

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

VERENA CRISTINA DE ALMEIDA

**CARBONO ORGÂNICO NO SOLO E SUA RELAÇÃO COM OS
COMPARTIMENTOS MORFOLÓGICOS REPRESENTATIVOS DO
ESTADO DE SÃO PAULO**

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao
Programa de Pós-Graduação em Geociências e
Meio Ambiente Área de Geociências e Meio
Ambiente para obtenção do título de Mestre em
Geociências e Meio Ambiente

Rio Claro / SP
2008

VERENA CRISTINA DE ALMEIDA

**CARBONO ORGÂNICO NO SOLO E SUA RELAÇÃO COM OS
COMPARTIMENTOS MORFOLÓGICOS REPRESENTATIVOS DO
ESTADO DE SÃO PAULO**

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao
Programa de Pós-Graduação em Geociências e
Meio Ambiente Área de Geociências e Meio
Ambiente para obtenção do título de Mestre em
Geociências e Meio Ambiente

Orientador Jairo Roberto Jiménez-Rueda

Rio Claro / SP
2008

551.41 Almeida, Verena Cristina de
A447c Carbono orgânico no solo e sua relação com os
compartimentos morfológicos representativos do Estado de
São Paulo / Verena Cristina de Almeida. - Rio Claro : [s.n.],
2008

65 f. : il., figs., gráfs., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Orientador: Jairo Roberto Jiménez-Rueda

1. Ciência do solo. 2. Geomorfologia. 3. Matéria orgânica
humificada. 4. Seqüestro de carbono. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

Agradecimentos

Inicialmente agradeço à Leila Maria Vasconcellos de Almeida, minha mãe, pelo incentivo e estímulo durante toda a minha vida. Obrigada pela ajuda nas traduções e revisão do texto.

Ao meu pai, Reinaldo Antonio de Almeida, pelo respeito às minhas escolhas.

Ao professor Jairo Roberto Jiménez-Rueda pelo convite e a oportunidade de realizar este trabalho.

Ao professor Silvio Govone, pela disposição e ajuda.

Aos amigos e colegas da pós-graduação, pelo auxílio e boa vontade: Jane Delane Verona, Mateus Vidotti e Hiran.

Às amigas que mesmo longe, estão muito próximas: Anna Carolina Pinheiro do Carmo, Carolina Correia dos Santos e Juliana D'Angelo Evaristo Moreira.

Ao meu companheiro Rodrigo Neregato por todo o amor, carinho e incentivo nestes bons anos que compartilhamos.

À Rosângela, por toda ajuda dispensada durante esta etapa.

RESUMO

Este trabalho apresenta aspectos relevantes para a implementação de projeto de MDL e PSAs em áreas naturais e cultivadas para empresas privadas, órgãos governamentais, organizações não-governamentais e sociedade civil que buscam bases técnicas-científicas com vistas ao desenvolvimento sustentável. O carbono orgânico no solo está principalmente sob forma de matéria orgânica humificada e sua quantidade e qualidade são influenciadas pelos fatores de formação do solo. A geomorfologia atua no condicionamento do solo e o clima age através do intemperismo, que transforma os elementos e a matéria orgânica humificada. O estudo analisou a distribuição do carbono orgânico nos compartimentos morfológicos do Estado de São Paulo. Os resultados indicaram que os maiores teores de carbono orgânico no solo (pontos discrepantes > 3.8%) relacionam-se às regiões que apresentam condições geomorfológicas propícias à deposição de sedimentos, como planícies de inundação e depressões côncavas, indicando relação com eventos pretéritos de evolução das paisagens aliados às condições climáticas de manutenção da matéria orgânica. As áreas planálticas, com solos mais jovens, também apresentam teores relativamente alto de carbono orgânico (%). A integração geossistêmica do compartimento solo com a geomorfologia constitui importante subsídio para propostas de seqüestro de carbono em projetos de MDL e PSAs, considerando o solo tanto como corpo principal da análise como também associado à cobertura vegetal no seqüestro de carbono. A determinação do carbono no solo para projetos de seqüestro/retenção deve empregar métodos de quantificação complementares, a fim de considerar as diferentes formas de carbono para contabilidade.

Palavras-chave: Ciência do solo, Geomorfologia, Matéria orgânica humificada e Seqüestro de carbono.

ABSTRACT

This study shows relevant aspects to implement CDM and PES in natural and cultivated areas for private enterprises, governmental offices NGOs and the society, all which search for technical-scientific basis for sustainable development. Organic carbon in the soil is mainly presented under the form of humic organic matter, and its quantity and quality are influenced by the same factors of soil formation. Geomorphology acts in soil conditioning and the climate, through weathering, acts in the formation and evolution of soils, as well as on humic organic matter. The aim of this study was to analyze the distribution of organic carbon on morphologic compartments in the State of São Paulo, Brazil. The results showed that the highest rates of organic carbon in the soil (outliers > 3.8%) related to the regions that presents geomorphologic conditions which were suitable to sediment depositions, such as inundated plains and depressions, indicating a relationship with the past evolution events of landscape and climate conditions to preserve the organic matter in soils. The planaltic areas with young soils also showed relatively high rates of organic carbon.

The geosystemic integration of soils compartments with the geomorphology constituted an important subside for carbon capture proposals in the Clean Development Environmental (CDM) and Payment for Environmental Services (PES); considering the soil either as main compartment of analysis or associated with vegetations in carbon capture. To determine carbon quantity in the soil or retention, complementary quantifying methods must be used in order to consider the different form of counting carbon.

Key-words: Soil science, Geomorphology, Humic organic matter and Carbon capture.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Justificativa	9
1.2. Objetivos	10
2. O CARBONO NOS ECOSISTEMAS TERRESTRES	11
2.1. O solo	12
2.2. Carbono no solo.....	15
2.3. Substâncias húmicas.....	23
2.3.1. Propriedades coloidais.....	26
2.4. Métodos de quantificação do carbono no solo.....	28
2.5. Estudo do carbono nos solos do Estado e São Paulo.....	32
2.5.1. Aspectos físicos.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODO.....	45
4. RESULTADOS.....	47
5. CONCLUSÃO.....	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
APÊNDICE I.....	64

1. INTRODUÇÃO

Em meio às discussões sobre as mudanças climáticas e o aquecimento global, os esforços de governos e da população são prejudicados pela falta de critérios técnicos adequados para a execução de projetos de seqüestro/neutralização de carbono no Brasil. São urgentes estudos que abranjam a complexidade e interdisciplinaridade afetas a essa discussão.

O carbono, elemento que transita por todos os compartimentos da Terra, diferencia-se em estado e forma, o que faz com que esse elemento seja particularmente importante no contexto do aquecimento global. Ele participa da composição de dois dos principais gases de efeito estufa – o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), além de recombinar-se com outros elementos e assim potencializar o aquecimento atmosférico que induz às mudanças climáticas em grande escala.

Como forma de reduzir o carbono atmosférico e de frear o aquecimento global algumas iniciativas políticas, econômicas e sociais têm sido apresentadas/implementadas.

O Protocolo de Quioto é um esforço político governamental multinacional que propôs Mecanismos de Flexibilização para a redução das emissões e do seqüestro do carbono. O Pagamento por Serviços Ambientais (PSAs) é uma proposta estratégica sócio-econômica promissora para países em desenvolvimento. O que ambos possuem em comum é, através de projetos que captura m GEEs da atmosfera, deter e, se possível, reverter o quadro do aquecimento global e conseqüentes mudanças climáticas.

O Protocolo de Quioto, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), propõe a cooperação entre os países-parte do Anexo II (países em desenvolvimento) e do Anexo I (países desenvolvidos) e é o único mecanismo de flexibilização do qual os países emergentes podem participar. Isto provoca a importação de métodos muitas vezes inadequados para a realidade dos países em

desenvolvimento. O PSAs considera a análise das potencialidades locais, fazendo-se, portanto, mais abrangente e flexível, possibilitando a adoção de métodos mais adequados, principalmente no tocante aos países tropicais.

No entanto, tanto o MDL quanto o PSAs esbarram em limitações técnicas. Projetos de MDL de reflorestamento implementados por empresas apresentam variação de mais de 300% entre a quantidade de CO₂ a ser capturada e a quantidade de árvores necessárias para tanto, o que resulta em diferentes estimativas de custos de reflorestamento e da respectiva remuneração por esse serviço (ICLEI, 2005; GERAQUE, 2007). Não consideram a variação de absorção do carbono atmosférico conforme a idade, a espécie e a fisiologia das espécies vegetais empregadas. Dessa forma, esses empreendimentos apresentam divergentes interpretações de sua sustentabilidade e eficácia, uma vez que buscam prioritariamente um nicho mercadológico promissor.

Essas iniciativas apresentariam maior efetividade e sustentabilidade se levassem em consideração a capacidade de armazenamento dos diferentes compartimentos terrestres. Segundo o IPCC, o solo é o compartimento terrestre com maior reserva de carbono. Dentro dos MDL, projetos que visam a adição e manutenção de carbono no solo ainda não são aceitos para países em desenvolvimento, talvez em virtude de pressões e interesses políticos e econômicos dos países desenvolvidos, uma vez que essa aceitação beneficiaria os países em desenvolvimento – sobretudo os tropicais, dotados de solos bastante profundos – com maior potencial para a geração de créditos de carbono.

A quantificação do carbono dos projetos/empreendimentos de reflorestamento ou manutenção das matas (que consideram somente o carbono retido na biomassa), acrescida da quantificação do carbono no solo, resultaria em maior potencial de geração de créditos de carbono, uma vez que este é um elemento que transita entre os diferentes compartimentos da Terra.

Há, contudo, interesse em considerar os créditos de carbono provenientes dos solos agrícolas, como ocorre nos países desenvolvidos. Neste caso, não se atenta para as variações da retenção do carbono no solo, prejudicada em todas as etapas do processo de cultivo, levando ao questionamento da eficiência dos empreendimentos/projetos a médio e longo prazo.

Nesse contexto, os PSAs representam uma tentativa mais eficiente para a obtenção de créditos de carbono, optando por projetos e empreendimentos que

priorizam o manejo do solo que promova a proteção das bacias hidrográficas, a conservação da biodiversidade e o seqüestro de carbono (PAGIOLA, et al., 2005a; PAGIOLA, et al., 2005b).

O carbono no solo é encontrado como carbono mineral e carbono orgânico, sendo que este está incorporado ao solo como matéria orgânica e substâncias húmicas. O aporte, a permanência e a emissão do carbono no solo estão intimamente ligados aos fatores de formação do solo: clima, material parental, geomorfologia, aspectos bióticos e tempo.

São urgentes, neste quadro, diretrizes que norteiem as ações para o seqüestro e a manutenção de carbono no solo em locais/regiões que apresentem melhores potenciais para a geração de créditos de carbono ou pagamento por serviços ambientais, levando em conta a distribuição geográfica do carbono orgânico no solo, conforme os tipos de solo e as diferenças morfológicas do relevo.

O presente estudo apresenta uma análise da distribuição do carbono orgânico no solo relacionada aos compartimentos geomorfológicos do Estado de São Paulo, a fim de verificar a relação entre eles e, dessa forma, discutir as potencialidades para a retenção e/ou armazenamento do carbono em forma de matéria orgânica no solo. Também discute diferenças entre empreendimentos/projetos em áreas naturais e agrícolas e os métodos existentes para a quantificação de carbono orgânico no solo, numa tentativa de colaborar na busca de soluções e escolhas de caminhos adequados às peculiaridades locais e regionais.

1.1. Justificativa

O carbono orgânico no solo possui relação causal com seus fatores de formação, mais particularmente com os aspectos ecogeossistêmicos e seus processos decorrentes. Considera-se que a geomorfologia atua no condicionamento do solo e que o clima age sobre esses compartimentos terrestres de forma a modelá-los. Para delinear as relações atmosfera-carbono-solo a partir de uma análise sistêmica, o emprego dos compartimentos geomorfológicos como base física fornece estruturas heterogêneas para derivação de inúmeras situações potenciais, tendo em vista sua função condicionante. Além disso, os processos específicos produzem diferentes coberturas de alteração, que podem ser enriquecidas ou não

com variadas formas de carbono, que por sua vez sustentam diversas formas de vida.

A integração ecogeossistêmica do compartimento solo constitui importante subsídio para propostas de seqüestro de carbono em projetos de MDL e PSAs, considerando o solo tanto como corpo principal da análise como também associado à cobertura vegetal no seqüestro de carbono. Esta abordagem apresenta alguns aspectos geoambientais relevantes para a implementação de projetos com foco nas mudanças climáticas, para empresas privadas, órgãos governamentais, organizações não-governamentais e sociedade civil que buscam bases técnicas-científicas com vistas ao desenvolvimento sustentável.

1.2. Objetivo

O objetivo do trabalho é apresentar uma análise da distribuição do carbono orgânico no solo relacionado aos compartimentos geomorfológicos do Estado de São Paulo, a fim de verificar a relação entre eles, e:

- discutir as potencialidades para a retenção e/ou armazenamento do carbono em forma de matéria orgânica no solo nas morfoestruturas representativas do Estado de São Paulo, assim como nos tipos de solo, e;
- discutir diferenças entre empreendimentos/projetos em áreas naturais e de cultivo e os métodos para a quantificação de carbono no solo adequados para cada um desses fins.

2. O CARBONO NOS ECOSISTEMAS TERRESTRES

O carbono transita pelos meios bióticos e abióticos, onde é regulado através de redução, reserva e emissão conforme a natureza de cada compartimento. Recombina-se facilmente com outros elementos e sua importância deve-se ao sustento de toda a cadeia de vida na Terra. Há muito tempo tem-se investigado seu comportamento, sendo o primeiro esquema geral de ciclo biogeoquímico (do grego bio = vida, geo = terra e do radical arábico alchimia, químico = mistura de vários sucos) realizado por Jean Baptiste André Dumas, em 1841 (apud RANKAMA e SAHAMA, 1960).

O ciclo do carbono baseia-se: (1) na conversão do CO_2 em fibras ou alimentos pela fotossíntese, (2) no consumo e oxidação dos carboidratos pelos organismos vivos, ressintetizando-os em CO_2 e outros produtos, principalmente no solo e (3) no retorno do CO_2 para a atmosfera pela respiração e decomposição.

Além de fornecer energia e matéria para a vida no planeta, o carbono participa da regulação da atmosfera global e, conseqüentemente, do clima, pois os gases atmosféricos são influenciados pela temperatura, pluviosidade, velocidade do vento, radiação solar, correntes e massas de ar. O clima, portanto, deve ser considerado na análise da evolução dos geossistemas presente e passados.

O ciclo do carbono promove a ciclagem de elementos que são assimilados e fragmentados continuamente pelos organismos vivos, retornando à atmosfera sob a forma de CO , CO_2 e CH_4 e nos oceanos sob a forma de CaCO_3 . Os fluxos e as quantidades de carbono variam conforme as características bioclimáticas e geossistêmicas regionais e/ou locais. A tabela 1 fornece uma estimativa do estoque de carbono na vegetação e no solo dos grandes biomas do globo terrestre.

Tabela 1

Estoque global de carbono na vegetação e no solo (profundidade=1m)

Bioma	Área (10 ⁶ km ²)	Estoque de carbono (Gt C)		
		Vegetação	Solo	Total
Florestas tropicais	17.6	212	216	428
Florestas temperadas	10.4	59	100	159
Florestas boreais	13.7	88	471	559
Savanas tropicais	22.5	66	264	330
Pradarias	12.5	9	295	304
Desertos e semi-áridos	45.5	8	191	199
Tundra	9.5	6	121	127
Pântanos	3.5	15	225	240
Terras agrícolas	16.0	3	128	131
TOTAL	151.2	466	2011	2477

Fonte: Adaptado de WBGU, 1998.

Os ciclos biogeoquímicos são classificados em dois compartimentos, conforme a disponibilidade e quantidade de carbono (ODUM, 1983). O compartimento reservatório é maior, de transferência mais lenta e com grande capacidade de ajuste às mudanças de concentração do CO₂ atmosférico através da fotossíntese e da formação de carbonatos nos oceanos. O compartimento lábil ou de ciclagem é menor, mais ativo entre os organismos e seu ambiente imediato e mais vulnerável às perturbações, tornando frágil o estoque de carbono nele contido.

2.1. O solo

O solo é a camada intemperizada entre a atmosfera e a litosfera, cujos limites horizontais são os corpos de água e as formações litológicas, e os verticais a superfície e a rocha.

Um perfil completo do solo é composto pelos horizontes principais A, E e B em diferentes estágios de evolução, notados através da diferenciação do perfil pelos processos formadores do solo. As camadas do solo são definidas pela sua formação, tanto por adição de material alóctone, como aluvião, como por adição de material autóctone, como matéria orgânica (IBGE, 2007). Segundo a evolução pedogenética, considera-se tanto camada ou horizonte o C, O, H e F; o R designa exclusivamente camada (IBGE, 1995).

Os horizontes diagnósticos superficiais (Tabela 2) podem ser predominantemente orgânicos (horizontes H e O) ou minerais (horizontes A), embora ocorra a translocação de materiais para o horizonte B (iluvial), que conjuntamente com o horizonte E denominam-se como eluviais, conforme a infiltração da água e translocação coloidal.

Tabela 2

Horizontes diagnósticos superficiais, suas características e quantidade de carbono orgânico para classificação

Horizonte diagnóstico	Características gerais	Características principais	Quantidade de carbono orgânico
Horizonte hístico	material orgânico decíduo: espessura \geq 20 cm; quando material vegetal lenhoso, espessura \geq 40 cm; quando sobrejacente a contato lítico, espessura \geq 10 cm	Horizonte H: sob condição de excesso de água por longos períodos Horizonte O: sob condições de drenagem livre e clima úmido	$C \geq 80\text{g/kg}$
Horizonte A chernozêmico	Horizonte mineral superficial, geralmente espesso e de cor escura	alta saturação de bases (\geq 65%), com predomínio de íons de cálcio e magnésio	$79\text{ g/kg} \leq C \leq 6\text{g/kg}$; em presença de carbonato de cálcio \geq 400g/kg; $C \geq 25\text{ g/kg}$ nos 18 cm superficiais
Horizonte A proeminente	semelhante ao A Chernozêmico, com \leq 18 cm de espessura quando mantém sua estrutura em qualquer situação climática	saturação de bases \leq 65%; menos profundo e estrutura dura quando seco	comparável ao A Chernozêmico
Horizonte A moderado	Horizonte mineral superficial	pode apresentar subhorizontes, os quais são inseridos na equação do cálculo do C-org total	$C \leq 79\text{ g/kg}$; para obtenção do C total*, $C \geq 60\text{ g/kg}$
Horizonte A antrópico	formado/modificado pelo uso contínuo com adição de insumos agrícolas	saturação de bases variável	semelhante aos Horizontes A Chernozêmico ou A Húmico
Horizonte A fraco	Horizonte mineral superficial fracamente desenvolvido	desenvolvimento limitado pela escassez de colóides minerais e/ou orgânicos ou pelas condições bioclimáticas extremas, como no semi-árido	$C\text{-org} < 6\text{g/Kg}$

Fonte: Adaptado de IBGE (2007), *equação do C-org para horizonte A húmico.

