

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO EM DIFERENTES POSIÇÕES
TOPOGRÁFICAS EM ÁREA SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Liziane de Figueiredo Brito
Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Janeiro de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO EM DIFERENTES POSIÇÕES
TOPOGRÁFICAS EM ÁREA SOB CULTIVO DE CANA-DE-
AÇÚCAR**

Liziane de Figueiredo Brito

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SP

Janeiro de 2008

Brito, Liziane de Figueiredo
B862e Emissão de CO₂ do solo em diferentes posições topográficas em
área sob cultivo de cana-de-açúcar / Liziane de Figueiredo Brito. --
Jaboticabal, 2008
xiii, 102 f. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2008
Orientador: Newton La Scala
Banca examinadora: Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Zigomar
Menezes de Souza, Gener Tadeu Pereira, Wanderley José de Melo
Bibliografia

1. Respiração do solo. 2. Atributos físicos. 3. Geoestatística. 4.
Variação temporal I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Liziane de Figueiredo Brito – Filha de Ruy de Brito e Leila Maria de Figueiredo Brito, nasceu em 27 de dezembro de 1977, em Três Pontas, Minas Gerais. Em março de 2002, graduou-se no curso de Agronomia pela Universidade Federal de Lavras (UFLA – Lavras/MG), onde foi bolsista do Programa Especial de Treinamento – PET/SESu, vinculado ao Curso de Agronomia, no período de março de 1998 a março de 2002. Em fevereiro de 2004, obteve o título de Mestre em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas - Manejo e Conservação do solo e da Água) pela Universidade Federal de Lavras (UFLA – Lavras/MG). Em 30 de janeiro de 2008, obteve o título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal) pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Câmpus de Jaboticabal (FCAV–UNESP/Jaboticabal).

Diante de Deus, nenhuma ocupação é em si grande ou pequena.
Tudo adquire o valor do Amor com que se realiza. (Sulco, n.487)

À Fernando e Mariana, meus filhos,
que trouxeram mais luz e alegria ao nosso lar,
e à Roberto, meu esposo, pelo seu amor e incentivo.
Vocês foram a força a para realização deste trabalho!

À todos da minha família, por tudo que são para mim
e, em especial, à minha mãe, por todo apoio,
sem o qual este trabalho não seria possível!

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Newton La Scala, pela orientação e apoio durante todas as etapas do doutorado, pela disponibilidade e dedicação ao que faz e, em especial, agradeço por sua confiança, amizade e compreensão...

Ao Professor José Marques Júnior, pela acolhida, orientação, participação neste trabalho e por disponibilizar a estrutura laboratorial para realização das análises.

Ao Professor Wanderley José de Melo pela amizade, sugestões, ensinamentos e por ter aberto as portas do laboratório para realização das análises.

Ao Professor Gener Tadeu Pereira pela paciência, disponibilidade e ensinamentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e aos coordenadores Jairo Osvaldo Cazetta e Pedro Luís da Costa Aguiar Alves pela oportunidade e confiança.

Aos Professores Carlos Eduardo Pellegrino Cerri e Zigomar Menezes de Souza pela participação na banca examinadora e pelos comentários e sugestões muito construtivos.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro e concessão da bolsa de estudos.

Aos Professores Marcílio Vieira Martins Filho, Antônio Sérgio Ferraudó, Euclides Braga Malheiros, Durvalina Maria Mathias dos Santos, Marcos Omir Marques, pela disponibilidade e colaboração em fases distintas do doutorado.

Aos proprietários da Fazenda Santa Isabel, pelo empréstimo da área experimental, suporte para realização do experimento e por acreditarem e apoiarem práticas de pesquisa. A todos os funcionários da fazenda, pela acolhida e apoio prestados. Em especial, agradeço a José Soltero (“Fogo”) e José (“Pernambuco”), pelo grande apoio nas amostragens de solo, pela simplicidade e agradável convívio.

A todos os professores, funcionários e amigos do Departamento de Ciências Exatas pela acolhida, amizade, apoio e agradável convívio. Ao amigo Norival pelo apoio nas

amostragens de campo. Agradeço também pela sala de estudos, suporte de informática e todo apoio neste período.

A todos os funcionários e amigos do Laboratório de Bioquímica do professor Wanderley: Alex, Camila, Gabriel, Kárita, Leyser, Liandra, Luma, Roberto, Rodrigo, Sueli, Tathi, Valéria... pela amizade, apoio, ensinamentos e agradável convívio.

Aos todos os professores e funcionários do Departamento de Solos e Adubos pela amizade e colaboração durante este período. À Orivaldo Gomes, Orivaldo (“Nenê”) e Djair, pelo apoio nas amostragens de solo e análises de laboratório.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção (FEPP) da FCAV/UNESP pelo apoio nas amostragens de solo e preparo do material para laboratório.

Aos funcionários do setor de transportes da FCAV/UNESP pelos serviços prestados.

Aos colegas, amigos e parceiros das amostragens a campo, Alan, Diego, Disney, Gleibson, Leyser, Lívia, Milton César, Mariluce, Mira, Natacha, Rafael, Sérgio, Zigomar, pela amizade, ajuda e convívio saudável.

A TODOS, que de alguma maneira contribuíram para este trabalho, muito obrigada!

SUMÁRIO

	Página
Resumo	x
Summary	xii
Capítulo 1 – Considerações Gerais	1
1.1 – Introdução e justificativa.....	1
1.2 – Hipótese.....	5
1.3 – Objetivos.....	5
1.4 – Desenvolvimento do estudo.....	6
Referências Bibliográficas.....	6
Capítulo 2 – Emissão de CO₂ e atributos do solo em diferentes posições topográficas em área sob cultivo de cana-de-açúcar	12
Resumo.....	12
2.1 – Introdução	13
2.2 – Material e Métodos.....	14
2.3 – Resultados e Discussão.....	18
2.3.1 – Variação da emissão de CO ₂ do solo.....	18
2.3.2 – Variação dos atributos do solo.....	22
2.3.3 – Emissão temporal de CO ₂ e sua relação com temperatura e umidade do solo.....	24
2.4 – Conclusões.....	27
Referências Bibliográficas.....	27
Capítulo 3 – Variabilidade espacial da emissão de CO₂ e de atributos do solo em diferentes posições topográficas em área sob cultivo de cana-de-açúcar	34

Resumo.....	34
3.1 – Introdução.....	35
3.2 – Material e Métodos.....	37
3.3 – Resultados e Discussão.....	44
3.4 – Conclusões.....	67
Referências Bibliográficas.....	67
APÊNDICE.....	73

EMIÇÃO DE CO₂ DO SOLO EM DIFERENTES POSIÇÕES TOPOGRÁFICAS EM ÁREA SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – A variação espacial e temporal da emissão de CO₂ do solo é influenciada por atributos do solo relacionados à produção e ao transporte do gás solo-atmosfera. Entretanto, ainda são escassos estudos visando compreender o efeito da topografia sobre a variabilidade da emissão de CO₂ do solo, especialmente em área de conversão para o sistema de colheita da cana-de-açúcar mecanizada sem queima. Este trabalho tem como objetivo estudar as variações da emissão de CO₂ do solo, em área cultivada com cana-de-açúcar, com histórico de colheita mecanizada sem queima, sob diferentes formas do relevo e posições na encosta. Foram selecionadas uma área situada numa superfície côncava (CONC) e outras duas em posições contrastantes numa superfície linear (encosta superior – ESUP e encosta inferior – EINF). Foram conduzidas avaliações da emissão de CO₂ e de atributos do solo, nas três áreas, em duas situações distintas: (1) em 2004, um mês após plantio da cana-de-açúcar, foram conduzidas avaliações em pontos aleatórios em cada uma das três áreas, num mesmo dia, sendo a emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo avaliados ao longo de 7 meses e, (2) em 2005, um mês após o corte mecanizado da cana-de-açúcar crua, foi caracterizada a variabilidade espacial da emissão de CO₂ e demais atributos do solo, por meio da semivariância, nas mesmas posições topográficas. A emissão total de CO₂ no período de 7 meses de estudo em 2004 foi 19,26, 23,03 e 22,29 Mg CO₂ ha⁻¹ nas áreas CONC, ESUP e EINF, respectivamente. A variação temporal da emissão foi explicada por uma relação exponencial com temperatura, e uma relação linear com umidade do solo. O valor de Q_{10} , calculado para as posições CONC, ESUP e EINF, foi de 1,98 (±0,34), 1,81 (±0,49) e 1,71 (±0,31). O efeito da forma do relevo e da posição topográfica sobre a variação da emissão de CO₂ do solo foi dependente da época de amostragem. Densidade do solo, macroporosidade, resistência do solo à penetração, agregação e conteúdo de carbono orgânico oxidável explicaram as variações observadas na emissão de CO₂ em 2004, especialmente quando se compara a posição côncava com a encosta superior. Em 2005, correlações lineares simples com os

atributos do solo avaliados não permitem explicar mais que 12,2% (R^2) da variabilidade espacial da emissão de CO_2 do solo. A estrutura de variabilidade espacial da emissão de CO_2 é descrita por modelo exponencial na forma côncava e por modelos esféricos nas áreas situadas na forma linear. A forma do relevo determina diferenças no alcance da dependência espacial da emissão de CO_2 do solo e da estabilidade de agregados, sendo superior na forma côncava em relação à forma linear. A forma do relevo influencia a variabilidade espacial dos atributos do solo estudados, mantendo-se fixos o manejo e a classe de solo.

Palavras-chave: atributos do solo, dióxido de carbono, geoestatística, respiração do solo, variação espacial, variação temporal

SOIL CO₂ EMISSION IN DIFFERENT TOPOGRAPHIC POSITIONS UNDER SUGARCANE

SUMMARY - The spatial and temporal variation of soil CO₂ emission is influenced by several soil attributes related to CO₂ production and gas transport from soil to atmosphere. However, few studies aiming to understand the effect of topography on the variability of CO₂ emissions exist, especially on the sugarcane harvest system without prior burning. The objective of this work was to study the spatial and temporal changes of the soil CO₂ emission in an area cultivated with sugar cane, having a mechanized crop system, under different relief forms and slope positions. In a landscape it was selected one area located in a concave form (CONC) and two others located at superior (ESUP) and inferior (EINF) positions in a linear form. It was conducted measurements of soil CO₂ emission and soil attributes at the three different locations in two different situations: (1) in 2004, one month after sugarcane plantation, measurements were conducted with randomized repetitions for each area in each sampling day, and soil CO₂ emission, soil temperature and soil moisture were also monitored during a period of 7 months, and (2) in 2005, one month after sugarcane harvesting without burning, the spatial variability of soil CO₂ emission and soil attributes were characterized by the semivariance in the same topographic positions. Total soil CO₂ emission during this period was 19,26, 23,03 e 22,29 Mg CO₂ ha⁻¹ for CONC, ESUP e EINF areas, respectively. Temporal variability of soil CO₂ emission was explained by an exponential function with soil temperature and a linear function with soil moisture. The Q_{10} values were 1.98 (±0.34), 1.81 (±0.49) and 1.71 (±0.31) for CONC, ESUP and EINF, respectively. The effect of relief form and topographic position on soil CO₂ emission variation was dependent on the time of measurement. Bulk density, macroporosity, penetration resistance, aggregation and oxidizable organic carbon content explain the changes in soil CO₂ emission observed in 2004, especially when the CONC position was compared to ESUP. In 2005, simple linear correlations with soil attributes does not permit explain more than 12,2% of soil CO₂ emission spatial variability. Soil CO₂ emission variability models were exponential in the concave area and spherical in the

areas located in the linear surface. Relief form determined differences in the soil CO₂ emission and soil aggregation range value, being higher in the concave form when compared to the areas located in the linear form. Considering the same soil type and management, relief form affected the spatial variability of soil CO₂ emission and soil attributes.

Key words: soil attributes, carbon dioxide, geostatistics, soil respiration, spatial variation, temporal variation

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 – Introdução e justificativa

Segundo IPCC (2007), o dióxido de carbono (CO₂) é considerado o principal gás do efeito estufa adicional, visto que representa cerca de 60% do total das emissões mundiais de gases de efeito estufa, decorrente do aumento na concentração deste gás na atmosfera de 270 ppm (pré-industrial) para 379 ppm (2005).

Atividades humanas são apontadas como responsáveis por este aumento na concentração atmosférica de CO₂, tendo como principal fonte, a combustão de combustíveis fósseis e, em segundo lugar, é apontada a mudança no uso da terra, contribuindo com uma parcela significativa (22%), porém, menor. A conversão de florestas em áreas agrícolas é responsável por 10 a 30% das emissões deste gás. Além da derrubada de florestas, outras práticas agrícolas como manejo do solo, calagem e irrigação contribuíram para um decréscimo do carbono estocado no solo na última década por favorecerem a decomposição da matéria orgânica do solo (IPCC, 2001a,b). No Brasil, no entanto, a contribuição de atividades relacionadas à agricultura é significativamente maior, sendo responsável por 75% das emissões de CO₂ do país.

Por outro lado, a importância da agricultura neste cenário está também relacionada ao seu significativo potencial de mitigação de carbono atmosférico. Estima-se que o solo estoca cerca de 1500Pg de carbono orgânico, e este valor é mais de duas vezes a quantidade de carbono presente na atmosfera (720Pg) e cerca de três vezes mais que o carbono da biota terrestre (LAL, 2001). Dependendo do manejo do solo adotado pode-se reduzir a mineralização da matéria orgânica e favorecer a conservação do carbono estocado (KAY & VANDENBYGAART, 2002), existindo ainda a possibilidade de aumentar este estoque de carbono pelo aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo (MANN, 1986; BAYER et al., 2002; FRANZLUEBBERS, 2002; WEST & POST, 2002; CRUZ et al., 2003), de modo que o solo passaria a funcionar como seqüestrador de CO₂ atmosférico.

Estima-se que a emissão anual de carbono do solo em áreas agrícolas seja de $544 \pm 80 \text{ g C m}^{-2}$ (RAICH & SCHLESINGER, 1992), sendo esta taxa controlada basicamente pela produção de CO_2 no solo e pelo transporte deste gás solo-atmosfera (FANG & MONCRIEFF, 1999; JASSAL et al., 2004). A produção de CO_2 é um processo que reflete a atividade biológica e bioquímica do solo, incluindo a atividade microbiana e a respiração de raízes. Como consequência das trocas gasosas entre solo e atmosfera, o CO_2 produzido é, então, transportado para a atmosfera por meio de dois mecanismos: a difusão, que consiste no movimento do gás da zona de maior concentração para a zona de menor concentração, sendo responsável pelo transporte de quase todo o CO_2 produzido, e o fluxo de massa, que ocorre em função de um gradiente de pressão. Inúmeros fatores influenciam os processos de produção e transporte de CO_2 , sendo, portanto, condicionadores da variabilidade espacial e temporal da emissão solo-atmosfera.

A variabilidade temporal da emissão de CO_2 é governada, basicamente, pela variação da temperatura e umidade do solo (FANG et al., 1998; KANG et al., 2003; EPRON et al., 2004; EPRON et al., 2006).

Em área de plantação de *Pinus elliotti* na Florida, EUA, a temperatura do solo foi o principal fator determinante da variabilidade temporal da emissão de CO_2 (FANG et al., 1998). A umidade do solo, entretanto, não mostrou relação clara com a emissão de CO_2 , provavelmente pelo fato de ter se mantido praticamente constante, o que, segundo os autores, pode ter favorecido as altas correlações com temperatura, já que umidade nunca foi fator limitante durante o estudo.

Estudos realizados em área de plantação de eucalipto no Congo, entretanto, mostraram a umidade do solo como principal fator controlador das variações temporais da emissão de CO_2 , sendo verificada correlação positiva entre estes fatores (EPRON et al., 2004). Relação negativa entre emissão e umidade, no entanto, foi encontrada em área de floresta tropical úmida (Guiana Francesa) (EPRON et al., 2006).

Em estudo realizado na Coreia, enquanto a temperatura do solo explicou mais de 84 a 96% das variações temporais da emissão de CO_2 , a umidade do solo foi

significativamente o fator regulador das variações espaciais da emissão de CO₂ (KANG et al., 2003).

A variabilidade espacial da emissão de CO₂, entretanto, está diretamente relacionada à variabilidade espacial da temperatura e umidade do solo, e também de inúmeros outros atributos do solo que afetam o processo.

Segundo LA SCALA et al. (2000), XU & QI (2001) e SCHWENDENMANN et al. (2003), o teor de carbono orgânico total do solo favorece a emissão de CO₂ solo-atmosfera. EPRON et al. (2004), entretanto, não encontrou correlação entre respiração do solo e carbono orgânico do solo, e FANG et al. (1998) verificaram correlação negativa com matéria orgânica em solos minerais.

Variáveis relacionadas ao compartimento lábil da matéria orgânica do solo como a biomassa microbiana (XU & QI, 2001), biomassa de raízes finas (FANG et al., 1998; XU & QI, 2001; SCHWENDENMANN et al., 2003), relação C/N (EPRON et al., 2004) e liteira (FANG et al., 1998) favorecem positivamente a emissão de CO₂.

LA SCALA et al. (2000) verificou também correlação linear positiva entre emissão de CO₂ e capacidade de troca de cátions e negativa com ferro ditionito. Teor de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio e valor de pH também promovem variações espaciais na emissão de CO₂ (XU & QI, 2001; SCHWENDENMANN et al., 2003).

Atributos físicos como textura, densidade do solo e porosidade do solo podem também exercer papel importante, afetando difusão do gás e atividade biológica (FANG et al., 1998; XU & QI, 2001; DILUSTRO et al., 2005). Segundo EPRON et al. (2006), com o aumento da umidade e densidade do solo, e decréscimo da biomassa de raízes e matéria orgânica do solo, houve aumento da emissão de CO₂, partindo de uma posição topográfica mais elevada (platô) no sentido da baixada.

As variações espaciais dos atributos do solo podem ser originadas a partir de processos naturais (geológico e, ou, pedológico), ou de práticas de uso e manejo do solo. Estudos recentes (SOUZA et al., 2003a, b; SOUZA et al., 2004a, b, c, d; EPRON et al., 2006; KANG et al., 2006) têm mostrado que a posição na paisagem e, ou, variações nas formas de relevo são agentes causadores de variabilidade espacial de

atributos do solo. Segundo estes autores, esta variabilidade ocorre em consequência das variações na trajetória do escoamento de água superficial e subsuperficial, sendo importante conhecer a continuidade da distribuição espacial destes atributos do solo para otimizar estratégias de manejo em áreas agrícolas.

Assim, a topografia é fator determinante da variabilidade espacial de atributos do solo, como umidade, temperatura, textura, densidade, porosidade, resistência à penetração, agregação, condutividade hidráulica, matéria orgânica, biomassa e nutrientes (KANG et al., 2003; SOUZA et al., 2003a, b; SOUZA et al., 2004a, b, c, d; EPRON et al., 2006; KANG et al., 2006).

