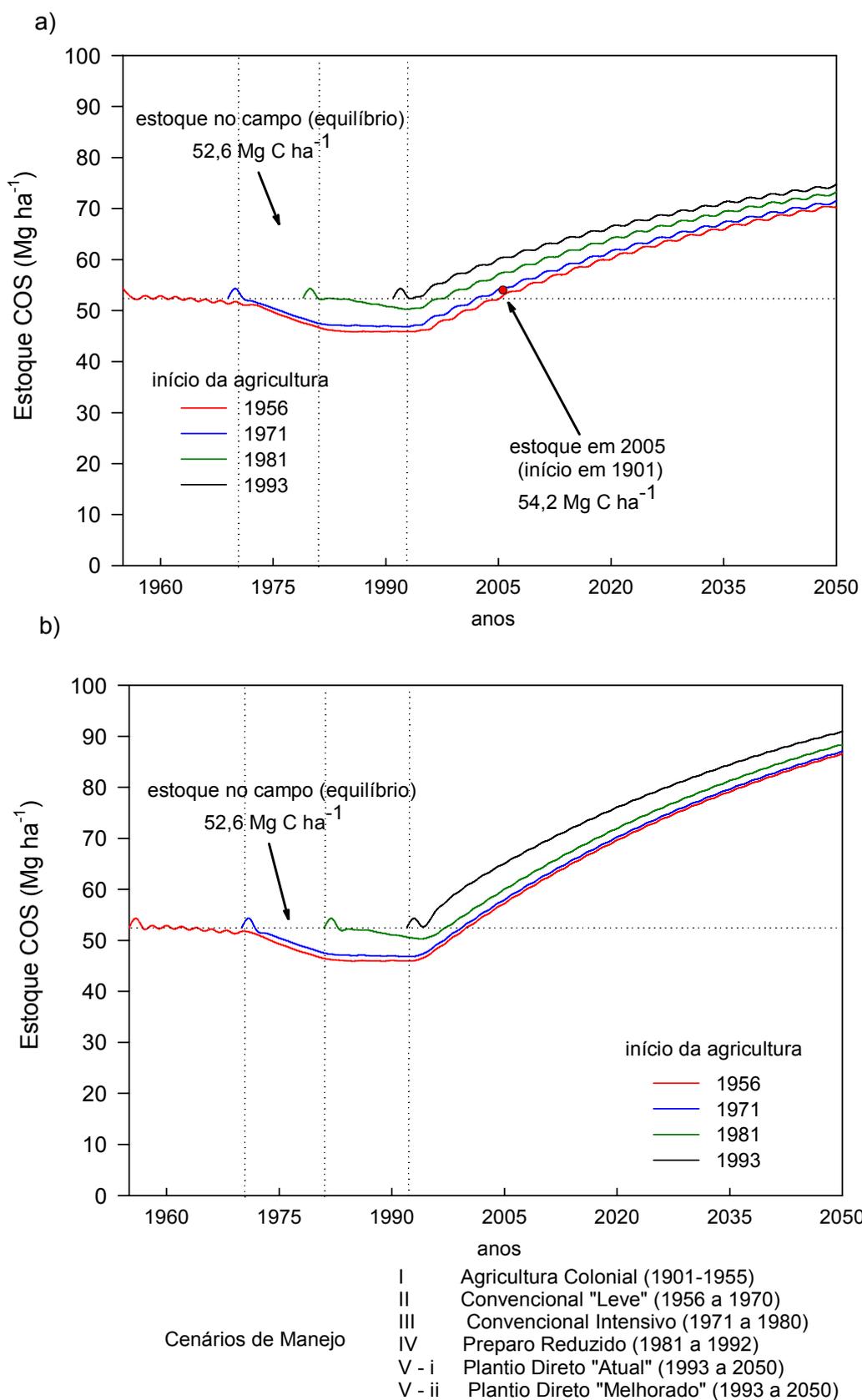


Figura 19. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura argilosa, nos topos, originalmente sob campo, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

55,1 Mg C ha⁻¹, tiveram redução de 17,6%, a partir da introdução da agricultura em 1956 até estabilizarem em 45,4 Mg C ha⁻¹ com a utilização do Preparo Reduzido entre 1981 e 1992 (Figura 20). A introdução do SPD a partir de 1993 iniciou a recuperação de estoques, que chegaram 53,5 Mg C ha⁻¹ observados em 2005 – um incremento do estoque de 17,8%. O cenário “Atual” permitiu atingir 69,3 Mg ha⁻¹ na simulação com agricultura iniciando em 1956, o que constitui um incremento de 25,8% superior aos estoques originais, mas representando um ganho de 52,6% em relação aos menores estoques observados durante o período sob preparo reduzido, correspondendo a uma taxa de acúmulo de COS de 0,42 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. Os estoques de COS finais em 2050 em simulações com outros anos de início da agricultura de 69,8, 71,5 e 73,5 Mg C ha⁻¹ para anos de início 1971, 1981 e 1993, respectivamente. No cenário “Melhorado”, o cenário simulado com agricultura a partir de 1956 levou a estoques finais de 87,0 Mg C ha⁻¹, 65,4% maiores que os originais e 91% maiores que em 1992, quando ocorreram os menores estoques. Este incremento a partir de 1993 até 2050 representou uma taxa de acúmulo de COS de 0,73 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

Em síntese, as simulações realizadas indicaram perdas do estoque de COS pela implantação da agricultura convencional em solos sob mata entre 49 e 33% com 70 a 80 anos de agricultura. Estes resultados são similares aos indicados na literatura internacional (Davidson e Ackerman, 1993; Guo e Gifford, 2003) e em estudos na região do Planalto Riograndense (Machado, 1976; Pöttker, 1977; Cintra et al., 1983). No caso dos Latossolos Vermelhos sob campo, as perdas foram entre 13 e 17%, relativamente pequenas após 25 anos de agricultura convencional, considerando que a exploração agrícola iniciou justamente com sistemas de manejo com preparo intensivo do solo e altas taxas de perda de solo por erosão. Uma possível explicação para estas menores diferenças seria que as perdas por maior decomposição e erosão foram compensadas por elevadas adições de C da biomassa. As referências históricas indicam que o uso agrícola em solos sob campo natural só iniciou quando foi disponibilizado um pacote tecnológico e apoio financeiro oficial, inicialmente para a cultura do trigo e após para a soja (Schilling, 1961; Rückert, 2003). Com efeito, no final da década de 1950 iniciou-se a aplicação de fertilizantes e corretivos e utilização de cultivares melhoradas nestas áreas.

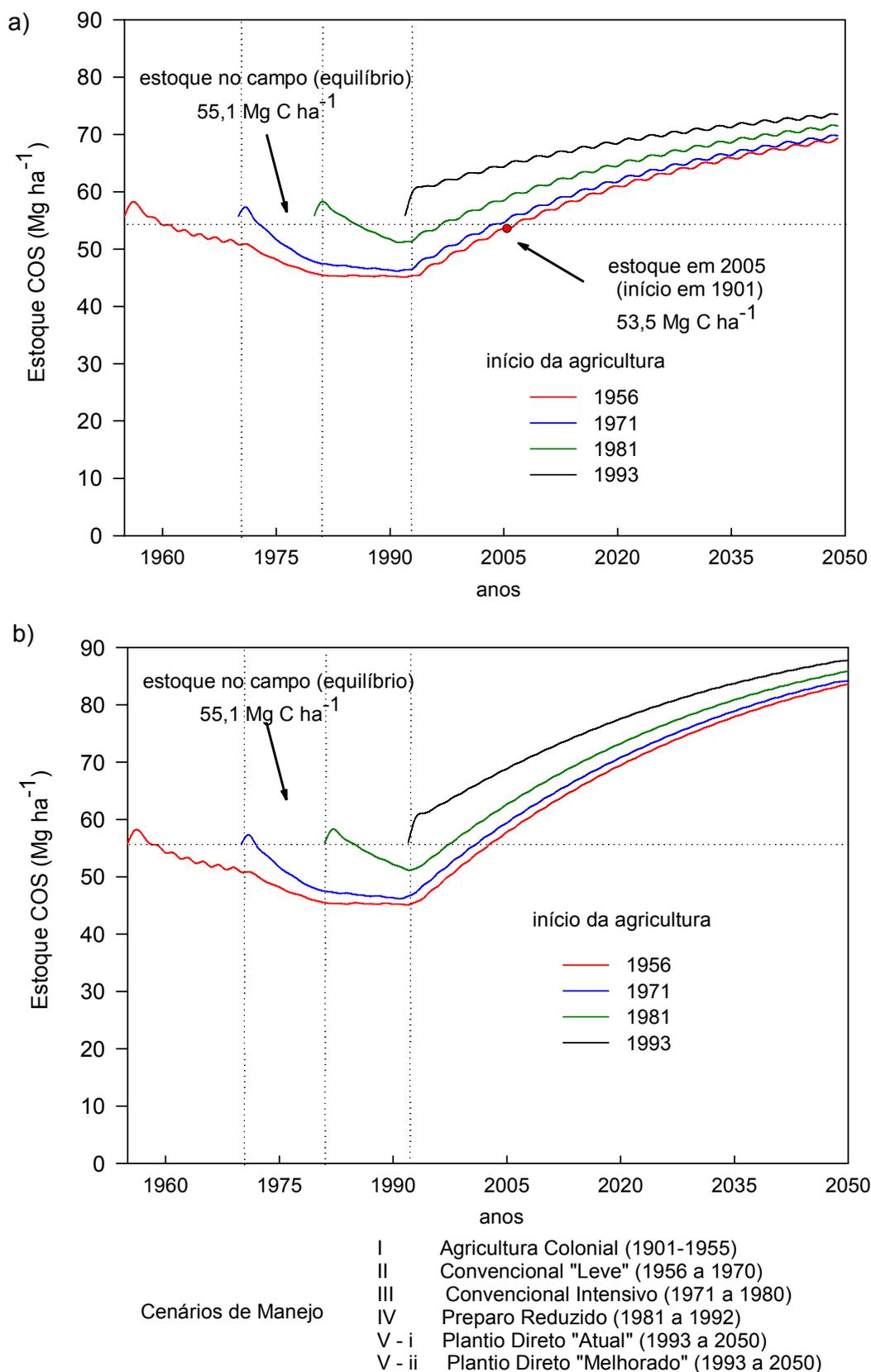


Figura 20. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes épocas de início da agricultura em Latossolos Vermelhos textura muito argilosa, nos topos, originalmente sob campo, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

As taxas de acúmulo de COS após a adoção do SPD até 2050 no cenário “Atual” nos Latossolos Vermelhos foram entre 0,30 e 0,44 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, um pouco inferiores à taxa média de 0,48 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ indicada por Bayer et al. (2006b) para solos subtropicais no Brasil. As taxas de acúmulo de COS no cenário “Melhorado” até 2050 nos Latossolos Vermelhos se situaram entre 0,6 e 0,7 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, próximas ao maior valor encontrado por Bayer et al. (2006b) para solos subtropicais no Brasil, de 0,81 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

As observações acima devem levar em consideração os seguintes aspectos: as taxas de acúmulo de COS obtidas por simulação da dinâmica de COS incorporam todas as incertezas envolvidas neste estudo, desde a variabilidade das estimativas dos estoques de COS até os parâmetros e variáveis do modelo; as taxa apresentadas referem-se a várias décadas até 2050, quando os estoques de COS na maioria das vezes já haviam atingido novo equilíbrio, enquanto a maioria dos estudos usados para comparação têm duração entre 10 e 20 anos, não havendo indicação sobre o estado atual da dinâmica dos estoques de COS observados (Bayer et al., 2006b); as taxas de acúmulo de COS apresentadas referem-se a massa equivalente dos solos sob vegetação natural em uma camada de 0 a 20 cm de profundidade, portanto consideram profundidades menores que 20 cm nas lavouras.

Grande parte das simulações indicou estoques de COS maiores que os originais (sob vegetação nativa) ao fim do período simulado em 2050, o que sugere um potencial de seqüestro de COS remanescente além dos estoques originais. Simulações anteriores com o Century em Latossolos Vermelhos com textura similar também produziram estoques maiores que os originais em cenários que incluíam o SPD com grande adição de resíduos (Debarba, 2002). Essas observações reforçam a idéia de que estoques de COS sob vegetação natural devem ser entendidos apenas como resultantes do equilíbrio de adições e perdas de C, não constituindo o limite máximo de acúmulo de C (Six et al., 2002).

6.3.2. Simulações considerando os elementos da paisagem

Como as simulações nos diferentes elementos da paisagem foram bastante similares (Figuras 21 a 26), foram analisadas apenas as simulações nos diferentes elementos da paisagem (topo, encosta e superfície deposicional) para cada combinação solo-vegetação original com início da agricultura em 1901. As simulações de outros anos de início da agricultura seriam igualmente similares às anteriormente apresentadas (item 6.3.1).

As taxas de erosão e deposição atribuídas aos diferentes elementos da paisagem topo, encosta e superfície deposicional tiveram pequeno impacto na evolução dos estoques de COS nos cenários simulados a partir de estoques originais assumidos como idênticos em toda a paisagem. Em síntese, os estoques nas encostas nos Latossolos e Neossolos Regolíticos com vegetação original mata foram 2,1% menores que nos topos no fim dos períodos sob agricultura convencional, e 2,6% maiores nas áreas deposicionais. Nos Latossolos originalmente sob campo, os estoques decresceram 1,4% nas encostas e aumentaram 3,0% em média nas áreas deposicionais. Ao fim da simulação, em 2050, no cenário “Atual” nos Latossolos e Neossolos Regolíticos foram 1,8% menores na encosta e 2,3% maiores nas áreas deposicionais e no cenário “Melhorado” foram 2,2% menores e 4,2% maiores, respectivamente. Nos Latossolos originalmente sob campo, em 2050, no cenário “Atual”, os estoques decresceram 1,2% nas encostas, e aumentaram 2,8% em média nas áreas deposicionais, e no cenário “Melhorado” os estoques decresceram 1,7% nas encostas e aumentaram 3,5% em média nas áreas deposicionais.

Considerando que, mesmo com taxas de erosão e deposição notadamente altas atribuídas aos blocos (períodos) sob agricultura convencional nas simulações, particularmente nas encostas e no período “Convencional Intensivo” (Apêndice 4), as diferenças observadas nas comparações anuais acima poderiam sugerir pouca relevância do fator erosão e deposição na dinâmica do COS no contexto estudado. Entretanto, a comparação da perda cumulativa de COS por erosão ao fim das simulações com os estoques originais indica que o impacto da erosão variou entre 21,5%

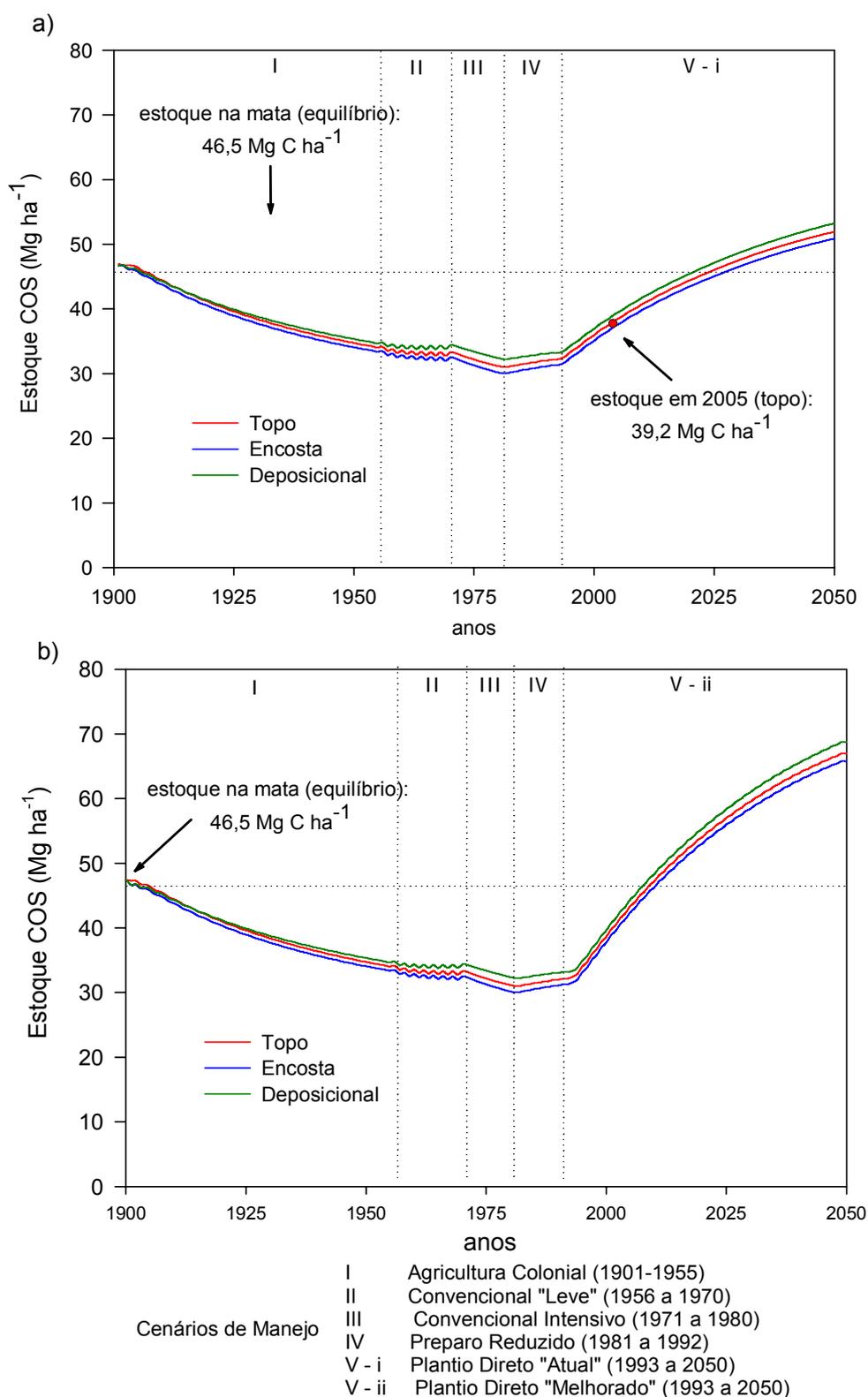


Figura 21. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Latossolos Vermelhos textura média, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

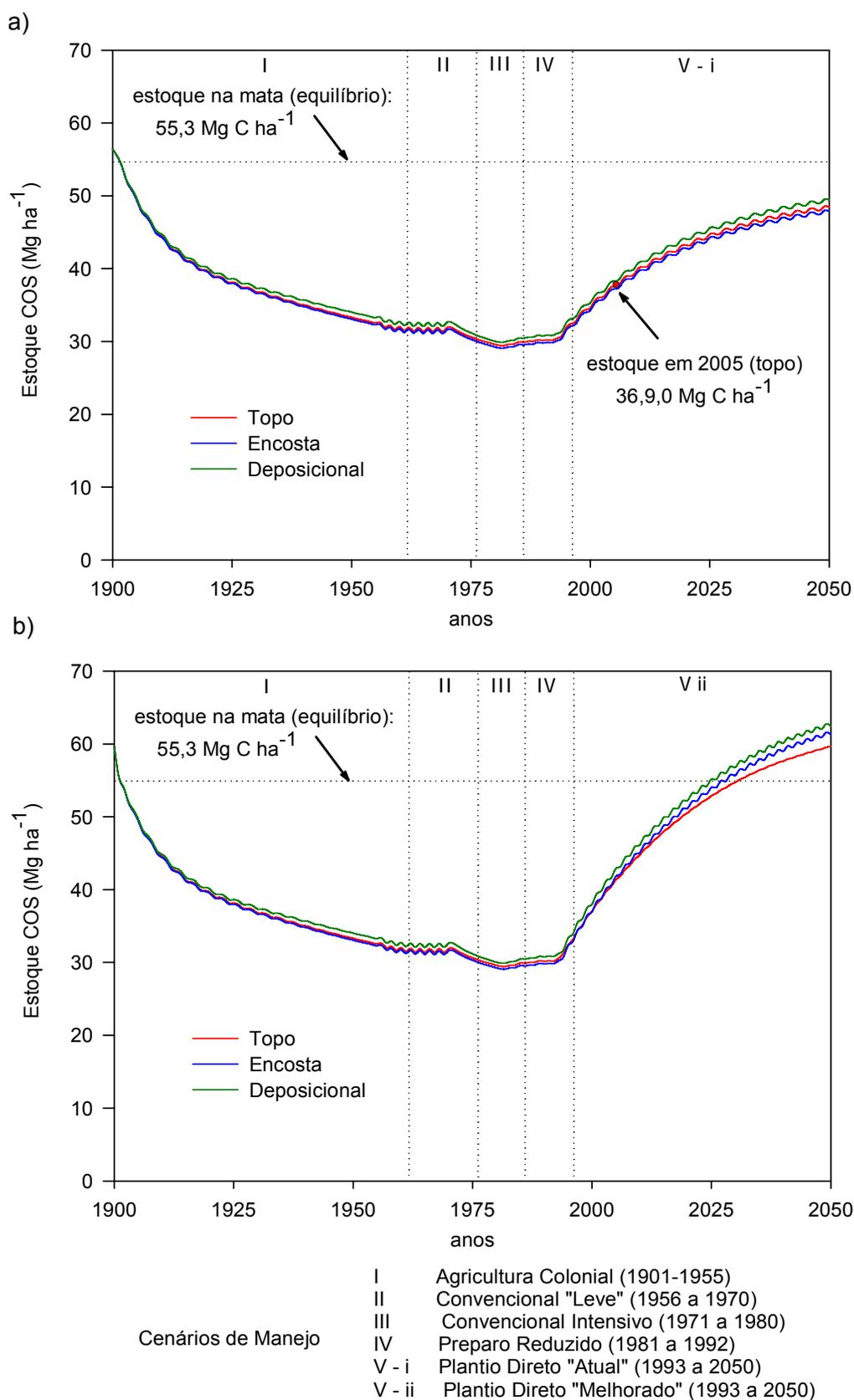


Figura 22. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Latossolos Vermelhos textura argilosa, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

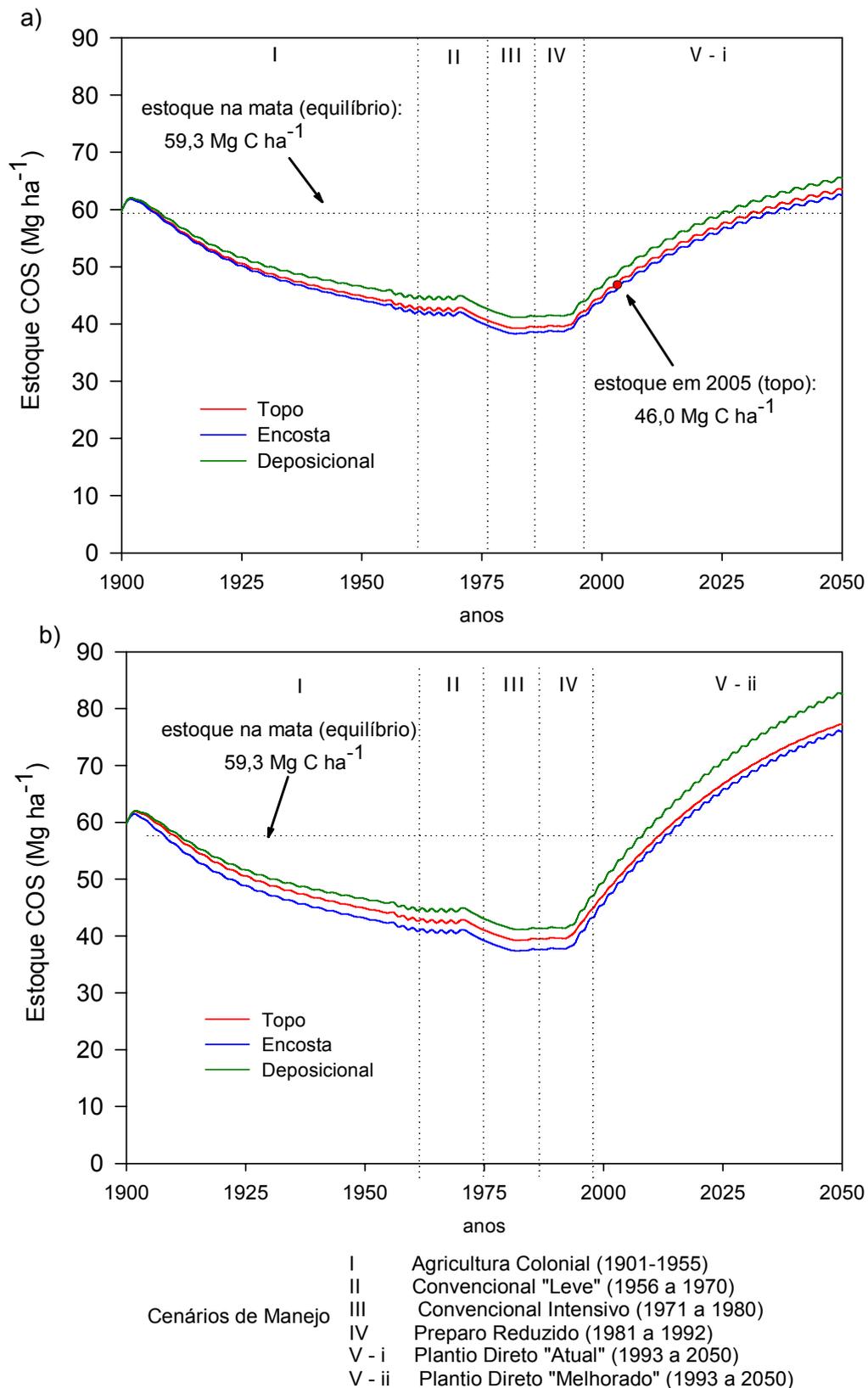


Figura 23. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Latossolos Vermelhos textura muito argilosa, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