O horizonte ou camada H constitui-se predominantemente de material orgânico. Mesmo após interferência na estrutura física (como por aração), o teor de matéria orgânica mantém-se elevado, independente da possibilidade de misturar-se com minerais (IBGE, 2007). Pode ser encontrado recoberto por aluvião, depósitos minerais e mesmo em camadas orgânicas mais recentes.

O horizonte ou camada O geralmente ocorre em ambiente altimontano, em locais pouco ou não perturbados, como áreas com vegetação nativa e outros plantios especiais (LEPSCH, 2002). Pode ser subdividido em dois estratos: na porção mais superficial (subhorizonte Oi) estão os detritos mais novos, de pH menos ácido, sobrepostos aos restos mais antigos (subhorizonte Oa), em estágio de decomposição mais avançado (JENNY, 1941; IBGE, 2007).

O horizonte A geralmente possui grande quantidade de matéria orgânica humificada, indicada pela coloração mais escura em relação aos outros horizontes diagnósticos. Devido a sua posição superficial, é vulnerável ao revolvimento (A1), podendo misturar-se com as camadas subjacentes (E e B). Este processo “afofa” a terra para o cultivo, modificando a estrutura física da camada, inclusive dos húmus naturais, que perdem formas lábeis de carbono para a atmosfera (DUCHAUFOR, 1991). Além disso, promovem a compactação da camada subjacente (LEPSCH, 2002).

Os Organossolos são solos que podem ser evoluídos quando apresentam horizontes Ha sápricos de diferentes idades (de 100 Ma, 50-60 Ma, ..., 3 Ma ou mais recentes). Horizontes meio evoluídos He; e pouco evoluídos, Hi. Situam-se em locais pouco ou não drenados com alto teor de umidade. O Sistema Brasileiro de Ciência do Solo – SiBCS (IBGE, 2007), classifica os Organossolos de acordo com as características do Horizonte H (Tabela 3).

Tabela 3
Material orgânico nos estratos dos Organossolos

Diferenciação do material orgânico na humificação/mineralização	Características	Sistema de Classificação Americana dos solos hísticos	Características segundo IBGE (2007) – Organossolos
Fábrico	material vegetal decíduo, cuja forma original é preservada	Hi	reconhecíveis os materiais de origem sem o uso de lupa
Hêmico	restos vegetais parcialmente decompostos, com partes ainda reconhecíveis	He	preserva até $\leq 50\%$ de material orgânico original após a destruição entre os dedos, observado com lupa
Sáprico	húmus com coloração marrom escura e material amorfo	Há	somente com o uso de microscópio ou outros métodos é possível reconhecer o material.

Fonte: adaptado de Kumada (1987) e IBGE (2007).

No horizonte B ocorre o acúmulo de grandes quantidades de materiais advindos das camadas sobrejacentes, resultando em bom desenvolvimento de cor e estrutura (LEPSCH, 2002), esta geralmente mais preservada que a dos horizontes sobrejacentes, daí sua importância para fins de classificação (BRASIL, 1960).

O horizonte C corresponde ao material com 50% de alteração dos constituintes originais da rocha ou material parental (hemisaprólito). O saprólito é pouco alterado pelos processos de formação e suas características são próximas às do material parental (LEPSCH, 2002).

2.2. Carbono no solo

A natureza e a quantidade de carbono no solo estão vinculadas à capacidade de suporte do meio, que tende ao seu particular equilíbrio. É, portanto, intrínseco ao uso da terra, que por sua vez subsidia o desenvolvimento e a permanência de diferentes biomas conforme as condições bioclimáticas e geossistêmicas locais e/ou regionais.

Além de ser um grande compartimento de reserva de carbono continental, o solo é um meio biologicamente ativo, em que as trocas gasosas advindas da respiração dos organismos e das raízes vegetais consomem o oxigênio disponível

nos poros e liberam o gás carbônico, fazendo com que sua concentração seja duas vezes maior em relação à atmosfera (LEPSCH, 2002). O papel do solo como compartimento reserva de carbono pode ser observada de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4

Quantidade de carbono nos compartimentos de reserva/ciclagem

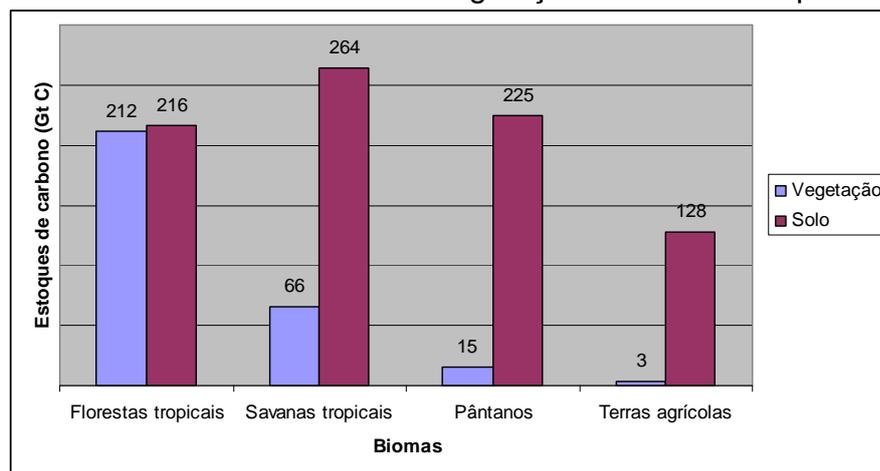
Compartimento	Quantidade (GtC)
Atmosfera	750
Oceano	1.723
Solo	1.600
Vegetação	610

Fonte: adaptado de IPCC, 1995.

As reservas de carbono no solo e na vegetação estão submetidas aos fatores climáticos, edáficos, geográficos e temporais. O carbono no solo supera em 75% os estoques do carbono na vegetação nas savanas tropicais, 93% em pântanos e quase 98% na agricultura. Em relação às florestas tropicais úmidas praticamente se equivalem, com diferença de 2% a favor do solo (Figura 1).

Figura 1

Carbono no solo x na vegetação em biomas tropicais



Fonte: adaptado de WBGU, 1998.

Ambientes úmidos e quentes proporcionam um meio adequado para o desenvolvimento de exuberantes florestas, com árvores sempre verdes que produzem grandes quantidades de serapilheira, rapidamente decomposta neste contexto. Os pântanos são biomas com grandes quantidades de carbono no solo

devido ao processo de decomposição ser inibido pela umidade excessiva do solo. Por outro lado, a vegetação dos climas árido e semi-árido desenvolveu estruturas morfológicas adaptadas (como as folhas adaptadas em espinhos), taxa fotossintética diferenciada (tipo CAM), que evitam a perda de água e o desenvolvimento de raízes profundas capazes de alcançar o lençol freático. A vegetação aporta menor quantidade de matéria orgânica ao solo em comparação às florestas sempre verdes, pois o incremento de material decíduo é bastante inferior ao dessas matas. No entanto, a porção de biomassa abaixo da superfície formada pelas raízes conjuntamente com os microrganismos agrega grandes quantidades de carbono no solo, como se fosse uma mata invertida (soterrada).

A quantidade de carbono no solo de terras agrícolas supera a quantidade encontrada na sua biomassa, porém muitos aspectos devem ser considerados. O tipo de manejo adotado, a adição de insumos agrícolas e a natureza fotossintética da espécie de cultivo são alguns fatores que, conjuntamente, influenciam no conteúdo de carbono no solo.

Segundo Kononova (1975), a adição de esterco e de insumos agrícolas altera a intensificação dos processos de formação e decomposição da matéria orgânica. Em sistemas de cultivo que empregam a queimada, as cinzas que permanecem no local aportam carbono no solo e contribuem para a manutenção das propriedades edáficas, contribuindo com uma melhora deste ambiente ao neutralizar a acidez e disponibilizar os diferentes nutrientes (MALAGON et al., 1976).

Alvarenga et al. (1999) comparou os teores do carbono orgânico e carbono microbiano em solos de cerrado com diferentes usos e manejo, cujos maiores teores ocorreram em cerrados naturais. O pasto nativo apresentou quantidade de carbono orgânico próxima à dos cerrados naturais, devido à abundância de raízes das gramíneas. Os solos com eucalipto apresentaram teores baixos de carbono microbiano em decorrência das substâncias fenólicas que inibem a ação microbiana.

Segundo Odum (1983), a ciclagem dos nutrientes está subordinada à velocidade do processo de humificação que varia em função da latitude. Nos trópicos o maior conteúdo de carbono orgânico ocorre na biomassa, enquanto nas altas latitudes está no solo e na serapilheira.

Volkoff e Cerri (1988) consideraram a temperatura, a acidez do solo e a drenagem os fatores mais influentes na distribuição geográfica dos tipos de húmus dos solos do Brasil. No entanto, o efeito da vegetação foi desprezado, embora a

produção de serapilheira nas zonas tropicais seja de 3 a 5 vezes superior em relação aos climas temperados, principalmente pela maior ocorrência de precipitação (FASSBENDER, 1975).

Os maiores teores de carbono concentram-se nos horizontes superficiais do solo, embora ocorra translocação de matéria orgânica humificada para os horizontes subseqüentes. A matéria orgânica humificada favorece o arejamento e a infiltração de água devido as propriedades coloidais.

“Melanização” é o nome dado ao processo de incorporação da matéria orgânica humificada em profundidade, favorecido pelas raízes e pela bioturbação. Uma parte dessa matéria orgânica sofre rápida reposição e outra parte é estabilizada, tornando-se mais escura. Alguns elementos presentes no solo podem se combinar com a matéria orgânica humificada, como o Ca^{2+} , que forma um horizonte cálcico na base do perfil pela precipitação do $\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$. Dessa forma, os agregados estáveis e de grande dimensão (2-5 mm) tipo “argila 2:1-Ca-MO estabilizada”, inibem a diferenciação do horizonte, afetando o desenvolvimento do solo (DUCHAUFOR, 1991). A matéria orgânica humificada acumulada por longos períodos de tempo intervém na pedogênese e na evolução dos solos.

O carbono no solo é encontrado sob as formas de carbono elementar (porção mineral) e de matéria orgânica. Nos trópicos a matéria orgânica possui papel determinante no ciclo do carbono e também participa da ciclagem de outros elementos.

Segundo Allison et al. (1965), a matéria orgânica é composta por húmus, humatos e restos de vegetais e animais em vários estágios de decomposição e de difícil identificação por se tratar de um material fortemente alterado. O húmus é um produto secundário que, através da mineralização, libera nutrientes minerais importantes para a vegetação.

Jackson (1970) considerou o carbono no solo sob quatro formas: 1) carbonatos minerais e íons derivados de carbonatos mais solúveis (HCO_3^- e CO_3^{2-}); 2) carbono elementar (formas inertes, como o carvão e o grafite); 3) húmus e humatos e, 4) resíduos orgânicos.

Odum (1983) considerou que o carbono orgânico no solo constitui o compartimento lábil, referindo-se, portanto, somente às formas orgânicas e de rápida humificação.

Duchaufour (1991) atribuiu o termo “stations” aos locais caracterizados por quantidades homogêneas de húmus, os quais são condicionados pela serapilheira, material mineral, clima e condições hídricas, sendo que um fator pode sobrepujar o outro conforme a natureza local.

A serapilheira é responsável pelo maior aporte de carbono ao solo, em torno de 60 Gt/ano. A contribuição de outros fatores, como o intemperismo do material parental e a respiração microbiana e radicular, é bastante inferiores em função das características ambientais locais e regionais.

A perda ou output de carbono para a atmosfera é de 1 a 2 Gt/ano pela oxidação da matéria orgânica. Para Fassbender (1975), a absorção de nutrientes e a produção dos tecidos vegetais em biomas maduros são comparáveis à produção da serapilheira, sendo sua composição indicativa da quantidade e qualidade do processo de humificação, uma vez que seus componentes podem tanto ativar a ação microbiana quanto inibi-la (DUCHAUFOR, 1991). Por outro lado, para Smith et al. (1998) somente uma quantidade fixa de carbono pode ser incorporada pelo solo, salvo mudanças de uso quando um novo limite é estabelecido, como na substituição do plantio direto pelo o manejo convencional.

Duchaufour (1991) enfatizou a influência da composição da serapilheira sobre a velocidade de decomposição, na fertilidade do solo e na diversidade da biota a partir de dois tipos de substrato (Tabela 4). Substrato tipo mull, proveniente da serapilheira “melhorativa” composta por grande diversidade de espécies vegetais, é rapidamente decomposto; o tipo moder ou mor, da serapilheira “acidificante”, tem decomposição lenta.

Tabela 4

Características e propriedades de serapilheira melhorativa e acidificante

MULL - melhorativa	MODER – acidificante
agregados geralmente grandes e estáveis	não possui a agregação típica dos solos com mull
decomposição e humificação rápidas	humificação muito lenta
atividade dos actinomicetos	mineralização lenta, basicamente fúngica
grande teor de ácidos húmicos.	Pequena quantidade de AHs e AFs
formação de complexos argilo-húmicos	migração dos ácidos em profundidade, provocando a eluição de certos constituintes minerais
pH neutro	pH < 5
diversidade de fauna com riqueza de minhocas	fauna caracterizada por artrópodes e ausência de minhocas

MULL - melhorativa	MODER – acidificante
elevado grau de saturação	grau de saturação muito baixo
80% de compostos neoformados e 20% de transferidos	compostos neoformados < 20% em relação aos transferidos
Rico em nitrogênio, razão C/N próxima de 10	rico em carbono, razão C/N próxima de 30-40

Fonte: adaptado de Duchafour (1991).

A serapilheira “melhorativa”, rica em nitrogênio e carboidratos, contém taninos hidrolizáveis de decomposição rápida, que vão diminuindo de concentração com a profundidade e melhoram o substrato. As gramíneas e leguminosas são os principais vegetais que aportam material. A serapilheira “acidificante” é pobre em nitrogênio, tem alto teor de lignina e lipídeos (de efeito alelopático aos decompositores), poucos compostos fermentáveis e apresenta taninos condensados que bloqueiam a mineralização das proteínas e promove efeito negativo ao substrato. Entre os vegetais que somam ao sistema estão os resinosos, como o *Pinus sp.* e o *Eucalyptus sp.* Dessa forma, em florestas plantadas, a situação de dominância das espécies vegetais pode resultar em baixa atividade microbiana. O material vegetal de uma floresta de *Eucalyptus* libera substâncias alelopáticas, inibindo o crescimento de plantas e microrganismos. Como consequência, ocorre diminuição da reserva de carbono no solo.

De acordo com Fassbender (1975), a composição química da serapilheira também varia com a idade das espécies que a compõem. Os tecidos vegetais são compostos por aproximadamente 90% de água e 10% de matéria seca, sendo que desta praticamente 90% são formas de carbono, oxigênio e hidrogênio. O resto são geralmente nutrientes (N, P, Ca, K, Mg). Os tecidos mais novos possuem mais carboidratos e proteínas e a porção lenhosa tem grandes quantidades de compostos fenólicos sob a forma de lignina e celulose. Plantas senis contêm mais lignina.

Segundo Kononova (apud Fassbender, 1975) os componentes orgânicos da serapilheira podem ser diferenciados pelas seguintes classes:

1. Carboidratos: compõem os tecidos de sustentação e condução das plantas e também as substâncias de reservas na forma de monossacarídeos e derivados, oligossacarídeos e polissacarídeos;
2. Lignina: componente básico dos tecidos lenhosos e de sustentação das plantas constituídos por aminoácidos e oligopeptídeos derivados. Dentro deste grupo estão as proteínas e as enzimas;

3. Graxas, ceras e resinas: são substâncias de reserva que se acumulam em diferentes órgãos das plantas, especialmente nas sementes.
4. Outros compostos: pigmentos, hormônios e alcalóides, que participam com pouca intensidade no processo de humificação.

O processo de humificação ocorre com a decomposição da serapilheira, decomposta em polímeros orgânicos contendo nitrogênio, fósforo, enxofre e sais minerais livres (Ca, Mg, K, Na, entre outros). Todas estas substâncias têm as mesmas características – são moléculas grandes e muito complexas, decompostas por enzimas microbianas. No entanto, diferem na velocidade da sua humificação, sendo rapidamente decompostos os carboidratos solúveis, amidos, celulosas, proteínas, aminoácidos e açúcares; as ceras, resinas e taninos decompõem-se lentamente, assim como as ligninas, que são vagarosamente biodegradadas e transformadas em carvão fóssil (DUCHAUFOR, 1991). Após esta etapa ocorre a separação final dos compostos orgânicos e a liberação dos minerais. Nos solos, os polissacarídeos de origem microbiana são mais encontrados que os de origem vegetal, pois estes se degradam rapidamente (FASSBENDER, 1975).

No processo de degradação e despolimerização os compostos são quebrados até seus constituintes básicos. Uma parte é mineralizada e a outra se mantém como matéria orgânica inalterada. Processos subseqüentes de humificação provocados pelo ataque de microrganismos produzem novos componentes, por meio de ressíntese biológica, conhecidos por ácidos húmicos (FASSBENDER, 1975). Sob condições naturais a humificação é delineada conforme a influência da biota, condições hidrotermais e propriedades químicas e físico-químicas associadas.