Conseqüentemente, como estes atributos do solo influenciam a produção e o transporte de CO_2 solo-atmosfera, a topografia tem sido apontada como fator controlador das variações espaciais da emissão de CO_2 , podendo estar relacionada a diversos aspectos como orientação e comprimento da encosta, microtopografia ou posição ao longo de gradiente topográfico (HANSON et al., 1993; KANG et al., 2003; FAHEY et al., 2005; EPRON et al., 2006; KANG et al., 2006; RISCH & FRANK, 2006).

Deste modo, a caracterização da variabilidade espacial da emissão de CO_2 por meio da geoestatística fornece informações relevantes a respeito da sua distribuição espacial, ajudando a compreender a dinâmica do CO_2 entre solo e atmosfera. Os atributos envolvidos nos processos de produção e transporte de CO_2 também possuem grande variabilidade espacial, o que torna complexa a tarefa de explicar as variações espaciais da emissão de CO_2 .

Segundo FANG et al. (1998) e RAYMENT & JARVIS (2000), os altos valores de coeficientes de variação obtidos para emissão de CO_2 do solo justificam o uso da geoestatística para modelar sua dependência espacial. Em adição, existe grande interesse científico em conhecer as características da distribuição espacial da emissão de CO_2 do solo, pois ajudam na modelagem do fenômeno para grandes áreas.

Atualmente, a área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil é de 6,2 milhões de hectares, sendo que a área plantada no Estado de São corresponde a 52,9% desta área total (CONAB, 2008) . A importância do setor canavieiro no cenário global está relacionada à sua eficiência energética. A utilização da biomassa para produção de

energia constitui uma importante estratégia na mitigação do aquecimento global, com destaque para o programa do etanol, que constitui, atualmente, o maior programa de mitigação no mundo. Em adição, considerando a extensão da área plantada com a cultura, a substituição do sistema de colheita da cana-de-açúcar com queima dos resíduos pela colheita mecanizada da cana crua, pode ter efeito sobre o balanço global de carbono (RAZAFIMBELO et al, 2006).

CERRI et al. (2007) relatam a retirada de 18,5 Mt C por ano da atmosfera, considerando atividades industriais e agrícolas envolvidas no setor canavieiro. Deste total, a conversão para o sistema de colheita sem queima é responsável pelo seqüestro de 0,48 Mt C por ano no solo e pela não liberação de 0,05 Mt C por ano, equivalente à emissão de metano decorrente da queima.

Entretanto, ainda são necessários estudos visando compreender o efeito do manejo da cana-de-açúcar sem queima sobre a emissão de CO₂ solo atmosfera. CAMPOS (2003) encontrou valores inferiores para emissões médias anuais de CO₂ em áreas de cultivo de cana-de-açúcar no sistema tradicional de queima e colheita manual (0,13 g CO₂ m⁻² h⁻¹) quando comparado com o sistema de colheita mecanizada sem a queima do canavial (0,14 g CO₂ m⁻² h⁻¹).

1.2 – Hipótese

A topografia (forma do relevo e posição na encosta) tem efeito sobre a variação espacial e temporal da emissão de CO₂ do solo-atmosfera.

1.3 – Objetivos

Os principais objetivos do presente estudo foram: (1) verificar o efeito da topografia na variação espacial e temporal da emissão de CO₂ do solo; (2) determinar atributos do solo controladores destas variações da emissão de CO₂ do solo; (3)

caracterizar a variabilidade espacial da emissão de CO₂ do solo e de atributos do solo relacionados aos processos de produção e transporte de CO₂.

1.4 – Desenvolvimento do estudo

Foram realizadas avaliações da emissão de CO₂ do solo e de atributos do solo relacionados aos processos de produção de CO₂ no interior do solo e transporte do gás solo-atmosfera, em diferentes posições na encosta, numa área agrícola cultivada com cana-de-açúcar, caracterizada por apresentar diferentes formas de relevo.

Num primeiro estudo, foram realizadas avaliações aleatórias da emissão de CO₂ e dos demais atributos do solo estudados em três posições topográficas, sendo as avaliações da emissão de CO₂ repetidas ao longo de sete meses de estudo, buscando compreender aspectos relacionados às variações espaciais e temporais da emissão de CO₂. Posteriormente, num segundo estudo, as avaliações foram realizadas nas mesmas posições topográficas, nos pontos de cruzamento de uma malha de amostragem, visando caracterizar a variabilidade espacial da emissão de CO₂ e dos demais atributos do solo avaliados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAYER, C.; DICK, D. P.; RIBEIRO, G. M.; SCHEUERMANN, K. K. Estoques de carbono em frações da matéria orgânica afetados pelo uso e manejo do solo, com ênfase ao plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 3, p. 401-406, 2002.

CAMPOS, D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono**. 2003. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar – Safra 2007/2008 – Terceiro levantamento, novembro/2007.** Disponível em:

http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3_levantamento0708_nov2007.pdf>,

Acesso em: 21 jan. 2008.

CRUZ, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; FLORES, C. A.; SILVA, J. B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1105-1112, 2003.

DILUSTRO, J. J.; COLLINS, B.; DUNCAN, L.; CRAWFORD, C. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. **Forest, Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, n. 1, p. 85-95, 2005.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; MOUVONDY, W.; MABIALA, A.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOFFRE, R.; JOURDAN, C.; BONNEFOND, J.; BERBIGIER, P.; HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. **Forest, Ecology and Management**, Amsterdam, v. 202, n. 1-3, p. 149-160, 2004.

EPRON, D.; BOSC, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

FAHEY, T. J.; SICCAM, T. G.; DRISCOLL, C. T.; LIKENS, G. E.; CAMPBELL, J.; JOHNSON, C. E.; BATTLES, J. J.; ABER, J. D.; COLE, J. D.; FISK, M. C.; GROFFMAN, P. M.; HAMBURG, S. P.; HOLMES, R. T.; SCHWARZ, P. A.; YANAI, R. D. The biogeochemistry of carbon at Hubbard Brook. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 75, n. 1, p. 109–176, 2005.

FANG, C.; MONCRIEF, J. B. A model for soil CO₂ production and transport 1: Model development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 95, n. 4, p. 225-236, 1999.

FANG, C.; MONCRIEFF J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dodrecht, v. 205, n. 2, p. 135-146, 1998.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 95-106, 2002.

HANSON, P. J.; WULLSCHLEGER, S. D.; BOHLMAN, S. A.; TODD, D. E. Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest. **Tree Physiology**, Victoria, v. 13, n. 1, p. 1-15, 1993.

IPCC, 2001a: **Climate Change 2001: Synthesis Report**. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WATSON, R.T. and the Core Writing Team. (Ed.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.

IPCC, 2001b: **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M., van der LINDEN, P. J.; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. (Ed.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

IPCC, 2007. **Mudança do Clima 2007: A Base das Ciências Físicas. Sumário para os Formuladores de Políticas do Grupo I. Quarto Relatório de Avaliação do IPCC**. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/3881.html>>. Acesso em: novembro de 2007.

JASSAL, R. S.; BLACK, T. A.; DREWITT, G. B.; NOVAK, M. D.; GAUMONT-GUAY, D.; NESIC, Z. A model of the production and transport of CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 124, n. 3-4, p. 219-236, 2004.

- KANG, S.; DOH, S.; LEE, D.; LEE, D.; JIN, V. L.; KIMBALL, J. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, n. 10, p. 1427-1437, 2003.
- KANG, S.; LEE, D.; LEE, J.; RUNNING, S.W. Topographic and climatic controls on soil environments and net primary in a rugged temperate hardwood forest in Korea. **Ecological Research**, Tsukuba, v. 21, n. 1, p. 64-74, 2006.
- KAY, B. D.; VANDENBYGAART, A. J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 107–118, 2002.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; CORÁ, J.E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, 2000.
- LAL, R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 71, p. 145-191, 2001.
- MANN, L. K. Changes in soil carbon storage after cultivation. **Soil Science**, Baltimore, v. 142, n. 5, p. 279-288, 1986.
- RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, Stockholm, v. 44, n. 2, p. 81-99, 1992.
- RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 1, p. 35-45, 2000.
- RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C.; Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystem and Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285-289, 2006.

RISCH, A. C.; FRANK, D. A. Carbon dioxide fluxes in a spatially and temporally heterogeneous temperate grassland. **Oecologia**, Berlin, v. 147, n. 2, p. 291-302, 2006.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111-128, 2003.

SOUZA, C. K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1067-1074, 2003a.

SOUZA, C. K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de um latossolo em Jaboticabal – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 486-495, 2003b.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2004a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 491-499, 2004b.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 309-319, 2004c.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 51-58, 2004d.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 6, p. 1930-1946, 2002.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a Young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 6, p. 667-677, 2001.

CAPÍTULO 2 - EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO EM DIFERENTES POSIÇÕES TOPOGRÁFICAS EM ÁREA SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – A variação temporal e espacial da emissão de CO₂ solo-atmosfera é influenciada por inúmeros atributos do solo relacionados à produção de CO₂ e à difusão do gás no solo. Ainda são escassos, entretanto, estudos de longa duração visando compreender o efeito da topografia na variação da emissão deste gás especialmente em áreas agrícolas sob clima tropical. O objetivo deste trabalho foi verificar o efeito da topografia na variação espacial e temporal da emissão de CO₂ solo-atmosfera e identificar os atributos do solo associados a estas variações, em área de latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil. A emissão total de CO₂ no período de sete meses após o plantio da cana-de-açúcar foi de 19,26, 23,03 e 22,29 Mg CO₂ ha⁻¹ nas posições cônica (CONC), encosta superior (ESUP) e encosta inferior (EINF), respectivamente, enquanto os valores médios variaram entre 0,23 e 0,71; 0,27 e 0,90 e 0,31 e 0,80g CO₂ m⁻² h⁻¹. A variação temporal da emissão em cada uma das áreas foi explicada por uma relação exponencial entre emissão de CO₂ e temperatura do solo, e uma relação linear da emissão deste gás com a umidade do solo. O valor de Q_{10} , calculado para as posições CONC, ESUP e EINF, foi de 1,98 (±0,34), 1,81 (±0,49) e 1,71 (±0,31). Densidade do solo, macroporosidade, resistência do solo à penetração, agregação e conteúdo de carbono orgânico oxidável explicaram as variações observadas na emissão de CO₂, especialmente quando se compara a posição cônica com a encosta superior. O efeito da forma do relevo e da posição topográfica sobre a variação da emissão de CO₂ do solo foi dependente da época de amostragem.

Palavras-Chave: atributos do solo, dióxido de carbono, porosidade do solo, respiração do solo, variação espacial, variação temporal

2.1 – Introdução

A emissão de CO₂ solo-atmosfera é um componente importante do ciclo global de carbono, a qual é controlada basicamente por dois processos: a produção de CO₂ no interior do solo e o transporte gasoso do solo à atmosfera (FANG & MONCRIEFF, 1999). A produção de CO₂ tem como fontes principais a atividade microbiana e a respiração das raízes, e o transporte gasoso é governado pela equação de difusão. Esses processos são influenciados por inúmeros fatores, que determinam a variação espacial e temporal da emissão de CO₂. A temperatura e a umidade do solo, ou a interação entre ambos, são os principais responsáveis pela variabilidade temporal da emissão deste gás (KANG et al., 2003; EPRON et al., 2004), enquanto a sua variabilidade espacial é afetada também pelo teor de carbono orgânico, biomassa microbiana, biomassa de raízes finas, liteira, teor de nitrogênio, teor de magnésio, pH, capacidade de troca de cátions, ferro ditionito, densidade, porosidade e textura do solo (FANG et al., 1998; LA SCALA et al., 2000; XU & QI, 2001; EPRON et al., 2006).

Variações na emissão de CO₂ e em atributos do solo como umidade, temperatura, textura, densidade, porosidade, resistência à penetração, agregação, condutividade hidráulica, matéria orgânica, biomassa e nutrientes, dentre outros, têm sido compreendidas como função de orientação e comprimento da encosta (KANG et al., 2003; KANG et al., 2006), microtopografia (JIA et al., 2003), posição ao longo do gradiente topográfico (HANSON et al., 1993; RISCH & FRANK, 2006), declividade da encosta (SILVA et al., 2004) e forma da paisagem (SOUZA et al., 2003; SOUZA et al., 2004a, b, c). Estes aspectos da topografia afetam os fluxos de água superficial e subsuperficial, constituindo, segundo DANIELS & HAMMER (1992), a principal causa de variabilidade espacial de atributos do solo. A identificação dos fatores controladores da variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ do solo também é, portanto, dependente de variações topográficas.

Atualmente, no cenário mundial, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, com 6,2 milhões de hectares plantados. Esta área representa aproximadamente 11,5% da área total cultivada com os principais produtos agrícolas brasileiros. São Paulo é o

maior produtor, com 3,68 milhões de hectares plantados, correspondendo por 52,9% da área cultivada no Brasil. Considerando que a área total cultivada com cana-de-açúcar no Brasil aumenta a cada ano, atingindo um aumento de 13% na safra de 2007/2008 em relação à safra de 2006/2007, é de grande interesse estudar a variação espacial e temporal da emissão de CO₂ neste agrossistema (CONAB, 2008).

O objetivo deste trabalho foi verificar o efeito da topografia na variação espacial e temporal da emissão de CO₂ solo-atmosfera e identificar os atributos do solo associados a estas variações, em área de latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil.

2.2 – Material e Métodos

O experimento foi realizado na Fazenda Santa Isabel, situada nas coordenadas geográficas 21° 17' a 21° 18' de latitude Sul e 48° 08' a 48° 10' de longitude Oeste, no município de Jaboticabal (SP), em área sob cultivo de cana-de-açúcar há mais de 60 anos, com histórico de mais de 10 anos de colheita mecanizada da cana crua (início na safra 1992/1993). O clima foi caracterizado como Aw, tropical de verão chuvoso e inverno seco, segundo a classificação de Köepen. A temperatura média é 24,3 °C em janeiro e 18,8 °C em julho. A precipitação média anual está em torno de 1425 mm, com precipitações mensais totais de 239,5 mm e 25,3 mm para janeiro e julho, respectivamente. O solo predominante na área foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico textura argilosa (LVef), sendo a presença do Latossolo Vermelho eutrófico textura argilosa (LVe) restrita a uma pequena área dentro da posição côncava, segundo classificação da EMBRAPA (1999).

A topografia da área de estudo é caracterizada por apresentar duas formas de relevo, baseado no modelo de paisagem estabelecido por TROEH (1965), que associa perfil e curvatura do terreno, sendo uma forma côncava, a qual ocorre na posição mais elevada da paisagem, e outra linear, no sentido da encosta. Na forma linear foram definidas duas posições, encosta superior e encosta inferior, segundo critérios propostos pelo modelo de vertente de DARLYMPLE et al. (1968), apresentado em

CHRISTOFOLETTI (1980). As amostragens foram realizadas aleatoriamente na forma côncava (CONC) e nas duas posições dentro da encosta na forma linear, encosta superior (ESUP) e encosta inferior (EINF), situadas, respectivamente, a 612 m, 621 m e 515 m acima do nível do mar (Figura 2.1).

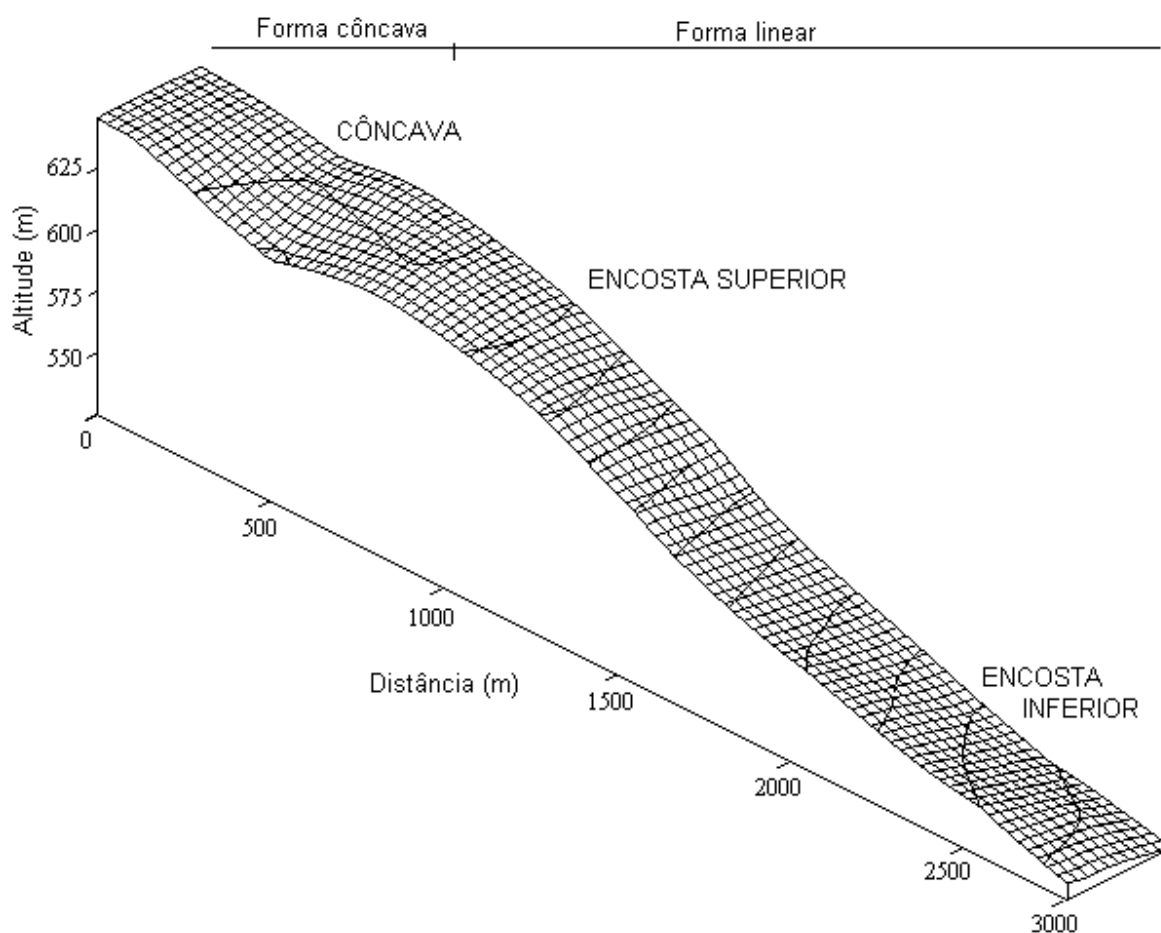


Figura 2.1. Perfil altimétrico abrangendo as formas côncava e linear da área em estudo, sendo identificadas as posições côncava, encosta superior e encosta inferior. Modificado de SOUZA (2003).