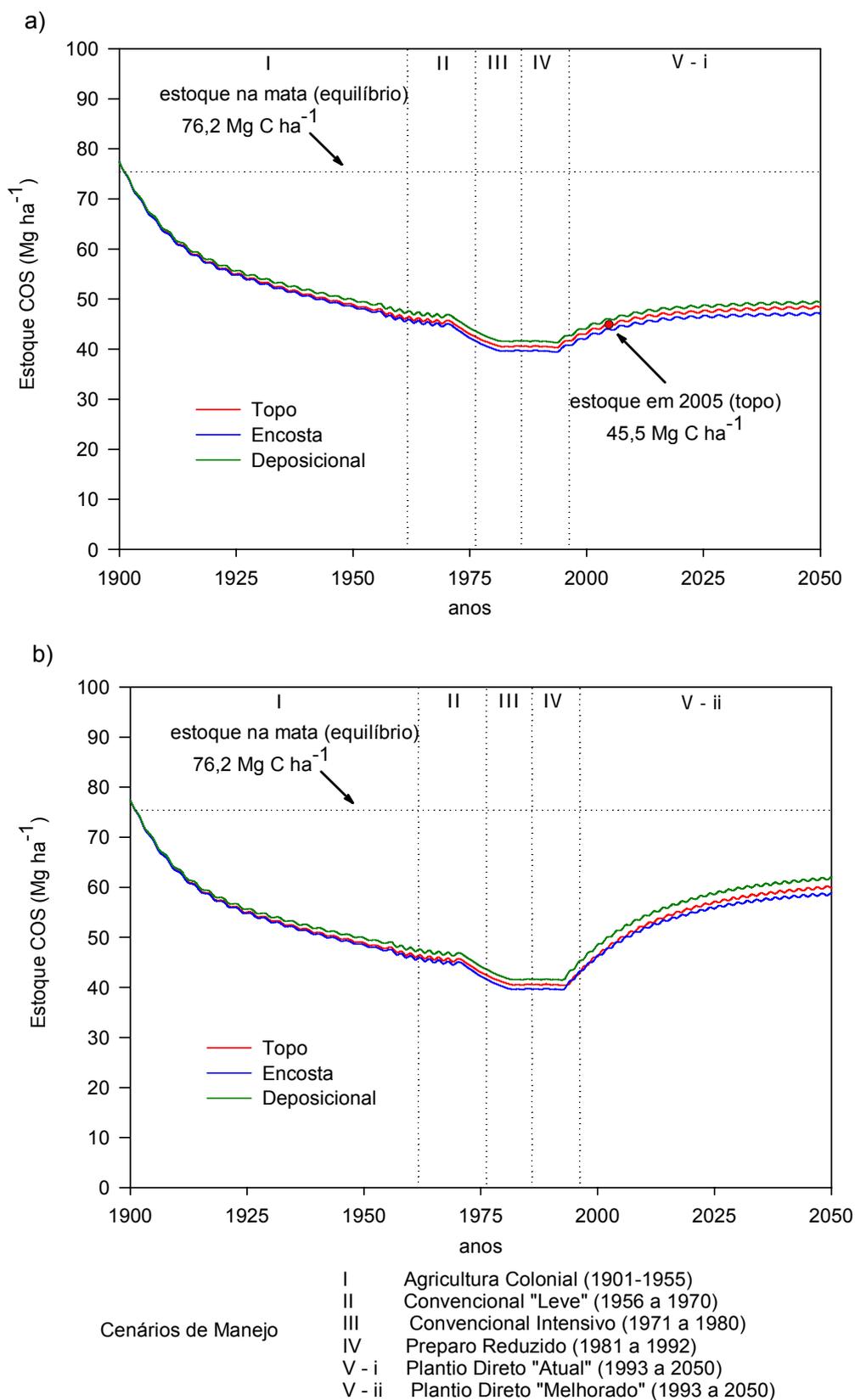


Figura 24. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1901, em Neossolo Regolítico, originalmente sob mata, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

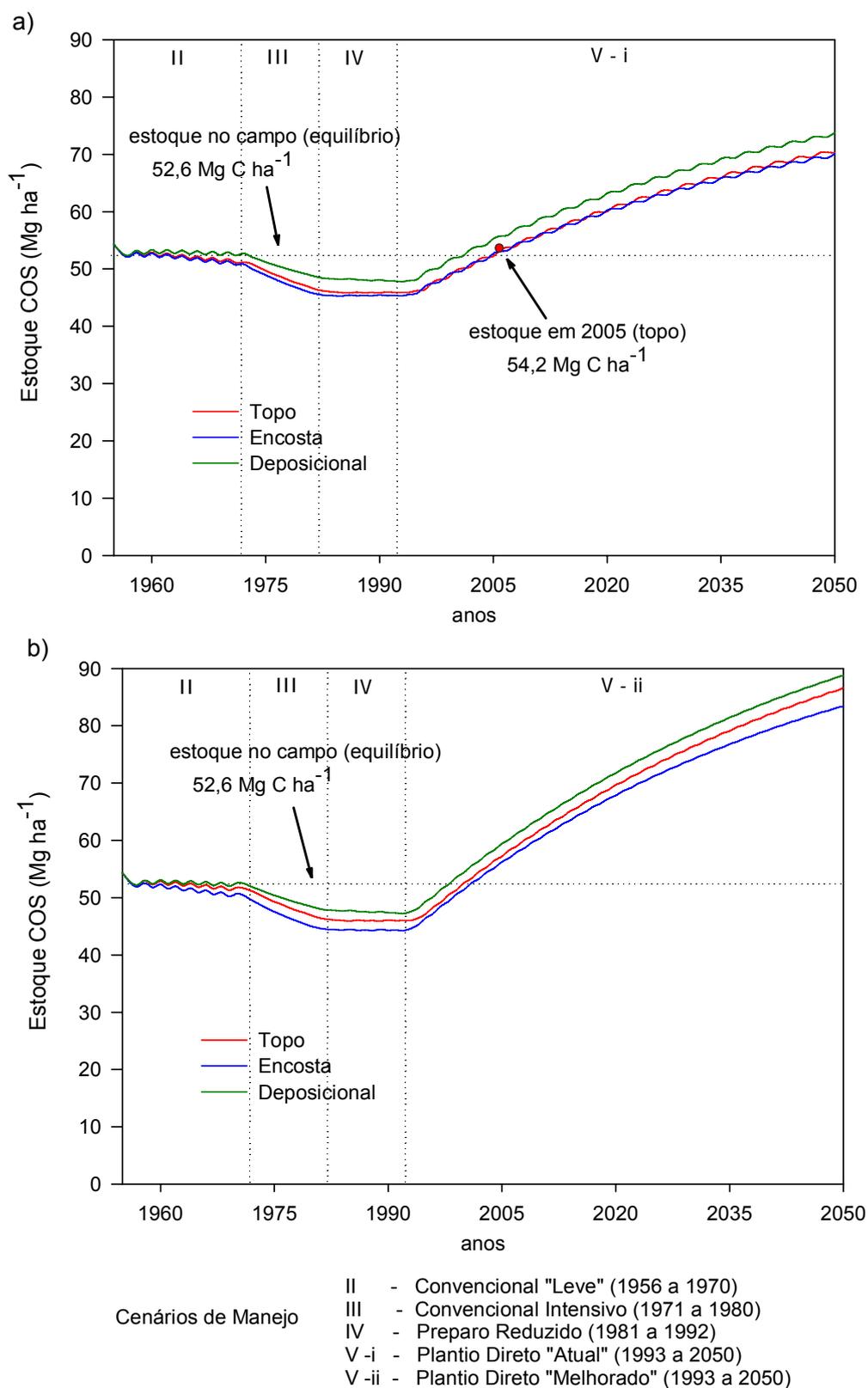


Figura 25. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1955, em Latossolos Vermelhos textura argilosa, originalmente sob campo, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

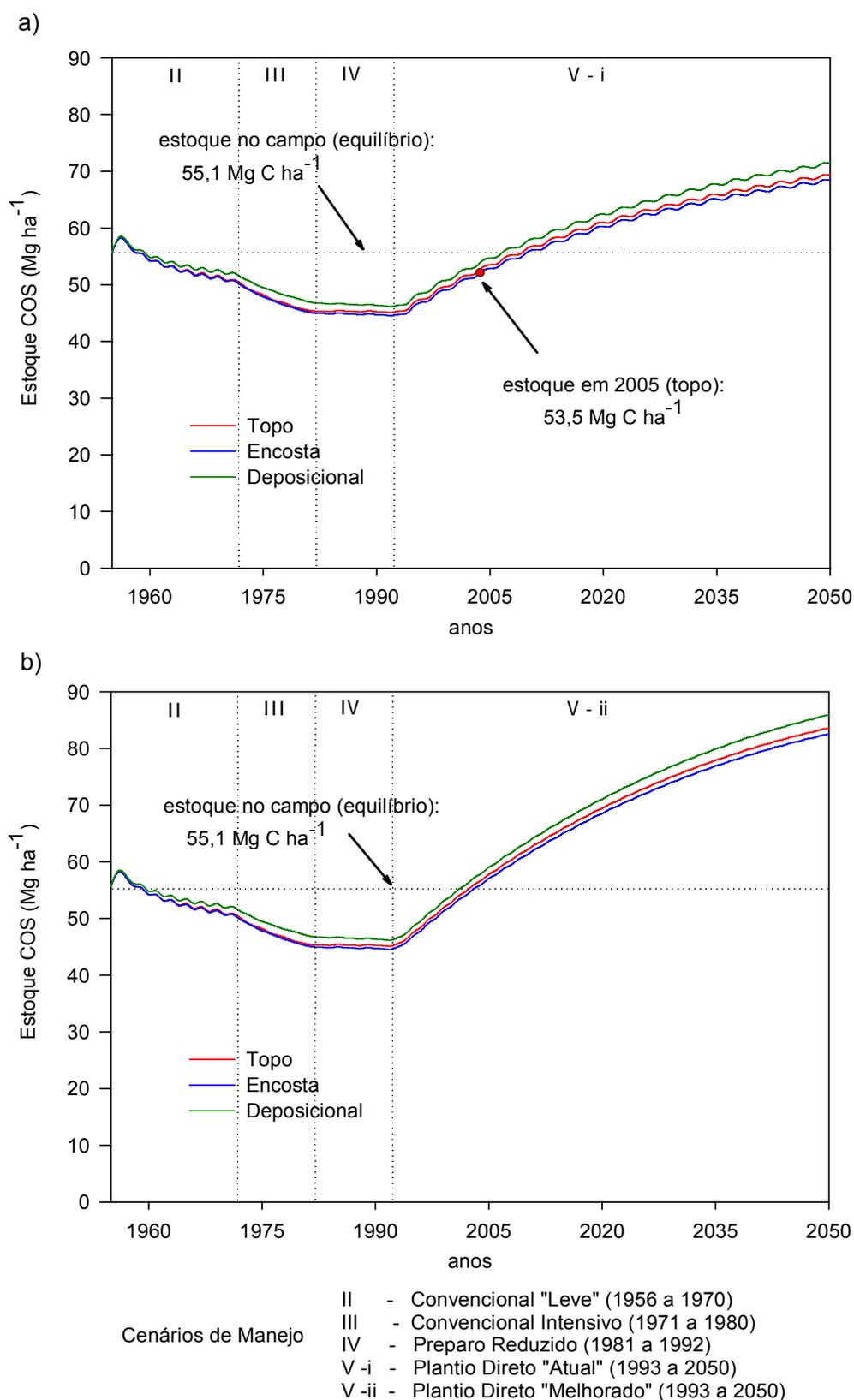


Figura 26. Evolução dos estoques de COS (a partir da amostragem de equilíbrio de 0 a 20 cm) em diferentes posições na paisagem, com início da agricultura em 1955, em Latossolos Vermelhos textura muito argilosa, originalmente sob campo, a) com cenários de manejo SPD "Atual"; b) com cenários de manejo SPD "Melhorado".

nas encostas do Latossolo Vermelhos textura média, justamente aquele com maior suscetibilidade à erosão e menores estoques originais, e 7,5% nos topos dos Latossolos Vermelhos textura argilosa, menos suscetíveis à erosão e com estoques elevados. A deposição ocorrida representou entre 12,7 e 28% dos estoques originais observados (Tabela 5).

Cabe ressaltar que esta análise deve ser considerada com cuidado, pois o Century não é um modelo de erosão e alguns aspectos do tratamento da perda ou ganho de COS por erosão e deposição são bastante precários à luz do conhecimento existente sobre o mecanismo da erosão (e a deposição) do solo, o que contribui para as incertezas associadas aos resultados obtidos. O Century simula a perda de COS por erosão a partir da definição de eventos mensais com taxas rígidas de perda de solo. O COS perdido é uma fração do estoque total de COS na camada de simulação no mês com evento de erosão, calculada a partir da taxa de erosão de solo atribuída no mês e pelo fator de enriquecimento do C (um parâmetro fixo igual a 2). Como já discutido em 5.5.3., esta perda de COS “erodido” na camada de simulação (de 20 cm de espessura) é repostada por uma quantidade de C da subsuperfície, contida em uma massa igual à massa perdida por erosão. Dados os parâmetros utilizados neste estudo para estimar os estoques subsuperficiais ($I_{hzf}(1)$, $I_{hzf}(2)$ e $I_{hzf}(3)$) e os valores observados para os compartimentos ativo, lento e passivo das simulações, a reposição retornou aproximadamente entre 50 a 70% do COS perdido por erosão. Entretanto, os dados analíticos referentes à camada de 20 a 30 cm deste estudo indicaram que, nos solos amostrados sob lavoura, os estoques de COS representaram entre 30 e 40% do estoque da camada 0 a 20 cm, ou seja, a reposição efetuada nas simulações provavelmente superestimou os estoques subsuperficiais de COS. De outra parte, a deposição é estimada conforme Pennock e Frick (2001), não sendo resultado da modelagem de deposição propriamente dita, pois não foi tratada como o transporte e acúmulo de solos de áreas adjacentes. Estas limitações evidentes do Century 4 no tratamento da erosão e deposição deverão ser superadas na versão 5 do Century em desenvolvimento, que incorpora revisões significativas nos algoritmos de ciclo do N, ciclo hidrológico, bem como no tratamento da erosão e deposição (NREL, 2007).

TABELA 5. Erosão e deposição cumulativa de COS desde o início da agricultura até 2050, em valores absolutos e relativos aos estoques originais de COS.

Unidade de Simulação	Estoque COS Mg C ha ⁻¹	Perda(-) ou Ganho (+) de COS pela erosão			
		“Atual”		“Melhorado”	
		Mg C ha ⁻¹	%	Mg C ha ⁻¹	%
<u>LV textura média</u>					
<u>mata</u>					
topo		-5,0	-10,8	-5,2	-11,2
encosta	46,5	-9,6	-20,6	-10,0	-21,5
deposicional		+12,5	+26,9	+13,2	+28,4
<u>LV argiloso</u>					
<u>mata</u>					
topo		-4,1	-7,4	-4,4	-8,0
encosta	55,3	-7,3	-13,2	-7,6	-13,7
deposicional		+9,2	+16,6	+8,8	+15,9
<u>LV muito argiloso</u>					
<u>mata</u>					
topo		-5,2	-8,8	-5,3	-8,9
encosta	59,3	-10,6	-17,9	-10,6	-17,9
deposicional		+14,4	+24,3	+14,8	+25,0
<u>Neossolo rególfico</u>					
<u>mata</u>					
topo		-6,6	-8,7	-6,7	-8,8
encosta	76,2	-14,3	-18,8	-14,9	-19,6
deposicional		+15,5	+20,3	+16,0	+21,0
<u>Neossolo flúvico</u>					
<u>mata</u>					
deposicional	68,6	+6,4	+9,3	+6,6	+9,6
<u>LV argiloso</u>					
<u>campo</u>					
topo		-4,4	-8,4	-4,8	-9,1
encosta	52,6	-8,6	-16,3	-8,8	-16,7
deposicional		+11,6	+22,1	+11,2	+21,3
<u>LV muito argiloso</u>					
<u>campo</u>					
topo		-4,7	-8,5	-4,8	-8,7
encosta	55,1	-8,2	-14,9	-8,6	-15,6
deposicional		+7,0	+12,7	+7,3	+13,2

6.4. Distribuição espacial dos estoques de COS

As simulações dos dois cenários considerando diferentes épocas de início da agricultura permitiram espacializar as alterações de estoque devidas às mudanças de uso. O acoplamento da base de dados oriunda das simulações pelo Century com a base de dados de uso do solo associou os estoques de COS correspondente a cada condição de uso do solo em alguns anos selecionados. Desta forma foi possível visualizar a distribuição dos estoques desde a condição original até os cenários preditivos, considerando as mudanças de uso e sistema de manejo e efeitos de posição na paisagem (erosão/deposição) de forma integrada (Figuras 27 a 35). Esta integração permitiu ponderar alguns dos principais aspectos que definem os estoques atuais de COS em uma região e ainda incluir explicitamente as áreas inundadas pela Represa Passo Real e as zonas urbanas. Para estas, consideramos que estoques de COS se mantiveram inalterados a partir da inundação ou da expansão da mancha urbana. Além disso, a ferramenta de geoprocessamento possibilitou a elaboração de mapas de diferenças de estoques de COS entre anos, o que proporciona uma rápida identificação das áreas e situações onde houve mudanças mais significativas (Figuras 36 a 43). Neste estudo, optou-se por utilizar legendas que permitissem a visualização mais ampla possível dos estoques medidos e simulados.

A observação dos mapas de estoques permite uma visão sinóptica da dinâmica dos estoques de COS. Em síntese, pode-se observar as substanciais perdas de estoques nos solos sob floresta nas cinco décadas iniciais de exploração agrícola na região central e leste de Ibirubá e XV de Novembro e a manutenção dos estoques na região oeste, onde predominavam os campos. A partir de 1956, as perdas de COS se generalizam para toda a região, com exceção dos cada vez menores remanescentes de vegetação nativa (Figuras 28, 29, 30, 31, 32 e 33). Este quadro é revertido em parte a partir de 1981, pelo início da utilização de sistema conservacionistas (no caso, o Preparo Reduzido) e mais drasticamente a partir de 1993 com a adoção do SPD, com o que haveria recuperação parcial dos estoques originais em algumas situações, e até mesmo acúmulo de estoques maiores que os originais ao fim do ano 2050, especialmente no cenário com um sistema de

manejo mais intensivo em termos de rendimentos e produção de biomassa (SPD “melhorado”).

Mesmo utilizando um padrão de legendas expandido nos mapas apresentados, as menores perdas de estoques nas áreas deposicionais na maioria das vezes não são visualizáveis, pois os valores em diferentes elementos da paisagem são muito próximos, e relativamente pequenos se comparados com as diferenças entre classes e usos de solo.

Um dos aspectos mais importantes da modelagem espacialmente explícita do COS é a possibilidade de se tratar os fenômenos da erosão e deposição. No Planalto Riograndense, assim como em outras regiões do Brasil, a dinâmica do COS foi substancialmente afetada pela erosão. Mesmo que as taxas de erosão atualmente sejam pequenas se comparadas com o período de prática da agricultura convencional, deve-se reconhecer sua existência e quantificar o deslocamento de COS associado ao longo do tempo.

A determinação do destino dos sedimentos é crítica para uma quantificação mais precisa da variação dos estoques em escala regional. Como observado no campo, houve grande acúmulo de sedimentos em certas áreas de região de estudo, sendo que algumas destas estão sendo utilizadas para agricultura e outras mantêm vegetação nativa (matas, campos e banhados). Em muitas lavouras foi observado que houve acúmulo de sedimentos na mesma área, formando patamares em posições mais inferiores da paisagem, próximo às drenagens, especialmente onde existia mata na área adjacente. Essa situação é bastante comum e é similar à implantação de “zonas” ou “faixas de amortecimento” (*buffer strips*) para retenção de sedimento e contaminantes, as quais poderiam reter até 97% dos sedimentos (Lovell et al., 2006). O tratamento explícito de situações como esta demandaria utilizar uma escala maior de trabalho, que permitisse individualizar as lavouras, aprimorar a classificação da vegetação e modelar adequadamente a erosão e deposição. Para tanto, a revisão do Century e o desenvolvimento de modelos de erosão e deposição que tratem da dinâmica do COS com nível de detalhe similar ao Century parecem promissores. As versões mais recentes da família de modelos EPIC/APEX incorporaram boa parte do algoritmo de COS (Williams et al., 2000; Gassman et al., 2005). Van Oost et al.(2005) desenvolveram um

modelo (SPEROS-C) explicitamente articulado para analisar a dinâmica do COS concomitante à erosão e deposição em escala de lavoura.

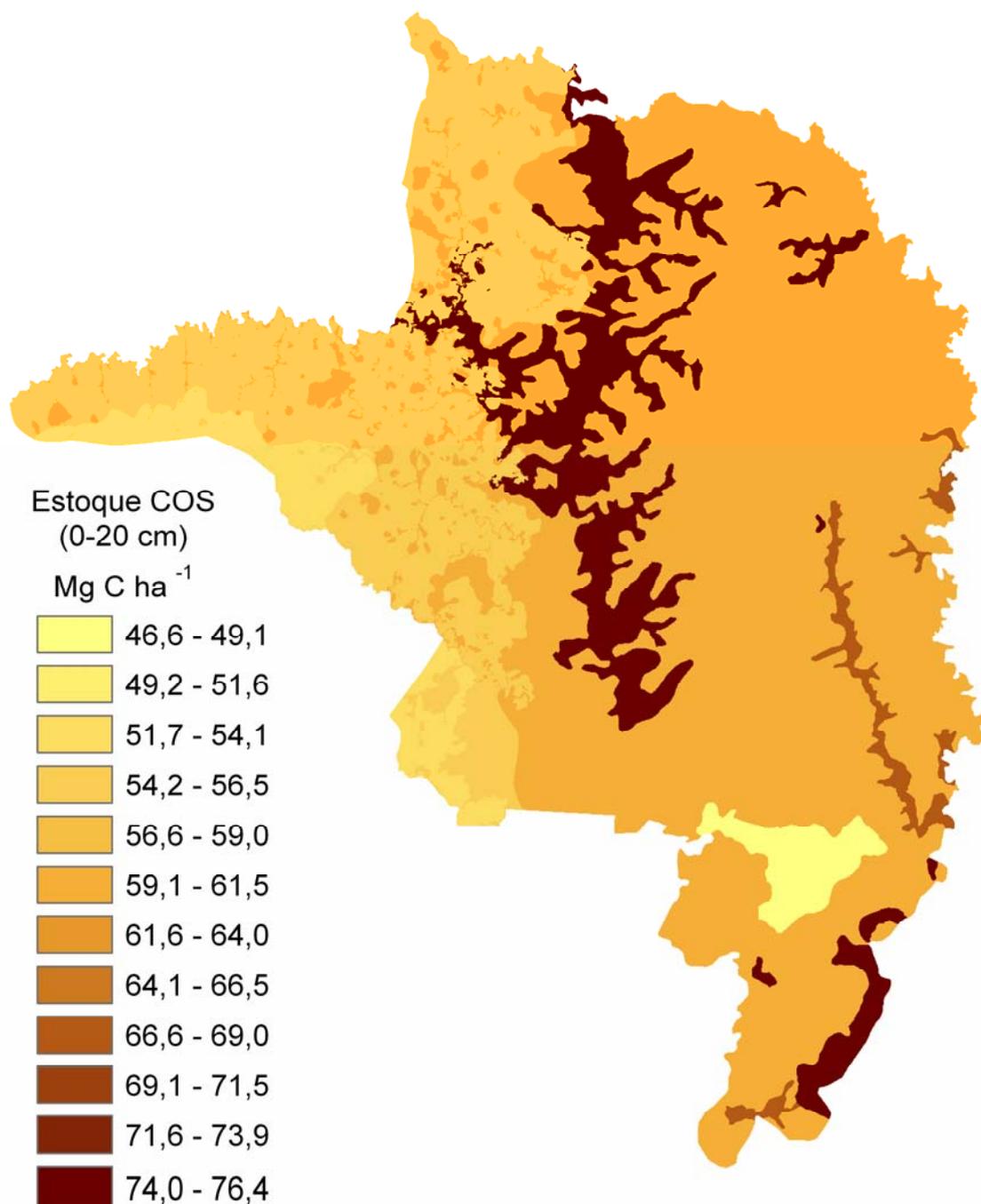


Figura 27. Distribuição dos estoques de COS em 1900, na camada de 0 a 20 cm na região de Ibirubá.