Kononova (1975) considerou decisivas as condições hidrotermais sobre o processo da decomposição, em que a mais alta intensidade de decomposição ocorre sob condições de temperaturas moderadas (por volta de 30°C) e umidade do solo entre 60-80%. A taxa de decomposição varia sob a ocorrência simultânea da temperatura e umidade em relação aos seus valores ótimos. Se um dos dois fatores tenderem ao mínimo, há queda na taxa de decomposição; se um dos fatores permanecer no intervalo ótimo a intensidade da decomposição depende essencialmente do outro fator. Esta afirmação indica que nos trópicos as condições hidrotermais do solo sob vegetação natural (floresta, cerradão, cerrado sujo e cerrado limpo) podem-se manter e, com isso, propiciar uma velocidade ótima da humificação sob temperatura que pode atingir os 30°C.

Chuvas da época de verão contribuem para a atividade decompositora da biota. Períodos caracterizados pelo déficit hídrico deprimem a atividade dos microrganismos, fazendo com que as substâncias decompostas não sofram mais ressíntese. Essas substâncias tardias (que reagem com a porção mineral) ficam pouco disponíveis aos microrganismos. Pouco húmus indica a alta taxa de decomposição da matéria orgânica e também a baixa capacidade de troca catiônica do solo (KONONOVA, 1975).

A matéria orgânica sofre transformação contínua, dando origem a novos compostos orgânicos, mas pode ser subdivida em substâncias menores de acordo com seu grau de decomposição. Kononova (1975) propôs um sistema de classificação da matéria orgânica do solo, cuja divisão se dá em dois grandes grupos (Tabela 6).

Tabela 6

Classificação das substâncias orgânicas no solo

I. Resíduos de plantas e animais frescos e incompletamente decompostos	
II. Húmus	a) Substâncias estritamente húmicas ác. húmicos, ác. fúlvicos, huminas, ác. himatomelânico
	b) Produtos de resíduos orgânicos de avançada decomposição e produtos da ressíntese microbiológica proteínas, carboidratos e derivados, graxas e óleos, tanina e lignina

Fonte: adaptado de Kononova (1975).

Kumada (1987) analisou os solos ácidos do Japão ricos em hidróxido de alumínio, derivados de material vulcânico e observou uma seqüência de processos de humificação, iniciada com a fragmentação do material vegetal decíduo, o escurecimento da cor do material, a diminuição da razão entre carbono e nitrogênio e a coloração de marrom escuro a preto das substâncias amorfas. Os ácidos húmicos desses solos são mais complexos que os provenientes de outro material parental, possuindo considerável quantidade de ácido húmico cinza e marrom, diferindo dos solos não vulcânicos, que possuem somente os ácidos marrons (KONONOVA, 1975).

No processo de mineralização os microrganismos produzem inúmeras enzimas que decompõem os elementos em aminoácidos, que tão logo podem ser: 1) metabolizados pelos microrganismos, 2) adsorvidos por argilas e formar complexos

organo-minerais, 3) incorporados na fração do húmus, 4) absorvidos pelas plantas, 5) lixiviados, e 6) mineralizados até transformarem-se em amônia, que pode produzir compostos simples como CO_2 , H_2 , CH_4 e H_2S conforme o aminoácido originário. A mineralização dos derivados das ligninas ocorre em menor velocidade e com maior grau de complexidade. De forma geral, a maior parte dos compostos da matéria mineralizada são simples e não polimerizados (FASSBENDER, 1975).

2.3. Substâncias húmicas

São produtos da transformação do material orgânico do solo que apresentam considerável resistência à ressínteses. Constituem a fração coloidal da matéria orgânica obtida por síntese microbiana e química da serapilheira.

A umidade influencia a natureza e a composição das substâncias húmicas. Hilgard (1906) verificou baixa quantidade de húmus com alto conteúdo de nitrogênio nas regiões secas e, nas regiões úmidas, solos ricos em húmus com baixo teor de nitrogênio. Os mecanismos de condensação e polimerização, predominantemente dos ácidos fúlvicos são retardados sob umidade excessiva e reação ácida do solo. Sendo assim, nos solos ferralíticos ricos em serapilheira, sob condição de alternância de umidade, há predominância dos ácidos fúlvicos e os ácidos húmicos são pouco condensados (KONONOVA, 1975).

A natureza e distribuição das substâncias húmicas pode ser obtida, em laboratório, através das porcentagens de carbono e nitrogênio, pela razão C/N, pelo conteúdo de ácido húmico (AH), ácido fúlvico (AF) e a pela razão AH/AF (KONONOVA, 1975). As substâncias húmicas também são classificadas conforme sua solubilidade (Tabela 5) e seu peso molecular, que evolui gradativamente na ordem dos menos polimerizados para os mais polimerizados: ácido fúlvico < ácido húmico < humina.

Tabela 5

Classificação dos ácidos húmicos segundo a solubilidade e conteúdo de carbono (SCHEFFER e ULRICH, 1960)

Características	Ácidos fúlvicos	Ácidos húmicos			
		Ác. himatomelânico	Ác. húmico pardo	Ác. húmico cinza	Humina
Cor	amarelo-avermelhado à marrom	marrom	marrom escuro	cinza-preto	Preto
Solubilidade em brometo de acetila	solúvel	solúvel	insolúvel	insolúvel	Insolúvel
Solubilidade em água	solúvel	insolúvel	insolúvel	insolúvel	Insolúvel
Solubilidade em álcool	solúvel	solúvel	insolúvel	insolúvel	Insolúvel
Solubilidade em soda	solúvel	solúvel	solúvel	solúvel	Insolúvel
Conteúdo de carbono	43-52%	58-62%	50-60%	58-62%	–

Fonte: Adaptado de Scheffer e Ulrich (1960 apud FASSBENDER, 1975; KONONOVA, 1975).

Ácido húmico (AH)

Os ácidos húmicos (AH) são geralmente polímeros de alto grau com cargas negativas que formam colóides esferoidais de alto peso molecular. Distinguem-se duas partes em sua estrutura: uma aromática, derivada da decomposição microbiana da lignina e da síntese microbiana; e outra nitrogenada, do tipo aminoácidos ou peptídeos obtidos diretamente da síntese de produtos de microrganismos ou dos produtos de degradação da síntese de proteínas pelos microrganismos das plantas superiores (FASSBENDER, 1975). O núcleo, constituído por anéis aromáticos com grande quantidade de nitrogênio, é a parte mais resistente da molécula a qualquer tipo de alteração. A zona periférica é formada por cadeias abertas mais vulneráveis à alteração. Seu caráter ácido ocorre principalmente pela presença dos radicais COOH e OH (FASSBENDER, 1975). Em geral, contém mais C (entre 50-63%) e N (entre 1,5-5%) e menos H, S e O quando comparados aos ácidos fúlvicos. Os ácidos húmicos constituem sistemas coloidais de elevada capacidade de troca catiônica, efeito tamponizante, alta retenção de água, atuam como ácidos fracos e originam agregados expansíveis (JENNY, 1980).

Os AH possuem formas diferenciadas, como os ácidos hematomelânicos, que são formas menos polimerizadas, pouco estáveis e pouco ricas em substâncias alimentares para os microrganismos; os ácidos húmicos pardos são mais polimerizados e se ligam mais às argilas; os ácidos húmicos cinzentos são mais ricos e conferem maior fertilidade ao meio.

O processo de humificação sugere que ocorre certa evolução das substâncias húmicas, pois algumas características são acentuadas conforme a dinâmica do processo, geralmente na ordem:

AF → ác. himatomelânico → AH pardo → AH cinza → humina

A coloração tende a ficar mais escura, e ocorrem diferenciações no tamanho das partículas, no grau de polimerização, no peso equivalente e no peso atômico total. Também, há diminuição da solubilidade destas substâncias, assim como da acidez. Quanto mais condensadas as formas, mais maduras.

Ácido fúlvico (AF)

Os ácidos fúlvicos compreendem as substâncias húmicas que permanecem livres após floculação dos AHs por acidificação do meio. São semelhantes aos ácidos húmicos, porém são formas menos polimerizadas do aqueles e têm menor peso molecular. Os ácidos fúlvicos são compostos fenólicos (polissacarídeos e constituintes de proteínas) com predomínio de cadeias periféricas, sendo sua estrutura aromática fracamente expressa. Os polissacarídeos podem constituir mais de 30% do carbono nos ácidos fúlvicos (FASSBENDER, 1975). É observada a predominância dos ácidos fúlvicos na composição do húmus em condições de alta atividade biológica. Migram facilmente por não se ligarem às argilas.

Humina

As huminas são substâncias maduras fortemente unidas aos minerais de argila, sendo possível a sua extração somente em NaOH quente (FASSBENDER, 1975).

2.3.1. Propriedades coloidais

O solo é um sistema aberto composto por minerais, matéria orgânica, água e/ou ar. Ao longo do tempo, a sucessão dos processos exogênicos e endogênicos específicos promovem a diferenciação das coberturas de alteração intempérica (CAIs) (JIMÉNEZ-RUEDA, 2003), reconhecíveis pela pedostratigrafia dos conjuntos e sequências de camadas de alteração. Nesse ambiente ocorrem processos específicos de diferenciação das unidades de alteração intempérica (UAIs).

O húmus possui alta densidade de cargas elétricas, conferindo-lhe propriedades coloidais pela capacidade de troca catiônica. São importantes, portanto, para o equilíbrio entre as cargas elétricas e a pedogênese.

Colóide é a denominação química para partículas pequenas ($< 0,002 \text{ mm} = 2 \mu\text{m}$), em que se enquadram as argilas e o húmus. Possuem grande superfície específica como consequência do alto grau de subdivisão, podendo tanto reagir como interagir com íons disponíveis no meio. A troca catiônica ocorre entre as cargas advindas do intemperismo do material parental, da decomposição da serapilheira e da atração com as moléculas de água.

Os argilominerais tendem a adsorver a matéria orgânica humificada, o que torna efetiva a sua incorporação no meio, além de torná-la indisponível aos microrganismos. Entre os cátions adsorvidos em maior quantidade nos colóides estão os básicos Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} e os ácidos H^{+} e Al^{+3} . A importância de alguns desses minerais e sua interação com a matéria orgânica humificada impõem certa ênfase que será dada a eles.

Sílica

Sua alteração libera o ácido monossilícico (SiO_4H_4), solúvel, que toma a forma amorfa ou cristalina com certa rapidez. A sílica, diferente do alumínio e do ferro, é fortemente reciclada pela vegetação e também está sob influência do tipo de serapilheira (mull ou moder).

Em meios suficientemente confinados, a sílica solúvel é adsorvida pelo alumínio insolúvel (ou pouco solúvel, com $\text{pH} > 5$), formando uma mistura de alumínio-sílica, que evolui para os alófanos (quando a matéria orgânica humificada freia a cristalização) ou

argilas de neoformação. Quando livre, sofre os processos de monosialitização ou bisialitização, segundo o pH.

Oxihidróxidos de Alumínio

O íon trocável Al^{+3} é substituído por íons $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ e (OH) , formas menos trocáveis. Esses íons desempenham o papel de cátions de ligação entre as argilas e o húmus, assim como ocorre com o ferro.

Os óxidróxidos insolúveis, tanto no estado amorfo quanto no cristalino, só existem em relativa abundância em certos solos ou horizontes. A evolução das formas amorfas para as formas cristalizadas depende da quantidade de matéria orgânica humificada presente no meio, cujo poder inibe a cristalização do Al e Fe (MELFI et al., 1979; DUCHAUFOR, 1991). Kononova (1975) atribui ao Al e ao Fe o impedimento da transformação da matéria orgânica. A forma cristalina do alumínio (gibbsite) predomina nos solos ferralíticos, evoluindo em meio muito drenado e pobre em matéria orgânica.

Oxihidróxidos de ferro

Resultam da alteração dos minerais ferro-magnesianos. Sua evolução ocorre conforme a aeração do meio e a presença de matéria orgânica humificada. Formas insolúveis como o $\text{Fe}(\text{OH})_2$ são abundantes em meio bem aerado e biologicamente ativo (mull). As poucas formas iônicas (Fe^{3+}) solúveis são relacionadas aos solos muito ácidos ou mal aerados (podzólicos e hidromórficos) e evoluem rapidamente para os íons oxidróxidos complexos ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) amorfos. A presença de matéria orgânica humificada pode inibir a cristalização. Geralmente os óxidos férricos permanecem livres e se integram pouco às argilas, com exceção das montmorillonitas ferríferas dos vertissolos e certas cloritas.

Em meio aerado tipo mull, a evolução dos íons férricos para as formas insolúveis ocorre imediatamente; o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ se associa às argilas sob formas amorfa e cristalina e desempenha o mesmo papel de cátion de ligação que o alumínio em meio aos agregados de argila-ferro-húmus (melanização). Se o húmus é moder, a diversidade de compostos orgânicos favorece a formação de formas móveis, que migram em profundidade. O ferro se acumula no horizonte B (espódico) sob a forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo (podzolização) (DUCHAUFOR, 1991).

Na ausência ou em pequena quantidade de matéria orgânica humificada a cristalização dos óxidos de ferro amorfos é completa e rápida, favorecida pela alternância de umidade e de ressecamento e pelas temperaturas elevadas do pedoclima; as formas cristalizadas, muito coloridas, dão aos solos de climas quentes cor muito viva (ocre ou vermelho). As duas principais formas cristalinas do ferro são a goethita (com pouca matéria orgânica) e a hematita (DUCHAUFOR, 1991).

Cálcio e Sódio

O cálcio atua na decomposição da matéria orgânica e geralmente está associado ao aumento do pH do solo. Pequena quantidade de sódio trocável também aumenta a taxa de decomposição pela conversão parcial de substâncias húmicas para formas solúveis, disponíveis aos microrganismos. Já grandes quantidades de sódio trocável resultam na diminuição da aeração e inibem a atividade microbiana (KONONOVA, 1975).

2.4. Métodos de quantificação do carbono do solo

Os métodos químicos para quantificação de carbono são amplamente usados para diagnosticar a fertilidade dos solos, respondendo claramente a uma preocupação agrícola de produtividade da terra. Grande parte dos métodos foram desenvolvidos para atender demandas agrícolas e, face aos desafios contemporâneos das mudanças climáticas globais, são adotados para auxiliar o entendimento do comportamento do carbono no solo.

Machado (2005) discutiu que os procedimentos usuais para a quantificação do estoque de carbono no solo são trabalhosos e pouco precisos, urgindo o desenvolvimento de métodos analíticos rápidos, de baixo custo, precisos e portáteis para a quantificação in situ e em tempo real do estoque de carbono.

Os procedimentos de coleta em campo e os tratamentos prévios à análise devem ser feitos cuidadosamente. Não existe uma regra exata, e variações podem ocorrer no momento da coleta em campo, por influência do coletor, e na leitura dos resultados em laboratório, dificultando a comparação entre os dados obtidos e outros trabalhos.

Segundo Broadbent (1965), deve-se ter cautela na análise entre os teores de carbono de diferentes solos, assim como entre diferentes horizontes de um mesmo perfil. Para a comparação entre dados de diferentes trabalhos científicos, deve-se verificar o método empregado em laboratório e adotá-lo durante toda a análise. Na coleta de campo, deve-se anotar observações das condições climáticas, geomorfológicas e ambientais para posterior análise e interpretação sistemática dos dados obtidos (KUMADA, 1987).

O IPCC (1996) orienta que a quantificação de carbono do solo seja efetuada até a profundidade de 30 cm e sem considerar os carbonatos, eliminados com tratamento prévio.

Com base nos trabalhos de Allison (1965), Allison et al. (1965), Jackson (1970), EMBRAPA (1991) e IBGE (2007), as considerações a seguir são relacionadas aos tratamentos químicos amplamente utilizados para a análise e quantificação do carbono nos solos.

Carbono total (C-total)

O carbono total nos solos inclui as quatro formas: carbonatos minerais (calcita e dolomita) e íons derivados de carbonatos mais solúveis (HCO_3^- e $\text{CO}_3^{=}$), carbono elementar, húmus, humatos e resíduos orgânicos (JACKSON, 1970).

Sua determinação ocorre através de combustão por via seca ou úmida, que difere conforme os instrumentos, processos e detalhes inerentes a cada via. Em ambas as vias, o carbono total do solo é convertido em CO_2 . Sua determinação é geralmente obtida por titulação (via úmida) ou gravimetria (via seca), e ambas apresentam resultados concordantes. Esses métodos são largamente utilizados.

Via úmida

A combustão por via úmida necessita de instrumentos que ocupam muito espaço em laboratório, tornando-se desvantajosa se não utilizada constantemente, mas não há dificuldades para a obtenção de tais instrumentos. O método ocorre pela digestão do carbono total por ácido crômico ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) misturado ao ácido sulfúrico (H_2SO_4) e fosfórico (H_3PO_4). O procedimento dura aproximadamente 25 minutos e não apresenta problemas quanto à remoção dos carbonatos.

Via seca

A combustão por via seca é feita em forno especial (resistente ou de indução) de custo elevado, o que torna onerosa a sua obtenção. Os procedimentos são os mesmos para ambos os fornos e os resultados obtidos são similares. A única diferença é que o forno por indução não necessita de pré-aquecimento. A determinação por via seca promove completa oxidação do carbono total e também de outros elementos contidos na amostra. O CO₂ desprendido da queima é absorvido por Ascarita ou outro absorvente e depois determinado por gravimetria. Os outros gases formados durante a combustão, como os resultantes da decomposição dos carbonatos, são removidos com uma corrente de O₂. Neste método todas as formas de carbono do solo são quantificadas como um só valor (EMBRAPA, 1991).

Carbono orgânico (C-org)

O teor de carbono orgânico no solo indica a quantidade de matéria orgânica aí acumulada. É a chave para critérios diagnósticos em solos orgânicos e caracterização de vários horizontes diagnósticos superficiais.

Para sua quantificação, adiciona-se dicromato de potássio à amostra para a oxidação do carbono orgânico. O meio deve ser ácido e a temperatura elevada para queimar o carbono em CO₂. O excesso de dicromato de potássio é medido em função da quantidade de sulfato ferroso gasta para sua titulação.

Matéria orgânica (MO)

Sua determinação pode ser feita por métodos diretos e drásticos (queima a 500°C ou digestão com água oxigenada), que apresentam muitas limitações (IBGE, 2007). Segundo EMBRAPA (1991), a medição da amostra é volumétrica, a determinação é colorimétrica e os resultados expressos em porcentagem, ou então em gramas de matéria orgânica por 100 cm³ de solo. No entanto, quando o objeto da análise é puramente a matéria orgânica, torna-se conveniente o emprego da titulação para obtenção de resultados mais precisos. A análise de rotina da matéria orgânica inclui os materiais orgânicos que acompanham a amostra após o peneiramento, perfazendo a fração humificada do solo.