As avaliações da emissão de CO_2 foram realizadas em 17 dias, entre 28 de abril e 23 de novembro de 2004. O experimento teve início, portanto, há aproximadamente um mês após o plantio da cana-de-açúcar, o qual ocorreu entre 17 e 22 de março de 2004, após realizado o preparo convencional do solo (gradagens e subsolagem). As medições da emissão de CO_2 foram conduzidas pela manhã (9 às 11 horas) ou pela

tarde (14 às 16 horas) e, em alguns dias, em ambos os períodos da manhã e da tarde, com 10 repetições aleatórias dentro de cada área em cada dia de amostragem, utilizando uma câmara LI-6400-09 (LI-COR, NE USA) (HEALY et al., 1996). A câmara constitui um sistema fechado, com volume interno de 991 cm³ e área circular de contato com o solo de 71,6 cm² e analisa a concentração de CO₂ no seu interior por meio de espectroscopia de absorção ótica na região do infravermelho, a qual foi acoplada a anéis de PVC previamente instalados no solo, na entre-linha de plantio da cana-de-açúcar. A utilização de colares de PVC visa minimizar distúrbios no solo, causados pela inserção da câmara no mesmo, no momento da avaliação. Os colares de PVC são, portanto, instalados no solo pelo menos 24 horas antes das avaliações da emissão de CO₂.

A temperatura (T) do solo foi avaliada com sensor de temperatura acoplado à câmara, nos 17 dias de amostragem, em cada um dos 10 pontos de avaliação da emissão de CO₂ do solo, na profundidade de 0,00 a 0,15 m. A umidade (U) do solo foi determinada pelo método gravimétrico (GARDNER, 1986), em 11 dos 17 dias de amostragem, em amostras coletadas no momento da avaliação da emissão de CO₂ do solo na profundidade de 0,00 a 0,15 m.

A amostragem de solo foi realizada na profundidade de 0,00 a 0,15 m, com cinco repetições em cada área. A densidade do solo (DS) foi determinada em amostras indeformadas coletadas com amostrador adaptado a cilindros com dimensões médias de 5,04 cm de diâmetro interno e 4,01 cm de altura (EMBRAPA, 1997). O volume total de poros (VTP) foi calculado com base no valor de densidade. A distribuição de poros por tamanho (macroporosidade – Macro e microporosidade – Micro) foi determinada utilizando-se funil de placa porosa sob a tensão de 60 cm de altura de coluna d'água em amostras previamente saturadas. O volume de água retido na amostra nesta condição corresponde aos microporos, e os macroporos são calculados por diferença (EMBRAPA, 1997).

A estabilidade de agregados foi determinada segundo metodologia proposta por KEMPER & ROSENAU (1986), em peneiramento em água, com agregados que passam pela peneira de 7,93 mm e ficam retidos na peneira de 4,76 mm, separando-os

em classes, utilizando jogo de peneira de malhas 4,76 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm e 0,25 mm. Os resultados foram expressos em termos de diâmetro médio geométrico (DMG), porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm ($\varnothing > 2\text{mm}$), porcentagem de agregados com diâmetro entre 2 e 1 mm ($\varnothing 2-1\text{mm}$) e porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm ($\varnothing < 1\text{mm}$).

As amostras de solo coletadas com trado na profundidade de 0,00 a 0,15 m foram passadas em peneira de 2 mm e utilizadas nas seguintes determinações: a análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, com NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica de baixa rotação por 16 horas (modificado de EMBRAPA, 1997); o teor de Fe₂O₃ foi extraído pelo ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1979); e o teor de carbono orgânico oxidável (CO) foi obtido segundo RAIJ et al. (1987).

O teste de resistência do solo à penetração (RP) foi realizado com penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR – STOLF, segundo STOLF (1991), com 10 repetições em cada área, na profundidade de 0,00 a 0,15 m. A umidade (U) do solo foi determinada pelo método gravimétrico (GARDNER, 1986) em amostras coletadas no momento da realização do teste de resistência do solo à penetração em campo, na profundidade de 0,00 a 0,15 m.

O estoque de carbono (EstC) foi calculado com base na massa de solo equivalente (BAYER et al., 2000), nas profundidades de 0,00 a 0,15 m, 0,15 a 0,30 m e 0,30 a 0,45 m, pela expressão $EstC = (CO * DS * e) / 10$, sendo *EstC* é o estoque de carbono (Mg ha⁻¹), *CO* é o teor de carbono orgânico oxidável (g kg⁻¹), *DS* é a densidade do solo (kg dm⁻³) e *e* a espessura da camada estudada (cm) (neste caso corresponde a 15 cm).

Todas as variáveis determinadas foram avaliadas pela análise de variância de medidas repetidas, sendo utilizados os seguintes modelos, para cada conjunto de variáveis respostas: (1^o) emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo: $Y_{ij} = m + P_i + Erro(a) + T_j + P_iT_j + Erro(b)$, sendo *Y_{ij}* o valor de cada observação, *m* a média geral comum a todas as observações, *P_i* o efeito da posição topográfica *i*, *Erro(a)* o erro da parcela, *T_j* o efeito da época *j*, *P_iT_j* o efeito da interação entre posição

topográfica e época, $Erro(b)$ o resíduo geral; e (2^o) para demais variáveis avaliadas: $Y_{ij} = m + P_i + Erro(geral)$, sendo Y_{ij} o valor de cada observação, m a média geral comum a todas as observações, P_i o efeito da posição topográfica i , $Erro(geral)$ o resíduo geral. Aplicou-se o teste de Tukey nas comparações múltiplas das médias a 10% de probabilidade. Todos os resultados da análise estatística foram obtidos no programa SAS/Statistical Analysis Systems (SAS, 1998)

2.3 – Resultados e Discussão

2.3.1 – Variação da emissão de CO₂ do solo

A Figura 2.2 apresenta a variação da emissão de CO₂ do solo ao longo do período estudado (7 meses) nas áreas CONC, ESUP e EINF. A média total da emissão neste período para CONC, ESUP e EINF foi 0,38, 0,47 e 0,45 g CO₂ m⁻² h⁻¹, (Tabela 2.1), respectivamente, com variação no período estudado superior a 200%, como observado na posição ESUP, que apresentou emissões médias entre 0,27 e 0,90 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (Tabela 1A). Esta variação é conseqüência da sazonalidade do clima local. As menores emissões foram observadas no período de inverno (20/06/2004 a 21/09/2004), Figura 2.2), que se caracteriza por apresentar menores precipitações e temperaturas mais baixas. CAMPOS (2003) encontrou valores inferiores para emissões médias anuais de CO₂ em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, tanto no sistema tradicional de queima e colheita manual (0,13 g CO₂ m⁻² h⁻¹) como no sistema de colheita mecanizada sem a queima do canavial (0,14 g CO₂ m⁻² h⁻¹). Apesar destes valores inferiores, este autor também descreveu uma variação de 200% na emissão de CO₂ (0,07 a 0,21 g CO₂ m⁻² h⁻¹) ao longo do ciclo da cultura (08/1999 a 07/2000).

Esta grande variação temporal da emissão de CO₂ mostra a importância de avaliar a emissão em diferentes áreas agrícolas e escalas de tempo. Como a emissão de CO₂ é influenciada por um grande número de fatores, a extrapolação da emissão para áreas maiores deve considerar os fatores determinantes da sua variação temporal

e espacial, como temperatura do solo, umidade, textura, liteira e posição topográfica (SOTTA et al., 2006). Estimativas indiretas baseadas na diferença do estoque de carbono orgânico do solo num determinado intervalo de tempo também são utilizadas para prever perdas de carbono do solo. Mudanças no estoque de carbono orgânico do solo, decorrentes do manejo do solo no Brasil, foram estimadas com base em um mapa que associa diferentes tipos de solo e vegetação, combinado com resultados de uma base de dados de solos, conforme detalhado em BERNOUX et al. (2001; 2002).

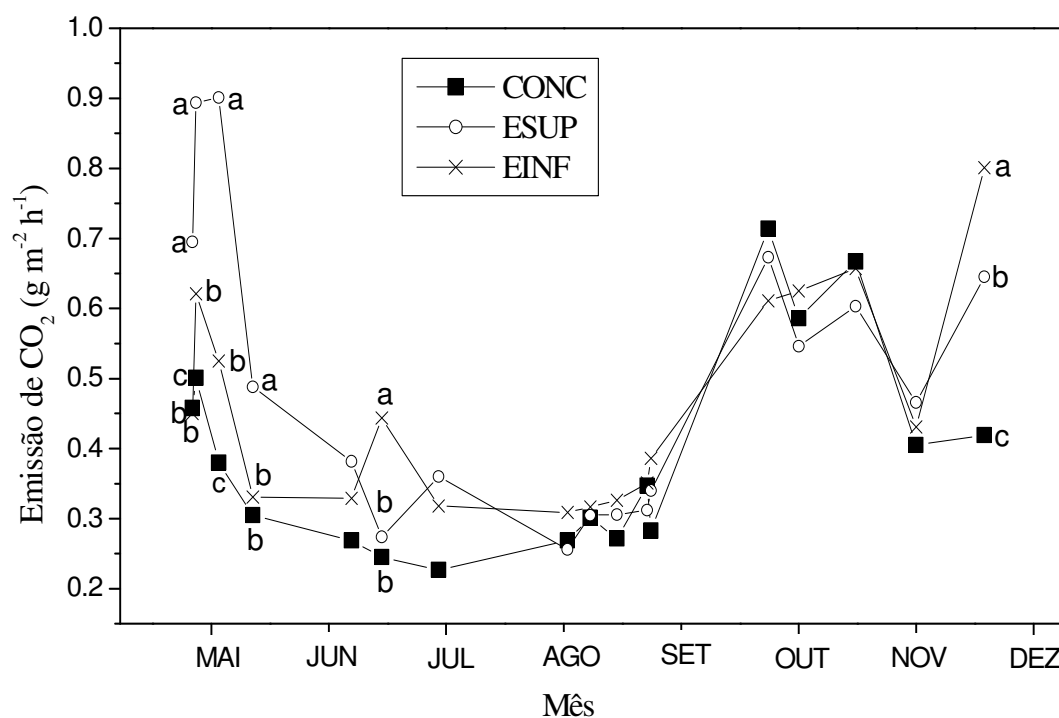


Figura 2.2. Emissão de CO₂ solo-atmosfera avaliada entre 28 de abril e 23 de novembro de 2004 nas posições côncava (CONC), encosta superior (ESUP) e encosta inferior (EINF). As letras indicam as avaliações onde foram observadas diferenças significativas na emissão de CO₂ do solo entre as posições topográficas num mesmo dia (Tukey, $p < 0,10$).

Tabela 2.1. Emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados nas posições cônica, encosta superior e encosta inferior, na profundidade de 0,00 a 0,15 m, em área de cultivo de cana-de-açúcar.

Atributos ¹	Cônica	Encosta Superior	Encosta Inferior	CV (%) ²
CO ₂ m (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	0,38 (0,21)	0,47 (0,26)	0,45 (0,24)	55,21
T (°C)	22,47 (3,85)	23,01 (3,61)	23,62 (3,82)	16,43
U (%)	21,35 (6,18)	21,21 (5,96)	20,15 (5,82)	28,68
CO ₂ t (Mg CO ₂ ha ⁻¹)	19,26	23,03	22,29	-
Argila (%)	61,00 A	57,67 A	60,63 A	4,79
Silte (%)	25,50 A	25,67 A	23,37 A	10,73
Areia total (%)	13,50 B	16,67 A	16,00 A	3,26
DS (kg dm ⁻³)	1,43 A	1,22 B	1,37 A	2,91
VTP (m ³ m ⁻³)	0,477 A	0,491 A	0,445 A	11,08
Micro (m ³ m ⁻³)	0,434 A	0,399 A	0,343 A	15,76
Macro (m ³ m ⁻³)	0,043 B	0,092 A	0,102 A	18,41
RP (MPa)	2,25 A	1,50 B	1,62 AB	28,24
DMG (mm)	1,33 B	2,05 A	1,75 AB	23,92
Ø>2mm (%)	50,96 B	74,77 A	66,17 AB	22,49
Ø2-1mm (%)	9,94 A	3,44 B	6,17 AB	62,21
Ø<1mm (%)	39,10 A	21,80 B	27,66 AB	37,11
CO (g dm ⁻³)	16,47 B	20,48 A	18,15 AB	12,10
EstC (Mg/ha ⁻¹)	35,24	37,36	37,39	-
Fe ₂ O ₃ (%)	15,35	19,25	21,00	-

¹Atributos: CO₂m, T e U (média da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo ao longo do período estudado e seus respectivos erros-padrão entre parênteses); CO₂t (emissão total de CO₂ ao longo dos 7 meses de estudo, correspondente a 209 dias); DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Micro (microporosidade), Macro (macroporosidade), RP (resistência do solo à penetração), DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (% de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø2-1mm (% de agregados com diâmetro entre 2 e 1 mm); Ø<1mm (% de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono), Fe₂O₃ (obtido pelo ataque sulfúrico). ²CV: coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

As diferenças nas emissões médias de CO₂ do solo num mesmo dia entre as posições topográficas foram significativas (p < 0,10) dependendo do período do ano (Figura 2.2 e Tabela 1A). HANSON et al. (1993) também relataram diferenças na emissão de CO₂ em algumas avaliações, e não em todo o período de estudo, comparando áreas situadas em diferentes posições topográficas (topo, declive da encosta ou vale). O efeito da topografia sobre a emissão de CO₂ foi observado especialmente nos primeiros dias de avaliação, quando o solo se encontrava quase totalmente desprovido de vegetação. O fato das diferenças nas emissões entre as posições não se manterem durante todo o experimento provavelmente esteja relacionada a outros fatores, como à contribuição da respiração de raízes com o

desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, concordando com PARKIN et al. (2005). Segundo este autor, a respiração das raízes mascarou o efeito da topografia na respiração do solo, sendo este efeito maior em raízes de milho, que é uma gramínea como a cana-de-açúcar, quando comparada com as raízes da soja.

Nos primeiros dias de avaliação, a posição ESUP apresentou as maiores emissões em relação às observadas em CONC e EINF, mostrando que a emissão de CO₂ é diferenciada dependendo da posição topográfica (Figura 2.2 e Tabela 1A). Outros estudos relatam um aumento considerável na emissão de CO₂ no sentido descendente da encosta, com maiores emissões nas posições mais baixas da paisagem, quando comparadas com as posições de topo e meio da encosta, o que está relacionado à contribuição da erosão, visto que na baixada observa-se um aumento na biomassa do solo em superfície (RISCH & FRANK, 2006), espessura e conteúdo de matéria orgânica no horizonte A e aumento de produtividade (DEJONG, 1981). No entanto, o aumento da emissão de CO₂ neste estudo não ocorreu nesta direção ao longo da encosta. A cobertura do solo proporcionada pela cultura da cana-de-açúcar, bem como a palhada remanescente na área neste sistema de colheita sem queima, provavelmente tenham atuado como fator de proteção do solo contra erosão, evitando perda de solo e redução do carbono orgânico em superfície, visto que a área na posição mais elevada da encosta apresentou maior emissão de CO₂ e teor de carbono orgânico do solo (Tabela 2.1). Por outro lado, comparando as formas de relevo côncava e linear, observa-se que a forma do relevo nem sempre está determinando diferenças na emissão de CO₂ no início do experimento, já que em algumas observações nenhuma diferença significativa ($p < 0,10$) foi observada entre as emissões de CONC e EINF.

A emissão total de CO₂ no período, obtida a partir da integral da emissão ao longo do tempo (área embaixo das curvas apresentadas na Figura 2.2), para cada uma das áreas CONC, ESUP e EINF, foi de 19,26, 23,03 e 22,29 Mg CO₂ ha⁻¹, respectivamente, mostrando uma maior variação entre as posições CONC e ESUP, com uma diferença de 3,77 Mg CO₂ ha⁻¹, após 7 meses de estudo (Tabela 2.1). Considerando que cerca de 5 Mg em eq-CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ (considerando fluxos de CO₂,

N_2O e CH_4) deixam de ser emitidos para a atmosfera no sistema de colheita da cana-de-açúcar sem queima, quando comparado com o sistema que utiliza queima (CAMPOS, 2003), o efeito da topografia na emissão de CO_2 é considerável. Embora na cultura da cana-de-açúcar ocorra liberação de CO_2 para atmosfera pelo processo de emissão de CO_2 do solo ou pela queima da cana-de-açúcar no caso do sistema de colheita manual com queima, as emissões deste gás não são consideradas como uma emissão líquida ao longo do tempo, pois, no ciclo seguinte, a cultura reabsorve o CO_2 emitido (EMBRAPA, 2002).

2.3.2 – Variação dos atributos do solo

A posição ESUP apresentou menor densidade do solo, maior macroporosidade, maior diâmetro médio geométrico, maior porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm, menor porcentagem de agregados com diâmetro entre 2 e 1 mm, menor porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1mm, menor resistência do solo à penetração e maior teor de carbono orgânico oxidável, quando comparada com CONC ($p < 0,10$) (Tabela 2.1). Considerando esses mesmos atributos do solo, os valores para a posição EINF foram intermediários, diferindo estatisticamente de ESUP em relação à densidade do solo e de CONC somente para macroporosidade.

A área que apresentou a menor densidade do solo, menor resistência do solo à penetração e maior macroporosidade foi aquela que apresentou a maior emissão de CO_2 nas primeiras avaliações (posição ESUP) (Tabela 2.1 e Tabela 1A). Estes resultados evidenciam a importância do espaço poroso do solo para o transporte de gases e, conseqüentemente, para atividade microbiana, o que está de acordo com resultados obtidos por XU & QI (2001).

FANG et al (1998) observaram que uma maior porosidade total facilita a entrada de oxigênio no solo, favorecendo a respiração e, conseqüentemente, aumentando a emissão de CO_2 . Apesar dos valores de volume total de poros para CONC, ESUP e EINF serem similares, as maiores emissões de CO_2 do solo (nas primeiras avaliações) foram observadas nos locais com maiores macroporosidades. Estes resultados mostram a influência da distribuição do tamanho de poros na emissão, já que a difusão

de gases no solo, segundo a lei de Fick, $E_{CO_2} = -D_{CO_2}^{ar} (VTP - U)(L/Le)^2 dC/dx$ (sendo E_{CO_2} a emissão de CO_2 solo-atmosfera, $-D_{CO_2}^{ar}$ o coeficiente de difusão do gás no ar, $(VTP - U)$ a porcentagem de volume poroso sem água e $(L/Le)^2$ o fator de tortuosidade) (ALVENÄS & JANSSON, 1997), depende não somente do volume total de poros (VTP), mas também da tortuosidade.

Assim, a distribuição de macro e microporos determinam as possíveis trajetórias dos gases no solo, afetando tanto a entrada de O_2 no solo como a saída de CO_2 . A reduzida macroporosidade observada na posição CONC ($0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) constitui, portanto, a principal limitação ao transporte do gás solo-atmosfera nesta área, quando comparada com a macroporosidade observada nas áreas situadas na forma linear. Os valores obtidos para ESUP ($0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e EINF ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), entretanto, apesar de superiores, estão próximos ao valor mínimo de porosidade de aeração ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) necessário ao desenvolvimento do sistema radicular (GUPTA & ALLMARAS, 1987).