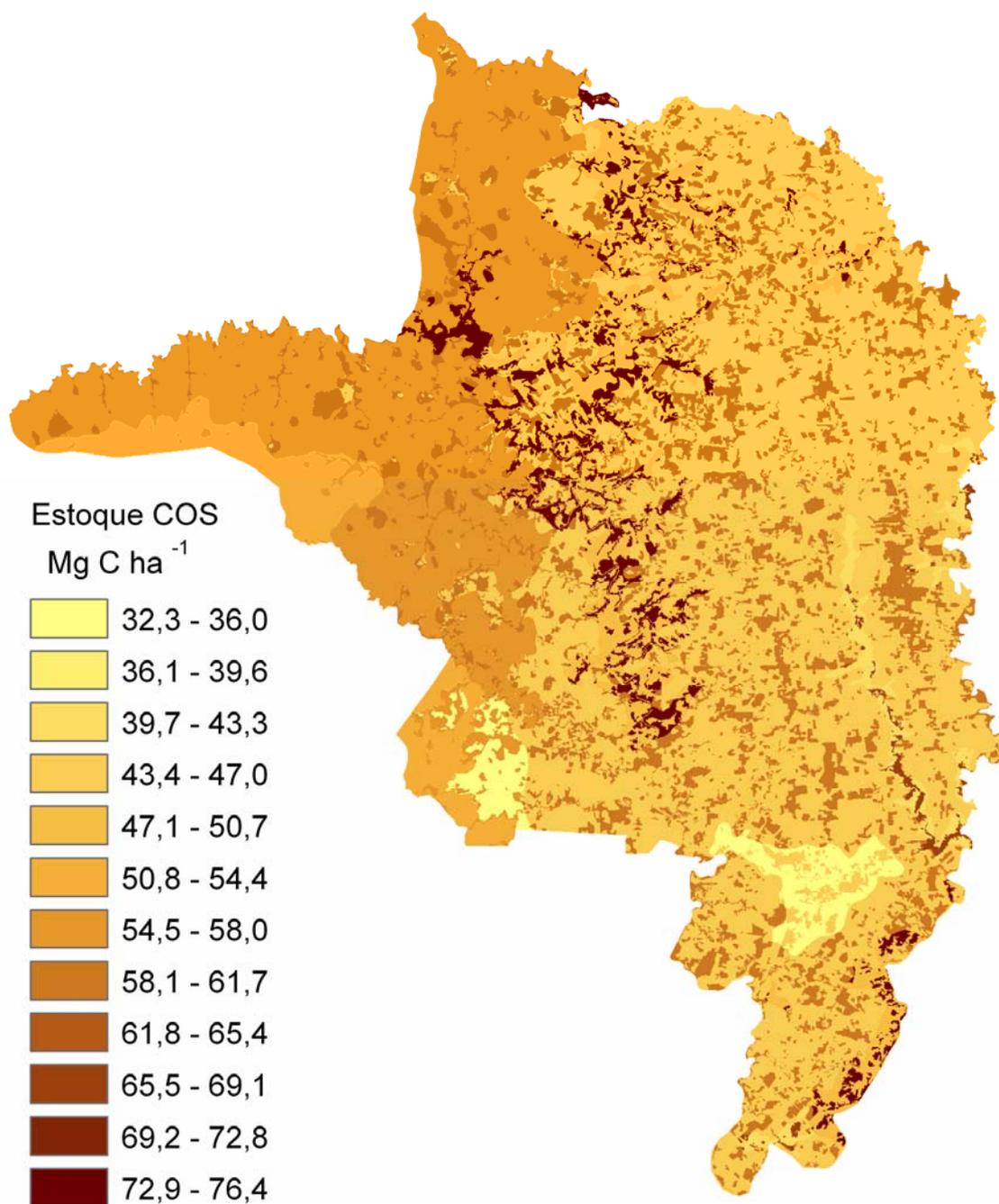


Figura 28. Distribuição dos estoques de COS em 1955 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

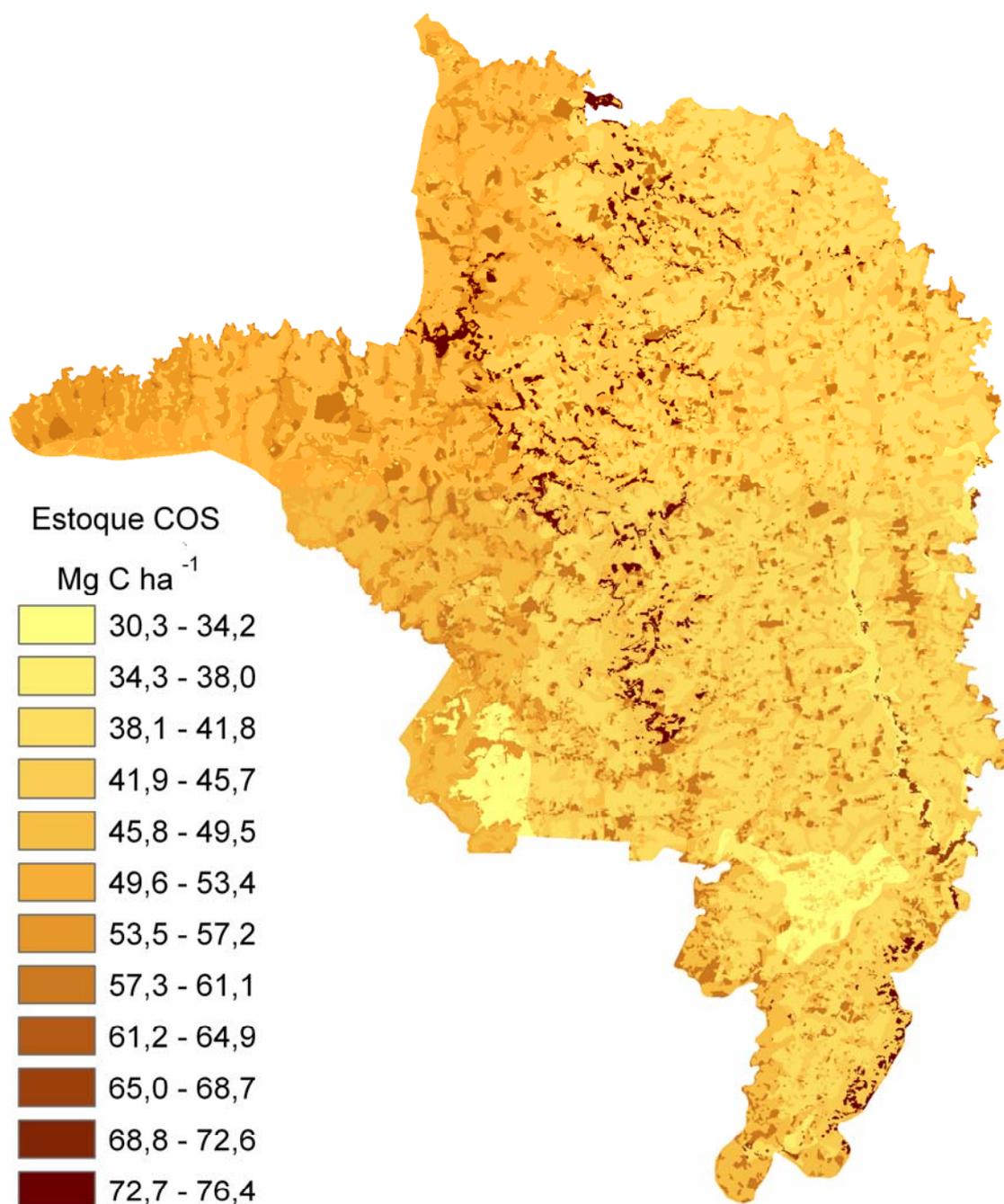


Figura 29. Distribuição dos estoques de COS em 1975 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

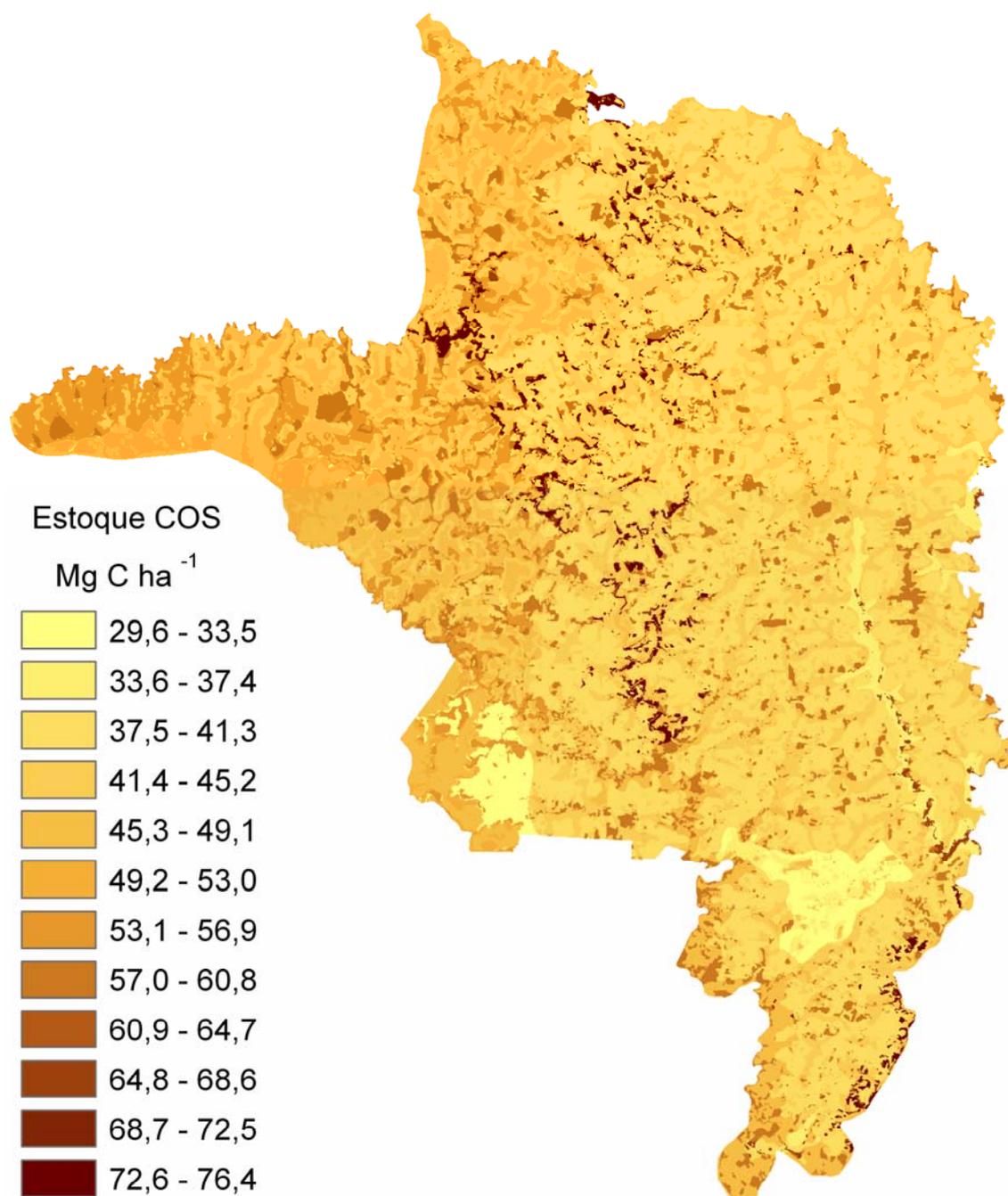


Figura 30. Distribuição dos estoques de COS em 1985 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

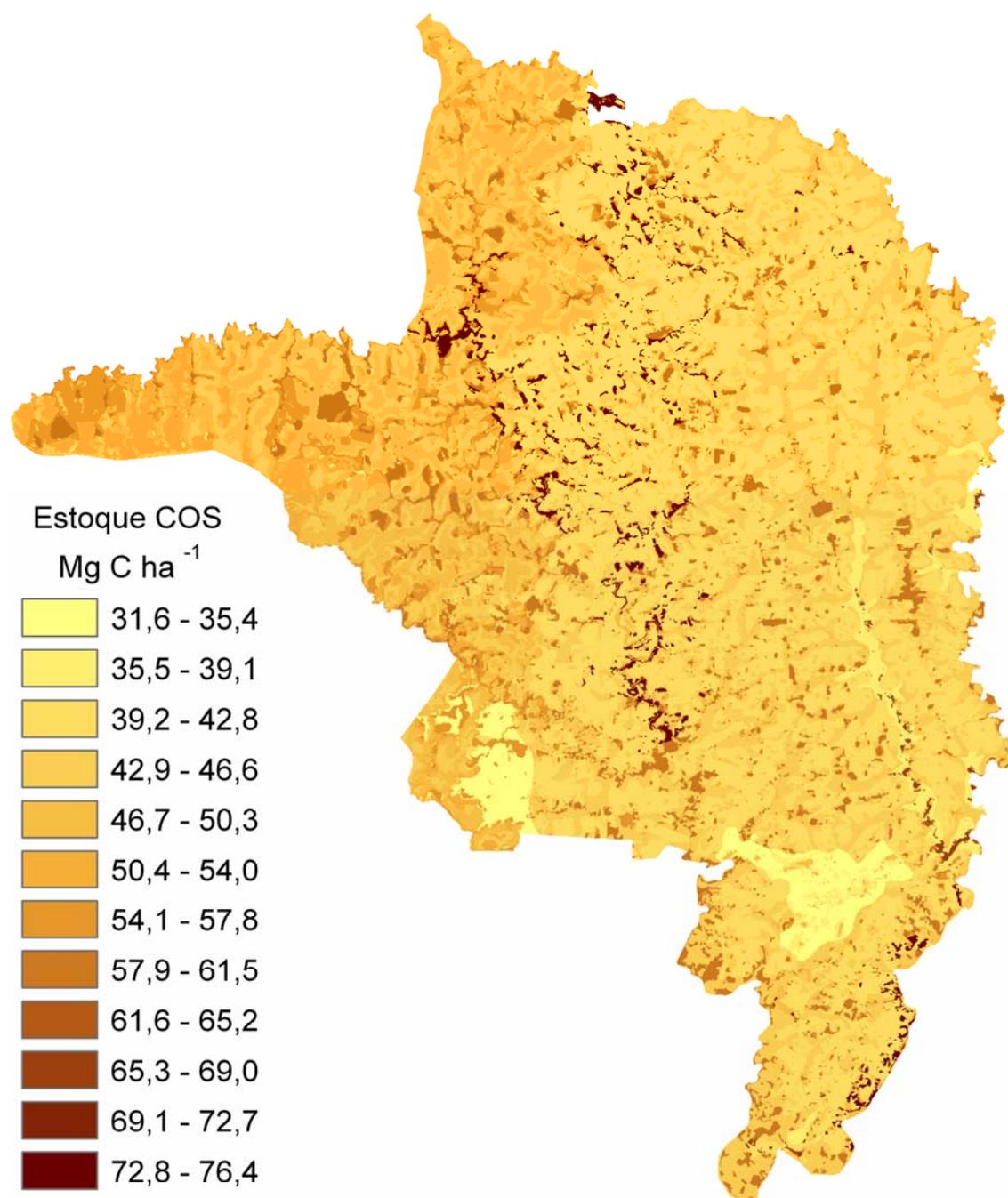


Figura 31. Distribuição dos estoques de COS em 1995 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

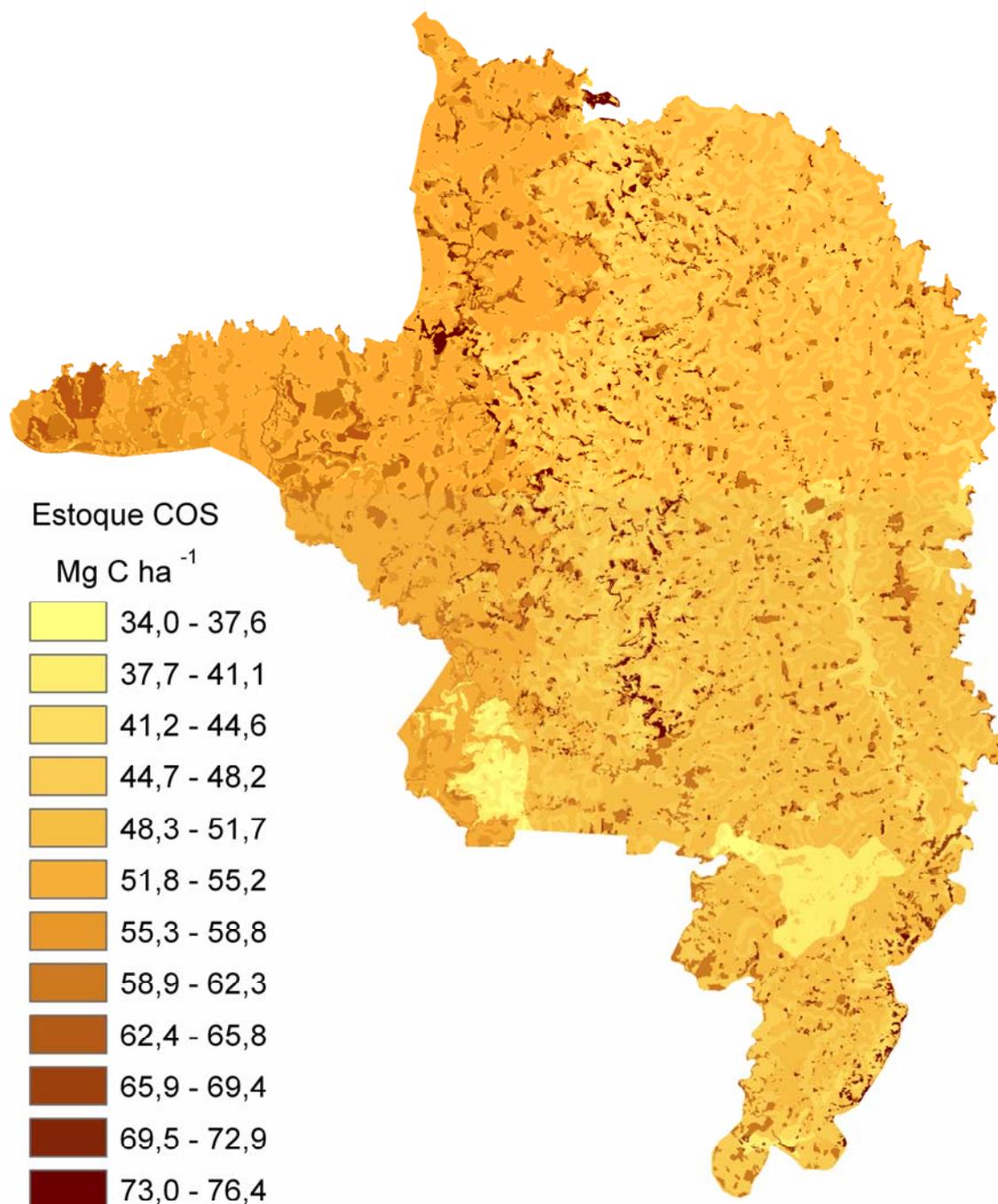


Figura 32. Distribuição dos estoques de COS em 2005 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

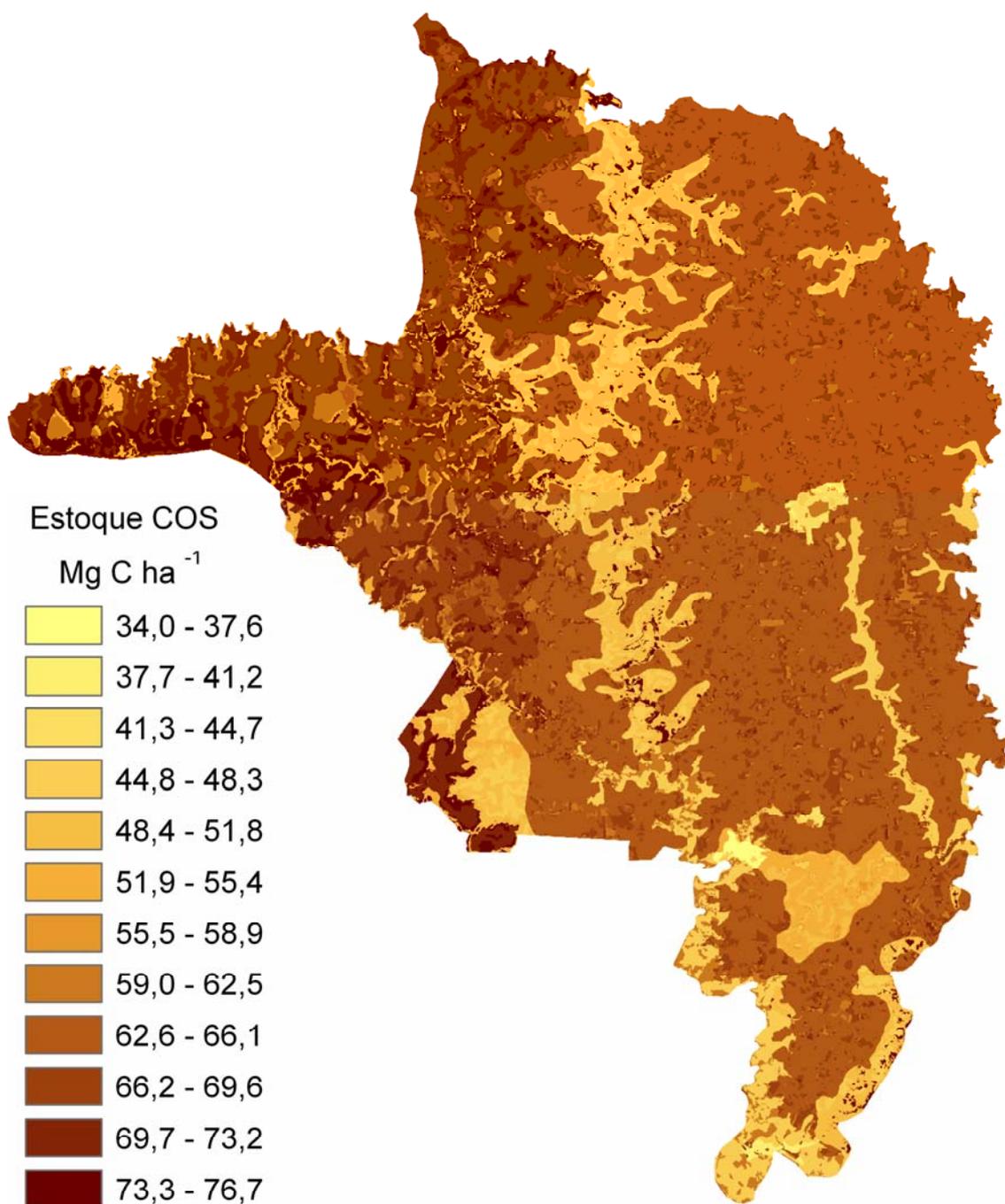


Figura 33. Distribuição dos estoques de COS em 2050 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

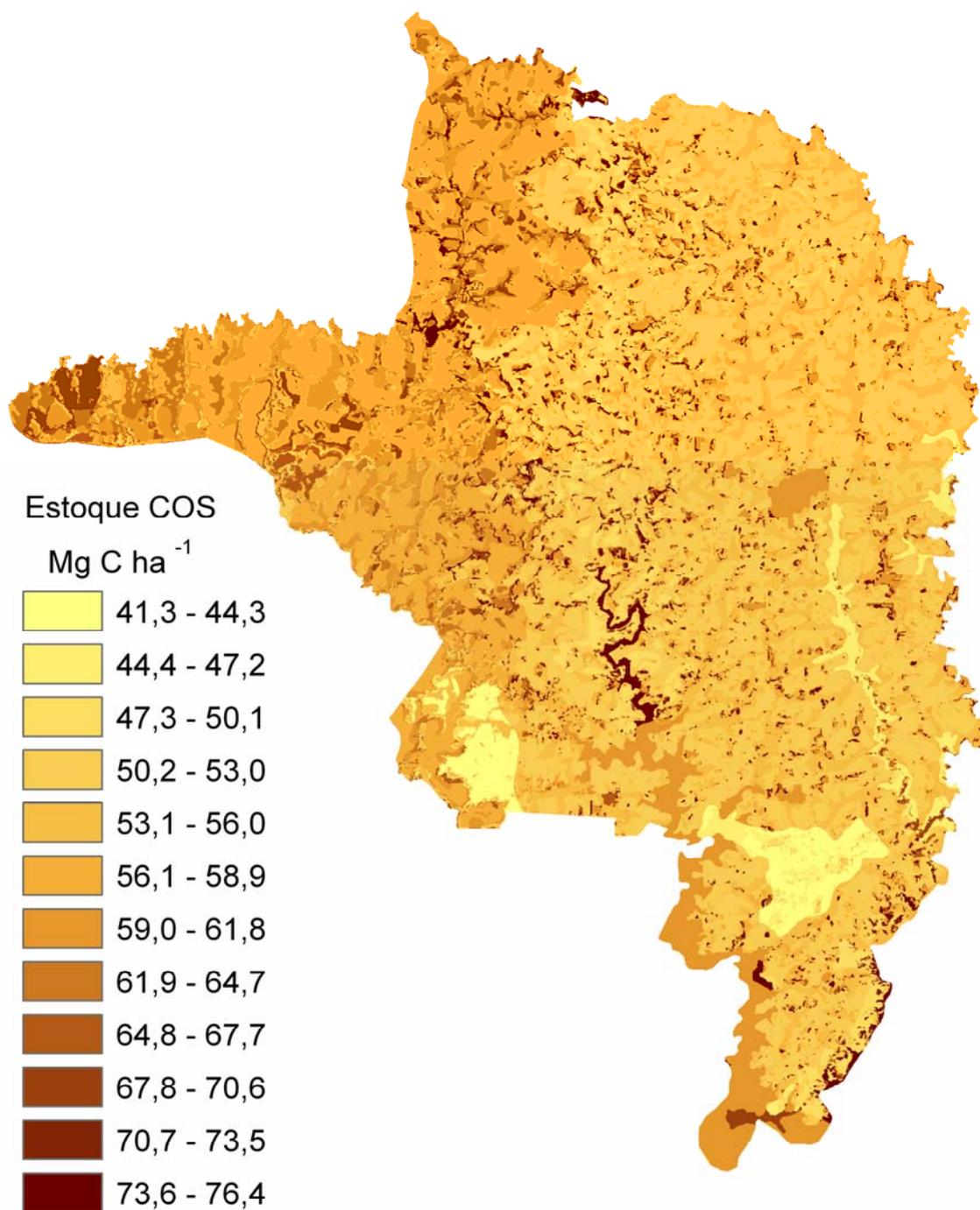


Figura 34. Distribuição dos estoques de COS em 2005 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original. Cenário “Melhorado” a partir de 1993.