O método para a quantificação da matéria orgânica é o mesmo para a determinação do carbono orgânico. Considera-se que a matéria orgânica possui

58% de carbono, multiplicando o carbono orgânico pelo fator convencional de “Van Bemmelen” (1,724); porém este fator deve ser tomado como uma aproximação. Este procedimento é bastante difundido e amplamente adotado no Brasil.

Este método quantifica outras formas de carbono (inorgânico) existentes no solo, tais como carvão e alguns resíduos de plantas não humificadas, o que influencia o resultado final. Neste método, os carbonatos devem ser eliminados previamente da amostra. O procedimento por peneiramento é simples e proporciona a redução dos fragmentos de calcáreo (de matriz não calcárea). Para solos calcáreos, a subtração pode ser feita com uma amostra testemunha e outra amostra determinada. A amostra testemunha costuma ter por volta de 0,8-1,2 mg de CO₂, devendo ser adotado valor padrão de 1,0 mg de CO₂. Consta na literatura que este método de determinação seja razoável.

O método, originalmente desenvolvido por Schollenberger em 1927 e modificado por Walkley e Black em 1946, envolve a digestão do excesso de ácido crômico e subsequente titulação do excesso do agente oxidante. Tem sido amplamente usado devido a sua simplicidade (KUMADA, 1987), pois não exige aparatos complexos e nem demanda muito tempo. A via úmida oxida o carbono de forma incompleta, sendo necessário o uso de um fator de correção que possibilite a comparação de resultados entre os métodos de via seca e úmida. A titulação também está sujeita a erros quando há presença de elementos oxidáveis (Cl, Fe e Mn).

Também a espectrometria infravermelha é empregada para a identificação das substâncias húmicas através da medida da absorção da luz infravermelha de uma amostra (FASSBENDER, 1975).

A determinação das substâncias húmicas ocorre a partir da fração dos ácidos húmicos (precipitáveis por H₂SO₄ e solúveis em meio alcalino) e dos ácido fúlvicos (solúveis em meio ácido) extraídos do solo por um sal alcalino (pirofosfato de sódio).

A relação E4/E6 expressa o grau de condensação das moléculas húmicas conforme a alternância de umidade. A razão C/N também é utilizada como método para caracterização da matéria orgânica no que tange os diferentes tipos de substâncias húmicas e na avaliação do grau de sua alteração. À medida que aumenta a decomposição da matéria orgânica, diminui a razão C/N do solo. O alto conteúdo de ácidos húmicos implica em alta razão C/N; a predominância dos ácidos fúlvicos é indicada pela menor razão C/N e maior fertilidade do solo. Quando a razão

C/N é elevada (> 30), os microorganismos não mineralizam o nitrogênio orgânico, entrando assim em competição com as plantas pelo nitrogênio disponível no solo. No entanto, a razão C/N pode variar dependendo do cuidado na remoção dos resíduos vegetais semidecompostos da amostra.

Análises da fração humina podem ser realizadas através de isótopos de ^{14}C . Além disso, os fragmentos de carvão identificam os vegetais pela técnica de antracologia (PESSENDA et al., 2005).

2.5. Estudo do carbono nos solos do Estado de São Paulo

Os estudos sobre o carbono nos solos de São abrangem diferentes escalas, que vão desde a quantificação do carbono microbiano, do fracionamento dos ácidos húmicos até a interpretação de imagens de satélite.

Estudos que relacionaram o teor de carbono no solo com manejos agrícolas são variados, como Orlando et al. (1977) que utilizaram determinação colorimétrica e verificaram grande variabilidade do carbono orgânico em solos submetidos ou não a calagem; Souza e Melo (2003) verificaram a resposta da matéria orgânica em Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho através de via úmida, pelo dicromato de potássio em meio ácido e pela extração e fracionamento das matérias húmicas por solubilidade; La Scala (2007) registrou as emissões de CO_2 provenientes de diferentes manejos do solo com uma câmara acoplada a um sistema portátil de fotossíntese (LI-6400) que analisa a concentração do gás através de espectroscopia de absorção óptica.

Outras pesquisas investigaram possíveis soluções aos problemas causados por resíduos de diversas naturezas, cuja adição aos solos visa o aumento de seu estoque de carbono e da fertilidade. Jiménez-Rueda et al. (1992) adicionaram resíduos de granja em Latossolo Vermelho-Amarelo e, a partir da determinação dos ácidos húmicos, verificaram a cimentação ocasionada pelos ácidos fúlvicos na camada de alteração, limitando o desenvolvimento radicular de culturas; Almeida (2001) utilizou uma câmara no solo para a captura dos gases da atividade microbiana, provenientes da decomposição de resíduo de indústria de sílica-gel e vinhaça incorporado ao solo, cuja leitura foi realizada por espectroscopia de absorção óptica; em estudo de Cerri et al. (2004), compararam as estimativas de

dois tipos de manejo (sem resíduos de cultura e com resíduos de cultura) ; Boeira e Souza (2007) incorporaram lodo proveniente de dois tratamentos de esgoto (de origem doméstica e urbano-industrial) e analisaram os teores de carbono orgânico por de via seca.

Estimativas do potencial de seqüestro de carbono realizadas por Szakács (2003) em Neossolos sob pastagem através da resposta espectral de imagem de satélite Landsat 7 e análise radiométrica por espectro do infravermelho médio, não obtiveram bons resultados com o emprego da imagem; Caetano et al. (2006), verificaram altos teores de matéria orgânica nas coberturas de alteração intempérica da planície de inundação do rio Moji-Mirim a partir do comportamento espectral na faixa do visível, cujo método de trabalho combinou imagens de satélite, verificação em campo e testes de reflectância em laboratório, permitindo a identificação de padrões de resposta bem definidos, nos quais a matéria orgânica se destacou por apresentar cor cinza/preta.

Silva et al. (2007) analisaram as quantidades de carbono ao longo de topossequência em Latossolos utilizando extração de ácidos húmicos, determinação dos radicais livres do tipo semiquinona, quantificação gravimétrica do carbono em fragmentos de carvão e testes C/N, que indicaram o processo de humificação em profundidade.

Para Machado (2005), se destacam as funções de pedotransferência para estimar a densidade do solo. Os marcadores isotópicos podem ser empregados para mapear o fluxo do carbono entre os diferentes compartimentos a partir do material vegetal. As plantas C3 e C4 apresentam diferentes razões $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$, sendo que as C3 apresentam maior conteúdo de ^{13}C , entre 25 e 30% em relação às C4 (^{13}C entre -8 a -18%) (CERRI, 1986; VOLKOFF e CERRI, 1988).

2.5.1. Aspectos físicos

O Estado de São Paulo localiza-se na região sudeste do Brasil, entre os paralelos 19°47'S a 25°14'S e meridianos 44°10'W a 53°70'W.

Geologia

O Estado de São Paulo está geologicamente inserido no contexto sedimentar da Bacia do Paraná (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI, 1994). Afloram rochas

devonianas até sedimentos cenozóicos, com o embasamento cristalino, de natureza granítico-gnáissica, a sudeste.

O pacote sedimentar mais antigo que aflora no estado é o Grupo Paraná, de idade devoniana. É constituído por arenitos amarelados, médios a grossos da Formação Furnas (parte basal) e por folhelhos, siltitos e arenitos da Formação Ponta Grossa (parte superior). Este pacote reflete uma sedimentação de ambientes continentais fluviais na base e uma influência marinha em direção ao topo.

Durante o permo-carbonífero, e sobrepondo-se discordantemente ao Grupo Paraná, depositaram-se os grupos Itararé e Guatá. O Grupo Itararé, de idade neocarbonífera a eopermiana, é caracterizado por turbiditos e diamictitos com intercalações de pacotes arenosos, refletindo as condições glaciais de sua sedimentação. O Grupo Guatá, de idade neopermiana, é constituído por arenitos associados a camadas de carvão, siltitos e folhelhos carbonosos da Formação Rio Bonito (parte basal) e por siltitos e siltitos arenosos da Formação Palermo (parte superior), num episódio transgressivo de sedimentação.

A deposição do Grupo Passa Dois encerra a sedimentação paleozóica no Estado de São Paulo, sendo constituído por folhelhos e argilitos escuros, folhelhos betuminosos e calcários da Formação Irati (parte basal) e por argilitos, folhelhos e siltitos cinzas e arroxeados da Formação Corumbataí (parte superior).

Acima do Grupo Passa Dois depositou-se o Grupo São Bento. No Triássico depositou-se a Formação Pirambóia, constituída por arenitos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, médios a finos com estratificações cruzadas, acumulada sob sistemas continentais flúvio-eólicos. No Jurássico, um extenso campo de dunas recobriu essa área, acumulando os arenitos avermelhados, finos a médios da Formação Botucatu. No Eocretáceo, o volumoso derrame basáltico da Formação Serra Geral recobriu essa região.

O Grupo Bauru corresponde à seqüência suprabasáltica no Estado, de idade eo-neocretácea, constituído por arenitos, conglomerados, argilitos e calcários de cores arroxeadas, depositados sob influência continental fluvial e lacustre.

Ainda, existem depósitos cenozóicos da Formação Rio Claro, constituídos por arenitos conglomeráticos mal consolidados e argilitos vermelhos, possivelmente de origem continental com condições climáticas semi-áridas.

Clima

Segundo Setzer (1966), São Paulo apresenta os seguintes climas dominantes, conforme a classificação de Koeppen: Af, Aw, Cwa, Cwb, Cfa e Cfb, apresentados na figura 1, obtida através da compilação de dados de estações do INMET, DAEE e CPTEC relativos a um período de coleta entre 1961-1990 (Figura 2). Essa diversidade deve-se a posição geográfica, geomorfologia diversificada e diferentes massas de ar que condicionam o Estado de São Paulo.

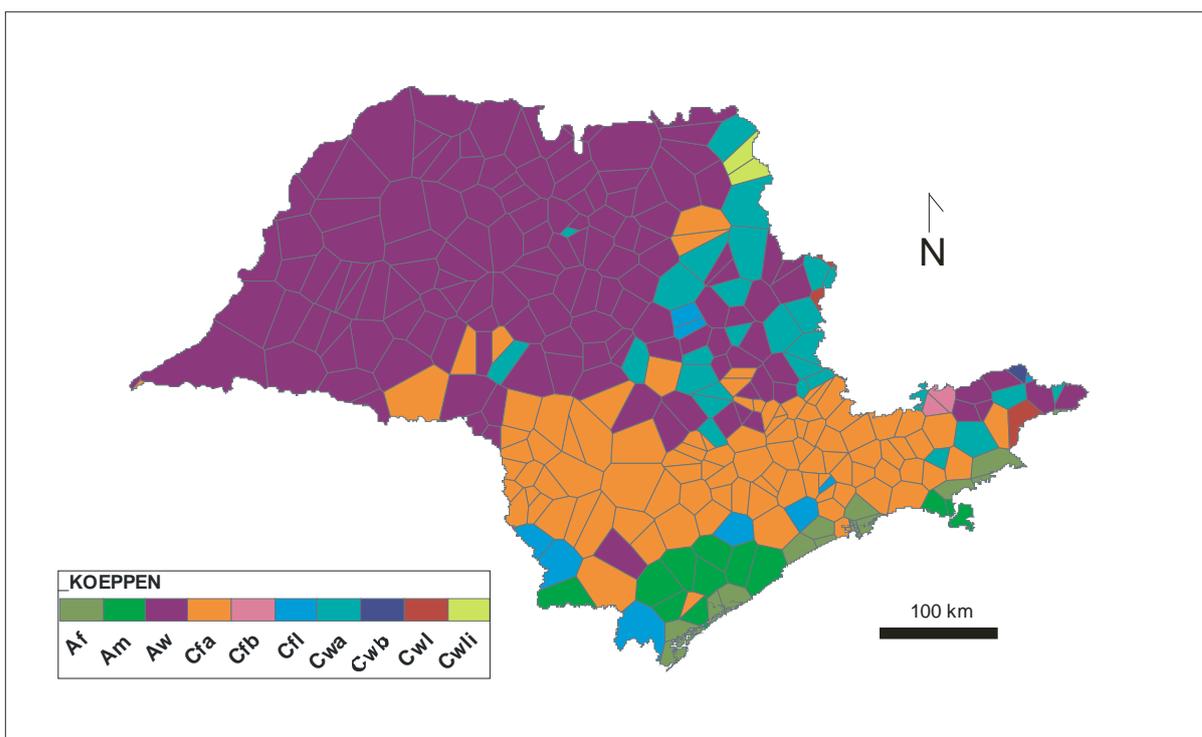


Figura 2: classificação dos climas do Estado de São Paulo pelo sistema de Köppen (SETZER, 1966), modificado com a utilização de dados meteorológicos.

Dois tipos climáticos são predominantes: o Aw, tropical com invernos relativamente secos e o Cfa, subtropical quente. Eles abrangem grande área do interior paulista e não possuem estação seca. O Af do litoral possui altos índices pluviométricos ao longo do ano. O Am tropical monçônico é bastante expressivo no Vale do Ribeira, com chuvas excessivas durante o ano todo. Além disso, os tipos Cwa e Cwb são influenciados pela altitude.

Na região sudeste há o avanço da massa Tropical Continental (quente e seca) no verão e seu desaparecimento no inverno, dando lugar às massas Tropical Atlântica (quente e úmida) e Polar Atlântica (fria e seca).

Na faixa litorânea ocorre influência da massa Tropical Atlântica e no oeste paulista da massa Tropical Continental (NETO e NERY, 2005). A baixada litorânea possui temperaturas mais brandas e maior umidade do que o oeste devido à associação dos sistemas extratropicais (fortalecidos pela freqüência das correntes da frente polar) com a barreira imposta pela Serra do Mar. Segundo Monteiro (1976), na faixa central que abrange os municípios de Campinas, Piracicaba e Bauru ocorre zona de conflito entre os sistemas extra e intertropicais, proporcionando ao estado um caráter climático transicional comparado aos diferentes climas do território brasileiro.

Quatro direções de vento predominam durante todo o ano, mas também há ocorrências de calmarias sazonais. Na faixa meridional ocorre a influência dos sistemas extratropicais e o encontro entre os ventos SE, NE e E no setor setentrional, definindo o limite zonal do território paulista. O norte do estado (Vale do Paraíba e Serra da Mantiqueira) é mais afetado pelos ventos NE, com calmarias resultantes da ação orográfica em escala sub-regional

A orografia condiciona o clima em escala regional, sub-regional e local, modificando a circulação e eliminando o período seco em determinadas localidades, como ocorre na Serra do Mar e na Mantiqueira, de clima tropical de altitude. Nesta, as temperaturas relativamente baixas devem-se às altas altitudes em associação com as incursões da massa Polar Atlântica nessas áreas (NETO e NERY, 2005). O Vale do Paraíba apresenta trecho seco dentro da faixa úmida oriental e trechos úmidos ao longo das cuestas (MONTEIRO, 1976).

A insolação na parte central e oeste do Estado é mais intensa no inverno devido à menor duração do dia. A faixa litorânea apresenta nebulosidade elevada bem distribuída por todo o ano, possivelmente pela influência da massa Tropical Atlântica e da diminuição das horas de insolação, inclusive no inverno (MONTEIRO, 1976).

Geomorfologia

O relevo do Estado de São Paulo resulta da ação das forças endogênicas e exogênicas desencadeadas há milhares de anos. Entre os fatos de destaque, o fraturamento generalizado da plataforma brasileira no Jurássico, seguido pelo vulcanismo associado de grande escala no Cretáceo (ALMEIDA, 1969) e a

Tabela 6

Morfoestruturas e morfoesculturas do Estado de São Paulo

UNIDADES MORFOESTRUTURAIS	UNIDADES MORFOESCULTURAIS
I. Cinturão Orogênico do Atlântico	1.1) Planalto Atlântico
	1.1.1) Nível Alto (acima de 900m)
	1.1.2) Nível Médio (800-900m)
	1.1.3) Nível Baixo (700-800m)
II. Bacia Sedimentar do Paraná	2.1) Planalto Ocidental
	2.2) Depressão Periférica
III. Bacias Sedimentares Cenozóicas	3.1) Planalto de São Paulo
	3.2) Depressão do Médio Paraíba
	3.3) Depressão do Baixo Ribeira
	3.4) Planícies Litorâneas
	3.5) Planícies Fluviais

Fonte: IPT (1997).

O Planalto Atlântico é bastante diversificado litológica e topograficamente, o que compreende indícios de antigas superfícies de aplainamento (ALMEIDA, 1964). É constituído por rochas metamórficas associadas com intrusivas em faixa de orogenia antiga. Ab'Sáber (1970, 2003) elucidou que no domínio “mares de morros” os processos morfoclimáticos foram mais intensos nas áreas cristalinas e cristalofilianas, que sofreram intensa mamelonização em relação ao material litológico granítico-gnáissico. De forma geral, o relevo condiciona uma densa drenagem em vales profundos. IPT (1997) empregou como critério de divisão a altitude das feições morfoesculturais, sendo unidades de relevo: Planalto e Serra da Mantiqueira, Planalto e Serra da Bocaina, Planalto de Paraitinga/Paraibuna, Planalto de Ibiúna/São Roque, Planalto de Jundiaí, Planalto de Serra Negra/Lindóia, Planalto Paulistano/Alto Tietê, Planalto do Alto Rio Grande, Planalto do Ribeira/Turvo, Escarpa/Serra do Mar e Morros Litorâneos; Planalto de Guapiara e Planalto do Médio Vale do Paraíba.

Os sucessivos ciclos de erosão ocasionaram o rebaixamento dos terrenos e a deposição dos sedimentos continentais na bacia intracratônica do Paraná, principalmente dos materiais menos resistentes do escudo, o qual teve suas formas realçadas pela manutenção do material granítico-gnáissico mais resistente (ALMEIDA, 1964).