As diferenças observadas para o teor de Fe_2O_3 e teor de carbono orgânico oxidável entre as posições topográficas são coerentes com os resultados obtidos para os índices de estabilidade de agregados (diâmetro médio geométrico (DMG), porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm ($\varnothing > 2\text{mm}$), porcentagem de agregados com diâmetro entre 2 e 1 mm ($\varnothing 2-1\text{mm}$), porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm ($\varnothing < 1\text{mm}$), Tabela 2.1), confirmando a relação positiva entre estes atributos e agregação (OADES, 1984; SCHWERTMANN & TAYLOR, 1989). Apesar da proteção física da matéria orgânica associada à agregação, as maiores emissões de CO_2 observadas na posição ESUP, provavelmente, estejam relacionadas ao maior teor de carbono orgânico desta área. Em acordo, relação positiva entre emissão de CO_2 e conteúdo de carbono orgânico do solo é relatada por LA SCALA et al. (2000) e XU & QI (2001). YOO et al. (2006) também mostram maior respiração do solo onde havia maior quantidade de substrato (carbono orgânico do solo) disponível para atividade microbiana.

O estoque de carbono na profundidade de 0,00 a 0,15m observado nas três posições topográficas variou entre 35,24 e 37,39 $Mg \text{ C ha}^{-1}$ (Tabela 2.1). Sob condições

experimentais semelhantes em relação ao tipo de solo (Latosolo Vermelho distroférico) e cultura (cana-de-açúcar), LUCA (2002) encontrou estoques de carbono em torno de 36,1 Mg C ha⁻¹ e 41,1 Mg C ha⁻¹, na profundidade de 0,00 a 0,15 m, em área com e sem queima dos resíduos da cana-de-açúcar, respectivamente. Os resultados obtidos no presente estudo, o qual foi conduzido em área com histórico de 10 anos de colheita da cana-de-açúcar crua, são inferiores aos relatados por LUCA (2002) em área sem queima da cana-de-açúcar.

2.3.3 - Emissão temporal de CO₂ e sua relação com temperatura e umidade do solo

A temperatura média do solo ao longo do período estudado variou entre 17,9 e 30,6°C, sendo o menor valor observado na área CONC e o maior na EINF (Tabela 1A). Os valores médios para cada dia de avaliação variaram entre 17,9 - 30,2°C, 18,8 - 29,1°C e 18,9 - 30,6°C para CONC, ESUP e EINF, respectivamente. Comparando as três áreas, diferenças significativas ($p < 0,10$) nos valores diários foram observadas em sua maioria entre CONC e EINF, com maior valor em EINF em nove dos dezessete dias avaliados. Os valores de temperatura do solo para ESUP não diferiram das demais áreas na maioria das observações. Os valores de temperatura do solo apresentaram uma variação, expressa pelo coeficiente de variação (CV), de 16,43% ao longo do período estudado (Tabela 2A). Analisando os dados obtidos para cada dia, entretanto, a variação dos dados é consideravelmente menor, com valores de coeficiente de variação entre 1,39 e 8,25%, à exceção de um dia de avaliação que apresentou coeficiente de variação de 13,15%.

A variação temporal da emissão de CO₂ do solo nas diferentes posições topográficas pode ser explicada por uma dependência exponencial da média da emissão diária em função da temperatura média do solo (LLOYD & TAYLOR, 1994; FANG & MONCRIEFF, 2001, XU & QI, 2001). O modelo $E_{CO_2} = a e^{-bT_{solo}}$ (Equação 1) ajustado foi linearizado, obtendo-se um modelo do tipo $Ln_{(E_{CO_2})} = a + bT_{SOLO}$ (Equação 2) (Tabela 2.2), o qual apresentou melhor ajuste baseado no coeficiente de determinação

do modelo (R^2) para a posição CONC em relação àquelas situadas na forma linear. A temperatura do solo explicou de 24 a 51% da variação temporal da emissão de CO_2 , dependendo da posição topográfica (Tabela 2.2), o que está relacionado à menor variação da temperatura do solo (CV entre 1,39 e 13,15%) em relação à variação da emissão de CO_2 (CV entre 19,3 e 61,3%) (Tabela 2A).

Tabela 2.2. Relação entre emissão de CO_2 e os atributos temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade (%) do solo nas três posições topográficas estudadas.

Paisagem	Parâmetros estimados				
	$Ln_{(E_{CO_2})} = a + b T_{SOLO}$ (Equação 2)				
	a	b	R^2	p	$Q_{10} = e^{10b}$
Côncava	$-2,556 \pm 0,399$	$0,068 \pm 0,017$	0,51	0,001*	1,98 ($\pm 0,34$)
Encosta superior	$-2,166 \pm 0,636$	$0,059 \pm 0,027$	0,24	0,044*	1,81 ($\pm 0,49$)
Encosta inferior	$-2,100 \pm 0,438$	$0,054 \pm 0,018$	0,39	0,010*	1,71 ($\pm 0,31$)
	$E_{(CO_2)} = a + b U_{SOLO}$ (Equação 4)				
	a	b	R^2	p	
Côncava	$0,170 \pm 0,142$	$0,012 \pm 0,006$	0,31	0,100*	
Encosta superior	$0,027 \pm 0,230$	$0,025 \pm 0,010$	0,43	0,039*	
Encosta inferior	$0,386 \pm 0,208$	$0,006 \pm 0,010$	0,04	0,563 ^{NS}	

$E_{(CO_2)}$: emissão de CO_2 ; T_{SOLO} : temperatura do solo; U_{SOLO} : umidade do solo; Q_{10} : sensibilidade da emissão de CO_2 do solo em relação a um aumento de 10°C na temperatura, sendo b proveniente da equação 2. *: significativo ($p < 0,10$); ^{NS}: não significativo ($p < 0,10$). Não existe diferença significativa para a sensibilidade da emissão de CO_2 em relação à temperatura e à umidade do solo para as três posições topográficas pelos testes T para paralelismo e F para coincidência ($p < 0,05$) (ZAR, 1999).

A estimativa do valor de Q_{10} , o qual representa a sensibilidade da emissão de CO_2 do solo em relação a um aumento de 10°C na temperatura, foi calculada a partir da equação $Q_{10} = e^{10b}$ (Equação 3), para cada posição topográfica, sendo b proveniente da equação 2. Os resultados obtidos para as posições CONC, ESUP e EINF foram 1,98 ($\pm 0,34$), 1,81 ($\pm 0,49$) e 1,71 ($\pm 0,31$), respectivamente, estando dentro da faixa derivada em investigações prévias (RAICH & SCHLESINGER, 1992; LLOYD & TAYLOR, 1994). Comparando as posições topográficas CONC e ESUP, verifica-se que a área CONC apresentou menor valor de Q_{10} e melhor estabilidade de agregados (Tabela 2.1). Este resultado, segundo DAVIDSON & JANSSENS (2006), pode advir de uma maior proteção física da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, uma redução da

sensibilidade da emissão em relação à temperatura do solo nessas áreas. No entanto, considerando as três posições topográficas, não foi possível concluir a respeito desta relação entre agregação e Q_{10} , visto que a EINF apresentou o menor valor de Q_{10} e não diferiu das demais áreas em relação à agregação.

Considerando todo o período em estudo, a umidade média do solo variou entre 13,2 a 29,7%, 14,6 a 30,5% e 12,6 a 28,5%, nas áreas CONC, ESUP e EINF, respectivamente. A variação da umidade do solo foi influenciada pela posição na encosta, visto que um maior número de diferenças significativas ($p < 0,10$) pode ser observado quando as posições ESUP e EINF são comparadas (Tabela 2A). O coeficiente de variação no período estudado foi de 28,68%, e considerando as avaliações diárias, os valores de coeficiente de variação estiveram entre 5,72 e 24,37% (Tabela 2A).

A variabilidade temporal da emissão de CO_2 foi ser explicada por uma dependência linear em relação à umidade do solo ($E_{(CO_2)} = a + bU_{SOLO}$) (Equação 4) nas áreas CONC e ESUP ($p < 0,10$) (Tabela 2.2). A umidade do solo explicou 31 e 43% da variação da emissão nestas áreas, respectivamente. A ausência de relação entre umidade do solo e emissão de CO_2 na posição EINF sugere que o efeito da umidade é dependente da posição topográfica.

Em síntese, a temperatura do solo influenciou a variação temporal da emissão de CO_2 nas três áreas estudadas enquanto o efeito da umidade do solo foi evidente somente em CONC e ESUP. Outros estudos relatam o efeito destes fatores sobre a variação temporal da emissão CO_2 . Em área de montanha na China, a emissão de CO_2 foi influenciada principalmente pelas variações na temperatura do solo (LI et al., 2007). Segundo estes mesmos autores, o efeito da umidade do solo foi constatado apenas quando a condição de umidade foi limitante. RETH et al. (2005) também observaram relação entre umidade do solo e emissão somente no período mais seco do ano. Resultados obtidos em condição de floresta tropical úmida na Amazônia (SOTTA et al., 2006) e na Ásia (KOSUGI et al., 2007) mostraram que a variabilidade temporal da emissão de CO_2 foi dependente especialmente da umidade do solo. Forte efeito de

ambos, temperatura e umidade do solo, sobre a emissão de CO₂ foi observado em área de florestas manejadas no Canadá (PENG et al., 2006).

Os resultados obtidos no presente estudo mostram a importância da determinação da emissão CO₂ do solo em diferentes situações, visando explicar variações espaciais e temporais da emissão. A complexidade do fenômeno estudado justifica a dificuldade em explicar as variações na emissão com atributos isolados, nas condições em que este estudo foi realizado, conforme relatado em outros estudos (SCHWENDENMANN et al., 2003; D'ANDRÉA, 2004). Os resultados apontam também para a necessidade de considerar o efeito de aspectos topográficos como a forma do relevo e a posição na encosta sobre a variação espacial da emissão de CO₂ do solo na extrapolação dos dados para grandes áreas.

2.4 - Conclusões

A temperatura e a umidade do solo influenciam a variação temporal da emissão de CO₂ solo-atmosfera.

A variação espacial da emissão de CO₂ ocorre em resposta a variações em atributos físicos (densidade do solo, macroporosidade, resistência do solo à penetração e agregação do solo) e teor de carbono orgânico do solo. O efeito da forma do relevo e da posição topográfica sobre a variação da emissão de CO₂ do solo é dependente da época de amostragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVENÄS, G.; JANSSON, P. E. Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 88, n. 1-4, p. 47-56, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping

systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 2, p. 101-109, 2000.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. CO₂ emission from mineral soils following land-cover change in Brazil. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 7, p. 779-787, 2001.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 888-896, 2002.

CAMPOS, D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono**. 2003. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2^a ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1980. 188p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar – Safra 2007/2008 – Terceiro levantamento, novembro/2007**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/3_levantamento0708_nov2007.pdf, Acesso em: 21 jan. 2008.

D'ANDRÉA, A. F. **Fluxo de CO₂ do solo em áreas com cafeeiros e povoamentos florestais**. 2004. 97 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

DANIELS, R. B.; HAMMER, R. D. **Soil geomorphology**. New York: John Wiley, 1992. 236 p.

DARLYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land surface model. **Geomorphologie**, Zeitschrift für, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, London, v. 440, n. 9, 2006.

DEJONG, E. Soil aeration as affected by slope position and vegetative cover. **Soil Science**, Baltimore, v. 131, n.1, p. 34–43, 1981.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1979.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento / EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Relatórios de referência. Emissões de gases de efeito estufa na queima de resíduos agrícolas**. Brasília: Embrapa Meio Ambiente, 2002. 108 p.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; MOUVONDY, W.; MABIALA, A.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOFFRE, R.; JOURDAN, C.; BONNEFOND, J.; BERBIGIER, P.; HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. **Forest, Ecology and Management**, Amsterdam, v. 202, n. 1-3, p. 149-160, 2004.

EPRON, D.; BOSC, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

FANG, C.; MONCRIEF, J. B. A model for soil CO₂ production and transport 1: Model development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 95, n. 4, p. 225-236, 1999.

FANG, C.; MONCRIEF, J. B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 33, n. 2, p. 155-165, 2001.

- FANG, C.; MONCRIEFF J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, n.2, p. 135-146, 1998.
- GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analyses**. Madison: ASA, 1986. p. 493-541. (Agronomy Monography, 9)
- GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances Soil Science**, New York, v. 6, n. 1, p. 65-100, 1987.
- HANSON, P. J.; WULLSCHLEGER, S. D.; BOHLMAN, S. A.; TODD, D. E. Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest. **Tree Physiology**, Victoria, v. 13, n. 1, p. 1-15, 1993.
- HEALY, R. W.; STRIEGL, R. G.; RUSSELL, T. F.; HUTCHINSON, G. L.; LIVINGSTON, G. P. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: Identification of physical processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 3, p. 740-747, 1996.
- JIA, S.; AKIYAMA, T.; MO, W.; INATOMI, M.; KOIZUMI, H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a cool temperate broad-leaved forest. 1. Measurement of spatial variance and factor analysis. **Japanese Ecology**, v. 53, n. 1, p. 13–22, 2003.
- KANG, S.; DOH, S.; LEE, D.; LEE, D.; JIN, V. L.; KIMBALL, J. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, n. 10, p. 1427-1437, 2003.
- KANG, S.; LEE, D.; LEE, J.; RUNNING, S.W. Topographic and climatic controls on soil environments and net primary in a rugged temperate hardwood forest in Korea. **Ecological Research**, Tsukuba, v. 21, n. 1, p. 64-74, 2006.
- KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: ASA, 1986. p. 425-441. (Agronomy Monography, 9)

KOSUGI, Y.; MITANI, T.; ITOH, M.; NOGUCHI, S.; TANI, M.; MATSUO, N.; TAKANASHI, S.; OHKUBO, S.; NIK, A.R. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 147, n. 1, p. 35-47, 2007.

LA SCALA JÚNIOR, N., MARQUES JÚNIOR, J., PEREIRA, G.T., CORÁ, J.E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, 2000.

LI, H.; YAN, J.; YUE, X.; WANG, M. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, 2007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&_tokey=%23TOC%235881%239999%2399999999%2399999%23FLA%23&_cdi=5881&_pubType=J&_auth=y&_acct=C000049647&_version=1&_urlVersion=0&_userid=972052&md5=d28f5b3e67c899de76fc4bae130a7a0c> Acesso em: 20 dez. 2007.

LLOYD, J.; TAYLOR, J. A. On the temperature-dependence of soil respiration. **Functional Ecology**, Oxford, v. 3, n. 8, p. 315-323, 1994.

LUCA, E.F. **Matéria orgânica e atributos do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana de açúcar**. 2002. 101 f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, n. 1/3, p. 319-337, 1984.

PARKIN, T. B.; KASPAR, T. C.; SENWO, Z.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L. Relationship of soil respiration to crop and landscape in the walnut creek watershed. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 6, n. 6, p. 812-824, 2005.

PENG, Y.; THOMAS, S. C. Soil CO₂ efflux in uneven-aged managed forests: temporal patterns following harvest and effects of edaphic Heterogeneity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 289, n. 1-2, p. 253-264, 2006.

RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, Stockholm, v. 44, n. 2, p. 81-99, 1992.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, C. O. **Análise química do solo para fins de fertilidade**, Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RETH, S.; MARKUS, R.; FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux – A modified model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 268, p. 21-33, 2005.

RISCH, A. C.; FRANK, D. A. Carbon dioxide fluxes in a spatially and temporally heterogeneous temperate grassland. **Oecologia**, Berlin, v. 147, n. 2, p. 291-302, 2006.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT, 1998**: user guide. Cary, 1998.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111-128, 2003.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B., WEED, S. B. (Ed.) **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

SILVA, A. C.; TORRADO, P. V.; MARTIN-NETO, L.; VASQUEZ, F. M.; PÉREZ, M. G. Soil organic matter and geomorphic surface stability relationship in an oxisol toposequence (SE Brazil). In: INTERNATIONAL MEETING OF THE INTERNATIONAL HUMIC SUBSTANCES SOCIETY, 12, 2004, São Pedro. **Proceedings...** v. 1, p. 623-626.

SOTTA, E. D.; VELDKAMP, E.; GUIMARÃES, B. R.; PAIXÃO, R. K.; RUIVO, M. L. P.; ALMEIDA, S. S. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. **Forest, Ecology and Management**, Amsterdam, v. 237, n. 1-3, p. 57-64, 2006.

SOUZA, C. K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1067-1074, 2003.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2004a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 491-499, 2004b.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 51-58, 2004c.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to countour maps. **American Journal of Scienci**, New Haven, v. 263, n. 3, p. 616-627, 1965.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a Young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 6, p. 667-677, 2001.

YOO, G.; SPOMIER, L. A.; WANDER, M. M. Regulation of carbon mineralization rates by soil structure and water in an agricultural field and a prairie-like soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, n. 1, p. 16-25, 2006.

ZAR, J. H. **Biostatistical analysis**. 4. ed. New Jersey. 1999.

CAPÍTULO 3 – VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO₂ E DE ATRIBUTOS DO SOLO EM DIFERENTES POSIÇÕES TOPOGRÁFICAS EM ÁREA SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – A variabilidade espacial da emissão de CO₂ é determinada pela variação de atributos do solo relacionados à produção de CO₂ no interior do solo e ao transporte do gás solo-atmosfera. Considerando que a distribuição espacial destes atributos sofre influência da topografia, o objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial da emissão de CO₂ e de atributos relacionados aos processos de produção e transporte do gás solo-atmosfera em diferentes posições topográficas em área sob cultivo de cana-de-açúcar. As avaliações foram realizadas em três áreas: uma na forma côncava e outras duas em posições contrastantes na forma linear (encosta superior e encosta inferior). Caracterizou-se a variabilidade espacial, por meio da semivariância, da emissão de CO₂ e dos atributos temperatura do solo, umidade do solo, granulometria, densidade do solo, volume total de poros, macroporosidade, microporosidade, resistência do solo à penetração, estabilidade de agregados, carbono orgânico oxidável e estoque de carbono. Correlações lineares simples com os atributos do solo avaliados não permitem explicar mais que 12,2% (R²) da variabilidade espacial da emissão de CO₂ do solo. A estrutura de variabilidade espacial da emissão de CO₂ é descrita por modelo exponencial na forma côncava e por modelos esféricos nas áreas situadas na forma linear. A forma do relevo determina diferenças no alcance da dependência espacial da emissão de CO₂ do solo e da estabilidade de agregados, sendo superior na forma côncava em relação à forma linear. A forma do relevo influencia a variabilidade espacial dos atributos do solo estudados, mantendo-se fixos o manejo e a classe de solo.

Palavras-Chave: cana-de-açúcar, carbono orgânico, dióxido de carbono, geoestatística, krigagem, respiração do solo

3.1 – Introdução

A emissão de CO₂ do solo é resultado de uma série de processos físicos e bioquímicos, que afetam a produção de CO₂ no interior do solo e seu transporte solo-atmosfera. A magnitude da emissão de CO₂ varia no tempo e espaço, dependendo das condições ambientais, características do solo e do manejo agrícola adotado.