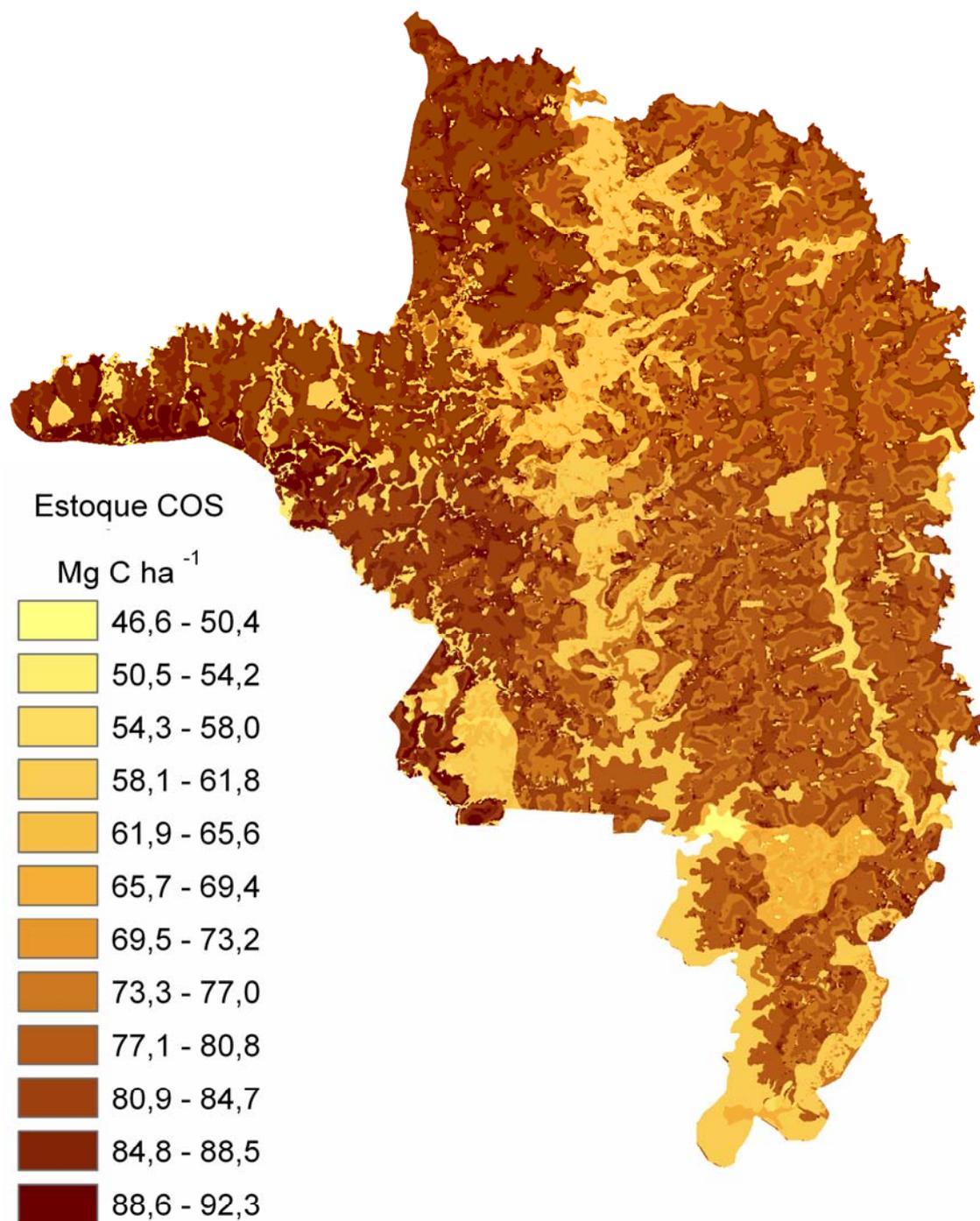


Figura 35. Distribuição dos estoques de COS em 2050 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original. Cenário “Melhorado” a partir de 1993.

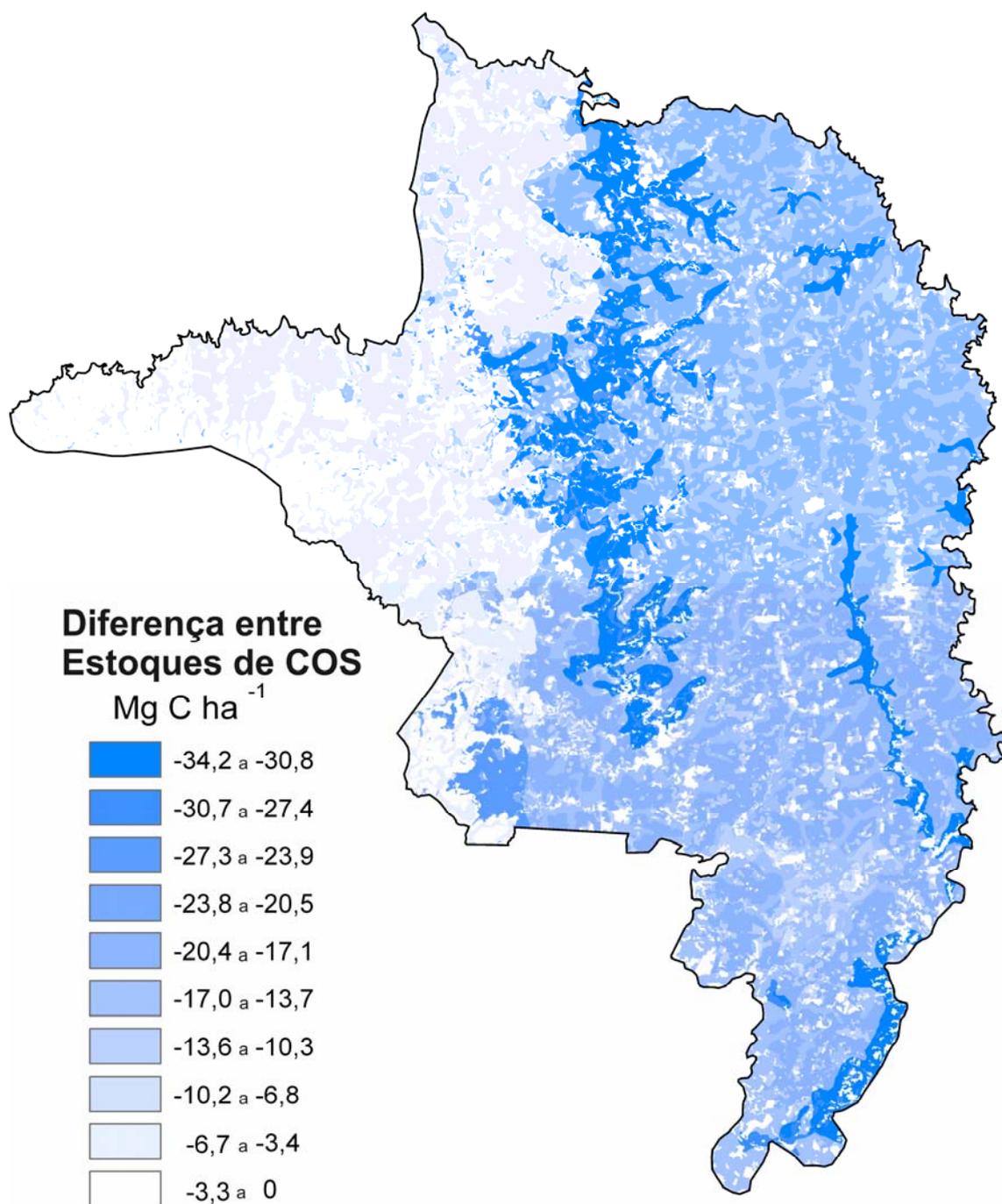


Figura 36. Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 1975 e 1900 (estoques originais) na camada de 0-20 cm na região de Ibirubá

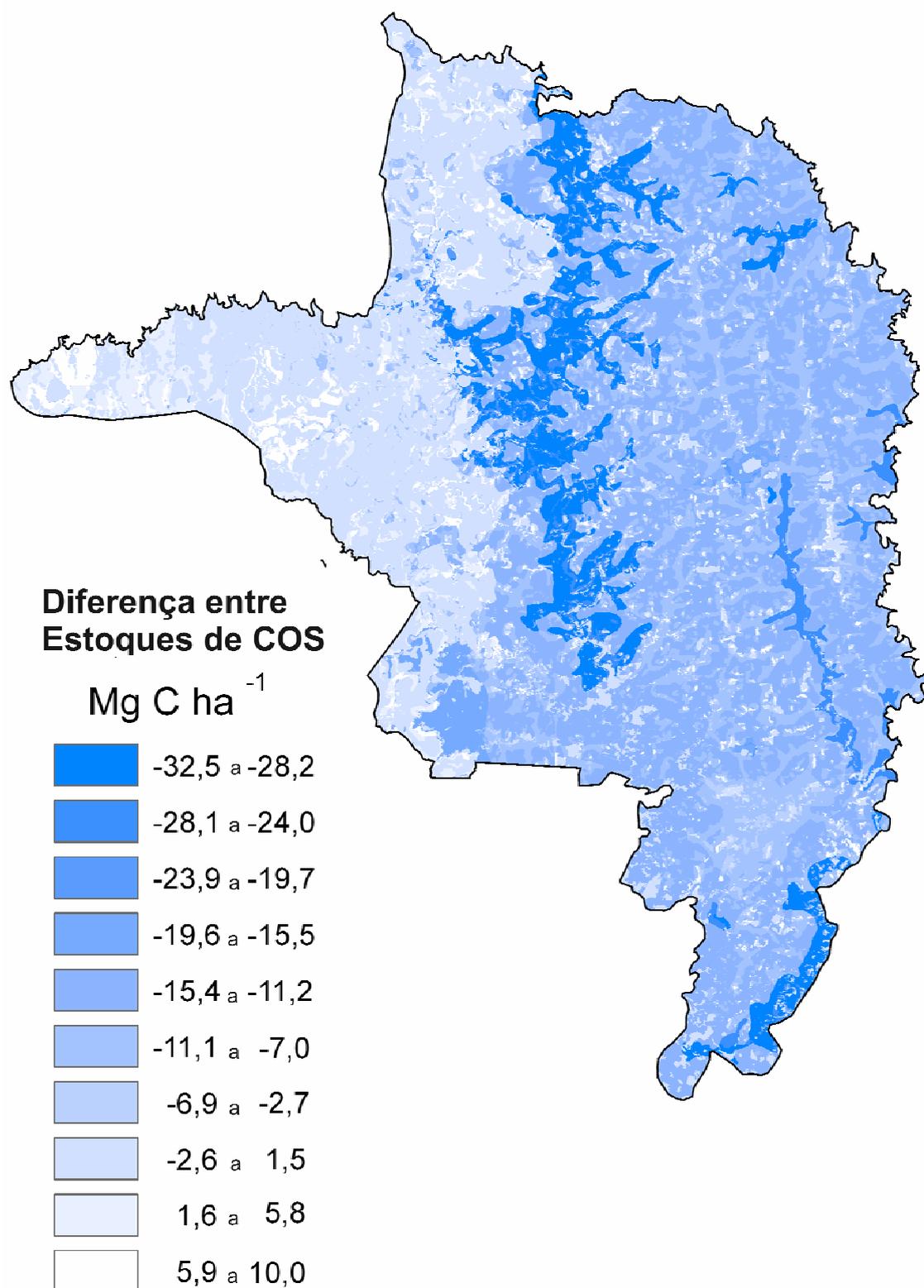


Figura 37. Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2005 e 1900 (estoques originais) na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

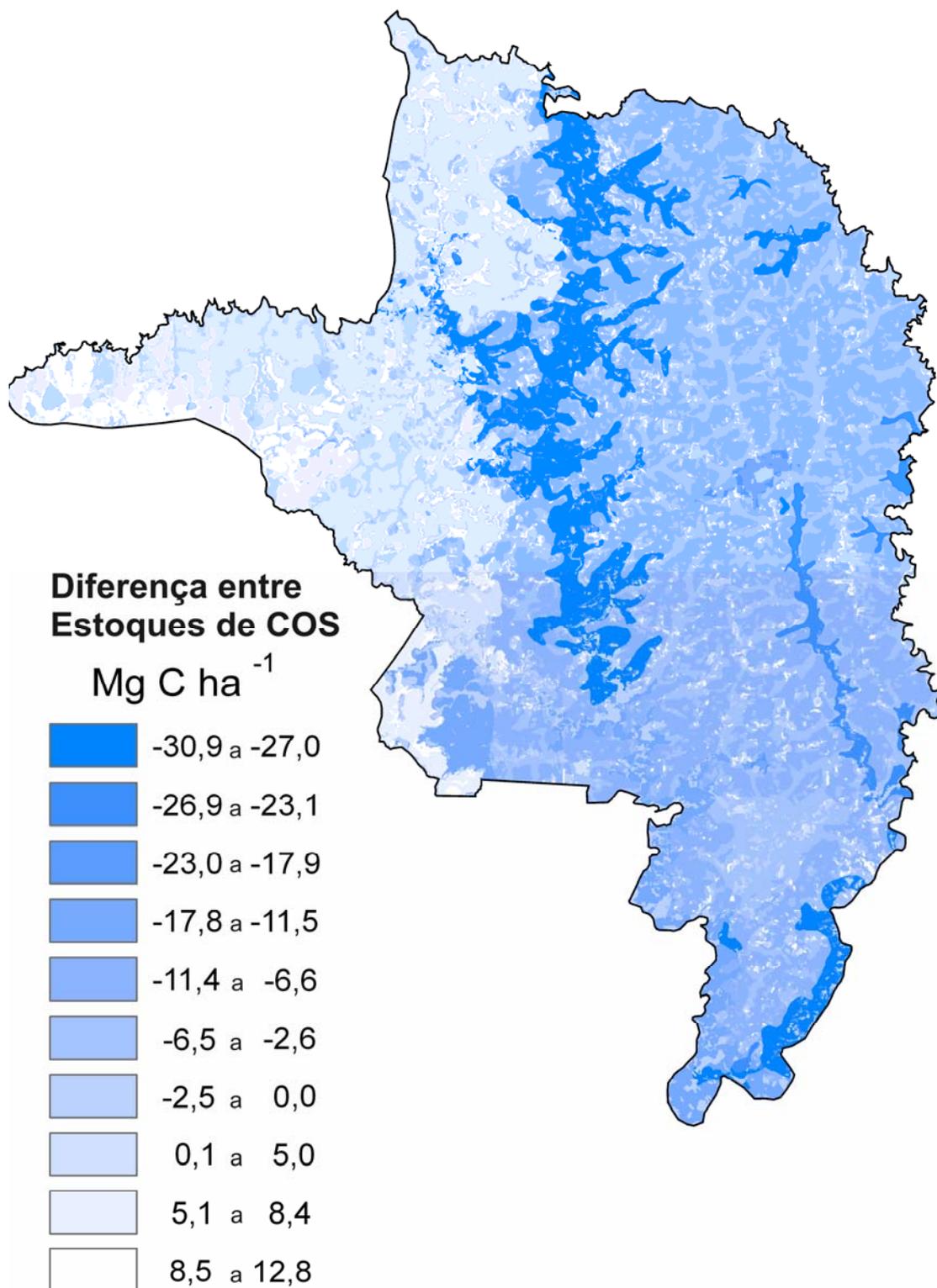


Figura 38. Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2015 e 1900 (estoques originais) na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

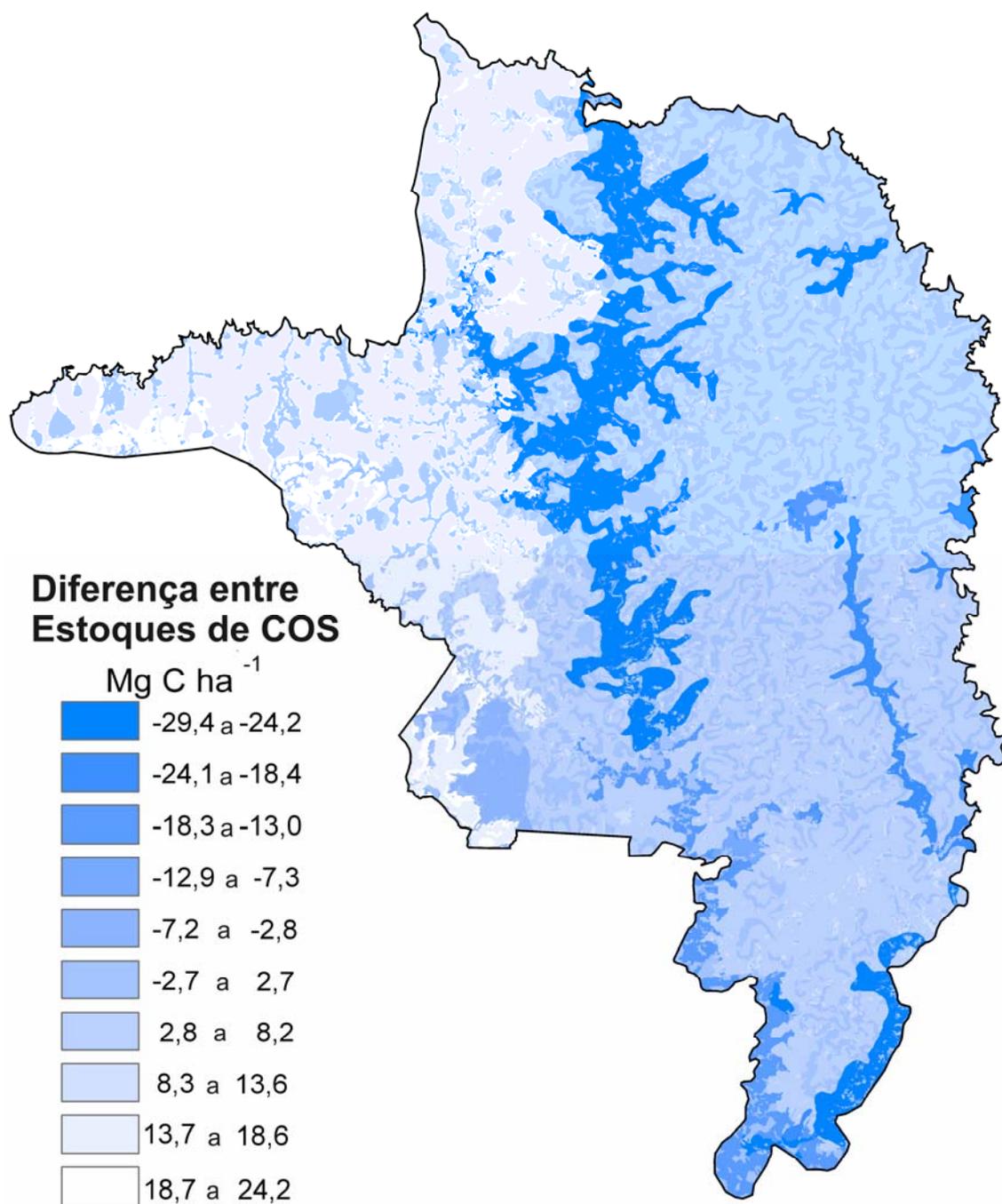


Figura 39. Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2050 e 1900 (estoques originais) na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

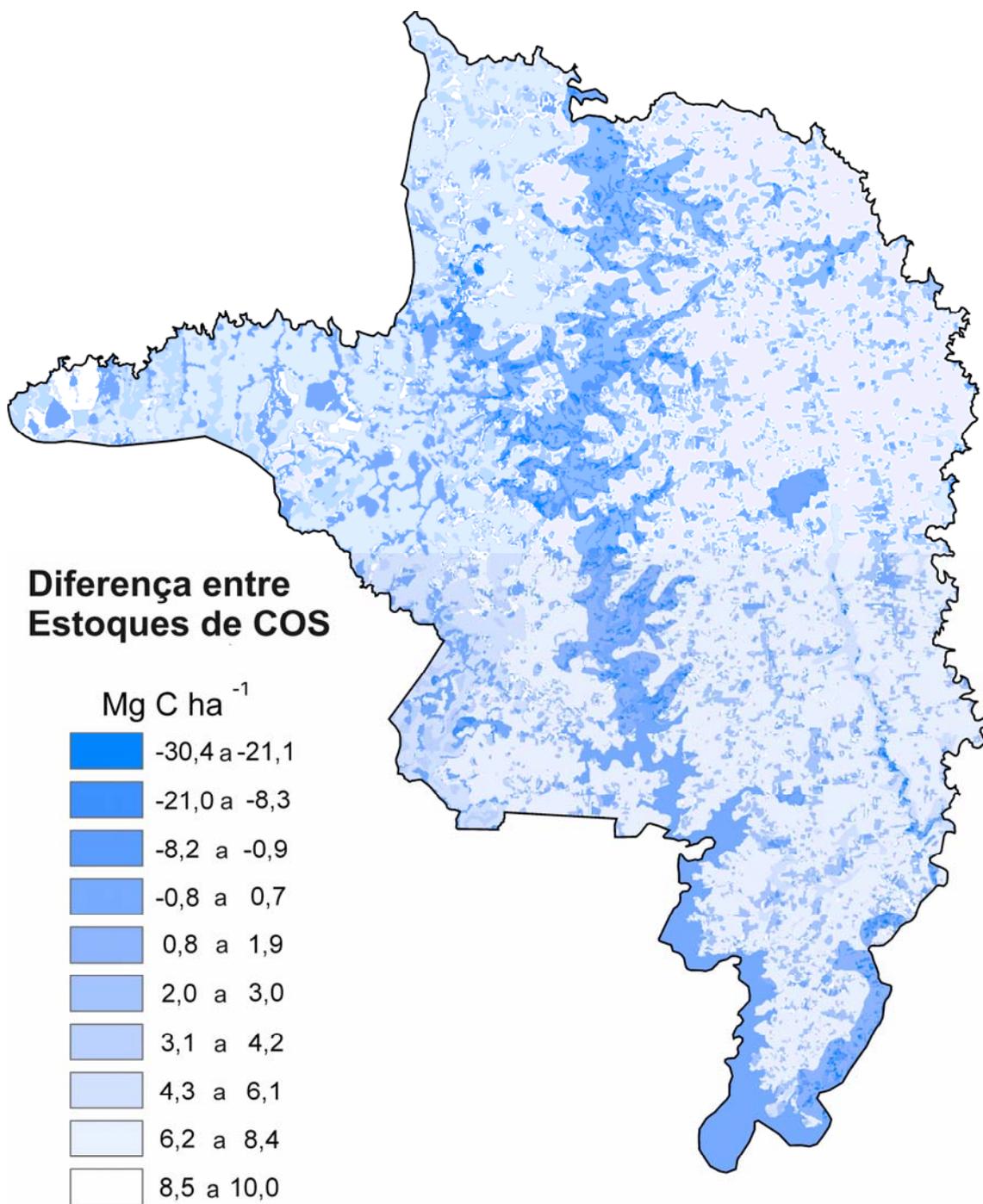


Figura 40. Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2005 e 1975 na região de Ibirubá. Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

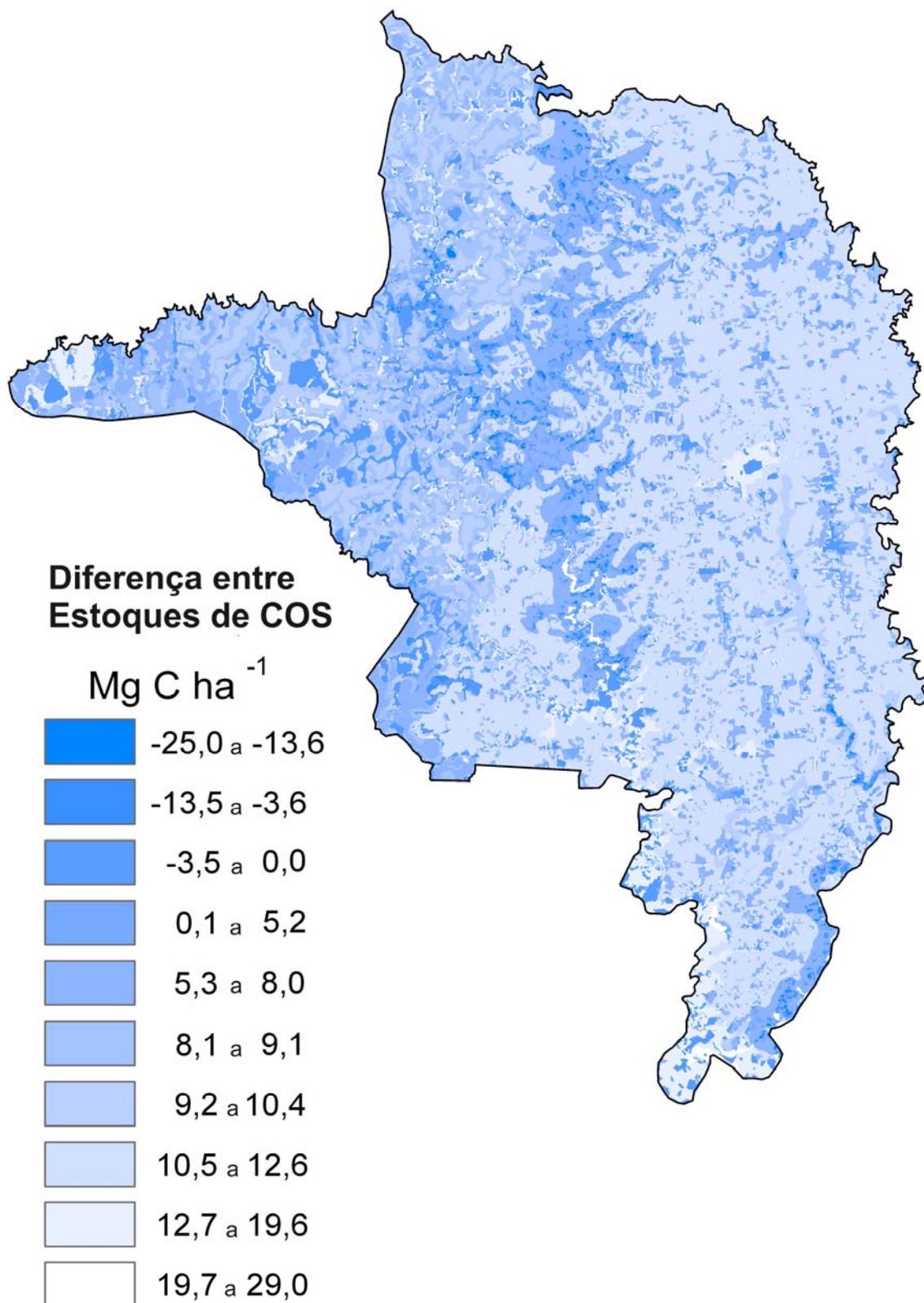


Figura 41. Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2005 e 1975 na região de Ibirubá, com cenário "Melhorado". Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