A Bacia Sedimentar do Paraná possui feições associadas aos processos erosivos e deposicionais decorrentes principalmente das mudanças climáticas de

alternância ocorridas no Cenozóico. Constitui-se de sedimentos continentais e marinhos (estes em menor quantidade) e derrames basálticos que preenchem as falhas e constituem extensas soleiras. É composta pelas seguintes unidades morfoesculturais:

1) Planalto Ocidental Paulista: perfaz aproximadamente 50% da área do Estado. Seu relevo é geralmente levemente ondulado, mas possui amplas colinas de topos aplanados conhecidas como cuestas, circundadas por depressões marginais. Possui variações fisionômicas regionais passíveis de divisão geomorfológica, conhecidas como: Planalto Centro Ocidental, Patamares Estruturais de Ribeirão Preto, Planaltos Residuais de Batatais/Franca, Planalto Residual de São Carlos; Planalto Residual de Botucatu e Planalto Residual de Marília.

2) Depressão Periférica Paulista: sua modelagem variada deve-se à influência tectônica, à litologia e principalmente aos processos de morfogênese mecânica pretéritos e atuais (PENTEADO, 1974). As altitudes oscilam entre 600-750m, sendo superiores nos locais que margeiam o front das cuestas. A densa drenagem manteve o antigo traçado orientado à NW. Divide-se em Depressão de Moji-Guaçu e Depressão do Médio Tietê (ALMEIDA, 1964).

As Bacias Sedimentares Cenozóicas são áreas preenchidas por sedimentos continentais e costeiros, com ocorrência marcante na região leste do Estado, embora seja associada a praticamente todas as unidades morfoestruturais pela ocorrência de eventos erosivos e deposicionais entre elementos positivos e negativos da paisagem. Constam as seguintes unidades associadas: 1) Planalto de São Paulo – Bacia de São Paulo; 2) Depressão do Médio Paraíba – Bacia de Taubaté; 3) Depressão do Baixo Ribeira – Bacia do Baixo Ribeira; 4) Planícies Litorâneas – bacias de sedimentação marinha e fluviais descontínuas; 5) Planícies fluviais.

Vegetação

Existe grande diversidade de tipos de vegetação que variam tanto pela longitude como pela altitude, dadas as condições favoráveis para o estabelecimento da vida.

Nas regiões costeiras os diferentes ecossistemas são associados à mata atlântica, diferindo bastante na estrutura dos estratos, densidade da vegetação e composição de espécies conforme o suporte ecológico específico.

Os manguezais ocorrem em ambiente condicionado pelas marés, nas margens de estuários. O solo é constituído predominantemente por sedimentos detríticos marinhos com contribuições de sedimentos colúvio-aluvionares dos rios (AB'SABER, 2003). A diversidade de espécies vegetais é baixa devido à forte dinâmica e energia do ambiente, com o predomínio de árvores como o mangue branco, mangue preto e mangue vermelho (espécies arbóreas), responsáveis por sustentar extensa biota entre os ambientes marinhos e continentais. O manguezal sofre deposição contínua de matéria orgânica, cuja decomposição é favorecida pela intensa atividade de microrganismos e pelas condições climáticas quentes e úmidas.

A restinga situa-se em planícies associadas à desembocadura de rios e formadas pelo depósito de sedimentos marinhos e fluviais. Nas praias e dunas é caracterizada por vegetação rasteira, que se diversifica na medida em que avança em direção ao continente, diferenciando-se em estratos compostos por espécies de gramíneas, cactáceas, arbustivas e arbóreas, entre outras (SÃO PAULO, 2005a).

A composição vegetal da Serra do Mar obedece à variação de altitude, sendo composta por floresta ombrófila densa marcada pelas árvores de copas altas que formam uma cobertura fechada, principalmente nas encostas. Há pouca incidência dos raios solares sobre o solo, com manutenção da alta umidade do ar (AB'SABER, 2003).

A floresta ombrófila mista, conhecida como mata de araucária por sua composição florística ter mais de 40% de araucárias, é de regiões com altas altitudes (INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL, 2004).

Em planaltos ocorre a floresta estacional semidecidual, conhecida como mata do interior, composta por espécies tanto de cerrado como de mata atlântica.

Na depressão periférica e trechos dos planaltos interiores ocorrem mosaicos de cerrados sobre Latossolos arenosos derivados de rochas cristalinas. O cerrado

subdivide-se em cinco tipos e variam conforme a fisiografia e as manchas de solos. De forma geral, caracterizam-se pelo predomínio de gramíneas em meio arbustivo-arbóreo pouco denso, o que proporciona radiação solar nos diversos estratos (AB'SABER, 2003). Nas planícies de inundação há o campo limpo, com domínio de gramíneas; campo sujo nos terraços baixos, com arbustos e gramíneas; campo cerrado e cerrado arbóreo-arbustivo nos terraços médios em transição com os platôs, com árvores tortuosas e esparsas e gramíneas que secam na época de estiagem; e cerradão nos platôs, com mata constituída de árvores de porte maior, menos tortuosas e poucas gramíneas (SÃO PAULO, 2005b).

A pressão humana ocorre sobre todos os ecossistemas presentes no estado, com maior destaque ao cerrado que é suprimido conforme a necessidade crescente de áreas para o cultivo de cana-de-açúcar e que não dispõe de proteção legal. Na estreita faixa litorânea os manguezais e a restinga são aterrados e retificados na linha da costa (MIGOTTO, 2008). No planalto atlântico as manchas urbanas ampliam-se, promovendo a conurbação e a ocupação dos locais menos povoados. Em sentido ao interior, os empreendimentos de biodiesel tem sido responsáveis pelo êxodo rural e influenciam no crescimento das cidades.

A vegetação é a expressão biótica das condições pedoclimáticas. Registros palinológicos em Botucatu indicam uma paleovegetação semelhante à dos campos e cerrados (48 a 18 mil anos atrás), caracterizada pela prevalência de elementos herbáceos sobre os arbóreos, onde atualmente há o estabelecimento de floresta semidecídua. Em Campos de Jordão também foi observada predominância de herbáceas (entre 35 – 17 mil anos), sendo que entre 17 – 10 mil anos houve expansão de espécies da floresta de araucária em direção às altas altitudes. No entanto, ocorria maior adensamento nas áreas baixas associadas às zonas ripárias; os rios foram responsáveis pela dispersão da espécie nos últimos 3 mil anos (SOUZA et al., 2005). Atualmente Campos de Jordão possui uma extensa floresta predominantemente de araucárias.

Solos

Grande porção dos solos paulistas está classificada como Latossolos (OLIVEIRA et al., 1999), pois o clima úmido e quente promove a intensificação dos processos de laterização ou latossolização. Possuem coloração avermelhada devido a adsorção dos óxidos de ferro pelas partículas de argila. Os Latossolos Vermelhos

eutroféricos (Latossolo Roxo) desenvolvem-se de rochas básicas (basalto e diabásio) e são ricos em nutrientes. Os demais Latossolos (Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e Latossolo Bruno) são pouco férteis naturalmente.

Na faixa litorânea ocorrem depósitos arenosos e sedimentos fluviais, havendo o predomínio dos Neossolos Quartzarênicos e Espodossolos (Podzóis Hidromórficos), alternados com Organossolos, Gleissolos e Planossolos. Em mangues, pela influência marinha, têm-se os Gleissolos Sálícos e Planossolos Nátricos. Nos deltas dos rios ocorrem geralmente os Neossolos Flúvicos.

Nas faixas relativamente estreitas de tabuleiros, na porção a leste do Estado de área montanhosa e domínio Mata Atlântica, há o relevo referido como “mar de morros”. A ocorrência de Argissolos e Latossolos Vermelho-Amarelos deve-se à gênese associada aos materiais derivados de granitos, gnaisses e xistos. Nas partes serranas, com forte declividade, predominam os Neossolos Litólicos e diversos Cambissolos (LEPSCH, 2002).

No oeste do estado há o predomínio de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos sob cerrados. Em áreas cuja cobertura original era floresta, há incidência de Latossolo Roxo e Nitossolos Vermelhos, férricos eutróficos, bem como solos superficialmente arenosos, com acúmulo de argila no horizonte B, desenvolvidos a partir de arenitos com cimento calcário, classificados como Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos. As “terras roxas” situam-se nos vales dos rios Parnaíba, Grande e Paranapanema e em grande parte do oeste do estado (LEPSCH, 2002).

Os Solos Hidromórficos são intrazonais, estando suas características zonais retardadas em virtude da influência da água, condicionada principalmente pelo relevo. Associam-se ao encharcamento, que determina o acúmulo de matéria orgânica ou um fenômeno de redução evidenciado pela cor característica (tons cinzentos e mosqueados), compreendendo respectivamente Organossolos e solos mais minerais. A gleização consiste na redução do ferro pela pouca quantidade de oxigênio nos poros, predominando mosqueados amarelos e vermelhos. Quando o nível de água abaixa e o ar penetra pelos poros, ocorre oxidação do ferro, que não se dá homoganeamente, ocorrendo principalmente próxima às raízes e nas fendas.

Uso do solo

Almeida (1964) ressaltou que áreas formadas por acumulações de sedimentos detríticos ocorridos durante o Cenozóico favoreceram o povoamento pelos relevos suaves. Ab'Sáber (2003) atribuiu a habilidade de identificação da fertilidade e adequação dos solos à expansão de fazendas por espigões divisores de manchas de oxissolos roxos, assim como a conseqüente instalação dos eixos ferroviários, que deram suporte ao escoamento dos produtos agrícolas.

O processo agrícola desencadeado valeu-se da abundância do território, avançando sobre áreas virgens para cultivo conforme se acentuava o esgotamento das terras. A exploração inadequada promoveu o empobrecimento do solo, ampliou a erosão e assoreou cursos d'água. A devastação reduziu para pouco mais de 7% (1.731.472 ha) a área coberta por Mata Atlântica, que ocupava 81,8% do território paulista (20.450.000 ha) (JOLY, 2007). Das matas nativas, um milhão de hectares de áreas ciliares precisam ser recuperados e reflorestados (SÃO PAULO, 2008). Juntas, as florestas e matas ciliares representam hoje pequena parcela de uso do solo, aproximadamente 2,3 milhões de hectares, em comparação com as atividades econômicas (Figura 4).

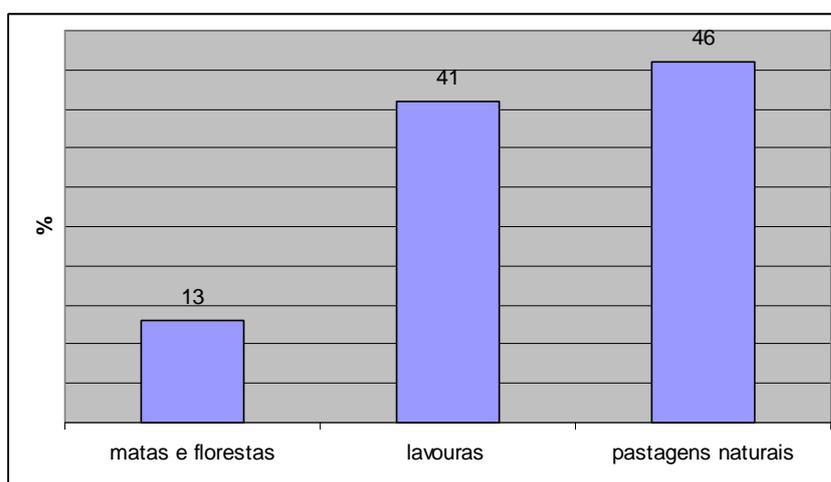


Figura 4: uso do solo no Estado de São Paulo, com exceção das áreas urbanizadas, adaptado do Censo Agropecuário (IBGE, 2006).

O Estado de São Paulo possui área total de 248.209,426 Km² (IBGE, 2006). Desses, em torno de 16 milhões de hectares são usados para atividades agroindustriais, como as lavouras e pastagens. De acordo com o IBGE, as lavouras são divididas em temporárias e permanentes, conforme o período da safra.

Atualmente, a cana-de-açúcar abrange mais de 41% da área do total das lavouras, sendo a cultura com maior expressão em área, como mostra a figura 5.

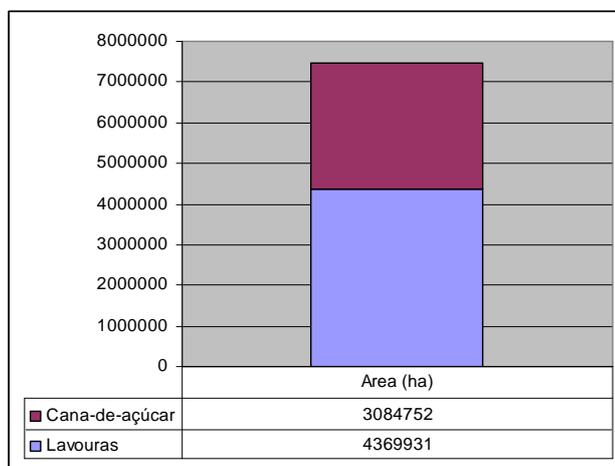


Figura 5: lavouras no Estado de São Paulo, de acordo com Censo Agropecuário (IBGE, 2006).

Mesmo com esforços do governo em criar leis para regulamentar e fiscalizar processos vinculados à produção canavieira, a queima da palha da cana-de-açúcar é uma prática bastante adotada no Estado por sua vantagem econômica. No entanto, a fuligem da queima é transportada pelo vento e acaba não sendo utilizada no local do cultivo, além de emitir CO₂ para a atmosfera. Os canaviais também recebem vinhoto como adubo, que penetra em profundidade no perfil e promove a melanização dos minerais.

De acordo com dados do IEA - Instituto de Economia Agrícola (2006), no período entre 2001 e 2006 o preço da terra em São Paulo mais que dobrou. Esta situação é decorrente da valorização das terras para o plantio da cana-de-açúcar.

3. MATERIAIS E MÉTODO

O Estado de São foi escolhido para estudo de caso por apresentar grande variedade de morfoesculturas e paisagens. Além disso, existem muitos estudos ambientais regionais (SETZER, 1966; SÃO PAULO, 2005b) e mapeamentos do meio físico (ALMEIDA, 1964; IPT, 1997; OLIVEIRA et al., 1999) que abrangem todo o Estado.

Os dados da quantidade de carbono orgânico no solo foram obtidos através das publicações Brasil (1960), Oliveira (1995, 1999a e 1999b), Bertolani et al. (2000) e Menk et al. (2000), além das informações complementares do material de origem, cobertura vegetal e altitude constantes nas descrições de cada perfil. A atualização da ordem dos solos para Brasil (1960) foi realizada de acordo com IBGE (2007).

Foram calculadas as quantidades de carbono orgânico de 143 perfis constantes nos levantamentos. A profundidade de 100 cm foi adotada por ser intermediária entre a dos países temperados (até 40 cm de profundidade) que possuem solos mais rasos e diferentes de solos tropicais (solos profundos superiores a 1 metro) para a padronização dos dados.

O cálculo do carbono orgânico do solo para cada perfil foi obtido através da multiplicação do carbono orgânico pela espessura (cm) do horizonte diagnóstico até a profundidade de 100 centímetros, que somados e divididos por 100 resultaram na porcentagem de carbono orgânico de cada ponto amostrado. O carbono orgânico (%) de cada ponto amostrado, multiplicado pelo fator de Van Bemellen (1,724), estabeleceu a quantidade de matéria orgânica no solo (%):

$$MO = C_{org} \times 1,724$$

Foram elaborados gráficos, tabelas e planilhas no programa Microsoft Excel[®] que organizaram a análise estatística e geoestatística do carbono orgânico (%) por

morfoestrutura. Estas informações foram compiladas em arquivos que auxiliaram a organização dos dados, uma vez que estes arquivos (.xls) são reconhecidos pelos outros programas utilizados.

A análise estatística verificou a distribuição da amostragem através de boxplot, e a geoestatística utilizando o método de krigagem.

Os dados foram plotados sobre o modelo digital de elevação SRTM de Miranda (2005), em sistema de coordenada geográfica e Datum WGS84, escala 1:250000. Este modelo facilitou a visualização da plotagem dos dados sobre as morfoestruturas, cuja divisão em altitudes proporciona a diferenciação geomorfológica do Estado de São Paulo.

A carta pedológica de Oliveira et al. (1999) foi obtida em formato digital na projeção UTM/Córrego Alegre (MG), escala 1:500000, sobre a qual foram plotados os pontos amostrados e então obtidas as respectivas classes de solos.

Os mapas digitais foram trabalhados com o uso do programa ESRI® ArcMap™ 9.2.

A análise da relação entre o carbono orgânico no solo e os compartimentos geomorfológicos foi efetuada através de estatística e geoestatística, executada com os programas Surfer8® e o XLStat. Os métodos geoestatísticos empregados foram a superfície de tendência e krigagem.

Os dados climatológicos de temperatura e precipitação foram obtidos nas estações climatológicas DAEE, INMET e CPTEC, sendo que os dados do INMET referem-se a um período de coleta entre 1961-1990. Foi feita edição para a obtenção de estimativas médias mensais (para temperatura e precipitação) e anuais (precipitação) com o uso do programa Microsoft Excel®. Os meses para a análise do clima – janeiro e julho – foram escolhidos por representarem a estação mais quente e a mais fria do ano.

Além desses programas, foi utilizado o CorelDRAW X3® para melhorar a adequação das figuras ao corpo do trabalho.

4. RESULTADOS

Quantificação do carbono orgânico dos perfis analisados

Consideradas as informações do carbono orgânico por horizonte diagnóstico dos perfis dos levantamentos da Tabela 7, a diferença entre o número de perfis total e o número de perfis analisados deve-se à ausência de dados em algumas localidades (coordenadas x, y), o que resultou numa amostragem insuficiente para algumas áreas do Estado. Além disso, boa parte dos perfis do levantamento de Oliveira (1999b) é compilada dos outros levantamentos (BRASIL, 1960; OLIVEIRA, 1995; 1999a).

Tabela 7

Número de perfis total e analisados

Levantamento	nº total de perfis	Perfis analisados
Brasil (1960)	86	86
Oliveira (1995)	12	11
Oliveira (1999a)	37	14
Oliveira (1999b)	13	12
Menk et al. (2000)	8	7
Bertolani et al. (2000)	13	12
TOTAL	169	142

Foi calculada a densidade dos pontos amostrados na área do Estado de São Paulo, obtendo-se um valor de $5,78^{-07}$ pontos/km². O universo amostral deste trabalho é composto por 142 pontos, o que representa um baixo índice para a área total do Estado, sobretudo porque sua distribuição é heterogênea, com altas concentrações em regiões com grande número de instituições de pesquisa do solo e agrária como a região central (depressão periférica). No sudoeste do Estado e na faixa litorânea, contudo, estes estudos são escassos. Ainda assim, o universo amostral deste trabalho possibilitou análises estatística e geoestatística de forma

satisfatória, evidenciando a complexidade do tema em condições ambientais e morfoestruturais diversas.