Temperatura e umidade do solo são os principais controladores das variações na emissão de CO₂, especialmente variações temporais (KANG et al., 2003; EPRON et al., 2004). Outros atributos do solo, relacionados à matéria orgânica e porosidade do solo, têm sido citados como controladores dos padrões de variabilidade espacial da emissão de CO₂ (FANG et al., 1998; LA SCALA et al., 2000b; XU & QI, 2001; SCHWENDENMANN et al., 2003; EPRON et al., 2006). Aspectos topográficos como formas de relevo e posições na encosta, por sua vez, afetam a distribuição espacial destes fatores (SOUZA et al., 2004a, b, d; EPRON et al., 2006) e, conseqüentemente, da emissão de CO₂.

Portanto, compreender a variabilidade espacial da emissão de CO₂ é importante para entender a dinâmica do CO₂, visto que o estudo da dependência espacial ajuda na interpretação do fenômeno numa determinada escala. A alta variabilidade dos dados de emissão de CO₂ do solo observados por FANG et al. (1998) e RAYMENT & JARVIS (2000), por exemplo, que encontraram coeficientes de variação (CV) de 55% e 87%, justifica o uso da geoestatística na tentativa de modelar sua dependência espacial.

Segundo LA SCALA et al. (2000b) e LA SCALA et al. (2003), a estrutura de dependência espacial da emissão de CO₂ em solo descoberto pode ser explicada por modelos esféricos e, com menor freqüência, por modelos exponenciais, e os graus de dependência espacial da emissão de CO₂ nestes estudos enquadram-se nas classificações de forte ou moderada, segundo critérios propostos por CAMBARDELLA et al. (1994). ISHIZUKA et al. (2005), entretanto, observaram fraca dependência espacial da emissão de CO₂ com observações em intervalos de 3 m em ecossistemas naturais.

Os padrões de variabilidade espacial da emissão de CO₂ obtidos por RAYMENT & JARVIS (2000) e OHASHI & GYOKUSEN (2007) mostram considerável alteração na escala de representatividade de uma amostra dependendo da condição experimental, visto que o alcance da dependência espacial da emissão de CO₂ nestes estudos variou de 1 a 80 m.

Conhecer a distribuição espacial da emissão de CO₂ e dos fatores que afetam as perdas de carbono do solo em áreas agrícolas no Brasil é fundamental para condução de manejo sustentável, visto que fornecem informações que ajudam a definir práticas adequadas de manejo agrícola e avaliar o efeito da agricultura na qualidade ambiental, tanto do ponto de vista da manutenção da matéria orgânica do solo como da redução das emissões atmosféricas de CO₂.

Entretanto, ainda são poucos os estudos no Brasil que caracterizam a variabilidade espacial da emissão de CO₂ em áreas agrícolas e consideram aspectos topográficos como a forma do relevo e a posição na encosta.

Atualmente, a cana-de-açúcar constitui a principal cultura agrícola do Brasil, e mudanças no manejo de resíduos pode ter efeito sobre o balanço global de carbono (RAZAFIMBELO et al, 2006). Segundo CERRI et al. (2007), a adoção da colheita da cana-de-açúcar sem queima proporciona um seqüestro de 0,48 Mt C por ano no solo, além da não liberação de 0,05 Mt C por ano, equivalente à emissão de metano decorrente da queima. Entretanto, estudos são necessários estudos visando compreender o efeito do manejo da cana-de-açúcar sem queima sobre a emissão de CO₂ solo atmosfera.

Este trabalho tem como objetivo estudar a variabilidade espacial da emissão de CO₂ e de fatores relacionados aos processos de produção e transporte do gás solo-atmosfera em diferentes posições topográficas em área sob cultivo de cana-de-açúcar. Deste modo, propõe-se determinar os fatores que melhor descrevem a variabilidade espacial da emissão de CO₂ em posições topográficas contrastantes, cultivadas com a principal cultura agrícola da região.

3.2 – Material e Métodos

O experimento foi realizado na Fazenda Santa Isabel, situada nas coordenadas geográficas 21° 17' a 21° 18' de latitude Sul e 48° 08' a 48° 10' de longitude Oeste, no município de Jaboticabal (SP), em área sob cultivo de cana-de-açúcar há mais de 60 anos, com histórico de mais de 10 anos de colheita mecanizada da cana crua (início na safra 1992/1993). O clima foi caracterizado como Aw, tropical de verão chuvoso e inverno seco, segundo a classificação de Köepen. A temperatura média é 24,3 °C em janeiro e 18,8 °C em julho. A precipitação média anual está em torno de 1425 mm, com precipitações mensais totais de 239,5 mm e 25,3 mm para janeiro e julho, respectivamente. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico textura argilosa (LVef), segundo classificação da EMBRAPA (1999).

A topografia da área de estudo é caracterizada por apresentar duas formas de relevo, baseado no modelo de paisagem estabelecido por TROEH (1965), que associa perfil e curvatura do terreno, sendo uma forma côncava, a qual ocorre na posição mais elevada da paisagem, e outra linear, no sentido da encosta. Na forma linear foram definidas duas posições, encosta superior e encosta inferior, segundo critérios propostos pelo modelo de vertente de DARLYMPLE et al. (1968), apresentado em CHRISTOFOLETTI (1980). As amostragens foram realizadas na forma côncava (CONC) e nas duas posições dentro da encosta na forma linear, encosta superior (ESUP) e encosta inferior (EINF), situadas, respectivamente, a 612 m, 621 m e 515 m acima do nível do mar (Figura 3.1).

As amostragens, em cada área de estudo, foram realizadas nos pontos de cruzamento de uma malha com dimensão de 90 x 90 m, com 49 pontos distribuídos em intervalos regulares de 15 m, onde foram adicionados 20 pontos (5 em cada um dos 4 quadrantes), totalizando 69 pontos de amostragem por área, separados por distâncias que variam entre 7,5 m e 127,3 m (Figura 3.2). O adensamento da malha de amostragem tem como objetivos aumentar o número de pontos amostrados e obter pares de pontos separados por distâncias menores que 15 m.

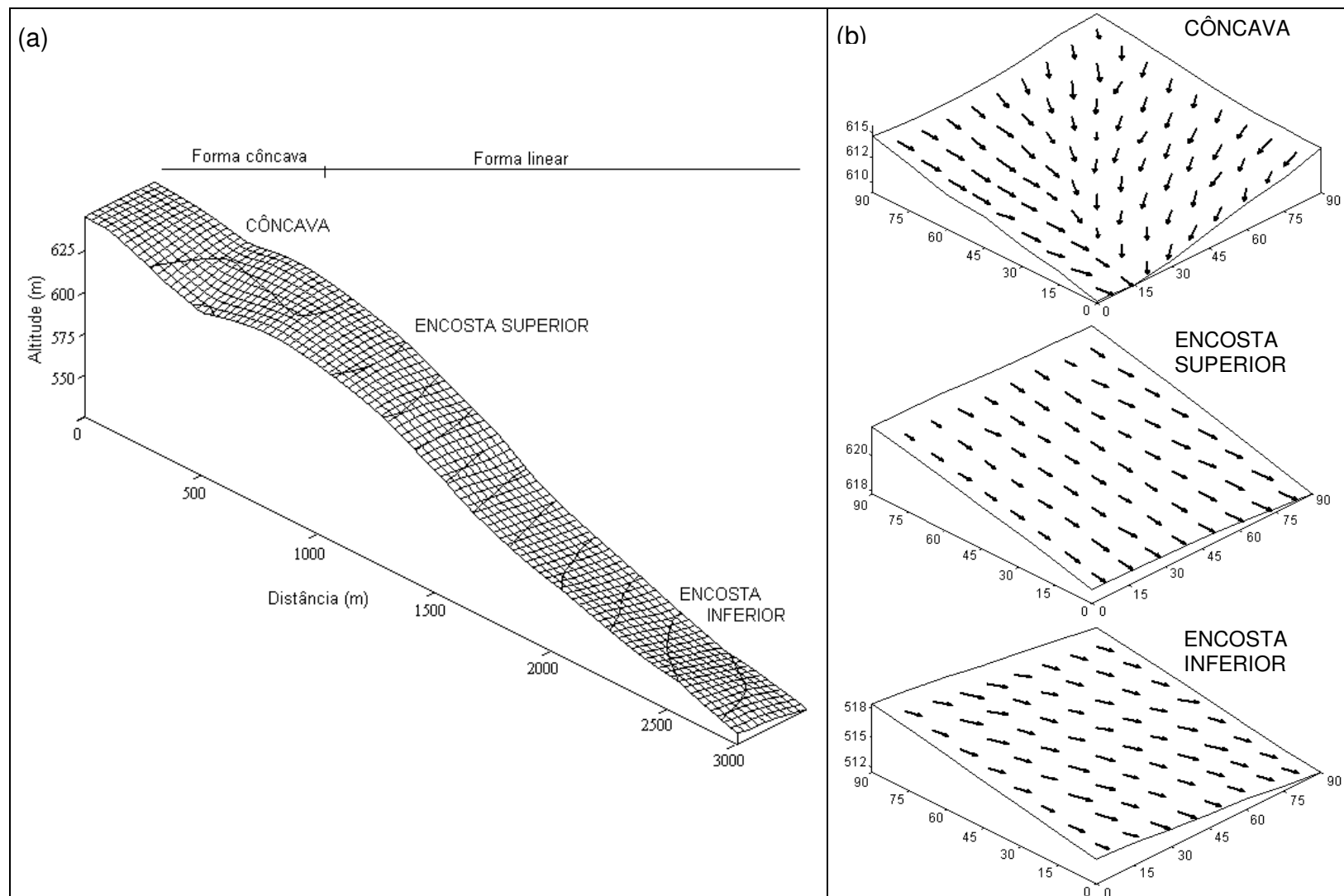


Figura 3.1. Representação esquemática da área experimental. (a) Perfil altimétrico com abrangendo as formas côncava e linear, sendo identificadas as posições côncava, encosta superior e encosta inferior (Modificado de SOUZA et al., 2003). (b) Modelo de elevação digital das três posições topográficas em estudo: côncava, encosta superior e encosta inferior.

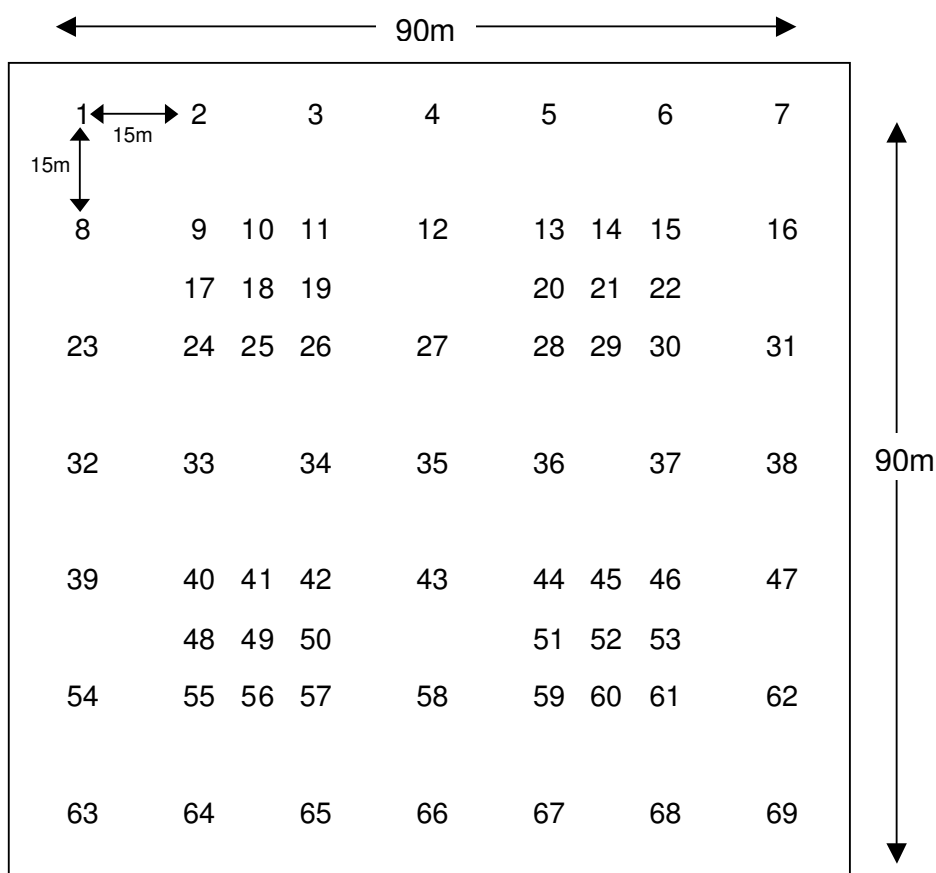


Figura 3.2. Esquema da malha de amostragem montada nas áreas cônica, encosta superior e encosta inferior: malha de 90 x 90 m, com 49 pontos distribuídos em intervalos regulares de 15 m, e onde foram adicionados 20 pontos (5 pontos em cada um dos 4 quadrantes), totalizando 69 pontos de amostragem por área, separados por distâncias que variam entre 7,5 m e 127,3 m.

As avaliações da emissão de CO_2 foram realizadas nos dias 30 de agosto, 31 de agosto e 06 de setembro de 2005 nas posições CONC, ESUP e EINF, respectivamente. Foi registrada precipitação de 12 mm entre 31 de agosto e 06 de setembro (Estação Agroclimatológica - Departamento de Ciências Exatas - FCAV/UNESP, Jaboticabal). As três áreas apresentavam grande quantidade de resíduos provenientes da colheita mecanizada da cana-de-açúcar crua realizada entre 29 de julho e 8 de agosto de 2005 (primeiro corte do seu ciclo produtivo). As medições da emissão de CO_2 foram conduzidas em cada uma das posições topográficas estudadas, no período da tarde (14 às 16 horas), utilizando uma câmara LI-6400-09 (LI-COR, NE USA) (HEALY et al.,

1996). A câmara constitui um sistema fechado, com volume interno de 991 cm^3 e área circular de contato com o solo de $71,6 \text{ cm}^2$ e analisa a concentração de CO_2 no seu interior por meio de espectroscopia de absorção ótica na região do infravermelho, a qual foi acoplada a anéis de PVC previamente instalados no solo nos pontos de cruzamento das malhas de amostragem. A utilização de colares de PVC visa minimizar distúrbios no solo, causados pela inserção da câmara no mesmo, no momento da avaliação. Os colares de PVC são, portanto, instalados no solo pelo menos 24 horas antes das avaliações da emissão de CO_2 . Foram retirados, da superfície do solo, os resíduos da cana-de-açúcar, provenientes da colheita mecanizada, para instalação dos colares de PVC no solo. A temperatura (T) do solo foi avaliada com sensor de temperatura acoplado à câmara, na profundidade de 0,00 a 0,15 m.

A amostragem de solo foi realizada nas profundidades de 0,00 a 0,15 m, 0,15 a 0,30 m e 0,30 a 0,45 m, nos 69 pontos da malha de amostragem, nas três posições topográficas. A densidade do solo (DS) foi determinada em amostras indeformadas coletadas com amostrador adaptado a cilindros com dimensões médias de 5,04 cm de diâmetro interno e 4,01 cm de altura (EMBRAPA, 1997). O volume total de poros (VTP) foi calculado com base no valor de densidade. A distribuição de poros por tamanho (macroporosidade – Macro e microporosidade – Micro) foi determinada utilizando-se funil de placa porosa sob a tensão de 60 cm de altura de coluna d'água em amostras previamente saturadas. O volume de água retido na amostra nesta condição corresponde aos microporos, e os macroporos são calculados por diferença (EMBRAPA, 1997).

A estabilidade de agregados foi determinada segundo metodologia proposta por KEMPER & ROSENAU (1986), em peneiramento em água, com agregados que passam pela peneira de 7,93 mm e ficam retidos na peneira de 4,76 mm, separando-os em classes, utilizando jogo de peneira de malhas 4,76 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm e 0,25 mm. Os resultados foram expressos em termos de diâmetro médio geométrico (DMG), porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm ($\varnothing > 2 \text{ mm}$) e porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm ($\varnothing < 1 \text{ mm}$).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, com NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica de baixa rotação por 16 horas (modificado de EMBRAPA, 1997), somente na profundidade de 0,00 a 0,15 m. O teor de carbono orgânico oxidável (CO) foi obtido segundo RAIJ et al. (1987) nas profundidades de 0,00 a 0,15 m, 0,15 a 0,30 m e 0,30 a 0,45 m.

O teste de resistência do solo à penetração (RP) foi realizado com penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR – STOLF, segundo STOLF (1991), na profundidade de 0,00 a 0,45 m. A umidade (U) do solo foi determinada pelo método gravimétrico (GARDNER, 1986) em amostras coletadas no momento da realização do teste de resistência do solo à penetração, nas profundidades de 0,00 a 0,15 m, 0,15 a 0,30 m e 0,30 a 0,45 m.

O estoque de carbono (EstC) foi calculado com base na massa de solo equivalente (BAYER et al., 2000), nas profundidades de 0,00 a 0,15 m, 0,15 a 0,30 m e 0,30 a 0,45 m, pela expressão $EstC = (CO * DS * e) / 10$, sendo *EstC* é o estoque de carbono (Mg ha⁻¹), *CO* é o teor de carbono orgânico oxidável (g kg⁻¹), *DS* é a densidade do solo (kg dm⁻³) e *e* a espessura da camada estudada (cm) (neste caso corresponde a 15 cm).

Estatísticas descritivas (mínimo, máximo, média, mediana, variância, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose) foram utilizadas para mostrar as características da variação dos atributos estudados (STATSOFT, 2001). A hipótese de normalidade foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A observação de valores extremos (máximos e mínimos) e a distribuição de frequência revelaram a existência de valores atípicos para as variáveis em estudo. Optou-se pela reedição dos dados extremos, através da média dos vizinhos, buscando maior proximidade da distribuição normal de frequência, identificada por valores de assimetria e curtose iguais a 0.

A dependência espacial dos atributos do solo foi obtida por meio de análises geoestatísticas. Assumida a hipótese intrínseca de estacionaridade dos dados, utilizou-se o semivariograma para quantificar a escala e a intensidade da variação espacial dos atributos do solo estudados. A semivariância foi estimada pela expressão:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância para pares de pontos separados pela distância h ; $N(h)$ é o número de pares de pontos das observações separadas por h ; $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os valores assumidos pela variável Z nos pontos x_i e $x_i + h$ (TRANGMAR et al., 1985).

A partir dos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$ para os pares de pontos separados por h foram gerados semivariogramas experimentais para os atributos estudados, aos quais foram ajustados os seguintes modelos matemáticos: (a) exponencial: $\gamma(h) = C_0 + C\{1 - \exp[-3(h/a)]\}$, $h > 0$; (b) esférico: $\gamma(h) = C_0 + C\left[3/2(h/a) - 1/2(h/a)^3\right]$, $0 \leq h \leq a$ e $\gamma(h) = C_0 + C$, $h > a$; (c) gaussiano: $\gamma(h) = C_0 + C\left\{1 - \exp\left[-3(h/a)^2\right]\right\}$, $0 < h < d$, sendo d a máxima distância na qual o semivariograma é definido (VIEIRA, 2000).