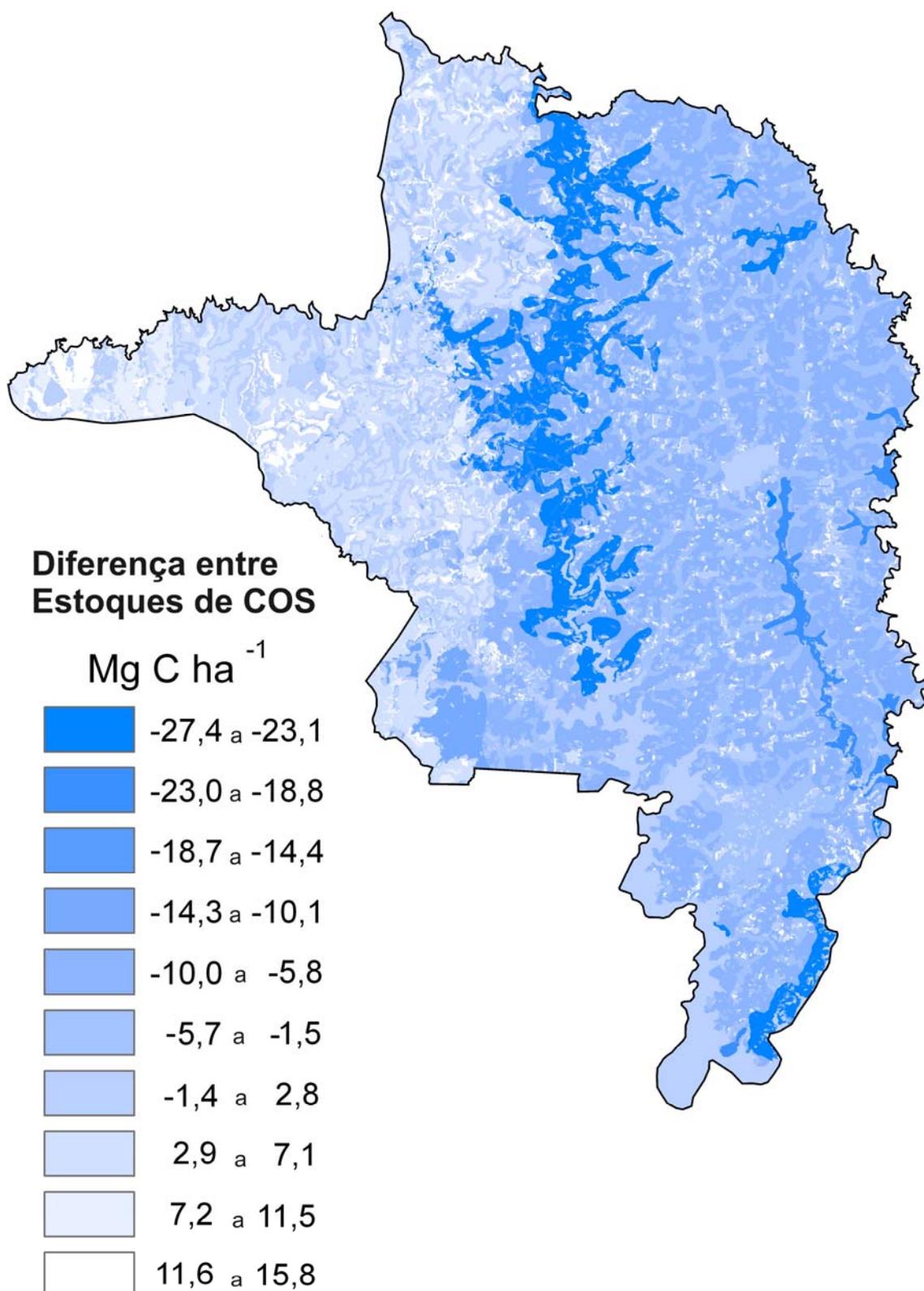


Figura 42. Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2005 e 1900 na região de Ibirubá, com cenário "Melhorado". Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

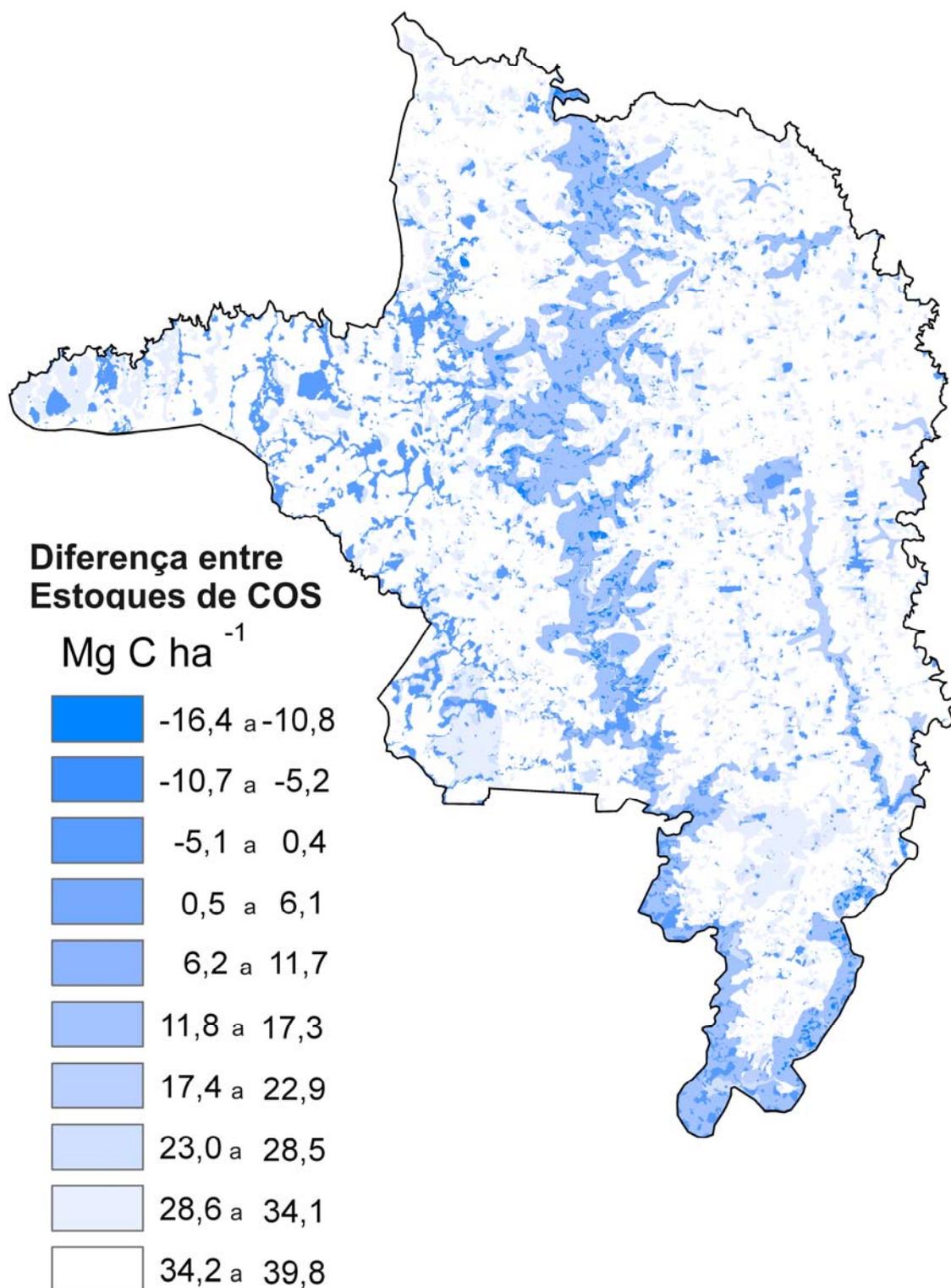


Figura 43. Distribuição espacial das diferenças entre estoques de COS em 2050 e 1975 na região de Ibirubá, com cenário "Melhorado". Lavouras em massa equivalente à camada de 0 a 20 cm da vegetação original.

6.5. Estoques totais regionais de COS

A criação de uma base de dados de estoques de COS espacialmente explícita tornou possível a agregação dos estoques por classe de solo, vegetação original e tempo de uso agrícola para cálculo dos estoques totais na região de Ibirubá (Tabelas 6 e 7). Em ambos os cenários simulados os estoques originais na camada de 0 a 20 cm decresceram de $5.043,1 \times 10^3$ Mg C (5,04 Tg C) para $4.254,3 \times 10^3$ Mg C (4,25 Tg C) em 1955 (perda de 15,6%) e seguiram em queda até $3.737,2 \times 10^3$ Mg C (3,74 Tg C) observados em 1985 (perda de 25,9% em relação ao original), no início do período com uso de sistemas conservacionistas (Preparo Reduzido). A partir da adoção do SPD foi evidenciada a recuperação dos estoques de COS na região, chegando em 2005 a $4.276,3 \times 10^3$ Mg C (4,27 Tg C) (ainda 15,2% inferior ao estoque original) no cenário “Atual” e a $4.654,7 \times 10^3$ Mg C (4,65 Tg C) (apenas 7,7% inferior ao estoque original) no cenário “Melhorado”. De acordo com os pressupostos deste estudo, os solos da região de Ibirubá poderiam armazenar um estoque total de $5.242,5 \times 10^3$ Mg C (5,24 Tg C) em 2050, em uma camada equivalente aos 20 cm de profundidade da vegetação original em 1900, 4% maior que o estoque original em 1900, no cenário de manejo com SPD similar ao que vem sendo praticado (cenário “Atual”) com pouca participação da cultura do milho na rotação. Uma melhoria no sistema de manejo atual, com maior frequência do milho, ou cultura com adição de biomassa equivalente, e incremento na fertilização nitrogenada, poderia ultrapassar esses estoques originais em 26,0%, chegando a $6.353,9 \times 10^3$ Mg C (6,35 Tg C), como simulado no cenário “Melhorado”.

É importante considerar que não foram simuladas algumas mudanças de uso do solo como o reflorestamento, a regeneração de vegetação nativa (pousio e sucessão ecológica) e a implantação de pastagens em áreas de lavoura. Mesmo que a ocorrência destas situações tenha sido pouco significativa neste estudo (apenas 14% da área total), o desenvolvimento de cenários que incorporem outros usos e manejos efetivamente existentes pode melhorar as estimativas de estoques totais.

Tabela 6. Estoques totais de COS e sua variação entre 1900 e 2050 considerando a massa equivalente de solo na camada de 0 a 20 cm sob vegetação nativa para o cenário “Atual” na região de Ibirubá.

Solo	Vegetação Original	1900	1955	1975	1985	1995	2005	2015	2050
		x 10 ³ Mg C							
LV text. média	mata	77,8	62,4	57,9	56,1	58,2	65,7	71,6	84,8
LV argiloso	mata	79,1	61,4	55,3	53,4	54,9	60,9	64,9	72,4
	campo	181,6	181,6	175,1	168,7	170,3	190,9	206,1	243,6
LV muito arg.	mata	2.979,3	2.425,2	2.238,7	2.147,7	2.220,6	2.515,0	2.720,2	3.150,3
	campo	900,5	900,5	827,3	794,2	803,5	905,4	974,9	1.131,0
Neos.Regolítico	mata	727,9	557,6	484,6	459,2	458,9	475,5	482,7	492,1
Neos. Flúvico	mata	96,9	65,7	59,4	57,7	59,1	62,9	65,4	68,2
Total		5.043,1	4.254,3	3.898,4	3.737,2	3.825,5	4.276,3	4.585,8	5.242,5
Diferença em relação a data anterior			-15,6%	-8,4%	-4,1%	2,4%	11,8%	7,2%	14,3%
Diferença em relação original (1900)			-15,6%	-22,7%	-25,9%	-24,1%	-15,2%	-9,1%	4,0%

Tabela 7. Estoques totais de COS e sua variação entre 1900 e 2050 considerando a massa equivalente de solo na camada de 0 a 20 cm sob vegetação nativa para o cenário “Melhorado” na região de Ibirubá.

Solo	Vegetação Original	1900	1955	1975	1985	1995	2005	2015	2050
x 10 ³ Mg C									
LV text. média	mata	77,8	62,4	57,9	56,1	60,7	73,6	84,2	86,4
LV argiloso	mata	79,1	61,4	55,3	53,4	55,7	60,9	73,3	72,4
	campo	181,6	181,6	175,1	168,7	173,3	202,6	229,5	289,6
LV muito arg.	mata	2.979,3	2.425,2	2.238,7	2.147,7	2.279,0	2.742,5	3.102,5	3.840,3
	campo	900,5	900,5	827,3	794,2	820,6	969,4	1.089,4	1.345,9
Neos.Regolítico	mata	727,9	557,6	484,6	459,2	471,6	528,6	560,8	599,3
Neos. Flúvico	mata	96,9	65,7	59,4	57,7	63,1	72,2	77,7	84,7
Total		5.043,1	4.254,3	3.898,4	3.737,2	3.924,1	4.654,7	5.217,4	6.353,9
Diferença em relação a data anterior			-15,6%	-8,4%	-4,1%	5,0%	18,6%	12,1%	21,8%
Diferença em relação original (1900)			-15,6%	-22,7%	-25,9%	-22,2%	-7,7%	3,4%	26,0%

Apesar das limitações e incertezas inerentes à abordagem utilizada neste estudo, a utilidade da extrapolação espacial dos resultados da modelagem de dinâmica do COS foi evidenciada nesta análise de âmbito regional. Certas situações não percebidas em uma observação pontual foram evidenciadas: a mudança de manejo de solos para um sistema que provocou grande acúmulo de COS (no caso o SPD) teve impacto no estoque total porque foi adotado em parte significativa da região. Não houve concomitantemente a ocorrência de outros usos e manejos do solo com efeito inverso em outras partes da região, que pudessem eventualmente contrabalançar o COS acumulado. No caso em estudo, a dominância da agricultura anual de grãos conduzida sob SPD na região de Ibirubá simplificou bastante a aplicação desta ferramenta e certamente não demonstrou todo seu potencial de utilização. Outras aplicações com cenários mais complexos em mosaicos diversificados de uso e manejo de solos, eventualmente tratados em escala maior (com maior detalhe), seriam mais propícias para ressaltar a aplicabilidade e propriedade desta abordagem no estudo da dinâmica do COS.

7. CONCLUSÕES

Este estudo utilizou uma abordagem articulada com ferramentas de amplo e pronto acesso por parte de universidades e instituições de pesquisa para análise da dinâmica do COS em escala regional. Muito embora persistam incertezas inerentes à amostragem de solo, à classificação de solos e de uso do solo, à modelagem do terreno e à própria dinâmica do COS, a integração de informações biofísicas e modelagem dinâmica possibilitou uma visão sinóptica da heterogeneidade regional dos estoques de COS e suas mudanças. A significativa redução dos estoques de COS a partir da implantação da agricultura em sistema de manejo convencional na região de Ibirubá foi evidenciada nas dimensões espacial e temporal, bem como a recuperação destes estoques após a introdução de manejos conservacionistas de solo.

Uma das principais vantagens desta abordagem é a capacidade de síntese na avaliação de cenários históricos e futuros de COS. A execução das simulações, sua espacialização e visualização em mapas e tabelas podem ser realizadas de forma relativamente rápida e consistente. A estruturação livre entre o modelo de simulação e Sistema de Informações Geográficas permite que, quando necessário, os avanços no conhecimento sobre dinâmica do COS e refinamentos na base de dados biofísicos (solos, vegetação e relevo) sejam prontamente incorporados e as estimativas de estoques de COS recalculadas.

Assim, esta metodologia constitui uma alternativa robusta para avaliação de alterações passadas e futuras nos estoques regionais de COS, pois permite a integração de fatores que influenciam o uso e manejo de solos – tendências econômicas, avanços tecnológicos, políticas públicas e até mesmo mudanças climáticas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLISON, F. E. **Soil organic matter and its role in crop production**. New York:Elsevier, 1973. 637p. (Developments in Soil Science, 3).
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.;BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular C e N no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n.1, p.189-197, 2001.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo sob Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, n.1, p.241-248, 2002.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B. C., VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.35, p.1599-1607, 2006.
- ARDÖ, J; OLSSON, L. Assessment of soil organic carbon in semi-arid Sudan using GIS and the CENTURY model. **Journal of Arid Environments**, Amsterdam, v.54, p.633–651, 2003.
- ARDÖ, J.; OLSSON, L. Soil carbon sequestration in traditional farming of Sudanese drylands. **Ecological Management**, New York, v.33, supl. 1, p.318-329, 2004.
- ARNOLD, J. G.; KING, K.W.; WILLIAMS, J. Erosion by Water, Hybrid Models. In: LAL, R. (Ed.) **Encyclopedia of Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 461-467.
- ARROUAYS, D.; BALESSENT, J.; GERMON, J.C.; JAYET, P.A.; SOUSSANA, J. F.; STENGEL, P. **Contribution à lutte contre l'effet de serre**. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France? Synthèse du rapport. Paris: Institut National de la Recherche Agronomique, 2002. 33p.
- AVÉ-LALLEMANT, R. **Viagem pela província do Rio Grande do Sul (1858)**. Belo Horizonte: Itatiaia,1980. 417p.

- BAKER, J. M.; OCHSNER, T. E.; VENTEREA, R. T.; GRIFFIS, T. J. Tillage and soil carbon sequestration - What do we really know? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.118, p.1-5, 2007.
- BALDOCK, J.A.; NELSON, P.N. Soil organic matter. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p.B25-B84.
- BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p. 215-230, 2000.
- BATTISTELA, V. **História de Tapera**. Não-Me-Toque: Santo Antônio, 1972. 233p.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240 f Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETTA, C. A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p.95-104, 2000.
- BAYER, C. Aumento do estoque de matéria orgânica em um cambissolo húmico catarinense sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.2, n.2, p.81-87, 2003.
- BAYER, C.; LOVATO, T.; DIECKOW, J. A; ZANATTA, J.; MIELNICZUK, J. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.91, p.217-226, 2006a.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATTO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.86, p.237-245, 2006b.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.888-896, 2003.
- BEHLING, H.; PILLAR, V. P.; BAUERMANN, S. G. Late Quaternary grassland (Campos), gallery forest, fire and climate dynamics, studied by pollen, charcoal and multivariate analysis of the São Francisco de Assis core in western Rio Grande do Sul (Southern Brazil). **Review of Palaeobotany and Palynology**, Amsterdam, v.133, p.235-248, 2005.
- BEUTLER, J. F.; BERTOL, I.; VEIGA, M.; WILDNER, L. P. Perdas de solo e água num Latossolo Vermelho aluminoférrico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.27, p.509-517, 2003.

- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Part 1. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1986. p.363-375. (Agronomy Monograph, 9).
- BLAISDELL, R.; CONANT, R.; DICK, W.; DOBERMANN, A.; IZAURRALDE, C.; RANSOM, M.; RICE, C.; ROBERTSON, P.; STUTH, J.; THOMPSON, M. **Recommended procedures for collecting, processing, and analyzing soil samples in CASMGS research slots**. Manhattan (Kansas):CASMGS-Consortium for Agricultural Soil Mitigation of Greenhouse Gases, 2003. 7p. (Working Group 4.1, Report).
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Philadelphia, v.23, n.6, p.481-504, 2004.
- BOCKSTALLER, C.; GIRARDIN, P. How to validate environmental indicators. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v.76, p.639-653, 2003.
- BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973.431 p. (Boletim, 30).
- BRASIL. **Folha topográfica 1:50.000 Fortaleza dos Valos**. Brasília: Ministério do Exército. Diretoria de Serviços Geográficos, 1980a (Folha SH22VA, MI-2932/4).
- BRASIL. **Folha topográfica 1:50.000 Ibirubá**. Brasília: Ministério do Exército. Diretoria de Serviços Geográficos, 1980b (Folha SH22VA, MI-2932/2).
- BRASIL. **Folha topográfica 1:50.000 XV de Novembro**. Brasília: Ministério do Exército. Diretoria de Serviços Geográficos, 1980c (Folha SH.22.VA, MI-2932/4).
- BRASIL. **Folha topográfica 1:50.000 Lagoão**. Brasília: Ministério do Exército. Diretoria de Serviços Geográficos, 1980d (Folha SH.22VA,MI-2932/4).
- BRICKLEMYER, R. S.; LAWRENCE, R. L.; MILLER, R. R. Documenting no-till and conventional till practices using Landsat ETM+ imagery and logistic regression. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.57, n.5, p.267-273, 2002.
- BRICKLEMYER, R. S.; LAWRENCE, R. L.; MILLER, R. R.; BATTOGTOKH, N. Predicting tillage practices and agricultural soil disturbance in north central Montana with Landsat imagery. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.114, p.210-216, 2006.
- BRUCE, J. P.; FROME, M.; HAITES, E.; JANZEN, H.; LAL, R.; PAUSTIAN, K. **Carbon sequestration in soils**. Carbon Sequestration in Soils Workshop. Calgary: Soil and Water Conservation Society, 1998. 38p.
- BURKE, I. C.; YONKER, C. M.; PARTON, W. J.; COLE, C. V.; FLACH, K., OJIMA, D. S. Texture, Climate, and Cultivation Effects on Soil Organic

- Matter Content in US Grassland Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p.800-805, 1989.
- BURKE, I.; SCHIMEL, D. S.; YONKER, C. M.; PARTON, W. J.; JOYCE, L. A., LAUENROTH, W. K. Regional modeling of grassland bio-geochemistry using GIS. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 4, n. 1, p.45-54, 1990.
- CASSOL, E. A. **Erosão do solo**. Influência do uso agrícola, do manejo e preparo do solo. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura: Instituto Pesquisas de Recursos Naturais Renováveis Ataliba Paz, 1984. 40p. (Publicação,15)
- CLARK, J.S. Why environmental scientists are becoming Bayesians? **Ecology Letters**, Oxford, v.8, p.2-14, 2005.
- CERRI, C. E. P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.; CERRI, C. C. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystem of the Amazon, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.67, p.1879-1887, 2003.
- CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CHAPLOT, V.; VICTORIA, R.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, Amsterdam, v.123, p.51-68, 2004.
- CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P.; PAUSTIAN, K.; BERLATO, M.A.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. **Global Change Biology**, Oxford, v.10, p.815–832, 2004.
- CHEN F.; KISSEL, D.E.; WEST, L.T.; ADKINS, W. Field-scale mapping of surface organic carbon using remotely sensed imagery. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.746–753, 2000.
- CINTRA, F.L.D; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.323-327, 1983.
- CONANT, R. T.; PAUSTIAN, K. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales. **Environmental Pollution**, Amsterdam, v.16, p.127-135, 2002.
- CONANT, R. T. ; SMITH, G. R.; PAUSTIAN, K. Spatial variability of soil carbon in forested and cultivated sites: implications for change detection. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.32, p.278-286, 2003.
- CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 29, p.777-788, 2005.

- DAVIDSON, E.A.; ACKERMAN, I.L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.20, p.161-193, 1993.
- DEBARBA, L. **Simulação pelo Modelo Century do Impacto da Agricultura sobre o Estoque de Carbono Orgânico em Solos do Planalto RioGrandense**. 2002. 172 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- DENARDIM, J. E. **Projeto METAS**. Parceria entre empresas públicas e privadas na pesquisa e difusão do sistema plantio direto. Passo Fundo: Projeto METAS, 1997. 28p. (Boletim Técnico, 1).
- DÍAZ-ZORITA, M.; BUSCHIAZZO, D.; PEINEMMANN, N. Soil organic matter and wheat productivity in the semiarid argentine Pampas. **Agronomy Journal**, Madison, v.91, p.276-279,1999.
- DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam,v.81, p.87-95, 2005.
- DONIGIAN JR, A. S.; PATHWARDHAN, A. S., JACKSON R.B. Modeling the impacts of agricultural management practices on soil carbon in the central U.S. In: LAL, R.; KIMBLE J. M.; LEVINE, E.; STEWART, J. W. B. (Eds). **Soil Management and Greenhouse Effect**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p.121-135.
- DORAN, J. W.;PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDIECK, D. F.; STEWART, B. F. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America,1994. p.1-20.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 529-538, 1995.
- ELLERT,B.H.; JANZEN,H.H.; McCONKEY, B.G. Measuring and comparing soil carbon storage. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.(Eds.) **Assessment Methods of Soil Carbon**. Boca Ratón: CRC Press, 2001. p.131-146.
- ELLIOT, E.T.; COLE, C.V. A perspective on agroecosystem science. **Ecology**, Ithaca, v. 70, n. 6, p.1597-1602,1989.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcView 3.2**. Redland, California, 1999.

- ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS 9**. Redland, California, 2003.
- EWEL, J. Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. **Annual Review of Ecological Systems**, Cambridge, v.17, p.245-71.1986.
- FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.69-116, 1997.
- FALLOON, P. D.; SMITH, P.; SMITH, J. U.; SZABÓ, J.; COLEMAN, K.; MARSHALL, S. Regional estimates of carbon sequestration potential: linking the Rothamsted Carbon Model to GIS databases. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.27, p.236–241,1998.
- FALLOON, P.; SMITH, P.; SZABÓ, J.; PÀSZTOR, L. Comparison of approaches for estimating carbon sequestration at the regional scale. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 18, p.164-174, 2002.
- FENG, H.; KLING, C. L.; GASSMAN, P. W. **Carbon sequestration, co-benefits, and conservation programs**. Ames: Center for Agricultural and Rural Development-Iowa State University, 2004.10p.(Working Paper, 04-WP 379)
- FERNANDES, F. F. **Uso do modelo Century no estudo da dinâmica do carbono orgânico em solos do Rio Grande do Sul**. 2002.172 f.Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- GASSMAN, P. W.; WILLIAMS, J. R.; BENSON, V.; IZAURRALDE, R. C.; HAUCK, L. M.; JONES, A. J.; ATWOOD, J. D.; KINIRY, J. R.; FLOWERS, J. D. **Historical development and applications of the EPIC and APEX models**. Ames: Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University, 2005. 43 p. (Working Paper, 397).
- GCTE-SOMNET. Global Change and Terrestrial Ecosystems Soil Organic Matter Network. **The official GCTE Soil Organic Matter Network Database**. Disponível: em <<http://safron.rothamsted.bbsrc.ac.uk/cgi-bin/somnet-models>>. Acesso em: 2 jan. 2007.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis. In: KLUTE, A (Ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and chemical methods. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1986. p. 383-411. (Agronomy Monograph, 9)
- GESSLER, P. E.; CHADWICK, O. A.; CHAMRAN, F.; ALTHOUSE, L.; HOLMES, K. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison,v.64, p.2046–2056, 2000
- GIFFORD, R. M.; RODERICK, M. L. Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression? **Global Change Biology**, Oxford, v.9, p.1507-1514, 2003.