O Apêndice I apresenta os seguintes dados dos pontos amostrados: teores de carbono orgânico (%) e matéria orgânica no solo (%), morfoestruturas/morfoescultura, altitude, temperatura e precipitação em janeiro e julho, cobertura vegetal e o município do qual fazem parte, além das coordenadas geográficas (x,y).

Estatística

Nos 142 pontos, o teor de carbono orgânico (%) foi dividido nas três unidades morfoestruturais e subdivididos nas unidades morfoesculturais, conforme IPT (1997). A dispersão dos 142 pontos indica potenciais discrepantes (Figura 6), confirmado pelas classes 4 e 5 de frequência (Tabela 8, Figura 7). São três os pontos discrepantes, com teor de carbono orgânico superior a 3,8%, que foram excluídos da segunda amostragem para não influenciar os resultados e que serão discutidos posteriormente.

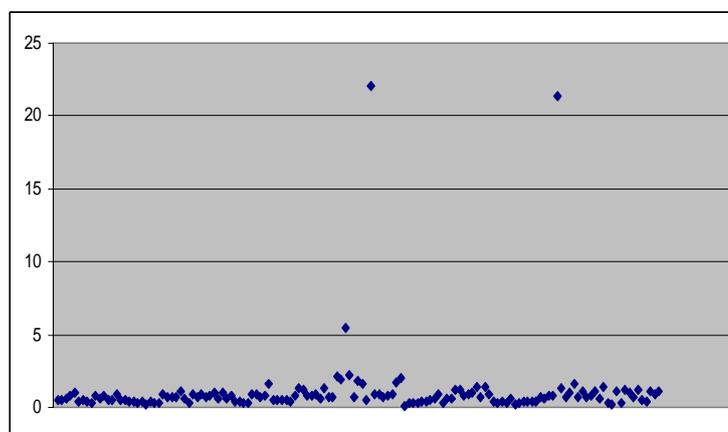


Figura 6: diagrama de dispersão do C (%) nos solos do Estado de São Paulo.

Tabela 8
Distribuição da frequência dos pontos amostrados

Classe	Limite inferior	Limite superior	Centro	Freqüência	Freq. relativa
1	0.140	0.640	0.390	61	0.430
2	0.640	1.290	0.965	63	0.444
3	1.290	3.870	2.580	15	0.106
4	3.870	13.415	8.643	1	0.007
5	13.415	22.030	17.723	2	0.014

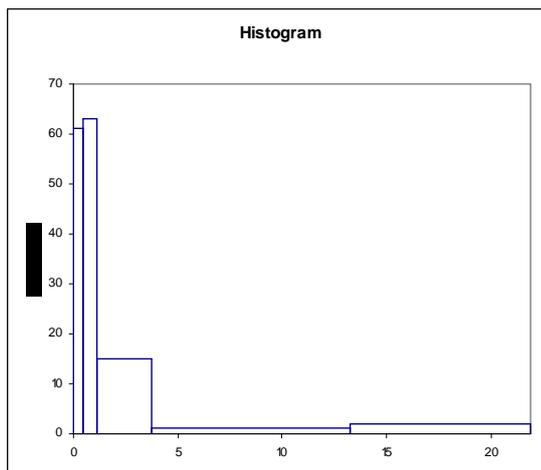


Figura 7: histograma de freqüência do teor de carbono orgânico nos solos

A classificação das unidades morfoestruturais seguiu a ordem: (1) Cinturão Orogênico do Atlântico, (2) Bacia Sedimentar do Paraná e (3) Bacias Sedimentares Cenozóicas/Depressões Tectônicas. Os dados da Bacia Sedimentar foram subdivididos em Depressão Periférica (DP) e Planalto Ocidental (PO), pois representavam mais de 80% dos dados.

A segunda amostragem é composta por 139 pontos, dos quais 87% possui teor de carbono orgânico inferior a 2,60%. Foram utilizados o valor mínimo, o valor máximo, a mediana e o 1 e 3 quartis (Figura 8). Os teores mais altos de carbono orgânico estão no Planalto Atlântico, seguido pela Depressão Periférica e bacias cenozóicas. Estas apresentaram valores mínimo, mediana e os quartis superiores aos das outras unidades, além de apresentar maior simetria em comparação às outras, porém com distribuição positiva. A distribuição é assimétrica para todas as morfoestruturas, visto que os extremos estão em diferentes distâncias da mediana, sendo que há pontos distribuídos positivamente.

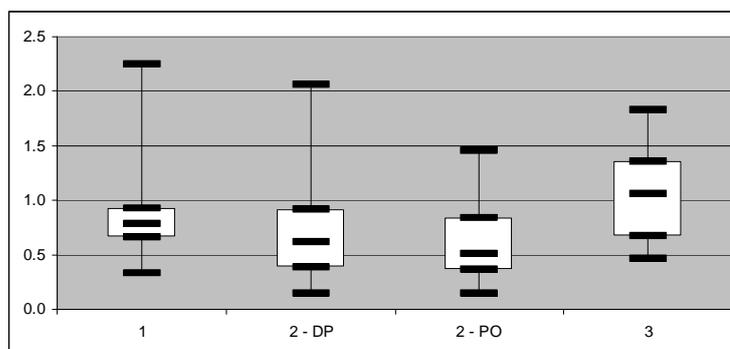


Figura 8: boxplot do carbono orgânico nos solos das morfoestruturas e morfoesculturas do Estado de São Paulo, sem os pontos discrepantes.

Geoestatística

Os resultados das krigagens feitas com a primeira e segunda amostragem mostraram que as fortes flutuações indicadas na primeira forçavam uma tendência dominante (Figura 9a). Com a exclusão dos pontos discrepantes, as curvas da krigagem ficaram melhor distribuídas (Figura 9b). A distribuição heterogênea dos pontos gera extrapolações com distorções devido à concentração de pontos em determinadas regiões e ausência ou escassez em outras. Assim, o resultado espacial obtido pela krigagem foi positivo, pois promoveu a distribuição aleatória das tendências geradas (após a exclusão dos discrepantes) e conservou os valores altos de carbono orgânico. O gráfico gerado sobreposto ao mapa digital de Miranda (2005) mostrou que as áreas com maiores teores de carbono no solo estão associadas aos planaltos.

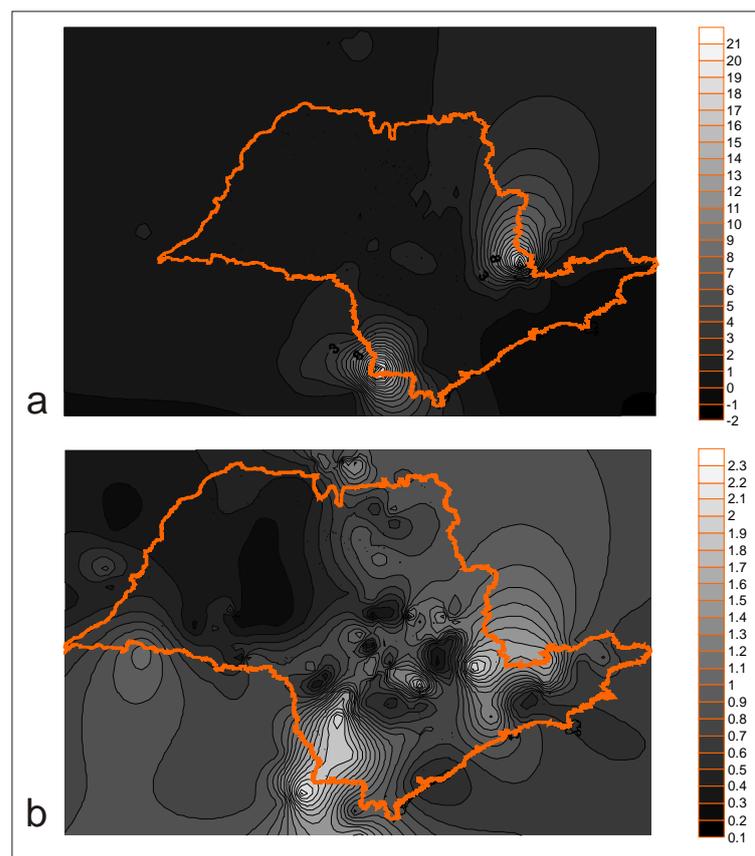


Figura 9: krigagem da primeira amostragem (a) e sem os pontos discrepantes (b).

A krigagem para os 139 pontos apresentou tendência de maiores teores de carbono orgânico em regiões planálticas (Planalto e Serra da Mantiqueira, Planalto de Serra Negra/Lindóia e Planalto do Ribeira Turvo) e na planície fluvial circundante às bordas do Planalto de Jundiáí.

O variograma com grandes flutuações sugere distribuição assimétrica dos dados aleatórios (Figura 10).

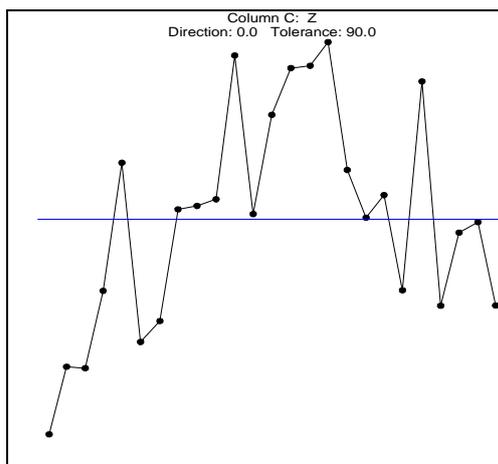


Figura 10: variograma de distribuição do carbono orgânico nas morfoestruturas do Estado de São Paulo.

Cinturão Orogênico do Atlântico - 1

No Planalto Atlântico ocorrem as localidades com maiores concentrações de carbono orgânico, relacionadas com as unidades morfológicas do Planalto e Serra da Mantiqueira, Planalto de Jundiáí, Planalto de Serra Negra e Lindóia, Planalto de Ibiúna e São Roque e Planalto do Ribeira/Turvo. Segundo Koeppen, há relativa diversidade de climas, predominantemente úmido e com verões quentes. A orografia influencia na manutenção da umidade e dos maiores teores de carbono, assim como as condições climáticas presentes e pretéritas e de formação do relevo.

Bacia Sedimentar do Paraná - 2

Unidade com o maior número de pontos. A classificação climática de Koeppen corresponde ao Aw, de clima quente e úmido com chuvas de verão, abrangendo quase toda a extensão da unidade. Os locais com maior concentração de carbono orgânico estão relacionados aos Planaltos Residuais de Franca e Batatais, nas proximidades do Reservatório Igarapava e no Planalto Centro Ocidental próximo do Rio Paranapanema, com climas mais amenos e faixas úmidas

decorrentes da orografia e da proximidade do rio. Também ocorre entre o Rio Tietê e o Planalto Residual de São Carlos e o Planalto Residual de Botucatu. Os teores mais baixos estão distribuídos pelo Planalto Centro Ocidental, constituído por colinas amplas e baixas, e pode estar associado ao clima mais seco e com pouca umidade.

Na Depressão Periférica os maiores teores de carbono orgânico estão próximas do Planalto de Jundiaí, nos municípios de Mogi-Mirim e Campinas. O clima predominante é Cfa, mesotérmico semi-úmido com verões quentes. As altas temperaturas aumentam a velocidade da decomposição da matéria orgânica, mas em determinados locais, por influência da vegetação, grandes quantidades de carbono são aportados no solo.

Bacias Sedimentares Cenozóicas / planícies fluviais / planícies litorâneas - 3

Unidade com o menor número de pontos, sendo que a maioria localiza-se sob clima bastante úmido que inibe a decomposição da matéria orgânica. Os dados relativos a estas regiões indicaram quantidades relativamente altas de carbono orgânico na Depressão do Baixo Ribeira, entre os municípios de Registro e Parique-Açú, região de planícies litorâneas/fluviais, com mediana alta. A faixa litorânea é uma região bastante dinâmica, moldada pelas sucessivas transgressões e regressões marinhas quaternárias, responsáveis pela distribuição sedimentar do litoral.

Pontos discrepantes

Os três pontos discrepantes foram analisados individualmente, com base nas informações geológicas, bióticas e de uso do solo encontrados nos levantamentos. Informações climáticas foram obtidas nas estações meteorológicas dos municípios destes pontos.

Os pontos discrepantes diferem bastante em altitude e estão tanto em região montanhosa do Planalto da Serra da Mantiqueira (ponto discrepante 1) quanto em região litorânea, na Depressão do Baixo Ribeira (ponto discrepante 3) (Tabela 9). O ponto discrepante 2 está localizado na Depressão do Médio Paraíba.

O alto teor de carbono orgânico dos pontos localizados nas depressões ocorre devido à forma concêntrica local/regional, ocasionada pela tectônica.

O clima dessas regiões são geralmente mais amenos e úmidos e favorecem a manutenção da matéria orgânica em detrimento de sua decomposição. A matéria orgânica acumula-se principalmente nos horizontes superficiais, mas nos pontos discrepantes o carbono orgânico foi encontrado em horizontes subsuperficiais, em profundidades superiores a 1,5 m. Isto evidencia eventos pretéritos associados à deposição de material orgânico em locais côncavos, como bacias relacionadas à rift e paleolagos. Existe relação genética entre os pontos discrepantes com o Rift Continental do Sudeste do Brasil.

Tabela 9

Pontos discrepantes – características locais

Ponto discrepante	Carbono orgânico (%)	Município	Altitude (m)	Material parental	Cobertura vegetal
1	5.49	Campos de Jordão	1780	Rochas ácidas	mata nativa
2	22.03	São José dos Campos	520	Sedimentos orgânicos	cultura anual
3	21.34	Registro	9	Mangues	mata nativa

Ponto discrepante 1

O município de Campos de Jordão é classificado por Koeppen como Cfb, caracterizado por clima temperado, úmido, com ocorrência de precipitação em todos os meses do ano, sem estação seca definida e temperatura média no mês mais quente inferior a 22°C. A condição úmida desfavorece a velocidade de decomposição da matéria orgânica, assim como os climas mais amenos.

A cobertura vegetal é composta por mata de altitude com predominância de araucárias. A distribuição entre os indivíduos é bastante espaçada e há poucas espécies que vivem em suas proximidades. Isto indica a existência de substâncias alelopáticas derivadas do material vegetal, que desfavorecem a permanência de microrganismos decompositores. Dessa forma, o material vegetal decíduo é acumulado na serapilheira e sua lenta decomposição ocasiona a formação do húmus tipo moder. A concentração do carbono orgânico é maior no horizonte A1 e vai diminuindo paulatinamente a medida que aumenta a profundidade. Segundo a descrição deste ponto em Brasil (1960), o perfil possui aproximadamente 3 metros de profundidade e há considerável quantidade de matéria orgânica nos horizontes C1 e C2. De acordo com o mapa pedológico de Oliveira et al. (1999), o solo é

Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura argilosa + Cambissolo Háptico distrófico textura média a argilosa, ambos A moderado e A proeminente em relevo montanhoso. Porém, o alto teor de carbono orgânico indica se tratar de Organossolo.

O município situa-se na moerfoescultura do Planalto e Serra da Mantiqueira. De acordo com Riccomini et al. (1987), rifts possibilitaram a deposição de camadas de sedimentos através de leques aluviais da Formação Resende na porção central da Bacia do Taubaté. Os sedimentos depositados indicam a existência de um sistema lacustre pela alternância de camadas centimétricas de ritmitos de folhelhos (escuros) e margas (claros), consideradas como depósitos referentes às flutuações climáticas do tipo El Niño e aos ciclos de manchas solares. Descrições paleontológicas indicaram a existência de diversa flora e fauna na região, com destaque para troncos de angiospermas, peixes, anfíbios e mamíferos (MEZZALIRA, 1989).

Conforme o histórico da região na qual se insere Campos de Jordão, condições bastante propícias à vida já estavam estabelecidas desde o Oligoceno. A matéria orgânica acumulada no paleolago tem forte influência na composição do material parental que originou o solo, visto que os Horizontes C1 e C2 indicam um teor considerável de carbono. Esta situação pretérita associada às condições climáticas do Quaternário resultou no alto conteúdo de carbono do solo neste ponto.

Ponto discrepante 2

São José dos Campos é classificado por Koeppen como clima Cfa semelhante ao de Campos de Jordão, porém com temperaturas médias do verão superiores a 22°C. De acordo com os gráficos de temperatura e precipitação, possui a menor quantidade de chuvas anuais comparado aos outros pontos discrepantes.

Segundo BRASIL (1960), o material de origem são detritos orgânicos, o que indica Organossolo, assim como o alto teor de carbono orgânico. No mapa pedológico (Oliveira et al., 1999), o solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico + Latossolo Amarelo distrófico, ambos A moderado, textura argilosa em relevo montanhoso e forte ondulado.

Situa-se na unidade morfoestrutural da Bacia Sedimentar de Taubaté, cuja gênese associa-se à de Campos de Jordão, vinculada ao rift e explanada anteriormente. No entanto, trata-se de uma porção do paleolago, cujos sedimentos

proporcionaram material rico em matéria orgânica. O conteúdo de carbono orgânico, quatro vezes maior em relação a Campos de Jordão, deve-se a duas possíveis condições: a primeira é a forma concêntrica de depressão, que acumula sedimentos na sua porção inferior; a segunda refere-se ao uso agrícola, descrito no levantamento como arrozal, cultura de áreas pouco drenadas devido à grande necessidade de água. O meio confinado e redutor promove a lenta e parcial decomposição da matéria orgânica, que se acumula em espessas camadas. O meio redutor é pobre em oxigênio e geralmente ácido, o que limita organismos decompositores.