Os modelos foram selecionados com base nos valores da soma do quadrado dos resíduos (SQR) e do coeficiente de determinação (R^2). Foi utilizado o procedimento da validação cruzada, que consiste na remoção individual de cada observação pertencente ao conjunto de dados e na posterior estimativa do seu valor por interpolação, a fim de verificar a confiabilidade do modelo matemático ajustado (Tabela 3A). O modelo ajustado escolhido foi aquele que forneceu os valores estimado e observado mais próximos para o atributo em questão, ou seja, o que possibilitou obter uma equação de regressão linear entre valores estimado e observado mais próxima da bissetriz (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Do ajuste de um modelo matemático aos valores estimados de $\hat{\gamma}(h)$ são definidos os seguintes coeficientes (TRANGMAR et al., 1985; ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989): efeito pepita (C_0), intercepto do modelo do semivariograma, representa o componente da variação ao acaso e indicativo da variabilidade a distâncias menores que a amostrada; patamar ($C + C_0$), valor da semivariância em que a curva do semivariograma estabiliza sobre um valor constante; alcance (a), distância na qual o

patamar é atingido e que define o limite da dependência espacial. O valor C representa a variabilidade espacialmente estruturada dos dados.

A razão entre o efeito pepita e patamar (C_0/C_0+C), expressa em porcentagem, foi utilizada para classificar a dependência espacial dos atributos do solo conforme proposto por CAMBARDELLA et al. (1994): dependência espacial forte, moderada ou fraca, quando $(C_0/C_0+C) \leq 25\%$, $25 < (C_0/C_0+C) < 75\%$ e $(C_0/C_0+C) \geq 75\%$, respectivamente.

Foi retirada a tendência ou não estacionaridade dos dados dos atributos que apresentaram semivariogramas experimentais com aumento da semivariância sem encontrar patamar definido. Esta análise consta do ajuste de uma superfície, função das coordenadas de posição X e Y e exame dos coeficientes de correlação, o que permitiu decidir entre o uso de uma superfície linear ou parabólica. Após selecionado o grau de superfície, removeu-se a tendência por meio de $Z_{res}(x, y) = Z(x, y) - Z_{est}(x, y)$, e a eficiência ou não da remoção foi verificada por meio do semivariograma gerado para a nova variável Z_{res} , o qual deve apresentar patamar bem definido (VIEIRA et al., 1992).

Foram feitas estimativas dos atributos estudados para os locais não amostrados a partir dos modelos ajustados aos semivariogramas por meio de interpolação por krigagem pontual (TRANGMAR et al., 1985). Os valores obtidos foram utilizados na construção de mapas de isolinhas para melhor representação e visualização da distribuição espacial do atributo em estudo. A distribuição dos atributos do solo que não apresentaram dependência espacial na escala de amostragem (efeito pepita puro - EPP) foi representada pela média geral das observações obtidas.

O programa GS+ Versão 7.0 (ROBERTSON, 1998) foi utilizado para gerar os semivariogramas, ajustar e validar os modelos teóricos e estimar os dados em locais não amostrados. Os mapas de isolinhas foram gerados no programa Surfer (Version 8, Golden Software, Inc., Golden, CO).

Adicionalmente, foram realizadas análises de correlação linear simples entre emissão de CO₂ e os demais atributos do solo avaliados (STATSOFT, 2001).

3.3 – Resultados e Discussão

O valor médio de emissão de CO₂ para cada uma das áreas, CONC, ESUP e EINF, foi, respectivamente, 0,28, 0,22 e 0,34 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3). A precipitação (12 mm) registrada entre 31 de agosto e 06 de setembro de 2005 pode ter favorecido a emissão de CO₂ na posição EINF, a qual apresentou valor médio superior ao verificado nas demais posições avaliadas. Estes valores de emissão de CO₂, obtidos um mês após colheita mecanizada da cana crua (primeiro corte), são condizentes com valores médios de emissão observados no mesmo período do ano anterior, visto que a emissão em agosto de 2004 variou entre 0,27 e 0,35 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (Tabela 1A). Entretanto, os valores médios da emissão CO₂ nos últimos dias de agosto de 2004 (0,32, 0,33 e 0,37 g CO₂ m⁻² h⁻¹, respectivamente, para CONC, ESUP e EINF) são superiores aos encontrados no final de agosto e início de setembro de 2005, o que pode estar relacionado a uma maior contribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em 2004, já que a cultura encontrava-se aproximadamente no quinto mês de desenvolvimento. Por outro lado, os valores obtidos neste trabalho são superiores aos observados por CAMPOS (2003) em áreas de cultivo de cana-de-açúcar nesta mesma época do ano, bem como em relação aos fluxos médios anuais observados tanto no sistema tradicional de queima e colheita manual (0,13 g CO₂ m⁻² h⁻¹) como no sistema de colheita mecanizada sem a queima do canavial (0,14 g CO₂ m⁻² h⁻¹).

Os valores de coeficientes de variação (CV) obtidos para emissão de CO₂ nas três posições topográficas estão entre 24,53 e 34,18%, sendo a maior variação da emissão de CO₂ verificada na posição ESUP (Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3). Os valores mínimo (0,07 g CO₂ m⁻²h⁻¹) e máximo (0,54 g CO₂ m⁻²h⁻¹) da emissão de CO₂ foram obtidos para ESUP e EINF, respectivamente. A heterogeneidade da emissão de CO₂ dentro de cada área mostra a importância de considerar a topografia da área em avaliações de campo. SOTTA et al. (2006) encontraram valores de CV entre 17,2 e 32,8% dependendo da posição topográfica avaliada (topo, posições superior e inferior da encosta e vale). Segundo estes autores, apesar das variações da topografia serem

Tabela 3.1. Estatísticas descritivas para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição côncava, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Prof. (m)	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP ²	CV ³	Assimetria	Curtose	D ⁴
CO ₂ (gCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	-	0,11	0,49	0,28	0,27	0,09	30,50	0,37	-0,35	0,11**
T (°C)	0,00-0,15	19,55	22,83	20,77	20,71	0,70	3,39	0,51	0,30	0,05 ^{NS}
U (%)	0,00-0,15	21,09	29,89	25,51	26,12	2,33	9,14	-0,23	-0,83	0,20***
	0,15-0,30	21,74	31,28	26,42	26,49	2,22	8,41	-0,02	-0,82	0,12***
	0,30-0,45	23,23	31,59	27,76	27,83	1,86	6,70	-0,14	-0,23	0,12**
Argila (%)	0,00-0,15	52,70	68,65	59,70	59,35	3,46	5,80	0,33	-0,26	0,07 ^{NS}
Silte (%)	0,00-0,15	15,80	31,50	22,81	22,40	3,28	14,38	0,28	-0,45	0,10*
Areia total (%)	0,00-0,15	10,70	26,80	17,49	15,60	4,12	23,58	0,43	-1,24	0,21***
DS (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	1,20	1,48	1,33	1,33	0,07	5,12	0,05	-0,48	0,08 ^{NS}
	0,15-0,30	1,24	1,51	1,37	1,36	0,06	4,65	0,41	-0,49	0,14***
	0,30-0,45	1,18	1,50	1,34	1,33	0,06	4,85	0,01	0,05	0,07 ^{NS}
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,48	0,60	0,54	0,54	0,03	5,01	0,23	-0,08	0,12**
	0,15-0,30	0,49	0,59	0,55	0,55	0,02	3,51	-0,48	0,38	0,17***
	0,30-0,45	0,50	0,60	0,55	0,55	0,02	4,43	0,00	-0,76	0,13***
Micro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,40	0,49	0,44	0,44	0,02	4,74	0,38	-0,19	0,14***
	0,15-0,30	0,41	0,50	0,46	0,46	0,02	4,21	0,18	-0,37	0,14***
	0,30-0,45	0,39	0,55	0,47	0,47	0,03	7,01	0,20	0,34	0,10 ^{NS}
Macro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,02	0,16	0,09	0,09	0,03	33,59	-0,23	-0,06	0,09 ^{NS}
	0,15-0,30	0,01	0,15	0,09	0,09	0,03	31,29	-0,05	0,32	0,11*
	0,30-0,45	0,02	0,15	0,08	0,07	0,03	39,19	0,46	-0,42	0,14***
RP (MPa)	0,00-0,15	3,70	14,06	8,34	8,20	2,43	29,11	0,41	-0,07	0,08 ^{NS}
	0,15-0,30	3,70	9,56	6,42	6,63	1,49	23,15	-0,06	-0,75	0,11**
	0,30-0,45	3,25	7,30	4,77	4,60	0,94	19,76	0,60	-0,04	0,13***
DMG (mm)	0,00-0,15	2,09	3,11	2,59	2,59	0,24	9,31	0,02	-0,29	0,07 ^{NS}
	0,15-0,30	0,72	2,87	1,65	1,61	0,57	34,16	0,31	-0,87	0,10*
	0,30-0,45	0,62	3,05	1,59	1,49	0,58	36,26	0,62	-0,20	0,09 ^{NS}
Ø>2mm (%)	0,00-0,15	75,79	87,09	82,01	81,98	2,33	2,84	-0,08	-0,06	0,05 ^{NS}
	0,15-0,30	23,14	84,86	56,79	57,60	17,04	30,01	-0,23	-1,10	0,11*
	0,30-0,45	24,46	87,92	52,84	50,94	16,44	31,12	0,21	-0,87	0,07 ^{NS}
Ø<1mm (%)	0,00-0,15	11,37	21,20	15,52	15,26	2,21	14,22	0,55	0,16	0,09 ^{NS}
	0,15-0,30	12,81	62,01	32,40	31,18	12,33	38,07	0,41	-0,75	0,10*
	0,30-0,45	11,64	60,20	33,50	34,69	11,11	33,16	-0,07	-0,75	0,06 ^{NS}
CO (g kg ⁻¹)	0,00-0,15	9,94	18,63	14,44	14,63	1,56	10,81	0,03	0,77	0,07 ^{NS}
	0,15-0,30	11,18	18,08	14,65	14,69	1,50	10,24	-0,37	0,04	0,06 ^{NS}
	0,30-0,45	7,43	15,58	11,14	10,85	2,08	18,71	0,52	-0,38	0,09 ^{NS}
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,00-0,15	20,30	37,31	28,90	28,64	3,49	12,08	0,09	-0,38	0,05 ^{NS}
	0,15-0,30	23,11	38,35	30,13	30,49	3,20	10,61	0,03	0,03	0,07 ^{NS}
	0,30-0,45	15,11	34,80	22,41	21,77	4,51	20,12	0,59	-0,15	0,09 ^{NS}

¹Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração), DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). ²DP: desvio padrão. ³CV: coeficiente de variação. ⁴D: estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov (^{NS}: não significativo a 10%; *: significativo a 10%; **: significativo a 5%; ***: significativo a 1%).

Tabela 3.2. Estatísticas descritivas para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição encosta superior, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Prof. (m)	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP ²	CV ³	Assimetria	Curtose	D ⁴
CO ₂ (gCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	-	0,07	0,42	0,22	0,22	0,08	34,18	0,23	-0,25	0,06 ^{NS}
T (°C)	0,00-0,15	20,56	23,41	21,67	21,56	0,75	3,45	0,66	-0,26	0,10 ^{NS}
U (%)	0,00-0,15	24,06	29,51	26,93	27,21	1,46	5,40	-0,30	-0,74	0,16 ^{***}
	0,15-0,30	23,40	29,53	27,23	27,36	1,24	4,57	-0,59	0,50	0,18 ^{***}
	0,30-0,45	25,57	29,47	27,88	27,96	0,80	2,88	-0,42	0,23	0,28 ^{***}
Argila (%)	0,00-0,15	53,95	62,10	58,49	58,45	1,62	2,77	-0,41	0,45	0,07 ^{NS}
Silte (%)	0,00-0,15	20,60	27,40	24,05	24,10	1,28	5,33	0,19	0,36	0,06 ^{NS}
Areia total (%)	0,00-0,15	15,80	18,90	17,36	17,30	0,70	4,05	0,04	-0,38	0,08 ^{NS}
DS (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	1,17	1,48	1,34	1,33	0,06	4,82	0,04	0,08	0,11 ^{**}
	0,15-0,30	1,12	1,40	1,26	1,26	0,06	4,36	-0,03	0,07	0,08 ^{NS}
	0,30-0,45	1,20	1,47	1,33	1,33	0,06	4,74	0,00	-0,47	0,07 ^{NS}
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,47	0,59	0,53	0,53	0,03	5,02	-0,11	-0,55	0,15 ^{***}
	0,15-0,30	0,48	0,59	0,53	0,54	0,02	3,94	-0,01	-0,14	0,12 ^{**}
	0,30-0,45	0,48	0,60	0,53	0,53	0,02	4,65	-0,07	-0,08	0,09 ^{NS}
Micro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,42	0,49	0,45	0,45	0,01	3,22	0,31	0,22	0,18 ^{***}
	0,15-0,30	0,39	0,49	0,43	0,43	0,02	5,37	0,31	-0,16	0,10 [*]
	0,30-0,45	0,41	0,50	0,46	0,45	0,02	5,28	-0,08	-1,01	0,13 ^{***}
Macro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,02	0,16	0,08	0,07	0,03	43,98	0,37	-0,19	0,09 ^{NS}
	0,15-0,30	0,03	0,19	0,10	0,11	0,03	31,38	0,07	-0,07	0,09 ^{NS}
	0,30-0,45	0,01	0,14	0,08	0,07	0,03	39,93	-0,05	-0,54	0,09 ^{NS}
RP (MPa)	0,00-0,15	2,95	7,75	5,11	5,05	1,15	22,56	0,25	-0,33	0,08 ^{NS}
	0,15-0,30	2,80	6,93	4,80	4,60	0,96	19,94	0,20	-0,66	0,09 ^{NS}
	0,30-0,45	2,13	6,40	4,10	4,15	0,77	18,82	0,13	0,43	0,08 ^{NS}
DMG (mm)	0,00-0,15	2,36	4,46	3,74	3,92	0,50	13,33	-0,85	0,05	0,15 ^{***}
	0,15-0,30	3,33	4,71	4,23	4,29	0,36	8,60	-0,91	0,11	0,14 ^{***}
	0,30-0,45	1,12	4,49	2,52	2,36	0,87	34,33	0,48	-0,60	0,11 ^{**}
Ø>2mm (%)	0,00-0,15	65,98	95,66	86,10	88,56	7,11	8,25	-0,99	0,36	0,15 ^{***}
	0,15-0,30	79,85	98,47	92,46	93,40	4,68	5,07	-1,09	0,70	0,14 ^{***}
	0,30-0,45	23,95	95,99	61,82	61,54	18,31	29,62	-0,08	-0,65	0,06 ^{NS}
Ø<1mm (%)	0,00-0,15	2,92	17,43	8,20	7,17	3,47	42,37	0,69	-0,30	0,13 ^{***}
	0,15-0,30	1,30	10,59	4,29	3,65	2,29	53,45	1,03	0,56	0,13 ^{***}
	0,30-0,45	2,67	53,22	23,01	22,88	11,90	51,71	0,35	-0,40	0,06 ^{NS}
CO (g kg ⁻¹)	0,00-0,15	14,65	20,69	18,13	17,96	1,40	7,71	-0,07	-0,68	0,08 ^{NS}
	0,15-0,30	10,94	17,88	14,36	14,47	1,49	10,40	-0,04	-0,24	0,12 ^{**}
	0,30-0,45	7,60	15,41	11,09	10,61	1,67	15,09	0,56	-0,24	0,12 ^{**}
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,00-0,15	28,51	43,91	36,38	36,06	3,18	8,75	0,09	-0,36	0,08 ^{NS}
	0,15-0,30	20,87	36,15	27,45	27,23	2,98	10,87	0,30	0,12	0,05 ^{NS}
	0,30-0,45	15,01	30,16	22,10	21,48	3,51	15,89	0,44	-0,34	0,08 ^{NS}

¹Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração), DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). ²DP: desvio padrão. ³CV: coeficiente de variação. ⁴D: estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov (^{NS}: não significativo a 10%; *: significativo a 10%; **: significativo a 5%; ***: significativo a 1%).

Tabela 3.3. Estatísticas descritivas para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição encosta inferior, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Prof. (m)	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP ²	CV ³	Assimetria	Curtose	D ⁴
CO ₂ (gCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	-	0,16	0,54	0,34	0,34	0,08	24,53	0,20	0,13	0,06 ^{NS}
T (°C)	0,00-0,15	20,55	23,17	21,58	21,51	0,57	2,66	0,91	0,85	0,11**
U (%)	0,00-0,15	21,50	27,92	24,93	25,07	1,48	5,93	-0,28	-0,45	0,17***
	0,15-0,30	20,94	27,00	24,43	24,53	1,34	5,47	-0,31	-0,18	0,17***
	0,30-0,45	21,33	27,41	24,64	24,53	1,18	4,80	0,10	0,15	0,20***
Argila (%)	0,00-0,15	43,75	56,70	50,31	50,50	2,74	5,45	-0,36	0,04	0,08 ^{NS}
Silte (%)	0,00-0,15	21,55	36,35	28,24	28,20	3,22	11,39	0,36	0,00	0,10*
Areia total (%)	0,00-0,15	18,40	24,80	21,34	21,20	1,58	7,39	0,25	-0,71	0,10*
DS (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	1,13	1,43	1,25	1,24	0,06	4,81	0,26	0,21	0,08 ^{NS}
	0,15-0,30	1,18	1,42	1,30	1,31	0,06	4,29	0,08	-0,60	0,10*
	0,30-0,45	1,10	1,47	1,28	1,29	0,07	5,53	-0,10	-0,08	0,12**
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,49	0,60	0,55	0,55	0,02	4,26	-0,28	-0,27	0,16***
	0,15-0,30	0,51	0,60	0,55	0,55	0,02	3,46	0,37	0,32	0,17***
	0,30-0,45	0,48	0,60	0,54	0,54	0,03	4,91	0,18	0,01	0,10*
Micro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,37	0,52	0,44	0,44	0,03	7,09	0,32	-0,43	0,11**
	0,15-0,30	0,40	0,55	0,45	0,45	0,03	7,41	0,47	-0,17	0,12**
	0,30-0,45	0,37	0,50	0,43	0,44	0,03	6,53	0,12	-0,36	0,13***
Macro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,04	0,19	0,11	0,11	0,03	28,75	0,22	-0,15	0,11**
	0,15-0,30	0,03	0,19	0,10	0,11	0,04	35,76	0,00	-0,70	0,12**
	0,30-0,45	0,04	0,19	0,11	0,11	0,04	33,53	0,32	-0,33	0,11**
RP (MPa)	0,00-0,15	2,35	5,95	4,02	4,15	0,85	21,06	0,40	-0,28	0,13***
	0,15-0,30	3,03	9,11	5,67	5,95	1,28	22,64	0,00	-0,56	0,14***
	0,30-0,45	3,25	8,20	5,71	5,95	1,02	17,94	-0,05	-0,20	0,12**
DMG (mm)	0,00-0,15	2,56	4,60	3,83	3,91	0,45	11,78	-0,59	0,10	0,10 ^{NS}
	0,15-0,30	2,16	4,37	3,34	3,36	0,52	15,50	-0,25	-0,70	0,08 ^{NS}
	0,30-0,45	2,87	4,66	3,93	3,96	0,51	13,09	-0,30	-1,06	0,11**
Ø>2mm (%)	0,00-0,15	74,50	97,33	88,12	89,03	5,33	6,05	-0,32	-0,58	0,08 ^{NS}
	0,15-0,30	60,97	94,97	80,54	81,61	8,04	9,99	-0,48	-0,55	0,10*
	0,30-0,45	74,41	97,98	88,86	89,50	6,80	7,65	-0,41	-1,01	0,11**
Ø<1mm (%)	0,00-0,15	1,89	17,11	7,41	7,17	3,24	43,76	0,44	-0,15	0,10*
	0,15-0,30	3,58	27,15	12,44	11,57	5,26	42,26	0,67	-0,03	0,14***
	0,30-0,45	1,66	17,63	7,15	6,25	4,27	59,63	0,55	-0,68	0,12**
CO (g kg ⁻¹)	0,00-0,15	13,11	17,85	15,39	15,26	1,04	6,76	0,15	0,09	0,07 ^{NS}
	0,15-0,30	11,68	20,40	15,98	15,86	1,71	10,69	0,19	-0,02	0,11**
	0,30-0,45	8,77	15,86	12,26	12,15	1,63	13,33	0,12	-0,54	0,08 ^{NS}
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,00-0,15	22,89	33,67	28,81	29,01	2,44	8,47	-0,19	-0,39	0,06 ^{NS}
	0,15-0,30	23,23	39,31	31,14	31,09	3,49	11,21	-0,04	-0,24	0,04 ^{NS}
	0,30-0,45	16,60	30,22	23,63	23,19	3,17	13,41	0,11	-0,69	0,11**

¹Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração), DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). ²DP: desvio padrão. ³CV: coeficiente de variação. ⁴D: estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov (^{NS}: não significativo a 10%; *: significativo a 10%; **: significativo a 5%; ***: significativo a 1%).

relativamente pequenas, esses resultados mostram sua importância, visto que tal variação foi da mesma ordem de magnitude da variação temporal da emissão de CO₂.