- GILMANOV, T.; PARTON, W. J.; OJIMA, D. Testing the 'CENTURY' ecosystem level model on data sets from eight grassland sites in the former USSR representing a wide climatic / soil gradient. **Environmental Modelling**, Amsterdam, v.96, p.91-210, 1997.
- GOMES, A.M. **Fundação e evolução das estâncias serranas**. Cruz Alta: Liderança, 1966. 332 p.
- GREENLAND, D. J. Land use and soil carbon in different agroecological zones. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; LEVINE, E. **Soil management and Greenhouse Effect**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 9-24.
- GREENLAND, D. J.; WILD, A.; ADAMS, D. Organic matter dynamics in soils of the tropics: from myth to complex reality. In: LAL, R. (Ed.) **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 1992. p.17-33.
- GREGORICH, E. J.; GREER, K. J.; ANDERSON, D. W.; LIANG, B. C. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.47, p.291-302, 1998.
- GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v.8, p.345-360, 2002.
- HAMBLIN, W. K.; CHRISTIANSEN, E. H. **Earth's Dynamic System**. 8th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. 740p.
- HARDEN, J. W. ; SHARPE, J. M.; PARTON, W. J.; OJIMA, D. S.; FRIES, T. L.; HUNTINGTON, T. G.; DABNEY, S. M. Dynamic replacement and loss of soil carbon on eroding cropland. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v.13, n.4, p.885-901, 1999.
- HASSINK, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.191, p.77-87, 1991.
- IBIRUBÁ. Prefeitura Municipal. **Estudo de Situação**: Município de Ibirubá. Ibirubá, 1965. 57p. (Mimeografado).
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**: Geologia, geomorfologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1986. [CD-ROM]. (Levantamento de Recursos Naturais, 33).
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário de 1995-1996**. Rio de Janeiro, 1997.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Malha municipal digital do Brasil 2001**. (Projeção Policônica). Brasília, 2001. Volume 2. (CD-ROM).
- IPCC. Intergovernmental Panel On Climate Change. **Climate change: The scientific basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881p.

- IZAURRALDE, R.C.; HAUGEN-KOZYRA, K.H.; JANS, D.C.; MCGILL, W.B.; GRANT, R.F.; HILEY, J.C. Soil C dynamics: Measurement, simulation and site-to-region scale-up. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M. (Eds.) **Assessment methods of soil carbon**. Boca Ratón: CRC Press, 2001. p. 553-575.
- JACINTHE, P. A.; LAL, R.; KIMBLE, J. M. Assessing water erosion impacts on soil carbon pools and fluxes. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M. (Eds.) **Assessment Methods of Soil Carbon**. Boca Ratón: CRC Press, 2001. p.131-146.
- JANDL, R.; LINDNER, M.; VESTERDAL, L.; BAUWENS, B.; BARITZ, R.; HAGEDORN, F.; JOHNSON, D. W.; MINKKINEN, K.; BYRNE, K. A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? **Geoderma**, Amsterdam, v.137, p.253-268, 2007.
- JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems - A soil science perspective. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.104, p.399-417, 2004.
- JASTROW, J.D.; MILLER, R.M. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. A.(Eds.) **Soil processes and carbon cycle**. Boca Ratón: Lewis, 1998. p.207-224.
- JENNESSENT. **Topographic Position Index extension for ArcView 3.x**. Disponível em <<http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>>. Acesso em: 12 dez. 2006.
- JENKINSON, D. S.; RAYNER, J. H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamstead classical experiments. **Soil Science**, Hagerstown, v.123, p.298-305, 1977.
- JENNY, H. **Factors of soil formation**. A system of quantitative pedology. New York:Dover,1994. 281p. (Reimpressão do original de 1941).
- JOBÁGGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, Washington, v.10, p.423-436, 2000.
- JØRGENSEN, S.E.; BANDOROCHIO, G. **Fundamentals of ecological modelling**. 3rd ed. Elsevier: Amsterdam, 2001. (Developments in Environmental Modelling, 21).
- KAHN, H.; WIENER, A. J. **The Year 2000**. A framework for speculation on the next thirty-three years. New York: Macmillan, 1967. p.262-264.
- KERN, J.; JOHNSON, M. G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, p.200-210, 1993.
- KRULL, E.; BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Importance of mechanisms and processes of stabilization of soil organic matter for modelling carbon

turnover. **Functional Plant Ecology**, Collingwood, v.30, p.227-232, 2003.

- KLAMT, E. **Morfologia, gênese e classificação de alguns solos do município de Ibirubá e regiões onde ocorrem**. 1969. 94f. Dissertação(Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1969.
- LAL, R.; KIMBLE J. M.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. World soils as a source or sink for radiatively-active soils. In: LAL, R.; KIMBLE J. M.; LEVINE, E.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p.1-7.
- LAL, R. Soil erosion and carbon dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.81, p.137-142, 2003.
- LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v.12, p.31-22, 2004.
- LEBLON, B.; GALLANT, F.; BONN, F.; PESANT, A. Corn residue assessment from optical and thermal infrared ground-based measurements. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.22, p.198-208, 1996.
- LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; MACHADO, P. L. O. A; FERNANDES FILHO, E. I.; NEVES, J. C. L. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p. 283–295, 2004.
- LEITE, L.F.C; MENDONÇA, E.S.; MACHADO, P.L.O. Simulação pelo modelo Century da dinâmica da matéria orgânica de um Argissolo sob adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.28, p.347-358, 2004.
- LEMOS, R. C.; ABRÃO, P. U. R.; AZOLIM, M. A. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Primeira Etapa: Planalto Riograndense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.2, p.71-209, 1967.
- LETTENS, S.; ORSHOVEN, J. V.; WESEMAEL, B. V.; VOS, B.; MUYS, B. Stocks and fluxes of soil organic carbon for landscape units in Belgium derived from heterogeneous data sets for 1990 and 2000. **Geoderma**, Amsterdam, v.127, p.11-23., 2004.
- LOPES, F. **Utilização do modelo century para avaliar a dinâmica do carbono do solo em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2006.143f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. 2001.133f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência

do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

- LOVELL, S. T.; SULLIVAN, W. C. Environmental benefits of conservation buffers in the United States: Evidence, promise, and open questions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.112, p. 249-260, 2006.
- LONGLEY, P.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic information systems and science**. New York: John Wiley & Sons, 2001. 472p.
- MACHADO, J.A. **Efeito do sistema convencional de cultivo na capacidade de infiltração de água no solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1976. 135f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1976.
- MANIES, K. L.; HARDEN, J W.; KRAMER, L.; PARTON, W. J. **Parametrizing Century to model cultivated and noncultivated sites in the loess region of western Iowa**. Menlo Park: U.S. Geologic Survey, 2000. 29p. (Open File Report, 00-508).
- MANIES, K. L.; HARDEN, J W; KRAMER, L.; PARTON, W. J. Carbon dynamics within agricultural and native sites in the loess region of western Iowa. **Global Change Biology**, Oxford, v.7, p. 545-555, 2001.
- MANLAY, R.; FELLER. C.; SWIFT, M. J. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.119, p.217-233, 2007.
- MARCHIORI, J. N. C. **Fitogeografia do Rio Grande do Sul**. Enfoque Histórico e Sistemas de Classificação. Porto Alegre: EST Edições, 2002. 118p.
- MCCARTY, G. W.; RITCHIE, J. C. Impact of soil movement on carbon sequestration in agricultural ecosystems. **Environmental Pollution**, Amsterdam, v.116, p.423-430, 2002.
- MCCONKEY, B.; LINDWALL, W. **Measuring soil carbon stocks. A system for quantifying and verifying change in soil carbon stocks due to changes in management practices on agricultural land**. Ottawa: Agriculture & Agri-Food Canada, June 1999. 5f. Folheto.
- MCKEOWN, R.; OJIMA, D. S.; KITTEL, T. G. F.; SCHIMEL, D. S.; PARTON, W. J.; FISHER, H.; PAINTER, T. Ecosystem modeling of spatially explicit land surface changes for climate and global change analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE/WORKSHOP ON INTEGRATING GIS AND ENVIRONMENTAL MODELING, 3., Santa Fe (EUA), 1996. **Anais: Integrating GIS and Models**. Santa Barbara (EUA): National Center for Geographic Information and Analysis, 1996. (CD-ROM).

- MELILLO, J.M.; BORCHERS, J.; CHANEY, H. FISHER; FOX, S.; HAXELTINE, A.; JANETOS, A.; D.W. KICKLIGHTER, T.G.F. KITTEL, A.D. MCGUIRE; MCKEOWN, R.; NEILSON, R.; NEMANI, R.; OJIMA, D.S.; PAINTER, T.; PAN, Y.; PARTON, W.J.; PIERCE, L.; PITELKA, L.; PRENTICE, C.; RIZZO, B.; ROSENBLOOM, N.A.; RUNNING, S.; SCHIMEL, D.S.; SITCH, S.; SMITH, T.; WOODWARD, I. Vegetation-ecosystem modeling and analysis project: comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 9, p.407-437, 1995.
- METHEREL, A. K.; HARDING, L. A.; COLE, C. V.; PARTON, W. J. **Century soil organic matter model - Agroecosystem version 4**. Fort Collins: Natural Resources Ecology Laboratory. Colorado State University, 1993. 133p. (Great Plains Research System Technical Report, 4).
- MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F. F., DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. **Tópicos de Ciência do Solo**, Viçosa, v.3. p.209-248, 2003.
- MILNE, E.; PAUSTIAN, K.; WILLIAMS, S.A.; KILLIAN, K.; SWAN, A.; SESSAY, M.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; KAMONI, P.; GICHERU, P.; WOKABI, S.; BHATTACHARYYA, T.; PAL, D.K.; GAJBHIYE, K.S.; AL-ADAMAR, R.; SHABBAZ, M.; RAWAJFIH, Z.; KHRESAT, S.; POWLSON, D.; COLEMAN, K.; BATJES, N.H.; BERNOUX, M.; FELLER, C.; FALLOON, P.; GISHER, G.; TUBIELLO, F. **Assessment of soil organic carbon stocks and change at national scale**. Wageningen: Global Environmental Facility: United Nations Environment Program: University of Reading, 2006. 171p. (Technical Report GEF Project GFL-2740-02-4381).
- MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C., BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil, **Geoderma**, Amsterdam, v.70, p.63-81, 1996.
- MULLA, D. J.; McBRATNEY, A.B. Soil spatial variability. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p.A321-349.
- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSON, C.T.; SUMNER, M.E. (Eds). **Methods of soil analysis**. part 3. Chemical Methods. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.961-1110. (Book Series, 5)
- NOBLE, I.; APPS, M.; HOUGHTON, R.; LASHOF, D.; MAKUNDI, W.; MURDIYARSO, D.; MURRAY, B.; SOMBROEK, W.; VALENTINI. Implications of different definitions and generic issues. In: WATSON, R.T.; NOBLE, I.R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N.H.; VERADO, D.J.; DOKKEN, D.J. **Land use, land-use change, and forestry**. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2000. p. 54-126

- NYE P. H.; GREENLAND, D. J. Changes in the soil after clearing tropical forest. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.21, n.1, p.101-112, 1964.
- NREL. Natural Resource Ecology Laboratory. **Century 4**. Disponível em: <<http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/>>. Acesso em: 15 jan. 2007.
- NORGAARD, A. **Spatial modelling of organic carbon by linking Century and GIS**. Copenhagen (Dinamarca): Instituto de Geografia. Universidade de Copenhagen, 2004. 170f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geografia, Universidade de Copenhagen, Copenhagen, 2004.
- OLIVEIRA, E. **Uso do modelo Century no estudo da dinâmica do nitrogênio em um argissolo do Rio Grande do Sul**. 2005.129f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ORTIZ, M. J.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. C. Classification of croplands through integration of remote sensing, GIS, and historical database. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v.18, p.95-105, 1997.
- PARTON, W. J.; SCHIMEL, D. S.; COLE, C. V.; OJIMA, D. S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.1173-1179, 1987.
- PAUSTIAN, K. Modelling soil organic matter dynamics. Global challenges. In: REES, R. M.; BALL B. C.; CAMPBELL C. D.; WATSON C. A. (Eds.) **Sustainable management of soil organic matter**. Oxford: CABI Publishing, 2001. p. 43-53.
- PAUSTIAN, K.; ROBERTSON, P.; ELLIOT, E. T. Management impacts on carbon storage and gas fluxes (CO₂, CH₄) in mid-latitude cropland. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A.(Eds.) **Soil management and greenhouse effect**. Boca Ratón: Lewis, 1995. p.69-83.
- PENNOCK, D. J.; VAN KESSEL, C. Effect of agriculture and of clear-cut forest harvest on landscape-scale soil organic carbon storage in Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 77, p. 211-218, 1995.
- PENNOCK, D. J.; FRICK, A.H. The role of field studies in landscape-scale applications of process models: an example of soil redistribution and soil organic carbon modeling using CENTURY. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 58, p.183-191, 2001.
- PHILLIPS, S. H.; YOUNG Jr, H. M. **No-tillage farming**. Milwaukee: Reiman Associates, 1973. 224 p.
- PILLAR, V. D.; QUADROS, F. L. F. Grassland-forest boundaries in Southern Brazil. **Coenoses**, Gorizia, v. 12, n. 2-3, p.119-126, 1997.

- POLYAKOV, P.; LAL, R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. **Ecosystem International**, Amsterdam, v.30, p.547-556, 2004.
- POST, W. M.; EMANUEL, W. R.; ZINKE, P. J.; STANGENBERGER, A. Soil carbon pools and world life zones. **Nature**, London, v. 298, p.156-158, 1982.
- POST, W. M.; KWON, K. C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. **Global Change Biology**, Oxford, v.6, p.317-328, 2000.
- PÖTTER, R. O.; HOCHMÜLLER, D. P. **Levantamento detalhado da área piloto para conservação de solos no município de Ibirubá (RS)**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1980. (Boletim Técnico, 68).
- PÖTTKER, D. **Efeitos do tipo de solo, tempo de cultivo e da calagem sobre a mineralização da matéria orgânica em solos do Rio Grande do Sul**. 1977. 85f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.
- RAMBO, B. **A fisionomia do Rio Grande do Sul**. Ensaio de monografia natural. 3ª ed. São Leopoldo: UNISINOS, 1994. 473p.
- REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.43, p.31-167, 1997.
- RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 3rd ed. Berlin: Springer, 1999. 362p.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria da Agricultura. **Mapa de vegetação potencial do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1983.
- ROSE, J. Erosion by water, modeling. In: LAL, R. (Ed). **Encyclopedia of soil science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p.468-471.
- ROUSH, M. L. Geographic Information Systems. In: BIRD, E. A; BULTENA, G. L.; GARDNER, J. (Eds.) **Planting the future: developing an agriculture that sustains land and community**. Ames: Iowa University Press, 1995. p.209-212.
- RÜCKERT, A. A. **Metamorfoses do território: A agricultura de trigo/soja no planalto médio rio-grandense 1930-1990**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 223p.
- RUDDIMAN, W. **Plows, plagues and petroleum**. How humans took control of the climate. Princeton: University Press, 2005. 202p.
- RUSSELL, E.W. **Soil conditions and plant growth**. Londres: Longman, 1961. 688p.

- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE-FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.1486-1499, 2001.
- SAINT-HILAIRE, A. **Viagem ao Rio Grande do Sul (1820-21)**. Belo Horizonte: Itatiaia, 1999. 215p.
- SANCHEZ, P.A.; LOGAN, T.J. Myths and science about the fertility and chemistry of soils in the Tropics. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A. **Myths and science of soils of the Tropics**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p.34-36. (Special Publication, 29).
- SALTER, R.M.; GREEN, T.C. Factors affecting the accumulation and loss of nitrogen and organic carbon in cropped soils. **Journal of the American Society of Agronomy**, Madison, v.25, p.622-630, 1933.
- SANTOS, M. C. L; KLAMT, E.; KAMPF, N.; ABRÃO, P. U. R.; AZOLIM, M. A. **Levantamento e utilização dos solos do município de Ibirubá**. Porto Alegre: INCRA:Secretaria da Agricultura:Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970.
- SCHILLING, P.R. **A crise econômica no Rio Grande do Sul. I - A crise da agropecuária**. Porto Alegre: Difusão de Cultura Técnica, 1961. 175p.
- SCHOLZE, M.; BONDEAU, A.; EWERT, F.; KUCHARIK, C.; PREISS, J.; SMITH, P. Advances in large-scale crop modeling. **Eos**, Washington, v.86, n.26, p.245-247, 2005
- SCHUMAN, G. E.; JANZEN, H. H.; HERRICK, J. E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. **Environmental Pollution**, Amsterdam, v.116, p.391-396, 2002.
- SHAFFER, M. A.; MA, L.; HANSEN, S. Introduction to simulation of carbon and nitrogen dynamics in soils. In: SHAFFER, M. A.; MA, L.; HANSEN, S. (Eds.) **Modelling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management**. Boca Raton: Lewis, 2001. p.1-10.
- SILVA, A. B. **Desmatamento no município de Ibirubá (RS) analisado por fotografias aéreas**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria 1979. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rural) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1979.
- SILVEIRA, A. M.; VICTORIA, R. L.; BALLESTER, M. V.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; PICCOLO, M. C. Simulação dos efeitos das mudanças de uso da terra na dinâmica do carbono do solo na bacia do rio Piracicaba. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.2, p.389-399, 2000.
- SILVERT, W. Modelling as a discipline. **International Journal of General Systems**, Londres, v.30, n.3, p. 261-282, 2001.

- SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOCHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.76, p.39-58, 2004.
- SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.241, p.155-176, 2002.
- SKJEMSTAD, J. O.; SPOUNCER, L.R.; BEECH, A. **Carbon conversion factors for historical soil carbon data**. Canberra: Australia Greenhouse Office, 2000. 28p. (National Carbon Accounting System Technical Report, 15)
- SLEUTEL, S.; DE NEVE, S.; BEHEYDT, B.; LI, C.;HOFMAN, G. Regional simulation of long-term organic carbon stock changes in cropland soils using the DNDC model: 2.Scenario analysis of management options. **Soil Use and Management**, Oxford, v.22, p.352-361, 2006a.
- SLEUTEL, S.; DE NEVE, S.; BEHEYDT, B.; LI, C.;HOFMAN, G. Regional simulation of long-term organic carbon stock changes in cropland soils using the DNDC model: 1. Large-scale model validation against a spatially explicit data set. **Soil Use and Management**, Oxford, v.22, p.342-35, 2006b.
- SMECK, N.E.; RUNGE; E. C. A.; MACKINTOSH, E.E. Dynamics and genetic modelling of soil systems. In: WILDING; L.P.; SMECK, N.E.; HALL. G. F. (Eds.) **Pedogenesis and soil taxonomy**. I. Concepts and Interactions. Amsterdam: Elsevier, 1983. 303 p. (Developments in Soil Science, 11A).
- SMITH, P.; SMITH, J. U.; POWLSON, D. S.; MCGILL, W. B.; ARAH, J. R. M.; CHERTOV, O. G.; COLEMAN, K.; FRANKO, U.; FROLKING, S.; JENKINSON, D. S.; JENSEN, L. S.; KELLY, R. H.; KELIN-GUNNEWIEK, H.; KOMAROV, A. S.; LI, C.; MOLINA, J. A. E.; MUELLER, T.; PARTON, W. J.; THORNLEY, J. H. M.;WHITMORE, A. P. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. **Geoderma**, Amsterdam, v.81, p.153-225, 1997.
- STEINBACH, H.; ALVAREZ, R. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in Pampean agroecosystems. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.35, p.3-13, 2006.
- STOLBOVOY, V; MONTANARELLA, L.; FILIPPI, N.; SELVARADJOU; S-K.; PANAGOS, P.; GALLEGRO, J. **Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soils of the European Union**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community, 2005. 12p.
- STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. p. 112

- TAN, Z. X.; LAL, R.; SMECK, N. E.; CALHOUN, F. G. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. **Geoderma**, Amsterdam, v.121, p.187-195, 2004.
- TORNQUIST, C. G.; GIASSON, E.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. Estoques originais de carbono orgânico em solos do Planalto do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 1 CD-ROM.
- TURNER, M. G.; GARDNER, R. H.; O'NEILL, R. V. Introduction to models. In: TURNER, M. G.; GARDNER, R. H.; O'NEILL, R. V. (Eds.) **Landscape ecology in theory and practice**. New York: Springer, 2002. 401p.
- UNFCCC. United Nations Framework Conference On Climate Change. **Baseline and monitoring methodologies**. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/methodologies>>. Acesso em: 2 jan. 2007.
- VAN DEVENTER, A.P.; WARD, A.D.; GOWDA, P.H.; LYON, J.G. Using Thematic Mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda (EUA), v.63, n.1, p.87-93, 1997.
- VAN DER LINDEN, A. M.A.; VAN VEEN, J.A.; FRISSEL, M.J. Modelling soil organic matter levels after long-term applications of crop residues, and farmyard and green manures. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.101, p.21-28, 1987.
- VAN DEN BYGAART, A.J.; GREGORICH, E.G.; ANGERS, D.A. Influence of agricultural management on soil organic carbon: A compendium and assessment of Canadian studies. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.83, p.363-380, 2003.
- VAN NES, E. H.; SCHEFFER, M. A strategy to improve the contribution of complex simulation models to ecological theory. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v.185, p.153-164, 2005.
- VAN OOST, K.; GOVERS, G.; QUINE, T.A.; HECKRATH, G. Comment on "Managing soil carbon" (I). **Science**, Washington, v.305, p.1567b, 2004.
- VAN OOST, K.; GOVERS, G.; QUINE, T.A.; HECKRATH, G.; OLESEN, J. E.; DE GRYZE, S.; MERCKX, R. Landscape-scale modeling of carbon cycling under the impact of soil redistribution: The role of tillage erosion. **Global Biogeochemical Cycles**. Washington, 2005. Disponível em: www.agu.org/pubs/crossref/2005/2005GB002471.shtml. Acesso em 25 fev. 2007.
- VAN OOST, K.; QUINE, T.A.; GOVERS, G.; HECKRATH, G. Modelling soil erosion induced carbon fluxes between soil and atmosphere on agricultural land using SPEROS-C. In: ROOSE, E.J.; LAL, R.; FELLER, C.; BARTHES, B.; STEWART, B.A. (Eds.) **Soil erosion and carbon dynamics**. Boca Ratón: CRC Press, 2006. p.37-50.

- VAN WESEMAEL, B.; LETTENS, S.; ROELANDT, C.; VAN ORSHOVEN, J. Changes in soil carbon stocks from 1960 to 2000 in the main Belgian cropland areas. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, Gembloux, v.8, n.2, p.133-139, 2004.
- VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.15-21, 1994.
- VERBURG, P.H.; VELDKAMP, A.; ROUSEVELL, M.D.A. Scenario-based studies of future land use in Europe. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.114, p.1-6., 2006
- VEZZANI, F. M. **Qualidade do solo na produção agrícola**. 2001.184 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- WANG, S.; TIAN, H; LIU, J.; PAN, J. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s–1980. **Tellus**, Oxford, v.55B, p.416-427, 2003.
- WEST, T.O.;POST, W.M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.1930-1946, 2002.
- WEST, T.O.; MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.91, p.217-232, 2002.
- WILLIAMS, J.R.; ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R. **The APEX model**. Temple: Blackland Research Center. Texas A&M University, 2000. 123p.(Report,. 00-06).
- WOODRUFF, C.M. Estimating the nitrogen delivery of soil from the organic matter determination as reflected by the Sanborn fields. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.14, p.208-212, 1949.
- YANG, X-M.; WANDER, M. M. Tillage effects on soil organic carbon distribution and storage in a silt loam soil in Illinois. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.52, p.1-9, 1999.
- YOO, K.; AMUNDSON, R. Erosion of upland hillslope soil organic carbon: Coupling field measurements with a sediment transport model. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v.19, n.3, p.1-17, 2005.
- ZHANG, J.; QUINE, T. A.; NI, S.; GE, F. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion. **Global Change Biology**, Oxford, v.12,p.1834-1841,2006.

9. APÊNDICES

APÊNDICE 1. Levantamentos de solos na região de Ibirubá

O estudo sistemático dos solos na região de Ibirubá iniciou em meados da década de 1960, quando foi realizada a primeira etapa do Levantamento de Reconhecimento de Solos do Rio Grande do Sul no Planalto Riograndense (Lemos et al., 1967). O relatório relativo ao Levantamento foi publicado em 1973, acompanhado de mapa na escala 1:750.000 (BRASIL 1973). Este mapa foi digitalizado e sua legenda atualizada para a versão vigente do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos em 1998 (Streck et al., 1998). A Figura 1 deste Apêndice contém o recorte deste mapa correspondente a área de estudo.

Na década de 1970, no âmbito do Projeto RADAMBRASIL foi realizado o Levantamento de Recursos Naturais do Rio Grande do Sul, cujo mapa de solos foi publicado pelo IBGE na escala 1:1.000.000, a partir da redução de escala de cartas de trabalho em escala 1:250.000. Estas cartas foram disponibilizadas, já em formato digital, por um convênio entre IBGE e Secretaria da Agricultura do RS em 2004. Em decorrência da metodologia de trabalho, o Mapa Exploratório caracteriza melhor a diversidade de solos na região se comparado com o Levantamento de Reconhecimento. A Figura 2 deste Apêndice contém o recorte deste mapa correspondente a área de estudo.