Ponto discrepante 3

Registro possui clima Am – tropical de monção, com precipitação total anual média superior a 1500 mm e precipitação do mês mais seco inferior a 60 mm. É descrito no mapa pedológico (OLIVEIRA et al., 1999) como associação complexa de Organossolo Mésico e Háplico distrófico + Organossolo Mésico e Gleissolo Háplico distrófico soterrado + Gleissolo não tiomórfico eutrófico e distrófico, ambos indiscriminados + Cambissolo Háplico Tb distrófico A moderado.

Situa-se na Depressão do Baixo Ribeira pertencente à Formação Pariquera-Açu, formada a partir do Rift Continental do Sudeste do Brasil, que compreende um sistema de leques aluviais associados à planície fluvial meandrante e lago (MELO, 1990).

Esta região sofre aporte contínuo de sedimentos e trata-se de uma área de inundação. A mata, bastante abundante e diversificada da região, soma material orgânico que é decomposto mais ou menos rapidamente. A alta pluviosidade e o clima quente se anulam, pois a decomposição é inibida pelas chuvas e por outro lado, favorecida pelo clima quente.

5. CONCLUSÃO

Cada ambiente atua de forma particular no aporte e na decomposição da matéria orgânica no solo. A potencialidade de retenção e armazenamento do carbono orgânico no solo obedece aos fatores de formação do solo e ao tipo de manejo empregado. Por isso são necessários estudos sistêmicos que considerem os diferentes tipos de carbono disponíveis no solo em associação à fisiografia e aos usos do solo. Outra recomendação abrange a influência de baixos e altos estruturais em trabalhos futuros.

Os maiores teores de matéria orgânica foram indicados em regiões planálticas e algumas depressões próximas aos planaltos. A krigagem indicou elevados teores de carbono orgânico associados aos planaltos. Nessas formas, a formação dos solos ocorre lentamente e os solos são mais jovens. Esses solos possuem elementos com elevada capacidade de troca catiônica, pois não sofreram tanto a ação das intempéries, e com maior potencial para adsorver a matéria orgânica humificada. Além disso, a temperatura mais amena em altas altitudes mantém a matéria orgânica no solo, pois diminui a velocidade das reações bioquímicas.

Os pontos com maior teor de carbono orgânico (discrepantes) estão em locais de ambiente deposicional, gerados por eventos tectônicos pretéritos e modelados pela dinâmica climática do presente. Geralmente, nessas regiões confluentes, os sedimentos depositados mantêm uma condição anaeróbia, cuja decomposição ocorre lentamente e a matéria orgânica permanece no local.

Não foi possível efetuar a correlação entre os solos e o teor de carbono devido à dificuldade em padronizar os dados e pela falta de precisão dos pontos sem coordenadas geográficas (BRASIL, 1960). O emprego das bases digitais para a análise foi satisfatório, com exceção do mapa digital pedológico (OLIVEIRA et al., 1999), que se mostrou incoerente com a maioria dos tipos de solos definidos nos levantamentos. O modelo digital de elevação SRTM (MIRANDA, 2005) proporcionou

boa relação com a divisão dos compartimentos geomorfológicos (IPT, 1997). No entanto, uma pequena análise evidenciou que os Neossolos possuem as menores quantidades de matéria orgânica, relacionadas ao pouco desenvolvimento deste solo e à sua natureza mineral e estrutural. Os Latossolos apresentaram bastante variação entre as médias das unidades geomorfológicas, porém os teores de matéria orgânica do Latossolos nos planaltos só foram inferiores aos dos pontos discrepantes. Verifica-se que os Latossolos possuem bom potencial para seqüestro de carbono com a adição de insumos orgânicos. Esta condição é particularmente importante para porções do estado que são agrícolas há bastante tempo, como para o Planalto Ocidental.

A quantificação de carbono com vistas ao potencial de seqüestro dos solos deve obedecer ao tipo de atividade desenvolvida, ou seja, se são solos para uso agrícola ou para áreas de proteção. No segmento agrícola deve-se levar em conta o tipo de cultura, o manejo adotado e o tempo de duração entre o início dos tratamentos do solo e a colheita da cultura. A queimada das culturas geralmente não preserva as cinzas in loco, pois são dispersas pelo vento para outras áreas, que não a de plantação e por isso este carbono não deve ser quantificado. A determinação de carbono pode ocorrer através da determinação da matéria orgânica de cada horizonte (via úmida), determinação do carbono microbiano dos horizontes superficiais e determinação dos ácidos húmicos e fúlvicos;

O empreendimento agrícola também deve durar no mínimo 20 anos para que haja a real incorporação do carbono orgânico em forma de matéria orgânica humificada no solo. Após este período, a determinação da humina deve ser considerada.

Outra situação refere-se aos locais de preservação não manejados, como em unidades de conservação ou áreas ripárias. Nesses locais, a condição fisiográfica e os registros policíclicos de concentração de carbono são aspectos de extrema importância para o estudo do carbono no solo. O carbono proveniente de quantificação da matéria orgânica lábil, do carbono total, dos ácidos húmicos, C3 e C4 deve ser considerado como reservatório global. A análise da humina ou de fragmentos soterrados de carvão a partir de isótopos de ^{14}C é recomendada para regiões com floresta nativa e solos espessos. O fato desses locais estarem protegidos pela legislação faz com que essas áreas sejam oportunas e preferenciais

para a implantação de MDLs e PSAs com vistas ao seqüestro e a manutenção do carbono no solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB`SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 159p.

ALLISON, L.E. Organic Carbon. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Orgs.). **Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1965. p.1367-1378.

ALLISON, L.E.; BOLLEN, W.B.; MOODIE, C.D. Total Carbon. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. **Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1965. p.1346-1366.

ALMEIDA, F.F.M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Bol. Inst. Geogr. Geol.**, São Paulo, v.41, p.167-263, 1964.

ALMEIDA, F.F.M. Diferenciação tectônica da Plataforma Brasileira. In: CONGR. BRAS. GEOL, 23., 1969. **Anais...** Salvador: SBG, Salvador, 1969. p.29-46.

ALMEIDA, S.D.M. **Avaliação da biodegradação no solo de resíduos de indústria processadora de sílica-gel e de agroindústria utilizando-se o respirometro padrão de Bartha**. 2001. 68p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Instituto de Biociências, UNESP, Rio Claro, 2001.

ALVARENGA, M.I.N; SIQUEIRA, J.O.; DAVIDE, A.C. Teor de carbono, biomassa microbiana, agregação e micorriza em solos de cerrado com diferentes usos. **Ciênc. Agrotec**. Lavras, v.23(3), p.617-625, 1999.

BERTOLANI, F.C.; COELHO, M.R.; ROSSI, M.; MENK, J.R.F.; PRADO, H. Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Folha de Marília-Memorial Descritivo. **Boletim Científico do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n.1, 42p, 2000.

BOEIRA, R.C.; SOUZA, M.D. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de um latossolo após três aplicações de lodo de esgoto. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.31, p.581-590, 2007.

BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo: contribuição à carta de solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura - Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas - Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas - Comissão de Solos. 1960. Boletim n.12, 634p.

BROADBENT, F.E. Organic Matter. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Orgs.). **Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1965. p.1397-1400.

CAETANO, N.R.; MATTOS, J.T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R. Caracterização das coberturas de alteração intempérica da Baixa Mojiana. **Geociências**. Rio Claro: Ed. UNESP, v.25(3), p.317-329, 2006.

CERRI, C.C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo no agrossistema cana-de-açúcar**. 1986. 197p. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CERRI, C.E.P.; FELLER, C. Carbon Cycling and sequestration opportunities in South America: the case of Brazil. **Soil Use and Management**, Oxford, v.20, p.248-254, 2004.

CZAJKOWSKI, S. **Aplicação da análise estatística espacial de dados multivariados em pedologia**. 1998. 151p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1998.

DUCHAUFOR, P. **Pédologie – sol, vegetation , environment**. Paris : Masson, 1991. 289p.

EMBRAPA. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: EMBRAPA-SEA, 1991. 329 p.

FASSBENDER, H.W. **Química de suelos**. Turrialba: Instituto Interamericano de Ciencias Agriolas, 1975, 398p.

GERAQUE, E. Neutralização de CO₂ esbarra em método. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 29 dez. 2007. Caderno A, Ciência, p.20.

HILGARD, E. **Soils, their formation, properties, composition and relations to climate and plant growth in the humid and arid regions**. New York - London: Macmillan. 1906.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE. 1995. 104p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2006 – resultados preliminares**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=sp&tema=censoagro>>. Acesso em: 17 nov. 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE. 2007. 316p. CD-ROM.

ICLEI – LOCAL GOVERNMENTS FOR SUSTAINABILITY. **Mudanças Climáticas e Desenvolvimento Limpo: oportunidades para governos locais**. Rio de Janeiro: ICLEI/LACS, 2005. 112p.

INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. **Almanaque Brasil Socioambiental**. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2004. 479p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE. Cambio del uso de la tierra y silvicultura. In: **Directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, version revisada en 1996: Libro de Trabajo**. v.2. 1996. p.1-25. Disponível em <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdffiles/spnch5-1.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2008.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo - Escala 1:500.000**. 2v. São Paulo: IPT/FAPESP, 1997. 2 mapas.

JACKSON, M.L. Determinaciones de materia orgánica em los suelos. **Analisis Quimico de Suelos**. 2.ed. Barcelona: Ediciones Omega, 1970. p.283-310.

JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York : McGraw-Hill Book Company Inc., 1941. 281p.

JENNY, H. **The soil resource - origin and behavior**. New York: Springer-Verlag, 1980. 377p.

JIMÉNEZ-RUEDA, J.R; TORNISIELO, S.M.T.; BARBOSA, I.F.; BENATTI, M.T.; UEMURA, A.N. Aspectos físico-químicos e microbiológicos de Latossolo Vermelho-Amarelo tratado com doses cumulativas de esterco de granja. **Rev. Bras. Geoci.**, v.22(3), p.321-328, 1992.

JIMÉNEZ-RUEDA, J.R. **Curso de Pedologia**. (Apostila da disciplina Origem e evolução de solos) Departamento de Petrologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, UNESP, 2003.

JOLY, C.A. Biodiversidade e mudanças climáticas: contexto evolutivo, histórico e político. **Ambiente e Sociedade**, v.10(1), p.169-172, 2007.

KONONOVA, M.M. Humus of virgin and cultivated soils. In: GIESEKING, J.E. **Soil Components: Organic Components. Volume 1**. New York: Springer-Verlag, 1975. p 475-536.

KUMADA, K. **Chemistry of soil organic matter**. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1987. 241p.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 253p.

LA SCALA, N. **Variabilidade temporal da perda de carbono após preparo do solo descrito por modelo de decomposição de primeira ordem**. 2007. 45p. Tese (Livre docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal, 2007.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.

MACHADO, P.L.O.A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Quím. Nova**, v.28(2), p.329-334, 2005.

MALAGÓN, D.C.; CORTÉS, A.L.; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R. Caracterización y câmbios físico-químicos producidos por alteracion del ecosistema em los suelos Igara-Paraná (Amazônia Colombiana). In: CONGRÉS INTERNACIONAL DÊS AMERICANISTES, 42., 1976, Paris. **Anais...** Paris, 1976, p.425-440.

MELFI, A.J.; PEDRO, G.; VOLKOFF, B. Natureza e distribuição dos compostos ferríferos nos solos do Brasil. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.3, p.47-54, 1979.

MELO, M.S. **A Formação Pariquera-Açu e depósitos relacionados: sedimentação, tectônica e morfogênese**. 1990. 211p. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

MENK, J.R.F.; ROSSI, M.; BERTOLANI, F.C.; COELHO, M.R. Levantamento semidetalhado do Município de Espírito Santo do Turvo (SP). **Boletim Científico do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n.2, 42p., 2000.

MEZZALIRA, S. **Os fósseis do Estado de São Paulo**. São Paulo: IGG - Série Pesquisa, 1989. 155p.

MIGOTTO, A. Carta aberta ao secretário do Meio Ambiente de São Paulo, Xico Graziano. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 16 abr. 2008. Caderno Aliás.

MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. Bacia do Paraná. **B. Geoci. Petrobrás**, Rio de Janeiro, v.8(1), p.69-82, 1994.

MIRANDA, E.E. (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 5 mar. 2008.

MONTEIRO, C.C.F. **O clima e a organização do espaço no Estado de São Paulo: problemas e perspectivas**. São Paulo: IGEOG-USP, 1976. p. Série Teses e Monografias n.28.

NETO, J.L.S.; NERY, J.T. Variabilidade e mudanças no Brasil e seus impactos regionais. In: SOUZA, C.R.G. (Org.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Ed. Holos, 2005. p.28-51.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1983. 434p.

OLIVEIRA, J.B. Solos da Folha do Município de Guaíra. **Boletim Científico do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n.33, 127p, 1995.

OLIVEIRA, J.B. Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. **Boletim Científico do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n.45, 108p, 1999a.

OLIVEIRA, J.B. Solos da Folha de Piracicaba. **Boletim Científico do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n.48, 173p, 1999b.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1999. 4 mapas, escala 1:500.000.

ORLANDO, J.; ZAMBELLO JR., E.; GLÓRIA, N.A. Influência sazonal nos resultados das análises químicas de solo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.1, p.62-65, 1977.

PAGIOLA, S.; PLATAIS, G. **Payments for Environmental Services**. Washington: World Bank. 2005a.

PAGIOLA, S.; BISHOP, J.; LANDELL-MILLS, N. **Mercados para Serviços Ecosistêmicos: instrumentos econômicos para conservação e desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Instituto Rede Brasileira Agroflorestal – REBRA, 2005b. 164p.

PENTEADO, M.M. Fundamentos de geomorfologia. Rio de Janeiro: Biblioteca Geográfica Brasileira, 1974 (**Série D, Publicação nº 3**).

PESSENDA, L.C.R.; GOUVEIA, S.E.M.; FREITAS, H.A.; RIBEIRO, A.S.; ARAVENA, R.; BENDASSOLLI, J.A.; LEDRU, M.P.; SIEFEDDINE, A.F.; SCHEEL-YBERT, R. Isótopos do carbono e suas aplicações em estudos paleoambientais. In: SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M.S.; OLIVEIRA, P.E. (Orgs.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos Editora, 2005.

RANKAMA, K; SAHAMA, T.G. **Geoquímica**. Madrid: Aguilar S.A. Ediciones, 1960. 862 p.

RANZANI, G.; PESSOTTI, J.E.; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R. **Carta de solos da Agropecuária Cresciumal S.A., município de Leme/SP**. 1976. 177p.

RICCOMINI, C.; APPI, C.J.; FREITAS, E.L.; ARAI, M. Tectônica e sedimentação no Sistema de Rifts Continentais da Serra do Mar (bacias de Volta Redonda, Resende, Taubaté e São Paulo). In: SIMP. GEOL. REG. RJ/ES, 1., 1987, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 1987. p.253-298.

SÃO PAULO (Estado). SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE. **Manual de reconhecimento de espécies vegetais da restinga do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente /DEPRN, 2005a, 440p.

SÃO PAULO (Estado). SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE. **Inventário Florestal da Vegetação Natural do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente/IF, 2005b, 200p.

SÃO PAULO (Estado). SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE. **Projeto de Recuperação de Matas Ciliares**. Disponível em: <http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Default.aspx?idPagina=2393>. Acesso em: 19 fev. 2008.

SASTRE, C. La végétation du haut et moyen Igara Paraná et les modifications apportées par les cultures sur brûlis. Culture sur brûlis et evolution du milieu forestier em Amazonie Du Nord-Ouest. **Bulletin de la Société Suisse D'Ethnologie**, Neuchâtel, Numero Special, p.31-44, 1975.

SCHNEIDER, R. L.; MÜLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. 1974. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG. v.1, p.41-65, 1974.

SETZER, J. **Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí - Centrais Elétricas de São Paulo (CESP). 1966.

SILVA, A.C.; TORRADO, P.V.; PÉREZ, M.G.; NETO, L.M.; VASQUEZ, F.M. Relações entre matéria orgânica do solo e declividade de vertentes em toposequência de Latossolos do Sul de Minas Gerais. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.31, p.1059-1068, 2007.

SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M.S.; DE OLIVEIRA, P.E. **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Ed. Holos, 2005. 382p.

SOUZA, W.J.; MELO, W.J. Matéria orgânica em um latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.27, p.1113-1122, 2003.

SZAKÁCS, G.G.J. **Sequestro de carbono nos solos - Avaliação das potencialidades dos solos arenosos sob pastagens, Anhembi – Piracicaba/SP**. 2003. 102p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, Piracicaba, 2003.

VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. L'humus des sols du Brésil, nature et relations avec l'environnement. **Cah. ORSTOM - Ser. Pédol.**, v.34(2), p.83-95, 1988.

WBGU, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveraenderungen. **Die anrechnung biologischer Quellen und Senken im Kyoto-Protokoll: Fortschritt oder rückschlag für den globalen umweltschutz**. Sondergutachten, Germany: Bremerhaven: WBGU, 1998. p.76.