De acordo com o critério de classificação dos atributos do solo em relação à sua variabilidade, proposto por WARRICK & NIELSEN (1980), os valores de CV indicam que a emissão de CO₂ do solo pode ser considerada um atributo de média variabilidade (Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3). Outros estudos de campo sobre variabilidade da emissão de CO₂ do solo apontam maior variação dos valores para CV para este atributo (12,7 a 87%), indicando maior heterogeneidade da emissão dependendo da condição experimental (FANG et al., 1998; RAYMENT & JARVIS, 2000; LA SCALA et al., 2000a, b; LA SCALA et al., 2003; ISHIZUKA et al., 2005; KHOMIK et al., 2006; SOTTA et al., 2006; OHASHI & GYOKUSEN, 2007).

Os demais atributos do solo avaliados nas três posições topográficas apresentaram baixa ou média variabilidade (WARRICK & NIELSEN, 1980), de acordo com os valores de CV dos dados (Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3): temperatura (T), umidade (U), argila (Arg), silte (Sil), areia total (AT), densidade (DS), volume total de poros (VTP) e microporosidade (Micro) enquadraram-se na classe de baixa variabilidade, enquanto macroporosidade (Macro), resistência do solo à penetração (RP) e porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm ($\varnothing < 1\text{mm}$) enquadraram-se na classe de média variabilidade. Os valores de CV para diâmetro médio geométrico (DMG), porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm ($\varnothing > 2\text{mm}$), carbono orgânico oxidável (CO) e estoque de carbono (EstC), enquadraram-se nas classes de baixa ou média variabilidade, dependendo da posição topográfica avaliada e da profundidade de amostragem.

Os valores de CV obtidos para os atributos areia total (4 a 23%), macroporosidade (0,00 - 0,15 m) (28 a 44%) e índices de agregação (DMG: 9 a 36%; $\varnothing > 2\text{mm}$: 2,8 a 30%; $\varnothing < 1\text{mm}$: 14 a 59%) em cada uma das três áreas em estudo foram consideravelmente diferentes dependendo do local amostrado, mostrando influência da topografia sobre a variação destes atributos do solo (Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3). Somando os valores de CV de todos os atributos avaliados em cada área, nota-se maior variabilidade geral dos atributos estudados na área CONC, visto que os maiores valores

de CV ocorrem predominantemente nesta área (57,5%). Em especial, no caso dos atributos areia total e índices de agregação (DMG e $\varnothing > 2\text{mm}$, na profundidade 0,15 - 0,30 m), os valores obtidos para a área CONC são notavelmente superiores aos valores nas demais áreas. Esta maior variabilidade nos dados da área CONC ocorre, provavelmente, em função da maior heterogeneidade de relevo dentro desta área, quando comparada com as posições avaliadas na forma linear. As variações nas curvaturas de relevo promovem um escoamento superficial e subsuperficial de água diferenciado dentro desta área afetando, conseqüentemente, a distribuição espacial dos atributos do solo. Os valores de CV para emissão de CO_2 , entretanto, não mostram maior variabilidade deste atributo na área CONC, quando comparada com as demais.

As análises de correlação simples efetuadas para cada área visam verificar o grau de associação linear entre emissão de CO_2 e os demais atributos do solo estudados (Tabela 3.4). Na área CONC, a macroporosidade foi o atributo que, individualmente, está mais associado à emissão de CO_2 , sendo observada correlação significativa ($p < 0,10$) com este atributo nas três profundidades avaliadas ($r = 0,21$, $r = 0,36$ e $r = 0,22$, respectivamente, para as profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m). Também foram observadas correlações nesta área com AT, DS, RP e índices de agregação, entretanto, foram significativas ($p < 0,10$) somente na profundidade de 0,15 - 0,30 m para DS e RP e na profundidade de 0,30 - 0,45 m para DMG, $\varnothing > 2\text{mm}$ e $\varnothing < 1\text{mm}$. Em contrapartida, as correlações dos índices de agregação com emissão na posição EINF foram significativas ($p < 0,10$) apenas em superfície (0,00 - 0,15 m), sendo também observadas correlações significativas ($p < 0,10$) com RP (0,30 - 0,45 m) e U (0,30 - 0,45 m). Na área ESUP, entretanto, não foi possível identificar um único atributo que, isoladamente, estivesse correlacionado significativamente ($p < 0,10$) com a emissão de CO_2 do solo.

Tabela 3.4. Correlações lineares (r) entre emissão de CO₂ e atributos do solo nas posições côncava, encosta superior e encosta inferior, nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Profundidade (m)	CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)		
		Côncava	Encosta superior	Encosta inferior
T (°C)	0,00-0,15	-0,06 ^{NS}	0,04 ^{NS}	-0,12 ^{NS}
U (%)	0,00-0,15	0,04 ^{NS}	-0,04 ^{NS}	-0,17 ^{NS}
	0,15-0,30	0,06 ^{NS}	0,11 ^{NS}	-0,19 ^{NS}
	0,30-0,45	-0,10 ^{NS}	0,08 ^{NS}	-0,21*
Argila (%)	0,00-0,15	-0,20 ^{NS}	0,19 ^{NS}	0,00 ^{NS}
Silte (%)	0,00-0,15	-0,12 ^{NS}	-0,06 ^{NS}	-0,03 ^{NS}
Areia total (%)	0,00-0,15	0,26*	-0,11 ^{NS}	-0,02 ^{NS}
DS (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	-0,15 ^{NS}	-0,15 ^{NS}	0,00 ^{NS}
	0,15-0,30	-0,24*	0,01 ^{NS}	0,07 ^{NS}
	0,30-0,45	-0,05 ^{NS}	-0,06 ^{NS}	0,12 ^{NS}
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,16 ^{NS}	0,17 ^{NS}	0,07 ^{NS}
	0,15-0,30	0,14 ^{NS}	-0,20 ^{NS}	-0,19 ^{NS}
	0,30-0,45	0,16 ^{NS}	0,19 ^{NS}	-0,03 ^{NS}
Micro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	-0,06 ^{NS}	-0,03 ^{NS}	0,03 ^{NS}
	0,15-0,30	-0,27*	-0,13 ^{NS}	-0,11 ^{NS}
	0,30-0,45	-0,09 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,02 ^{NS}
Macro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	0,21*	0,18 ^{NS}	0,01 ^{NS}
	0,15-0,30	0,36*	0,00 ^{NS}	-0,01 ^{NS}
	0,30-0,45	0,22*	0,14 ^{NS}	-0,04 ^{NS}
RP (Mpa)	0,00-0,15	-0,06 ^{NS}	0,16 ^{NS}	-0,16 ^{NS}
	0,15-0,30	-0,35*	-0,16 ^{NS}	-0,16 ^{NS}
	0,30-0,45	-0,19 ^{NS}	0,03 ^{NS}	-0,23*
DMG (mm)	0,00-0,15	0,05 ^{NS}	-0,10 ^{NS}	-0,24*
	0,15-0,30	-0,03 ^{NS}	-0,12 ^{NS}	-0,18 ^{NS}
	0,30-0,45	0,21*	0,03 ^{NS}	-0,01 ^{NS}
Ø>2mm (%)	0,00-0,15	0,08 ^{NS}	-0,11 ^{NS}	-0,22*
	0,15-0,30	-0,06 ^{NS}	-0,14 ^{NS}	-0,18 ^{NS}
	0,30-0,45	0,23*	0,01 ^{NS}	-0,02 ^{NS}
Ø<1mm (%)	0,00-0,15	-0,04 ^{NS}	0,10 ^{NS}	0,23*
	0,15-0,30	0,08 ^{NS}	0,16 ^{NS}	0,18 ^{NS}
	0,30-0,45	-0,23*	0,01 ^{NS}	-0,02 ^{NS}
CO (g kg ⁻¹)	0,00-0,15	0,13 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,05 ^{NS}
	0,15-0,30	-0,04 ^{NS}	0,14 ^{NS}	-0,14 ^{NS}
	0,30-0,45	0,06 ^{NS}	-0,04 ^{NS}	0,02 ^{NS}
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,00-0,15	0,03 ^{NS}	-0,07 ^{NS}	0,04 ^{NS}
	0,15-0,30	-0,16 ^{NS}	0,13 ^{NS}	-0,10 ^{NS}
	0,30-0,45	0,05 ^{NS}	-0,05 ^{NS}	0,06 ^{NS}

¹Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração), DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). *Índice de correlação linear significativo (p < 0,10). ^{NS}: índice de correlação linear não significativo (p < 0,10).

Apesar destes resultados não evidenciarem que haja relação linear de causa e efeito entre os atributos estudados e emissão de CO₂, visto que as correlações nem sempre são significativas dependendo da área ou profundidade de amostragem, outros estudos mostram a relação entre estes atributos com a emissão de CO₂ (FANG et al., 1998; LA SCALA et al., 2000a, b; XU & QI, 2001; KANG et al., 2003; MAESTRE & CORTINA, 2003; PENGTHAMKEERATI et al., 2005; BAUER et al., 2006; EPRON et al., 2006; SOTTA et al., 2006).

Provavelmente, a baixa variabilidade de alguns dos atributos do solo avaliados, o tamanho da área amostrada e esquema de amostragem, além da homogeneidade da área experimental, especialmente em relação às áreas localizadas na forma linear, sejam a causa do baixo número de correlações lineares com emissão de CO₂ (Tabela 3.4). De modo semelhante, outros relatos mostram ausência de associação da emissão de CO₂ com umidade do solo (LA SCALA et al., 2000a, b), temperatura do solo (LA SCALA et al., 2000a), argila (LA SCALA et al., 2000b; BAUER et al., 2006), silte (LA SCALA et al., 2000b), areia (LA SCALA et al., 2000b; BAUER et al., 2006), densidade do solo (BAUER et al., 2006), carbono orgânico (EPRON et al., 2004; BAUER et al., 2006; KHOMIK et al., 2006), em diferentes condições ambientais.

Por outro lado, SCHWENDENMANN et al. (2003) observaram correlação linear positiva entre emissão de CO₂ e temperatura do solo, porosidade livre de água e carbono total, e negativa com umidade do solo. No entanto, à exceção da umidade do solo, nenhuma destas tendências foi significativa ($p < 0,05$). Segundo estes autores, apesar do conjunto de dados analisado incluir variáveis que representam os diversos processos envolvidos na emissão de CO₂ (respiração das raízes, atividade microbiana e difusão gasosa), cada um deles pode responder diferentemente a fatores bióticos e abióticos, o que dificulta obter fortes correlações entre emissão de CO₂ e fatores isolados.

Sendo assim, as dificuldades encontradas ao se tentar estabelecer relações diretas entre atributos do solo e a emissão de CO₂, tanto neste estudo, como nos demais relatados, são um indício da natureza complexa do fenômeno. Buscando

compreender melhor a variação da emissão de CO₂ nas áreas em estudo, foi realizada a análise da variabilidade espacial dos atributos do solo avaliados.

As estatísticas descritivas indicaram distribuição simétrica dos atributos do solo avaliados nas posições côncava (CONC), encosta superior (ESUP) e encosta inferior (EINF) (Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3). Os valores da média e mediana estão próximos para todos os atributos, e os coeficientes de assimetria e curtose próximos de zero. Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov mostraram normalidade dos dados para a maioria dos atributos avaliados. Apesar da não normalidade para alguns atributos do solo, a simetria da distribuição dos dados, observada pela análise dos valores da média, mediana e coeficientes de assimetria e curtose, asseguram estacionaridade necessária ao uso da geoestatística (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; GONÇALVES, et al., 2001).

As diversas variáveis do solo analisadas apresentaram diferenças na estrutura de distribuição espacial, bem como na dependência espacial (Tabelas 3.5 a 3.10). Os semivariogramas indicaram, também, estrutura de variabilidade espacial distinta dependendo da posição topográfica estudada. Modelos esféricos, exponenciais e gaussianos foram ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos do solo com dependência espacial. Entretanto, alguns atributos não apresentaram estrutura de variabilidade espacial definida na escala de amostragem adotada.

Tabela 3.5. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais obtidos para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição côncava, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo	Profundidade (m)	Modelo	Pepita C ₀	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (a)	C ₀ /(C ₀ +C)	GDE	R ²	SQR
CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	-	Exponencial	0,0033	0,0075	44,5	0,43	MO	0,684	3,54.10 ⁻⁶
T (°C)	0,00-0,15	Esférico	0,2820	0,5550	60,6	0,34	MO	0,916	6,14.10 ⁻³
U (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Argila (%)	0,00-0,15	Esférico	5,3092	13,4678	65,2	0,28	MO	0,948	3,85
Silte (%)	0,00-0,15	Esférico	4,8774	11,1226	35,4	0,30	MO	0,825	4,52
Areia total (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
DS (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Gaussiano	0,0002	0,0004	17,6	0,29	MO	0,764	9,73.10 ⁻⁹
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Micro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	Exponencial	0,0002	0,0004	20,0	0,27	MO	0,604	1,22.10 ⁻⁸
	0,15-0,30	Exponencial	0,0001	0,0004	31,7	0,28	MO	0,780	4,49.10 ⁻⁹
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Macro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Esférico	0,0004	0,0008	14,3	0,31	MO	0,666	1,66.10 ⁻⁸
	0,30-0,45	Esférico	0,0004	0,0010	21,3	0,29	MO	0,622	6,75.10 ⁻⁸
RP (MPa)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-

Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração). GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção C₀/(C₀+C): forte (FO) para valores menores que 0,25; moderado (MO) para valores entre 0,25 e 0,75; fraco (FR) para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994). SQR: soma dos quadrados dos resíduos. EPP: efeito pepita puro.

Tabela 3.6. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais obtidos para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição côncava, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo	Profundidade (m)	Modelo	Pepita C ₀	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (a)	C ₀ /(C ₀ +C)	GDE	R ²	SQR
DMG (mm)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Esférico	0,0509	0,3500	43,0	0,13	FO	0,783	0,0174
	0,30-0,45	Esférico	0,0897	0,3481	36,0	0,20	FO	0,846	6,01.10 ⁻³
Ø>2mm (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Esférico	48,1906	335,0932	51,5	0,13	FO	0,913	7.583
	0,30-0,45	Esférico	46,3700	276,0000	30,8	0,14	FO	0,847	4.055
Ø<1mm (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Esférico	22,5753	179,3482	52,8	0,11	FO	0,893	2.389
	0,30-0,45	Esférico	22,7115	126,1000	32,7	0,15	FO	0,855	791
CO (g kg ⁻¹)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Esférico	0,7558	2,3147	24,7	0,25	FO	0,850	0,121
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Gaussiano	2,7700	10,1300	17,6	0,21	FO	0,723	6,35
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-

Atributos: DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção C₀/(C₀+C): forte (FO) para valores menores que 0,25; moderado (MO) para valores entre 0,25 e 0,75; fraco (FR) para valores maiores que 0,75 (CAMPARDELLA et al., 1994). SQR: soma dos quadrados dos resíduos. EPP: efeito pepita puro.

Tabela 3.7. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais obtidos para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição encosta superior, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Profundidade (m)	Modelo	Pepita C ₀	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (a)	C ₀ /(C ₀ +C)	GDE	R ²	SQR
CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	-	Esférico	0,00255	0,00605	21,1	0,42	MO	0,766	1,426.10 ⁻⁶
T (°C)	0,00-0,15	Exponencial	0,28200	0,56662	60,1	0,33	MO	0,840	0,0237
U (%)	0,00-0,15	Gaussiano	0,00011	0,00026	42,8	0,30	MO	0,884	3,69.10 ⁻⁹
	0,15-0,30	Esférico	0,00006	0,00020	45,9	0,23	FO	0,897	1,823.10 ⁻⁹
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Argila (%)	0,00-0,15	Exponencial	1,46700	2,90438	78,6	0,34	MO	0,890	0,136
Silte (%)	0,00-0,15	Exponencial	0,91207	1,61539	34,0	0,36	MO	0,729	0,16
Areia total (%)	0,00-0,15	Esférico	0,16752	0,58310	72,4	0,22	FO	0,973	7,851.10 ⁻³
DS (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Micro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Macro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
RP (MPa)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-

Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração). GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção C₀/(C₀+C): forte (FO) para valores menores que 0,25; moderado (MO) para valores entre 0,25 e 0,75; fraco (FR) para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994). SQR: soma dos quadrados dos resíduos. EPP: efeito pepita puro.