O estudo pedológico de maior escala e intensidade foi realizado quando Ibirubá foi escolhido como município-modelo para reforma agrária pelo INDA (Instituto Nacional de Desenvolvimento Agrário, hoje INCRA). Este projeto incluiu caracterização, levantamento semidetalhado e classificação de capacidade de uso do solo, e foi realizado pela Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul e Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS (Klamt, 1969; Santos et al., 1970). Ambos os estudos usaram a base cartográfica disponível na época (escala 1:100.000) e a base fotogramétrica de 1956 produzida pela Força Aérea Brasileira (escala aproximada de 1:30.000). O levantamento produziu um mapa de solos, publicado na escala 1:80.000, a partir da redução de escala sem generalização dos delineamentos de um mapa detalhado na escala 1:30.000 (Figura 3 deste Apêndice). Este mapa representa a melhor caracterização disponível da diversidade e distribuição dos solos da região. Sua elaboração adotou o modelo que vinha sendo aplicado no

Levantamento de Reconhecimento de solos no Planalto Riograndense (Lemos et al., 1967). Em síntese, o levantamento semidetalhado identificou, nas superfícies onduladas e suave onduladas, a predominância de *Latossolos Vermelhos aluminoférricos típicos* (correspondente a UM 'Erechim' do Levantamento de Reconhecimento) (Tabela 1), os quais ocorrem associados a *Neossolos Litólicos eutróficos chernossólicos* e *Chernossolos argilúvicos férricos típicos* (UM 'Associação Ciríaco-Charrua') nas áreas mais declivosas, respectivamente nas porção média e parte inferior das encostas. Nas superfícies deposicionais mais amplas podem ocorrer *Neossolos Flúvicos* e *Gleissolos*. Na região sul do município de XV de Novembro, os solos apresentam textura mais arenosa, pedregosidade variada, além da ocorrência ocasional de afloramentos rochosos. Ocorre ali uma grande mancha de *Latossolo Vermelho distrófico* textura arenosa (UM 'Cruz Alta'), e, em menor extensão, os *Nitossolos Vermelhos*. A oeste de Ibirubá e XV Novembro há ocorrência de *Latossolos Vermelhos distróficos* com textura média (UM 'Passo Fundo' e *intregrade* UM 'Passo Fundo'-'Erechim'). Apesar de utilizar a mesma nomenclatura das unidades de mapeamento do Levantamento de Reconhecimento do RS (BRASIL 1973), os estudos realizados identificaram algumas características divergentes dos perfis modais nos Latossolos da região. Klamt (1969) sugere que estes seriam mais recentes e menos intemperizados do que os descritos no Alto Uruguai, além de terem contribuição de outro material de origem, provavelmente da Formação Tupanciretã, por interestratificação com a Formação Serra Geral.

No final da década de 1970, um projeto de conservação do solo – Projeto Guarda Chuva – implantou uma área de estudo e observação na região de XV de Novembro. Um dos componentes deste projeto foi um levantamento detalhado de solos da área do projeto (177 ha) na escala 1:5.000 (Figura 4 deste Apêndice) (Pötter and Hochmüller 1980).

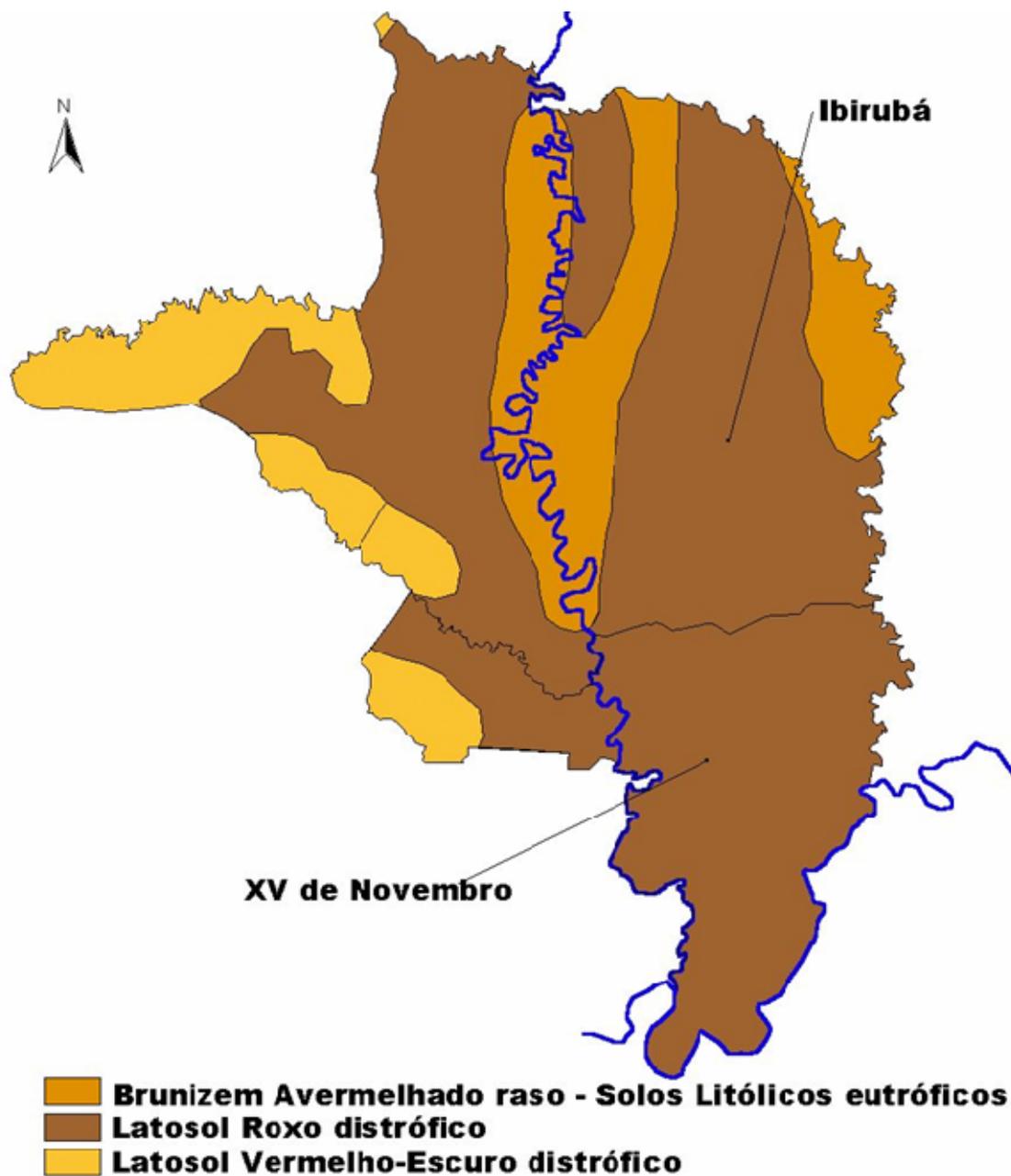


FIGURA 1. Recorte do mapa do Levantamento de Reconhecimento de Solos do RS referente a região de Ibirubá-XV Novembro com legenda original. Escala original 1:750.000 (Brasil, 1973).

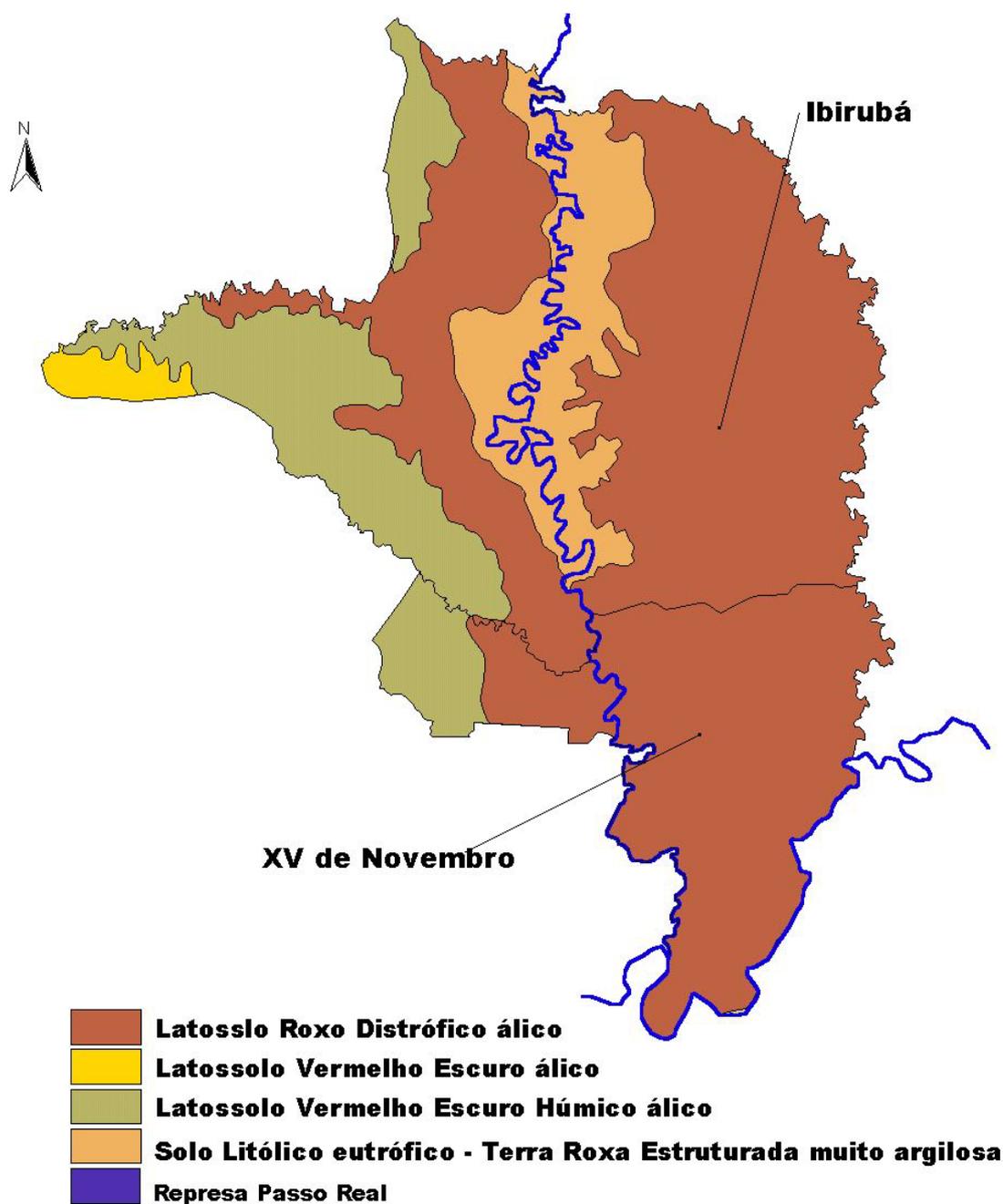


FIGURA 2. Recorte do Mapa de Solos do Levantamento Exploratório de Solos do RS referente região de Ibirubá-XV Novembro com legenda original. Escala de trabalho original 1:250.000, escala de publicação 1:1.000.000 (IBGE, 1986).

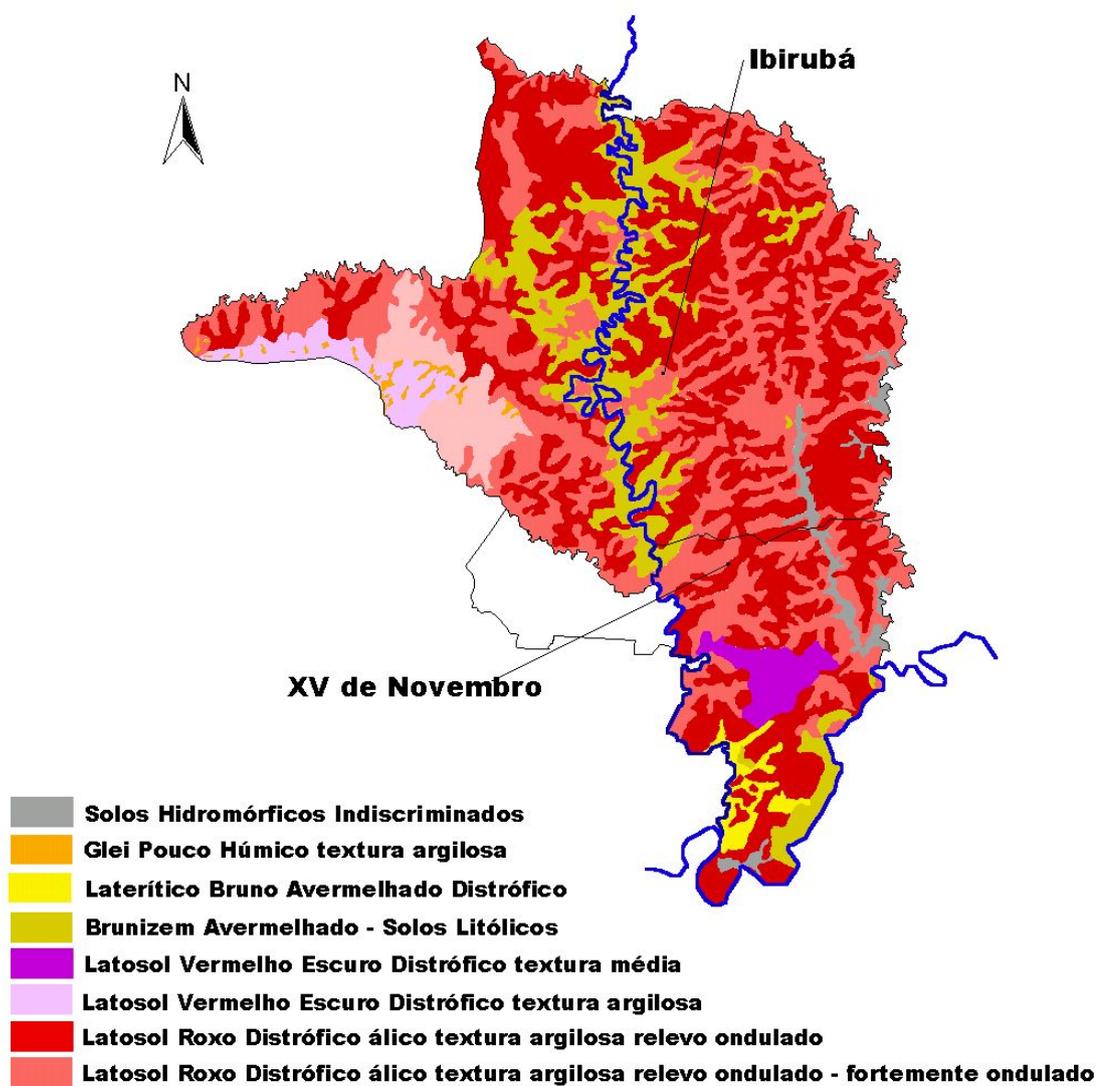


FIGURA 3. Mapa de solos do Levantamento Semidetalhado de Solos de Ibirubá com legenda original (Santos et al., 1970). Escala original 1:30.000.

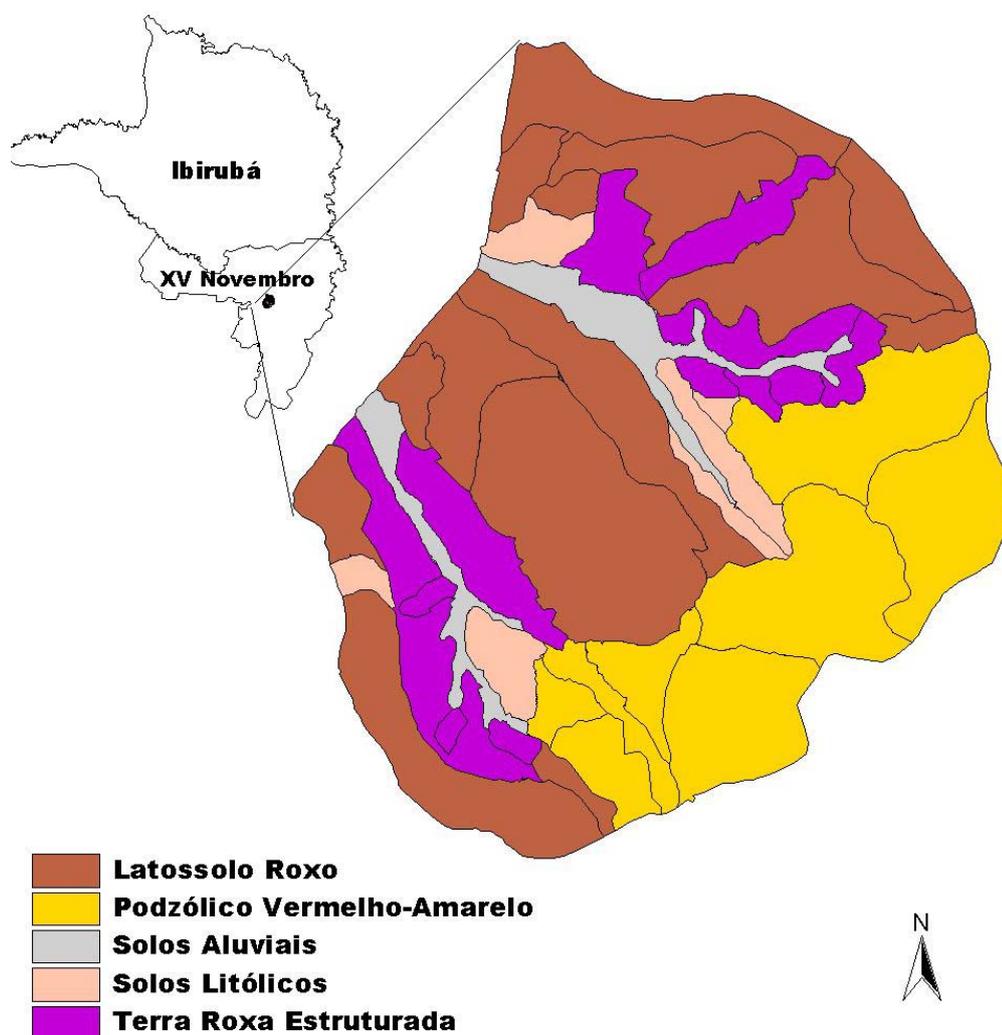


FIGURA 4. Levantamento de solos da microbacia do Projeto Guarda-Chuva (177 ha) com legenda original. Escala original 1: 5.000 (Pötter e Höchmüller, 1980).

TABELA 1. Equivalência entre a legenda original do levantamento semidetalhado (1970) de solos de Ibirubá e reclassificação conforme Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.

Legenda Original	Legenda Atualizada ¹
Latosol Vermelho Escuro Disitrófico textura argilosa (UM PASSO FUNDO)	LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico
Latosol Roxo Distrófico álico textura argilosa (UM ERECHIM)	LATOSSOLO VERMELHO aluminoférrico típico
Latosol Roxo-Latosol Vermelho Escuro textura argilosa (UM 'INTERGRADE')	LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico
Latosol Vermelho Escuro Distrófico textura média (UM CRUZ ALTA)	LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico
Laterítico Bruno Avermelhado Distrófico texttura argilosa (UM AURORA)	NITOSSOLO VERMELHO distrófico argissólico
Glei Pouco Húmico textura argilosa (UM BATÚ)	GLEISSOLO HÁPLICO
Brunizem Avermelhado textura argilosa (UM CIRIACO)	CHERNOSSOLO ARGILÚVICO
Solos Litóico Eutrófico textura média (UM CHARRUA)	NEOSSOLO LITÓLICO ou REGOLÍTICO
Solos Hidromórficos Indiscriminados [Aluviais e Glei Pouco Húmicos] (UM ALUVIAL)	NEOSSOLO FLÚVICO

¹ Quando existentes, foram utilizadas as mesmas atualizações propostas por Streck et al. (2003)

APÊNDICE 2. Evolução do uso do solo na região de Ibirubá¹ conforme os Censos Agropecuários do IBGE.

Ano	Área Agrícola	Área Cultivada	Lavouras Anuais	Lavouras Permanentes	Pastagens	Mata Nativa	Reflorestamento	Pousio
 ha							
1960	72.556	65.333	31.497	121	20.313	12.936	233	6.259
1970	74.141	71.664	41.079	1.136	16.657	16.024	353	2.839
1975 ²	71.787	-	47.063	778	-	-	-	-
1980	74.629	72.868	52.851	452	11.074	7.256	587	648
1985	72.451	70.326	53.673	486	8.106	6.623	815	623
1995	73.928	72.133	55.011	591	7.314	7.128	1.089	1.000

¹ Para fins deste estudo, inclui atual município de XV Novembro. Área total oficial 83.544 ha (IBGE 2002).

² Censo parcial - sinopse (dados incompletos).

Apêndice 3. Detalhamento dos locais amostrados. Coordenadas no sistema UTM, datum SAD-69.

No	Local	Uso do Solo	Solo	Data	Easting	Northing
1	Abreu	mata	LV argiloso	15/10/2004	285812	6934528
2	Abreu	mata	LV muito argiloso	15/10/2004	265905	6834553
3	Floss	mata	LV muito argiloso	15/10/2004	292414	6839486
4	Floss	mata	LV muito argiloso	15/10/2004	291941	6839505
5	Franken	mata	LV média	15/10/2004	294850	6813746
6	Franken	mata	LV média	15/10/2004	295078	6813836
7	Iora	mata	LV muito argiloso	15/10/2004	296250	6844093
8	Iora	mata	LV muito argiloso	15/10/2004	296303	6844079
9	Trombeta	lavoura	NeosRegolitico	15/10/2004	295969	6810461
10	Trombeta	mata	NeosRegolitico	15/10/2004	295993	6810463
11	Vera Abreu	campo	LV argiloso	15/10/2004	273812	6832373
12	Bonzanini	mata	LV muito argiloso	27/11/2004	300299	6833309
13	Schwantes	lavoura	Neos Flúvico	27/11/2004	298078	6825174
14	Boa Vista	lavoura	Neos Flúvico	27/11/2004	294939	6843417
15	Santa Clara 1	campo	LV argiloso	27/11/2004	281223	6819670
16	Bom Retiro	campo	LV muito argiloso	27/11/2004	284258	6843187
17	Scheffler	lavoura	LV argiloso	14/4/2005	294349	6816916
18	Scheffler	mata	LV argiloso	15/4/2005	294448	6816867
19	Nicolodi	lavoura	LV muito argiloso	15/4/2005	281136	6842537

Apêndice 3. Continuação...

20	Abreu	lavoura	LV argiloso	15/4/2005	265956	6834353
21	Nicolodi	lavoura	LV muito argiloso	3/10/2005	281136	6842537
22	Nicolodi	lavoura	LV muito argiloso	3/10/2005	280660	6843066
23	Nicolodi	mata	LV muito argiloso	3/10/2005	280839	6843008
24	Scheffler	lavoura	LV média	15/4/2005	294349	6816916
25	Scheffler	mata	LV média	15/4/2005	284987	6821522
26	Santa Clara 3	mata	LV argiloso	10/3/2005	281264	6822507
27	Linha Pulador 2	mata	Neos Flúvico	29/4/2006	297815	6824260
28	Celso Krug	lavoura	LV média	29/4/2006	296134	6815161
29	Ademar Rauppenthal	lavoura	LV argiloso	29/4/2006	297871	6817025
30	Sede Aurora	lavoura	LV argiloso	29/4/2006	295617	6812816
31	Erich Sommer	lavoura	LV muito argiloso	29/4/2006	292903	6828187
32	Nilton Gobbi	lavoura	LV muito argiloso	29/4/2006	284180	6838659
33	Jorge Pimentel	lavoura	LV argiloso	30/4/2006	277394	6831481
34	Rincão Seco	lavoura	LV muito argiloso	30/4/2005	285664	6827121
35	BR-277	lavoura	LV argiloso	30/4/2006	272097	6834847
36	Franken	lavoura	LV média	25/10/2006	295028	6813896
37	Franken	mata	LV média	26/10/2006	294875	6814264
38	Christ	lavoura	NeosRegolítico	25/10/2006	296376	6807726
39	Knak	lavoura	LV muito argiloso	27/11/2004	283383	6820118

APÊNDICE 4. Taxas anuais de erosão e deposição de solo por bloco de manejo utilizadas nos cenários “Atual” e “Melhorado” para simulação com Century.

Unidade de Simulação	Blocos	Erosão ou Deposição (-) (Mg solo ha ⁻¹ ano ⁻¹)
Latossolo Vermelho textura média Topo	1. Colonial	1,0
	2. Convencional "Leve"	3,0
	3. Convencional "Intensivo"	6,0
	4. Preparo Reduzido	2,0
	5. Plantio Direto	0,6
Latossolo Vermelho textura média Encosta	1. Colonial	2,0
	2. Convencional "Leve"	6,0
	3. Convencional "Intensivo"	12,0
	4. Preparo Reduzido	3,0
	5. Plantio Direto	1,2
Latossolo Vermelho textura média Deposicional	1. Colonial	-2,4
	2. Convencional "Leve"	-8,0
	3. Convencional "Intensivo"	-15,0
	4. Preparo Reduzido	-4,0
	5. Plantio Direto	-1,4
Neossolo flúvico Deposicional	1. Colonial	-1
	2. Convencional "Leve"	-3
	3. Convencional "Intensivo"	-6
	4. Preparo Reduzido	-2
	5. Plantio Direto	-0,6
Neossolo Regolítico Topo	1. Colonial	1,0
	2. Convencional "Leve"	3,0
	3. Convencional "Intensivo"	6,0
	4. Preparo Reduzido	2,0
	5. Plantio Direto	0,3
Neossolo Regolítico Encosta	1. Colonial	2,0
	2. Convencional "Leve"	6,0
	3. Convencional "Intensivo"	12,0
	4. Preparo Reduzido	3,0
	5. Plantio Direto	1,5

APÊNDICE 4. Continuação...