APÊNDICE I

Nº de pontos	Município	X (W)	Y (S)	Altitude (m)	Cobertura vegetal	TEMP JAN	TEMP JUL	CHUVA JAN	CHUVA DEZ	Morfologia	C (%)	MO (%)
BRASIL, 1960												
1	Pedro de Toledo	47°12'57,139"	24°16'44,651"	120	pastagem	27,6	20,1	299	249	1	0.50	0.86
2	Jacareí	46°06',061"	23°17'43,66"	580	gramíneas	24,3	17,6	226	189	3	0.55	0.95
3	Leme	47°23'39,471"	22°12'38,73"	720	gramíneas	24,3	18,2	237	204	2 - DP	0.56	0.96
4	Rio Claro	47°43'13,718"	22°27'22,701"	660	cultura de milho	24,2	18,0	226	199	2 - DP	0.80	1.38
5	Tatuí	48°1'33,83"	23°23'1,489"	740	gramíneas	25,3	17,1	223	176	2 - DP	1.05	1.81
6	Piracicaba	47°34'46,618"	22°47'44,01"	400	cerrado	24,4	17,3	253	256	2 - DP	0.42	0.72
7	Porto Feliz	47°29'28,965"	23°12'44,31"	490	pastagem	23,8	17,1	203	161	2 - DP	0.46	0.79
8	Corumbataí	47°38'58,484"	22°14'7,701"	740	pastagem	24,5	20,2	250	212	2 - PO	0.37	0.64
9	Mogi-Mirim	47°0'3,476"	22°33'22,259"	660	pastagem	24,3	18,0	243	196	2 - DP	0.32	0.55
10	Itaverá	48°56'43,547"	23°57'38,807"	710	gramíneas	23,9	16,8	158	147	2 - DP	0.80	1.38
11	Areias	44°42'37,2"	22°35'3,127"	620	mata secundária	24,7	18,3	268	229	1	0.63	1.09
12	Jacupiranga	48°1'5,497"	24°40'22,959"	80	mata secundária	26,5	18,8	217	143	3	0.76	1.31
13	Itatiba	46°47'1,41"	22°54'21,506"	800	pastagem	23,2	16,6	217	206	1	0.52	0.90
14	Itu	47°9'24,542"	23°15'21,605"	720	pastagem	24,4	17,7	219	196	2 - DP	0.51	0.89
15	Piedade	47°24'50,973"	23°41'0,047"	820	pastagem	24,4	17,6	151	107	1	0.92	1.59
16	Caçapava	45°43'19,695"	23°8'53,312"	820	pastagem	24,4	17,8	207	175	3	0.46	0.79
17	Santa Branca	45°53'26,289"	23°27'9,17"	980	pastagem	23,4	16,6	228	199	1	0.52	0.90
18	Mirassol	49°41'2,641"	20°45'47,074"	420	mata secundária	24,8	19,4	219	170	2 - PO	0.45	0.77
19	Arealva	49°41'35,991"	22°5'34,807"	400		24,9	18,7	204	256	2 - PO	0.39	0.67
20	Uchôa	49°11'46,967"	20°59'48,245"	500	cultura de café	25,4	19,8	236	233	2 - PO	0.28	0.48
21	Monte Aprazível	49°46'47,312"	20°44'37,117"	480	culturas anuais	25,0	19,6	238	230	2 - PO	0.36	0.62
22	Marília	50°0'56,828"	22°17'52,365"	620	cultura de café	24,0	17,8	217	191	2 - PO	0.23	0.40
23	Adamantina	51°6'29,503"	21°47'7,222"	390	mata nativa	25,5	19,6	202	146	2 - PO	0.36	0.62
24	Mirandópolis	51°2'43,393"	21°5'45,439"	420	cultura de café	25,7	20,1	190	141	2 - PO	0.28	0.48
25	Santo Anastácio	51°38'41,682"	21°57'56,324"	407	pastagem	25,5	19,4	182	152	2 - PO	0.34	0.59
26	Apiáí	48°54'42,785"	24°32'51,373"	760	culturas anuais	22,3	15,0	184	165	1	0.93	1.60
27	Taubaté	45°26'52,234"	23°11'42,818"	800	pastagem	24,5	17,9	214	197	3	0.67	1.15
28	Tietê	47°43'7,251"	23°1'50,726"	540	cultura de milho	25,0	17,6	236	147	2 - DP	0.74	1.27
29	Chavantes	49°47'4,792"	23°0'40,219"	580	cultura de café	25,4	19,3	174	166	2 - PO	0.69	1.19
30	Maracáí	50°40'11,287"	22°37'32,904"	360	pastagem	24,8	17,7	231	210	2 - PO	1.09	1.88
31	Barra Bonita	48°33'52,266"	22°26'23,168"	600	cultura de café	25,2	18,8	224	184	2 - PO	0.60	1.03
32	Itapuá	48°42'38,647"	22°15'12,417"	360	cultura de café	25,0	18,8	203	178	2 - PO	0.35	0.60
33	Ribeirão Preto	47°53'16,131"	21°9'40,307"	610	culturas anuais	24,3	19,3	274	271	2 - PO	0.95	1.64
34	Morro Agudo	47°56'23,933"	20°45'6,099"	550	pastagem	25,1	19,6	270	242	2 - PO	0.69	1.19
35	Pedregulho	47°26'9,184"	20°5'0,834"	820	pastagem	24,9	20,0	309	238	2 - PO	0.88	1.52
36	Miguelópolis	48°2'3,786"	20°11'42,096"	420	pastagem	23,9	18,9	308	237	2 - PO	0.73	1.26
37	Ituverava	47°47'20,68"	20°13'10,976"	560	floresta secundária	23,9	18,9	308	237	2 - PO	0.85	1.46
38	Batatais	47°31'49,851"	20°5'16,639"	580	cerrado	22,7	17,3	282	246	2 - PO	0.99	1.71
39	Sorocaba	47°34'41,977"	23°30'50,175"	620	cerrado	23,9	17,1	232	174	2 - DP	0.61	1.05
40	Mogi-Mirim	47°11'20,447"	22°28'56,386"	640	mata nativa	24,3	18,0	243	196	2 - DP	1.04	1.79
41	Tatuí	47°54'42,765"	23°16'39,127"	540	pastagem	25,3	17,1	223	176	2 - DP	0.56	1.12
42	Cordeirópolis	47°26'43,847"	22°29'19,413"	700	mata nativa	24,2	18,0	266	212	2 - DP	0.86	1.48
43	São José do Rio Preto	49°20'15,645"	20°43'59,791"	560	cerrado	25,3	20,0	254	234	2 - PO	0.42	0.72
44	Ouro Verde	51°40'23,293"	21°34'1,149"	360	mata nativa	25,8	20,0	197	156	2 - PO	0.44	0.76
45	Barretos	48°34'27,829"	20°35'57,75"	480	pastagem	25,0	19,6	240	237	2 - PO	0.35	0.60
46	Pederneiras	48°58'1,21"	22°19'18,051"	460	pastagem	24,9	18,7	204	256	2 - PO	0.29	0.50
47	Atibaia	46°39'11,227"	23°3'32,76"	780	pastagem	22,8	16,2	240	198	1	0.90	1.55
48	Piquete	45°11'47,301"	22°34'36,295"	660	pastagem	24,7	18,3	228	211	1	0.92	1.59
49	Itapeçerica da Serra	46°48'58,163"	23°37'28,534"	820	eucalipto	20,7	13,9	211	183	1	0.74	1.27
50	São Roque	47°3'35,815"	23°35'12,023"	1050	pastagem	23,5	15,9	235	188	1	0.83	1.43
51	Campos do Jordão	45°32'34,933"	22°44'55,944"	1560	mata nativa	16,5	10,4	322	280	1	1.65	2.84
52	Pirassununga	47°25'34,974"	22°3'50,17"	620	cerrado	24,2	18,1	251	217	2 - DP	0.46	0.79
53	Altinópolis	47°30'10,337"	20°58'6,164"	880	pastagem	22,7	17,3	282	246	2 - PO	0.51	0.89
54	Ibaté	48°3'0,739"	21°54'24,368"	620	pastagem	21,9	15,8	249	267	2 - PO	0.49	0.84
55	Sales de Oliveira	47°43'46,421"	20°48'36,747"	680	cerrado	24,2	18,9	313	251	2 - PO	0.49	0.84
56	Botucatu	48°30'22,52"	23°0'37,647"	800	cerrado	23,0	16,5	223	187	2 - PO	0.39	0.67
57	Franca	47°24'53,258"	20°24'56,329"	960	cerrado	21,6	17,3	297	276	2 - PO	0.77	1.33
58	São José dos Campos	45°35'44,383"	23°2'52,714"	590	gramíneas	24,3	17,7	221	187	3	1.36	2.34
59	Guarulhos	46°22'28,967"	23°24'40,735"	760	eucalipto	23,2	16,4	258	194	3	1.25	2.15
60	Jundiaí	46°52'20,82"	23°16'25,118"	780	cerrado	23,9	17,3	236	211	1	0.78	1.34
61	Aparecida	45°16'34,959"	22°52'52,494"	640	pastagem	24,5	18,0	233	203	1	0.79	1.36
62	Cachoeira Paulista	45°1'46,968"	22°40'34,193"	600	pastagem	24,3	17,9	257	227	3	0.87	1.50
63	Guaratinguetá	45°8'30,593"	22°46'53,039"	560	gramíneas	24,7	18,2	221	204	1	0.59	1.01
64	Mogi das Cruzes	46°14'33,976"	23°28'20,558"	1100	floresta secundária	23,1	16,3	205	172	3	1.35	2.32
65	Bananal	44°16'23,946"	22°33'10,584"	460	gramíneas	25,3	18,8	260	218	1	0.68	1.17
66	Santa Branca	45°46'49,604"	23°31'26,339"	760	pastagem	23,4	16,6	228	199	1	0.75	1.30
67	Bragança Paulista	46°32'45,728"	22°50'44,26"	860	eucalipto	22,1	15,7	262	227	1	2.12	3.65
68	Campinas	47°10'24,128"	23°4'53,078"	720	eucalipto	23,7	17,8	246	222	2 - DP	1.94	3.34
69	Campos do Jordão	45°28'25,813"	22°37'23,059"	1780	mata nativa	16,5	10,4	322	280	1	5.49	9.46
70	Apiáí	48°41'39,58"	24°26'31,504"	840	mata nativa	22,3	15,0	184	165	1	2.25	3.89
71	Piquete	45°12'11,829"	22°33'37,333"	1390	mata nativa	24,7	18,3	228	211	1	0.69	1.19
72	Sete Barras	48°1'15,849"	23°58'3,429"	800	mata nativa	27,7	20,1	245	179	3	1.83	3.15
73	Cananéia	47°56'54,407"	24°58'24,258"	10	gramíneas	27,7	19,8	319	229	3	1.58	2.72
74	Itanhaém	46°48'38,457"	24°9'12,878"	20	gramíneas	27,9	20,5	263	196	3	0.49	0.84

Nº de pontos	Município	X (W)	Y (S)	Altitude (m)	Cobertura vegetal	TEMP JAN	TEMP JUL	CHUVA JAN	CHUVA DEZ	Morfoestrutura	C (%)	MO (%)
75	São José dos Campos	45°56'58,01"	23°5'9,781"	520	culturas anuais	24,3	17,7	221	187	3	22.03	37.98
76	Botucatu	48°32'14,361"	22°52'14,881"	780	gramíneas	23,0	16,5	223	187	2 - PO	0.90	1.55
77	Silveiras	44°52'25,549"	22°42'22,435"	750	pastagem	24,8	18,4	260	221	1	0.93	1.60
78	Jundiaí	46°47'15,421"	23°17'36,128"	950	pastagem	23,9	17,3	236	211	1	0.67	1.15
79	Flórida Paulista	51°9'45,564"	21°36'4,756"	490	pastagem	25,6	19,7	200	162	2 - PO	0.76	1.31
80	Conchas	48°3'44,067"	23°1'2,279"	620	gramíneas	25,0	18,4	201	182	2 - DP	0.93	1.60
81	Porangaba	48°6'8,666"	23°11'51,049"	660	gramíneas	23,7	17,6	246	222	2 - DP	1.74	3.00
82	Guareí	48°11'39,368"	23°28'34,716"	750	gramíneas	23,6	16,8	190	162	2 - DP	2.06	3.55
83	Itirapina	47°47'3,236"	22°10'41,562"	800	cerrado	23,3	17,1	264	195	2 - PO	0.14	0.24
84	Itatinga	48°30'7,898"	23°6'3,772"	580	pastagem	22,7	16,2	226	190	2 - PO	0.30	0.51
85	Campinas	46°59'57,998"	22°49'55,494"	650	pastagem	23,7	17,8	246	222	2 - DP	0.27	0.46
86	Botucatu	48°22'18,042"	22°56'46,286"	420	pastagem	23,0	16,5	223	187	2 - PO	0.29	0.50
BERTOLANI et al., 2000												
87	Garça	640306	754334	648	café	24,7	17,4	251	178	2 - PO	0.35	0.60
88	Pirajuí	653377	756384	577	pastagem	24,2	17,5	159	160	2 - PO	0.36	0.62
89	Gália	652680	753127	592	café	24,7	17,4	251	178	2 - PO	0.32	0.55
90	Garça	630407	754507	665	café	24,1	18,0	228	199	2 - PO	0.61	1.05
91	Presidente Alves	654114	754500	611	pastagem	24,7	17,4	251	178	2 - PO	0.16	0.27
92	Vera Cruz	625075	753850	489	pastagem	24,1	18,0	228	199	2 - PO	0.33	0.59
93	Garça	630825	754498	670	pastagem	23,9	17,8	208	194	2 - PO	0.40	0.29
94	Marília	604321	754299	622	pastagem	24,0	17,8	217	191	2 - PO	0.36	0.62
95	Lucianópolis	650173	752205	560	pastagem	24,0	17,8	217	191	2 - PO	0.36	0.62
96	Gália	651396	753321	684	pastagem	24,7	17,4	251	178	2 - PO	0.41	0.71
97	Pirajuí	647700	755496	575	pastagem	23,9	17,8	208	194	2 - PO	0.67	1.15
98	Vera Cruz	625200	753750	518	pastagem	24,1	18,0	228	199	2 - PO	0.60	1.03
MENK et al., 1995												
99	Espírito Santo do Turvo	653745	748994	508	eucalipto	24,9	18,6	190	183	2 - PO	0.40	0.69
100	Espírito Santo do Turvo	664541	748670	552	pastagem	24,9	18,6	190	183	2 - PO	0.39	0.67
101	Espírito Santo do Turvo	667028	749354	501		24,9	18,6	190	183	2 - PO	0.51	0.88
102	Espírito Santo do Turvo	666200	748810	520	pastagem	24,9	18,6	190	183	2 - PO	0.62	1.07
103	Espírito Santo do Turvo	666070	748644	520		24,9	18,6	190	183	2 - PO	0.96	1.65
104	Espírito Santo do Turvo	663240	748554	555	pastagem	24,9	18,6	190	183	2 - PO	0.30	0.52
105	Espírito Santo do Turvo	656600	749922	590	pastagem	24,9	18,6	190	183	2 - PO	0.59	1.02
OLIVEIRA, 1995												
106	Miguelópolis	794100	776200	615	culturas anuais	23,9	18,9	308	237	2 - PO	0.65	1.12
107	Miguelópolis	801900	776100	525	culturas anuais	23,9	18,9	308	237	2 - PO	1.17	2.02
108	Ipuã	810100	774050	540	culturas anuais	25,2	19,9	238	211	2 - PO	1.19	2.05
109	Guaíra	757700	776470	495	pastagem	25,2	19,9	238	211	2 - PO	0.82	1.41
110	Guaíra	764900	776310	500	culturas anuais	25,2	19,9	238	211	2 - PO	0.91	1.57
111	Guaíra	775000	775500	515	pastagem	25,2	19,9	238	211	2 - PO	1.02	1.76
112	Miguelópolis	813800	776180	515	culturas anuais	23,9	18,9	308	237	2 - PO	1.45	2.50
113	Guaíra	783000	774500	520	culturas anuais	25,2	19,9	238	211	2 - PO	0.74	1.27
114	Miguelópolis	794800	776170	580	pastagem	23,9	18,9	308	237	2 - PO	1.41	2.43
115	Miguelópolis	774900	777190	490	pastagem	25,2	19,9	238	211	2 - PO	0.88	1.52
116	Guaíra	757700	776400	461	pastagem	25,2	19,9	238	211	2 - PO	0.44	0.76
OLIVEIRA, 1999a												
117	Espírito Santo do Pinhal	315300	754820	900	eucalipto	22,3	16,2	274	258	1	0.66	1.13
118	São Simão	220000	762600	640	pastagem	23,2	17,6	275	252	2 - PO	0.98	1.69
119	Corumbataí	47°41'19'	22°16'40"	890	pastagem	23,3	17,1	264	195	2 - PO	0.85	1.46
120	Leme	260000	754400	615	mata nativa	23,6	18,2	237	204	2 - DP	1.65	2.84
121	Piracicaba	783000	774500	520	culturas anuais	24,2	16,7	253	256	2 - DP	0.74	1.27
122	São Pedro	234000	750000	640	mata nativa	24,3	18,0	244	208	2 - PO	1.15	1.98
123	Miguelópolis	198000	751400	940	pastagem	23,9	19,3	274	271	2 - PO	0.75	1.29
124	Mogi-Guaçu	210000	764800	690	pastagem	24,3	17,9	255	224	2 - DP	0.80	1.38
125	Mogi-Mirim	272000	754000	625	culturas anuais	24,2	18,0	243	196	2 - DP	1.09	1.88
126	São Pedro	794100	776210	615	culturas anuais	22,3	18,0	244	208	2 - PO	0.65	1.12
127	Espírito Santo do Pinhal	298500	7512700	690	gramíneas	23,3	16,2	274	258	1	1.37	2.36
128	Itapira	200000	750000	550	gramíneas	24,3	17,1	264	195	1	0.33	0.57
129	São Carlos	47°48'25"	21°59'30"	800	pastagem	21,9	15,8	249	267	2 - PO	0.80	1.38
130	Registro	47°46'	24°24'	9	mata nativa	27,5	19,9	252	203	3	21.34	36.80
OLIVEIRA, 1999b												
131	São Pedro	211900	749860	580	mata nativa	24,3	17,9	263	208	2 - PO	0.17	0.29
132	Tietê	216500	746100	570	cana-de-açúcar	24,4	17,3	253	256	2 - DP	1.16	2.00
133	São Pedro	202000	750000	550	gramíneas	24,3	17,9	263	208	2 - PO	0.33	0.57
134	Santa Barbara D' oeste	242500	747090	640	cana-de-açúcar	24,8	18,2	234	182	2 - DP	1.19	2.05
135	Piracicaba	230600	750400	650	cana-de-açúcar	24,2	18,0	226	199	2 - DP	0.98	1.55
136	Mombuca	227900	745810	540	gramíneas	25,0	17,6	236	147	2 - DP	0.68	1.17
137	Capivari	237500	745650	560	mata nativa	24,8	18,2	234	182	2 - DP	1.17	2.02
138	Mombuca	225200	746300	560	cana-de-açúcar	25,0	17,6	236	147	2 - DP	0.48	0.83
139	Tietê	218500	745470	490	culturas anuais	25,0	17,6	236	147	2 - DP	0.38	0.65
140	Rio das Pedras	234400	747180	622		24,8	18,2	234	182	2 - DP	1.08	1.86
141	Piracicaba	220300	749470	570	gramíneas	25,0	17,6	236	147	2 - DP	0.89	1.53
142	Piracicaba	213800	748350	500	gramíneas	24,4	17,3	253	256	2 - DP	1.16	2.00