	1. Colonial	-2,0
Neossolo	2. Convencional "Leve"	-8,0
Regolítico	3. Convencional "Intensivo"	-12,0
Deposicional	4. Preparo Reduzido	-4,0
	5. Plantio Direto	-1,5
Latossolo	1. Colonial	1,0
Vermelho	2. Convencional "Leve"	2,0
textura muito	3. Convencional "Intensivo"	4,0
argilosa	4. Preparo Reduzido	1,5
Topo	5. Plantio Direto	0,3
Latossolo	1. Colonial	2,5
Vermelho	2. Convencional "Leve"	3,0
textura muito	3. Convencional "Intensivo"	8,0
argilosa	4. Preparo Reduzido	2,0
Encosta	5. Plantio Direto	0,6
Latossolo	1. Colonial	-3,0
Vermelho	2. Convencional "Leve"	-4,0
textura muito	3. Convencional "Intensivo"	-10,0
argilosa	4. Preparo Reduzido	-3,0
Deposicional	5. Plantio Direto	-1,0
Latossolo	1. Colonial	1,0
Vermelho	2. Convencional "Leve"	2,0
textura	3. Convencional "Intensivo"	5,0
argilosa	4. Preparo Reduzido	1,5
Topo	5. Plantio Direto	0,5
Latossolo	1. Colonial	2,0
Vermelho	2. Convencional "Leve"	3,0
textura	3. Convencional "Intensivo"	8,0
argilosa	4. Preparo Reduzido	1,5
Encosta	5. Plantio Direto	0,5
Latossolo	1. Colonial	-2,5
Vermelho	2. Convencional "Leve"	-4,0
textura	3. Convencional "Intensivo"	-11,0
argilosa	4. Preparo Reduzido	-3,0
Deposicional	5. Plantio Direto	-1,0

APÊNDICE 5. Alterações nos parâmetros originais do Century ou novos parâmetros adicionados neste estudo.

Alterações nos parâmetros de FIX.100

<u>Solo - Vegetação</u>	<u>Parâmetro</u>	<u>Valor original</u>	<u>Valor utilizado</u>
Latossolo Vermelho	DEC5	0,2	0,15
textura média	PS2S3(1)	0,003	0,006
Mata	PS2S3(2)	0,009	0,021
Latossolo Vermelho			
textura argilosa	DEC5	0,2	0,25
Mata			
Latossolo Vermelho			
textura argilosa	DEC5	0,2	0,14
Campo	PS2S3(2)	0,009	0,020
Latossolo Vermelho			
textura muito argilosa	DEC5	0,2	0,23
Mata			
Latossolo Vermelho			
textura muito argilosa	DEC5	0,2	0,14
Campo			
Neossolo Fluvico			
Mata	DEC5	0,2	0,27
Neossolo Regolítico			
Mata	DEC5	0,2	0,21

APÊNDICE 5. Continuação...

Parâmetros dos novos eventos DDEC em CULT.100		
Solo – Vegetação	Parâmetro	Valor utilizado
	CULTRA(1)	0,0
	(...)	0,0
Latossolo Vermelho textura média mata	CULTRA(7)	0,0
	CLTEFF(1)	1,0
	CLTEFF(2)	0,75
	CLTEFF(3)	0,9
	CLTEFF(4)	1,0
	CULTRA(1)	0,0
	(...)	0,0
Latossolo Vermelho textura argilosa Mata	CULTRA(7)	0,0
	CLTEFF(1)	1,0
	CLTEFF(2)	0,55
	CLTEFF(3)	0,7
	CLTEFF(4)	1,0
	CULTRA(1)	0,0
	(...)	0,0
Latossolo Vermelho textura argilosa Campo	CULTRA(7)	0,0
	CLTEFF(1)	1,0
	CLTEFF(2)	0,55
	CLTEFF(3)	0,75
	CLTEFF(4)	1,0
	CULTRA(1)	0,0
	(...)	0,0
Latossolo Vermelho textura muito argilosa Mata	CULTRA(7)	0,0
	CLTEFF(1)	1,0
	CLTEFF(2)	0,6
	CLTEFF(3)	0,9
	CLTEFF(4)	1,0
	CULTRA(1)	0,0
	(...)	0,0
Latossolo Vermelho textura muito argilosa Campo	CULTRA(7)	0,0
	CLTEFF(1)	1,0
	CLTEFF(2)	0,6
	CLTEFF(3)	0,7
	CLTEFF(4)	1,0

APÊNDICE 5. Continuação...

	CULTRA(1)	0,0
	CULTRA(7)	0,0
Neossolo Fluvico	CLTEFF(1)	1,0
Mata	CLTEFF(2)	0,8
	CLTEFF(3)	0,8
	CLTEFF(4)	1
	CULTRA(1)	0,0
	(...)	0,0
Neossolo Regolítico	CULTRA(7)	0,0
Mata	CLTEFF(1)	1,0
	CLTEFF(2)	1,0
	CLTEFF(3)	0,8
	CLTEFF(4)	1,0

Opções de floresta adicionadas em TREE.100:

Nome	Descrição	PRDX(2)	PRDX(3)
STARG	Floresta Subtropical - Latossolo Muito Argiloso	1150	600
STARN	Floresta Subtropical - Latossolo Textura Média	1050	500
STHID	Floresta Subtropical - Neossolo Flúvico	1380	400
STINT	Floresta Subtropical - Latossolo Argiloso	1280	450
STNEO	Floresta Subtropical - Neossolo regolítico	1670	825

Parâmetros alterados ou opções de cultura adicionadas em CROP.100:

Nome	Descrição	PRDX(1)	HI	HISW
C1	corn 1 - low-yield	240	0.4	0.3
C2	corn 2	275	0.45	0.5
C3	corn 3 - medium-yield	275	0.5	0.5
C4	corn 4	500	0.55	0.5
CN1RS	Campos Nativos (Latossolo Muito Argiloso)	215	0.02	0
CN2RS	Campos Nativos (Latossolo Argiloso)	205	0.02	0
OAT1	Aveia (cobertura)	220	0	0
OAT2	Aveia (cobertura)	320	0	0
SW1	Spring_wheat_low_harvest_index	300	0.35	0.25
SW2	Spring_wheat_medium_harvest_index	300	0.4	0
SW3	Spring_Wheat_high_harvest_index	300	0.45	0.25
SYBN1	Soybeans	130	0.4	0.5
SYBN2	Soybeans	180	0.4	0.2
SYBN3	Soybeans	175	0.45	0.7
SYBN4	Soybeans	215	0.5	0.7
W0	wheat_low_yield (Colonial)	120	0.35	0.4
W0.5	wheat_low_yield (década 1955-1960)	135	0.4	0.7
W1	wheat_medium_HI	170	0.39	0.9
W2	wheat_medium+_ HI	185	0.45	0.7
W3	Wheat_high_HI	215	0.45	0.42
WEED	Weeds	150	0.05	0

APENDICE 6. Concentrações de COS e densidade do solo por classe e uso original e atual do solo nas camadas de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 cm.

Classe e Uso Atual de Solo	n	Concentração C g C kg ⁻¹			Densidade do solo Mg m ⁻³		
		0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
<u>LV textura média</u>							
mata	4	25,53	14,69	10,96	1,12	1,24	1,22
lavoura (mata)	3	18,44	14,32	10,34	1,64	1,60	1,57
<u>LV argiloso</u>							
campo	2	19,62	15,94	14,52	1,45	1,51	1,50
lavoura (campo)	3	20,18	16,46	15,32	1,46	1,55	1,47
mata	3	31,54	17,97	13,30	1,11	1,21	1,26
lavoura (mata)	3	17,85	14,03	13,21	1,61	1,62	1,62
<u>LV muito argiloso</u>							
campo	2	22,93	17,22	15,26	1,39	1,48	1,42
lavoura(campo)	4	21,07	16,65	15,23	1,44	1,47	1,40
mata	7	34,29	21,17	17,45	1,03	1,19	1,20
lavoura(mata)	3	23,05	17,06	15,17	1,37	1,51	1,48
<u>Neossolo flúvico</u>							
mata	1	33,04	27,16	20,45	0,99	1,32	1,35
lavoura(mata)	2	19,19	17,43	22,27	1,34	1,48	1,53
<u>Neossolo regolítico</u>							
mata	1	38,55	28,35	23,66	1,05	1,26	1,22
lavoura(mata)	2	19,34	17,91	15,19	1,53	1,44	1,42

APÊNDICE 7. Textura, densidade do solo e carbono orgânico do solo nas camadas de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm e 20 a 30 cm nos pontos amostrados.

N ^o	(0-10 cm)			(10-20 cm)			(20-30 cm)					
	Areia %	Argila %	Densidade Mg m ⁻³	Carbono g kg ⁻¹	Areia %	Argila %	Densidade g kg ⁻¹	Carbono Mg m ⁻³	Argila %	Areia %	Densidade g kg ⁻¹	Carbono Mg m ⁻³
1	44,40	26,70	1,07	33,35	37,50	37,07	1,27	17,22	34,10	33,60	1,27	14,15
2	34,40	50,60	1,48	27,20	34,00	53,90	1,52	16,06	50,16	36,70	1,52	17,49
3	14,60	52,80	0,96	32,62	15,90	53,35	1,25	22,63	54,23	17,30	1,25	15,66
4	26,00	52,47	1,03	32,64	24,70	59,62	1,20	20,90	56,54	29,40	1,20	16,51
5	52,20	20,46	1,03	31,85	49,24	20,90	1,32	14,92	36,08	42,77	1,32	12,40
6	57,10	23,21	1,06	21,92	51,10	25,41	1,19	15,26	31,90	53,70	1,19	11,92
7	20,20	62,92	0,86	31,69	22,30	62,59	1,12	21,95	65,01	20,10	1,12	20,34
8	16,20	70,73	0,73	47,58	20,60	64,68	1,03	25,75	77,33	20,80	1,03	18,46
9	32,20	50,38	1,60	20,78	26,90	58,30	1,48	17,36	56,10	29,00	1,48	15,26
10	33,50	22,99	1,05	38,55	26,60	54,12	1,26	28,35	28,16	37,70	1,26	23,66
11	58,20	34,54	1,45	22,69	55,20	39,27	1,58	16,40	48,62	54,20	1,58	14,19
12	17,80	62,70	1,01	35,54	23,90	60,50	1,00	19,25	57,20	25,00	1,00	16,72
13	6,10	57,75	1,10	19,71	9,80	56,21	1,29	22,32	48,84	27,70	1,29	32,08
14	20,50	47,41	1,58	18,66	21,90	52,03	1,66	12,53	50,93	26,00	1,66	12,47
15	40,30	50,82	1,45	16,55	37,70	53,46	1,44	15,48	54,67	35,40	1,44	14,86
16	20,00	63,91	1,41	21,90	17,20	70,84	1,44	16,80	68,31	16,60	1,44	15,66
17	26,10	49,50	1,57	18,90	24,30	50,82	1,63	13,14	52,14	21,00	1,63	9,86
18	30,10	38,61	1,01	32,41	29,70	39,16	1,12	19,30	39,60	33,50	1,12	13,87
19	20,10	47,41	1,37	23,96	21,80	56,87	1,52	17,63	59,18	17,50	1,52	14,87

APÊNDICE 7. continuação...

Nº	(0-10 cm)			(10-20 cm)			(20-30 cm)			Densidade
	Areia	Argila	Densidade	Areia	Argila	Carbono	Areia	Argila	Carbono	
	%	%	Mg m ⁻³	%	%	Mg m ⁻³	%	%	Mg m ⁻³	g kg ⁻¹
20	38,70	32,78	1,53	36,50	42,35	16,57	34,90	46,53	15,91	1,47
21	23,70	50,49	1,54	23,12	56,32	16,34	21,50	59,18	14,25	1,50
22	19,60	54,67	1,43	14,30	65,89	15,74	13,50	52,36	14,28	1,38
23	17,79	52,03	1,13	17,10	55,00	21,65	19,60	52,80	16,97	1,17
24	63,56	31,90	1,60	72,03	18,92	12,36	63,17	32,78	3,70	1,63
25	69,20	20,57	1,19	69,50	20,57	14,52	52,46	40,81	7,53	1,22
26	59,90	30,91	1,26	37,00	48,95	17,38	28,00	66,33	11,89	1,26
27	31,57	45,87	0,99	64,18	27,28	27,16	57,89	26,84	20,45	1,35
28	69,92	27,50	1,66	62,31	27,72	14,35	42,56	26,29	14,09	1,47
29	48,03	38,39	1,63	44,60	41,25	14,69	36,73	49,94	14,70	1,59
30	44,93	36,74	1,62	40,48	41,69	14,26	30,38	55,22	15,07	1,62
31	20,83	62,59	1,41	19,29	64,02	15,26	24,92	48,62	14,52	1,49
32	17,66	68,09	1,42	17,14	52,91	16,87	11,59	57,09	17,51	1,25
33	47,82	41,36	1,35	46,51	44,88	16,53	40,63	50,16	15,04	1,49
34	22,61	58,19	1,39	19,69	60,17	17,15	13,68	67,76	15,00	1,51
35	43,32	41,14	1,57	41,69	47,85	16,27	42,50	45,32	15,01	1,45
36	61,00	28,91	1,67	59,50	27,35	16,26	61,30	35,18	13,23	1,60
37	59,60	21,78	1,19	57,20	23,51	14,05	57,00	24,58	11,99	1,23
38	26,20	37,23	1,45	25,10	41,65	18,46	21,10	44,34	15,13	1,42
39	6,20	66,00	1,31	19,30	64,90	18,76	22,50	48,40	15,98	1,44

APÊNDICE 8. Exemplo de seqüência de blocos de eventos de manejo no Cenário "Atual" (arquivo *.SCH do Century 4). Solo-vegetação: Latossolo Vermelho textura média, sob mata.

```

-2000      Starting year
2050      Last year
icsite.100 Site file name
0         Labeling type
0         Labeling year
-1        Microcosm
-1        CO2 Systems
2         Initial system
C1        Initial Crop
STARN     Initial Tree

Year Month Option
1         Block #   Floresta Subtropical_ Planalto(eq)
1899     Last year
1         Repeats # years
-2000    Output starting year
1         Output Month
1.00000  Output interval
M        Weather choice
01  01  TREE STARN
01  01  TFST
01  12  TLST
-999 -999 X
3         Block #   Floresta Subtropical_CorteQueima
1900     Last year
1         Repeats # years
1900     Output starting year
1         Output Month
1.00000  Output interval
M        Weather choice
01  01  TREE STARN
01  07  TREM CLEAR
01  11  TREM FIRE
-999 -999 X
3         Block #   Colonial (2xPousio_Milho/1xTrigo_Milho)
1955     Last year
3         Repeats # years
1901     Output starting year
1         Output Month
1.00000  Output interval
M        Weather choice
01  01  CROP WEED
01  01  FRST
01  04  LAST
01  05  EROD 0.050000
01  05  OMAD STMAN
01  06  CROP C1
01  06  CULT ANTIL
01  07  PLTM
01  10  EROD 0.050000
01  12  HARV G
01  12  LAST
02  01  CROP WEED
02  01  FRST
02  03  LAST
02  04  EROD 0.050000
02  04  CULT ANTIL

```

APÊNDICE 8. Continuação...

```

02 05 CROP W0
02 05 CULT CTDSK
02 05 PLTM
02 10 EROD 0.050000
02 11 LAST
02 11 HARV G
02 12 CROP WEED
02 12 FRST
03 04 EROD 0.050000
03 05 LAST
03 05 OMAD STMAN
03 06 CULT ANTIL
03 07 CROP C1
03 07 PLTM
03 10 EROD 0.050000
03 12 HARV G
03 12 LAST
-999 -999 X
4
      Block #          Convencional  "Leve"
(Trigo_PousioXMilho_Pousio)
1970      Last year
2         Repeats # years
1956      Output starting year
1         Output Month
1.00000   Output interval
M         Weather choice
01 01 CROP WEED
01 01 FRST
01 04 CULT CVTIL
01 04 LAST
01 05 EROD 0.150000
01 05 CROP W0.5
01 06 PLTM
01 06 FERT N1.5
01 08 FERT N3
01 10 EROD 0.150000
01 11 HARV G
01 12 CROP WEED
01 12 FRST
02 03 LAST
02 04 CULT CVTIL
02 05 EROD 0.150000
02 07 CROP C1
02 07 PLTM
02 07 FERT N2
02 08 FERT N3
02 09 EROD 0.150000
02 12 HARV G
-999 -999 X
5          Block #          Convencional "Intensivo"  (Trigo_Soja)
Queima_Resteva
1980      Last year
3         Repeats # years
1971      Output starting year
1         Output Month
1.00000   Output interval
M         Weather choice
01 03 LAST
01 03 HARV G
01 04 CULT CVTIL

```

APÊNDICE 8. Continuação...

```

01 04 EROD 0.300000
01 05 FERT N3
01 05 CROP W1
01 05 PLTM
01 05 CULT OTDSK
01 08 FERT N4
01 10 LAST
01 10 HARV G
01 11 FIRE C
01 11 EROD 0.300000
01 11 CULT CVTIL
01 12 PLTM
01 12 CROP SYBN2
01 12 CULT OTDSK
02 03 LAST
02 03 HARV G
02 04 CULT CVTIL
02 04 EROD 0.300000
02 05 FERT N3
02 05 CROP W1
02 05 PLTM
02 05 CULT OTDSK
02 08 FERT N4
02 10 HARV G
02 11 CULT CVTIL
02 11 FIRE C
02 11 EROD 0.300000
02 12 PLTM
02 12 CROP SYBN2
02 12 CULT OTDSK
03 03 LAST
03 03 HARV G
03 04 CULT CVTIL
03 04 EROD 0.300000
03 05 CROP W1
03 05 PLTM
03 05 CULT OTDSK
03 08 FERT N4
03 10 LAST
03 10 HARV G
03 11 FIRE C
03 11 EROD 0.300000
03 11 CULT CVTIL
03 12 CROP SYBN2
03 12 PLTM
03 12 CULT OTDSK
-999 -999 X
6          Block #      Preparo Reduzido (Trigo/Aveia_Soja)
1992       Last year
4          Repeats # years
1981      Output starting year
1          Output Month
1.00000   Output interval
M         Weather choice
01 03 LAST
01 03 HARV G
01 04 CULT CHISL
01 05 CROP W1
01 05 PLTM
01 05 FERT N2.5

```

APÊNDICE 8. Continuação...

```

01 07 FERT N5
01 10 EROD 0.200000
01 10 HARV G
01 10 LAST
01 11 CULT CHISL
01 12 CROP SYBN3
01 12 PLTM
02 03 HARV G
02 03 LAST
02 04 CULT CHISL
02 05 CROP OAT1
02 06 PLTM
02 07 FERT N4
02 09 CULT HERB
02 09 LAST
02 10 EROD 0.200000
02 11 CULT CHISL
02 12 PLTM
02 12 CROP SYBN3
03 03 HARV G
03 03 LAST
03 04 CROP W1
03 04 CULT CHISL
03 05 FERT N2.5
03 05 PLTM
03 07 FERT N5
03 09 LAST
03 10 EROD 0.200000
03 10 HARV G
03 11 CULT CHISL
03 12 CROP SYBN3
03 12 PLTM
04 03 LAST
04 03 HARV G
04 04 CULT CHISL
04 05 CROP OAT1
04 06 PLTM
04 07 FERT N5
04 09 LAST
04 09 CULT HERB
04 10 EROD 0.200000
04 10 CULT CHISL
04 11 CROP SYBN3
04 12 PLTM
-999 -999 X
7          Block #      Platio Direto (2xTrigo_Soja/lxAveia_Milho)
2050       Last year
3          Repeats # years
1993      Output starting year
1         Output Month
1.00000   Output interval
M         Weather choice
01 01 CULT DDEC
01 02 CULT DDEC
01 03 CULT DDEC
01 04 HARV G
01 04 EROD 0.030000
01 04 LAST
01 04 CULT DDEC
01 05 PLTM

```

APÊNDICE 8. Continuação...

01 05 CULT DDEC
01 05 CROP W2
01 06 CULT DDEC
01 06 FERT N2.5
01 07 CULT DDEC
01 07 FERT N5
01 08 CULT DDEC
01 09 CULT DDEC
01 10 HARV G
01 10 CULT DDEC
01 10 EROD 0.030000
01 10 LAST
01 11 CROP SYBN4
01 11 PLTM
01 11 CULT NTIL
01 12 CULT DDEC
02 01 CULT DDEC
02 02 CULT DDEC
02 03 CULT DDEC
02 04 HARV G
02 04 CULT DDEC
02 04 LAST
02 05 EROD 0.030000
02 05 CULT DDEC
02 05 FERT N2.5
02 05 CROP OAT2
02 05 PLTM
02 06 CULT DDEC
02 07 CULT DDEC
02 08 CULT ROLLR
02 08 LAST
02 08 CULT DDEC
02 08 CULT HERB
02 09 CULT DDEC
02 09 CROP C3
02 09 PLTM
02 09 CULT NTIL
02 09 FERT N4
02 10 EROD 0.030000
02 10 CULT DDEC
02 10 FERT N5
02 11 CULT DDEC
02 12 CULT DDEC
03 01 LAST
03 01 CULT DDEC
03 02 HARV G
03 02 CULT DDEC
03 03 CULT DDEC
03 04 EROD 0.030000
03 04 CROP W2
03 04 CULT DDEC
03 05 PLTM
03 05 CULT DDEC
03 05 FERT N2.5
03 06 CULT DDEC
03 07 CULT DDEC
03 07 FERT N5
03 08 CULT DDEC
03 09 CULT DDEC
03 10 LAST

03 10 EROD 0.030000
03 10 CULT 7DDEC
03 10 HARV G
03 11 PLTM
03 11 CULT NTIL
03 11 CROP SYBN4
03 12 CULT DDEC
-999 -999 X

APÊNDICE 9. Exemplo de seqüência de blocos de eventos de manejo no Cenário “Melhorado” (arquivo *.SCH do Century 4). Solo-vegetação: Latossolo Vermelho textura média, sob mata.

(Blocos 1 a 6 iguais ao Apêndice 10)

```

7          Block #      Platio Direto (Trigo_Soja/Aveia_Milho)
2050       Last year
2          Repeats # years
1993      Output starting year
1         Output Month
1.00000   Output interval
M         Weather choice
01 01 CULT DDEC
01 02 CULT DDEC
01 02 HARV G
01 03 CULT DDEC
01 04 EROD 0.030000
01 04 CULT DDEC
01 05 CULT DDEC
01 05 CROP W3
01 05 PLTM
01 06 CULT DDEC
01 06 FERT N3.5
01 07 CULT DDEC
01 07 FERT N5
01 08 CULT DDEC
01 09 CULT DDEC
01 10 HARV G
01 10 CULT DDEC
01 10 EROD 0.030000
01 10 LAST
01 11 CROP SYBN4
01 11 PLTM
01 11 CULT NTIL
01 12 CULT DDEC
02 01 CULT DDEC
02 02 CULT DDEC
02 03 CULT DDEC
02 04 HARV G
02 04 CULT DDEC
02 04 LAST
02 05 EROD 0.030000
02 05 CULT DDEC
02 05 CROP OAT2
02 05 PLTM
02 05 FERT N4
02 06 CULT DDEC
02 07 CULT DDEC
02 08 CULT ROLLR
02 08 LAST
02 08 CULT DDEC
02 08 CULT HERB
02 09 CULT DDEC
02 09 PLTM
02 09 CULT NTIL
02 09 FERT N4
02 09 CROP C4
02 10 EROD 0.030000
02 10 CULT DDEC
02 10 FERT N7.5
02 11 CULT DDEC
02 12 CULT DDEC
-999 -999 X

```

RESUMO BIOGRÁFICO

Carlos Gustavo Tornquist, filho de Jalmar Hugo e Helena Heloísa Fava Tornquist, nasceu em 9 de abril de 1964 em Porto Alegre. Estudou na Escola Pastor Dohms, em Porto Alegre, onde completou o Ensino Básico e Médio em 1981. Desde a infância freqüentava a propriedade da família em Taquari e também passou muitas férias escolares na propriedade dos tios Theodoro e Ana, em Entre Rios (Vera Cruz, RS). Em 1982, ingressou no curso de Física da UFRGS. No ano seguinte prestou serviço militar no CPOR (Centro de Preparação de Oficiais de Reserva-Porto Alegre) e, em 1984, ingressado no curso de Agronomia, onde graduou-se como Engenheiro Agrônomo em 1988. Entre 1989 e 1994 trabalhou em empresas (GLM Agropecuária-Cristalândia, TO) e ONGs (Fundação Gaia e Cooperativa Coolméia em Porto Alegre), além da propriedade da família. Entre 1994 e 1996 foi bolsista da Fulbright Commission (EUA), realizando curso de mestrado em Ciência do Solo, iniciando este programa na Louisiana State University-Baton Rouge, posteriormente transferido para a Texas A&M University-College Station quando seu orientador foi contratado por aquela universidade. Entre 1997 e 1999 foi professor substituto e chefe do Laboratório de Análises de Solo na Universidade de Passo Fundo. Antes de ingressar no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, atuou como assessor agrônomo para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina na empresa Manah S.A. Em 2005, durante o curso de doutorado, foi consultor pela EMATER-RS junto à equipe do Estado do RS que preparou o Projeto RS Biodiversidade, a ser financiado pelo GEF (Global Environmental Facility) da ONU a partir de 2007. Em 2006, ainda durante o curso de doutorado, realizou estágio na Iowa State University como parte do projeto de pesquisa realizado. Com a Eng^a Agr^a Simone Caggiano teve a filha Isabella, de 10 anos, nascida em College Station, Texas, que atualmente vive em São Paulo. Hoje é casado com a Eng^a Agr^a Renata Maltz, que já tinha os gêmeos Rafael e Gabriela (13 anos) de seu 1^o casamento. É associado (e, desde 1990, conselheiro) da Associação Gaúcha de Proteção ao Ambiente Natural, da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, da Soil Science Society of America e American Geophysical Union.