Tabela 3.8. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais obtidos para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição encosta superior, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Profundidade (m)	Modelo	Pepita C ₀	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (a)	C ₀ /(C ₀ +C)	GDE	R ²	SQR
DMG (mm)	0,00-0,15	Gaussiano	0,02010	0,24660	20,6	0,08	FO	0,956	1,018.10 ⁻³
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	Gaussiano	0,17554	0,82900	28,0	0,17	FO	0,984	4,870.10 ⁻³
Ø>2mm (%)	0,00-0,15	Gaussiano	3,89300	52,21248	24,3	0,07	FO	0,900	149
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	Gaussiano	69,99900	347,60000	29,3	0,17	FO	0,992	1.402
Ø<1mm (%)	0,00-0,15	Esférico	0,64920	12,60062	26,7	0,05	FO	0,744	14,3
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	Gaussiano	33,30765	141,70000	25,5	0,19	FO	0,911	666
CO (g kg ⁻¹)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,00-0,15	Exponencial	2,43968	10,52985	33,5	0,19	FO	0,870	4,4
	0,15-0,30	Esférico	1,34054	9,18000	18,9	0,13	FO	0,728	4,12
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-

Atributos: DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção C₀/(C₀+C): forte (FO) para valores menores que 0,25; moderado (MO) para valores entre 0,25 e 0,75; fraco (FR) para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994). SQR: soma dos quadrados dos resíduos. EPP: efeito pepita puro.

Tabela 3.9. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais obtidos para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição encosta inferior, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Profundidade (m)	Modelo	Pepita C ₀	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (a)	C ₀ /(C ₀ +C)	GDE	R ²	SQR
CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	0,00-0,15	Esférico	0,0022	0,0068	20,2	0,33	MO	0,861	9,586.10 ⁻⁷
T (°C)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
U (%)	0,00-0,15	Exponencial	0,0001	0,0003	52,7	0,34	MO	0,837	1,24.10 ⁻⁹
	0,15-0,30	Exponencial	0,0001	0,0002	26,4	0,29	MO	0,513	1,985.10 ⁻⁹
	0,30-0,45	Gaussiano	0,0001	0,0001	16,8	0,30	MO	0,788	8,307.10 ⁻¹⁰
Argila (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Silte (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Areia total (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
DS (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	Exponencial	0,0009	0,0036	19,3	0,20	FO	0,62	5,344.10 ⁻⁷
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Micro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Macro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
RP (MPa)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-

Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração). GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção C₀/(C₀+C): forte (FO) para valores menores que 0,25; moderado (MO) para valores entre 0,25 e 0,75; fraco (FR) para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994). SQR: soma dos quadrados dos resíduos. EPP: efeito pepita puro.

Tabela 3.10. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais obtidos para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados na posição encosta inferior, nas profundidades de 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Profundidade (m)	Modelo	Pepita C ₀	Patamar (C ₀ +C)	Alcance (a)	C ₀ /(C ₀ +C)	GDE	R ²	SQR
DMG (mm)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Esférico	0,0549	0,2732	26,0	0,17	FO	0,75	5,419.10 ⁻³
	0,30-0,45	Esférico	0,0656	0,2682	23,2	0,20	FO	0,97	4,407.10 ⁻⁴
Ø>2mm (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Esférico	4,4857	66,7700	25,9	0,06	FO	0,815	281
	0,30-0,45	Esférico	14,1466	46,9800	24,6	0,23	FO	0,968	17,1
Ø<1mm (%)	0,00-0,15	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	Esférico	0,9041	28,5600	23,5	0,03	FO	0,862	35,4
	0,30-0,45	Esférico	6,6972	18,4500	25,1	0,27	MO	0,944	3,08
CO (g kg ⁻¹)	0,00-0,15	Exponencial	0,3621	0,9863	15,0	0,27	MO	0,614	0,0151
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	EPP	-	-	-	-	-	-	-
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,00-0,15	Exponencial	0,6993	6,1160	24,9	0,10	FO	0,842	0,849
	0,15-0,30	EPP	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	Esférico	5,3769	11,0500	65,8	0,33	MO	0,916	2,39

Atributos: DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção C₀/(C₀+C): forte (FO) para valores menores que 0,25; moderado (MO) para valores entre 0,25 e 0,75; fraco (FR) para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994). SQR: soma dos quadrados dos resíduos. EPP: efeito pepita puro.

Os semivariogramas experimentais para alguns atributos do solo mostraram um aumento da semivariância sem encontrar um patamar, evidenciando tendência dos dados ou ausência de estacionaridade. Conforme apresentado em VIEIRA et al. (1992), foi retirada a tendência dos dados para os seguintes atributos do solo: (I) tendência linear: (a) umidade do solo, nas áreas CONC (0,00 - 0,15 m; 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m) e ESUP (0,30 - 0,45 m); (b) argila, na área EINF (0,00 - 0,15 m); (c) silte, na área EINF (0,00 - 0,15 m); (d) areia, na área EINF (0,00 - 0,15 m); (e) resistência do solo à penetração, nas áreas CONC, ESUP e EINF (0,30 - 0,45 m); (f) macroporosidade, na área ESUP (0,30 - 0,45 m) e (g) CO, na área EINF (0,00 - 0,15 m); (II) tendência parabólica: (a) areia, na área CONC (0,00 - 0,15 m); (b) DMG, na área EINF (0,00 - 0,15 m); (c) $\varnothing > 2\text{mm}$, na área EINF (0,00 - 0,15 m); (d) $\varnothing < 1\text{mm}$, nas áreas EINF (0,00 - 0,15 m) e ESUP (0,15 - 0,30 m); (e) CO, nas áreas CONC (0,00 - 0,15 m e 0,30 - 0,45 m) e ESUP (0,00 - 0,15 m) e (f) EstC, na área CONC (0,30 - 0,45 m). Somente para o atributo CO na área EINF (0,00 - 0,15 m) obteve-se um semivariograma para a nova variável Z_{res} com patamar bem definido ao qual foi ajustado um modelo exponencial; e, para os demais atributos, após retirada da tendência, observou-se ausência de estrutura espacial no semivariograma gerado com os valores de Z_{res} , evidenciando efeito pepita puro (VIEIRA et al., 1992).

A estrutura espacial da emissão de CO_2 foi definida por um modelo exponencial na posição CONC e por modelos esféricos em ambas as posições na forma linear (ESUP e EINF) (Tabelas 3.5 a 3.10). A escolha do modelo depende do comportamento do semivariograma perto da origem. Os modelos esféricos e exponenciais descrevem fenômenos com semivariograma com comportamento linear próximo da origem, sendo que os modelos exponenciais ajustam-se melhor a fenômenos mais erráticos a pequenas distâncias do que modelos esféricos (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Esses modelos matemáticos descrevem a variabilidade da emissão de CO_2 também em outras situações. LA SCALA et al. (2000b), por exemplo, mostram que em duas avaliações da emissão de CO_2 realizadas em uma malha de amostragem semelhante à utilizada neste estudo, em solo desprovido de vegetação, modelos

esféricos ajustaram-se aos dados, não tendo sido verificada, entretanto, estrutura de variabilidade espacial numa terceira amostragem realizada na mesma área. Em área de floresta tropical, ISHIZUKA et al. (2005) também selecionaram modelo esférico para descrever a estrutura de variabilidade da emissão de CO₂. OHASHI & GYOKUSEN (2007), entretanto, mostram que a variabilidade espacial da emissão de CO₂ em área de floresta foi descrita por diferentes tipos de modelos (esférico, exponencial e linear), dependendo da época de amostragem (estação do ano).

Para os demais atributos do solo avaliados, além de modelos esféricos e exponenciais, modelos gaussianos também se ajustaram aos dados. Os modelos gaussianos descrevem fenômenos que apresentam semivariograma com comportamento parabólico perto da origem, ou seja, fenômenos de maior continuidade, sem variações muito bruscas a pequenas distâncias (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

De modo geral, nota-se que estes atributos apresentaram ou não dependência espacial dependendo da posição topográfica e da profundidade de amostragem, não havendo predomínio de um determinado tipo de modelo matemático na descrição de sua estrutura de distribuição espacial (Tabelas 3.5 a 3.10). A estrutura espacial da temperatura do solo foi descrita por modelos esférico na CONC, exponencial na ESUP e não apresentou dependência espacial na EINF. No caso da umidade, ocorreu EPP na posição CONC para todas as profundidades, enquanto na forma linear estes atributos apresentaram dependência espacial descrita pelos diversos modelos citados anteriormente, à exceção do EPP verificado para ESUP (0,30 - 0,45 m). Para granulometria, houve predomínio de modelos esféricos na CONC, exponenciais na ESUP e ausência de dependência espacial para EINF. Os atributos DS, VTP, Micro e Macro praticamente não apresentaram estrutura espacial definida na forma linear, sendo ajustados modelos matemáticos variados em algumas profundidades de amostragem na CONC. Não foi observada estrutura espacial para RP. A agregação do solo, expressa pelos índices DMG, $\phi > 2\text{mm}$ e $\phi < 1\text{mm}$, apresentou dependência espacial definida na maioria das posições e profundidades amostradas, à exceção da profundidade de 0,00 - 0,15 m para CONC e EINF e 0,15 - 0,30 m para ESUP. Com relação aos atributos CO e EstC observa-se predomínio de modelos exponenciais

quando existe dependência espacial. Em concordância, outro estudo realizado nesta mesma área experimental, porém em escala de amostragem distinta, também mostrou um mesmo atributo do solo (granulometria e matéria orgânica do solo) sendo descrito por diferentes tipos de modelos matemáticos nas formas côncava e linear (SOUZA et al., 2003).

CAMBARDELLA et al. (1994) mostram que a estrutura de variabilidade espacial de atributos como densidade do solo, agregação, carbono orgânico e respiração do solo pode ser descrita tanto por modelos esféricos como exponenciais. Estes modelos são também utilizados na descrição da variabilidade espacial da umidade do solo, granulometria, resistência do solo à penetração, agregação, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e matéria orgânica do solo (SOUZA et al., 2003; SOUZA et al., 2004a, b, c, d; KILIÇ et al., 2004; DUFFERA et al., 2007). Os modelos gaussianos ocorreram em menor proporção nestes estudos.

Considerando todas as áreas e profundidades de amostragem analisadas, nota-se que um considerável número de variáveis avaliadas sem estrutura espacialmente definida na escala de amostragem adotada, ou seja, como a variância pepita é igual à variância total dos dados, as determinações realizadas nos pontos de cruzamento da malha não são espacialmente correlacionadas. Os semivariogramas para estes atributos mostram descontinuidade próxima à origem, que é representada por uma grande dispersão dos pontos em relação à curva ajustada, a qual aparece como uma constante, caracterizando um efeito pepita puro (EPP). Isto indica que as medições realizadas no esquema de amostragem proposto não foram suficientes para a determinação da estrutura de variabilidade espacial destes atributos, especialmente para resistência do solo à penetração (RP), que apresentou ausência de estrutura de dependência espacial em todas as áreas e profundidades amostradas. SOUZA et al. (2004a), entretanto, encontraram estrutura de variabilidade espacial para RP em ambas profundidades as 0,00 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m. Apesar da semelhança entre as áreas experimentais (mesmo tipo de solo e histórico de mais de 30 anos de cultivo de cana-de-açúcar) e destes autores terem utilizado distância mínima de amostragem entre pontos maior que a adotada neste estudo (10 m entre pontos contra distância mínima

de 7,5 m), um fato que justifica esta ausência de dependência espacial para RP é a menor variabilidade dos dados, expressa pelos valores de CV (Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3).

Os resultados de SOUZA et al. (2004a, b, d) mostram estrutura de variabilidade espacial definida para umidade do solo do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade, resistência do solo à penetração, agregação e teor de matéria orgânica, em ambas as profundidades 0,00 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m. Segundo estes autores, pequenas variações no relevo condicionam variabilidade diferenciada para tais atributos do solo, ou seja, o compartimento da área experimental caracterizado por apresentar curvaturas côncavas e convexas apresentou maior variabilidade destes atributos quando comparado com o outro compartimento onde o relevo é mais homogêneo. Estes autores relatam também maior variabilidade dos dados, expressa pelo CV, em relação aos resultados obtidos no presente estudo (Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3), especialmente para umidade do solo, porosidade total, microporosidade, densidade do solo, resistência do solo à penetração e agregação, o que, provavelmente, ocorre em consequência desta variação do relevo dentro da área experimental.

De modo semelhante, considerando as três posições topográficas avaliadas, a área CONC, caracterizada por apresentar relevo mais heterogêneo, quando comparada com as áreas ESUP e EINF, apresentou maior número de variáveis com estrutura espacial, havendo um predomínio de modelos esféricos ajustados às mesmas. Segundo RAYMENT & JARVIS (2000), a maioria da heterogeneidade espacial encontrada em seu estudo também foi consequência de variações na microtopografia. A posição ESUP, por sua vez, apresentou o maior número de variáveis com EPP e não foi observado predomínio de um determinado tipo de modelo matemático (esférico, exponencial ou gaussiano). Na posição EINF, modelos esféricos e exponenciais foram ajustados aos semivariogramas experimentais das variáveis com dependência espacial, em sua maioria.

O grau de dependência espacial (GDE), expresso pela relação entre variância do efeito pepita (C_0) e variância total ($C + C_0$) (CAMBARDELLA et al., 1994), foi moderado para emissão de CO_2 do solo nas três posições topográficas avaliadas, visto que a

variação aleatória (efeito pepita) representou de 33 a 43% da variância total dos dados (Tabelas 3.5 a 3.10). Outros estudos mostram GDE fraco (ISHIZUKA et al., 2005) ou moderado (LA SCALA et al., 2000b) para emissão de CO₂, podendo também variar de acordo com a estação do ano (forte no verão e inverno, moderado no outono e sem dependência espacial na primavera) (OHASHI & GYOKUSEN, 2007).

Dentre os demais atributos do solo com estrutura espacial definida, observa-se que ocorreu um predomínio do componente estruturado da variabilidade espacial (C_0 representando apenas 5 a 25% de $(C + C_0)$), ou seja, GDE forte, especialmente em relação à agregação, EstC e DS. Temperatura do solo, umidade do solo, granulometria, VTP, Micro e Macro apresentaram, na maioria das avaliações, GDE moderado, e a contribuição de C_0 foi de até 39% da variância total. Esta forte dependência espacial relatada anteriormente pode ser um indicativo de que a variabilidade destes atributos seja controlada por variações intrínsecas de atributos do solo (CAMBARDELLA et al., 1994), conforme também observado para carbono orgânico e macroagregação em CAMBARDELLA et al. (1994) e para granulometria e umidade do solo em DUFFERA et al. (2007).

Num outro extremo, atributos com fraca dependência espacial seriam controlados por variações extrínsecas como manejo, por exemplo (CAMBARDELLA et al., 1994). Na escala de amostragem adotada neste estudo, especialmente AT, DS, VTP, MICRO, MACRO, RP e CO não apresentaram dependência espacial na maioria das observações realizadas. CAMBARDELLA et al. (1994) e DUFFERA et al. (2007) também verificaram fraca ou ausência de dependência espacial para DS e VTP.

Os valores do alcance mostram heterogeneidade na distribuição espacial dos atributos avaliados em cada posição topográfica (Tabelas 3.5 a 3.10). Para emissão de CO₂, o alcance foi consideravelmente maior na forma côncava (44,5 m) em comparação com os obtidos para a forma linear (21,1 m para ESUP e 20,2 m para EINF). Como o alcance define a distância a partir da qual as amostras de um determinado atributo são consideradas independentes (TRANGMAR et al., 1985), estes resultados mostram que para o cálculo da taxa média de emissão de CO₂ na forma côncava não devem ser tomadas medições a distâncias menores que 44,5 m, pois estas amostras estão

correlacionadas espacialmente. No caso da forma linear, as medições devem, então, ser realizadas em pontos separados por distância maiores que 20,6 m (em média). Portanto, menor número de pontos de amostragem seria necessário para estimar a emissão média de CO₂ em formas côncavas quando comparada com formas lineares.

Conforme observado, dependendo da condição experimental, a emissão de CO₂ pode apresentar diferentes valores de alcance, indicando variações na escala de representatividade de uma amostra. RAYMENT & JARVIS (2000) encontraram alcance de 1 m para emissão de CO₂ em área de floresta boreal no Canadá, enquanto em área de floresta tropical ISHIZUKA et al. (2005) relataram alcance de 10 m. Segundo OHASHI & GYOKUSEN (2007) o valor do alcance em área de floresta no Japão varia de 12 a 80 m, dependendo da estação do ano. Já em área de solo descoberto na mesma região onde foi realizado o presente estudo, o alcance da dependência espacial apresentou alteração considerável (29,6 a 58,4 m) em duas observações realizadas com intervalo de apenas uma semana no mês de novembro (LA SCALA et al., 2000b).

Os valores de alcance para temperatura do solo foram semelhantes nas áreas que apresentaram estrutura de dependência espacial (60,6 m para CONC e 60,1 m para ESUP). As maiores variações de alcance ocorreram para granulometria (valores entre 35,4 e 78,6 m) e estoque de carbono (valores entre 17,6 e 65,8 m). Somente os índices de agregação do solo (DMG, $\varnothing > 2\text{mm}$, $\varnothing < 1\text{mm}$) mostraram uma relação entre os valores de alcance e a forma do relevo, ou seja, valores superiores para a área CONC (variando entre 30,8 e 52,8 m) em comparação com os obtidos para ESUP e EINF, localizadas na forma linear, onde os valores de alcance apresentaram menor variação e média de 25,3 m. SOUZA et al. (2004b) observaram relação entre a distribuição espacial da estabilidade de agregados e a profundidade de amostragem, com menores valores de alcance na profundidade de 0,20 - 0,40 m em relação à profundidade de 0,00 - 0,20 m. Concordando com estes resultados, na forma côncava os menores valores de alcance também foram encontrados na maior profundidade de amostragem; entretanto, esta relação não foi observada nas áreas ESUP e EINF.

De maneira geral, os valores de alcance dos atributos do solo avaliados evidenciaram uma heterogeneidade na distribuição espacial dos atributos avaliados nas

três áreas e profundidades de amostragem. Apesar de algumas similaridades entre os valores de alcance para alguns atributos, diferenças entre eles também são freqüentemente encontradas, concordando com CAMBARDELLA et al. (1994).

Os mapas de superfície, obtidos a partir da interpolação por krigagem, mostram a distribuição da emissão de CO₂ do solo nas áreas CONC, ESUP e EINF (Figura 3.4). Os mapas das áreas ESUP e EINF mostraram maior descontinuidade da distribuição espacial da emissão de CO₂ do solo, o que, conforme relatado anteriormente, está relacionado aos menores valores de alcance nesta área (Tabelas 3.5 a 3.10). Como o valor de alcance em CONC foi o dobro do verificado em EINF e ESUP, o mapa desta área apresentou, portanto, maior continuidade da distribuição espacial da emissão de CO₂. SOUZA et al. (2004a, b, d), entretanto, verificaram que pequenas variações no gradiente de declive e nas formas de relevo condicionam variabilidade diferenciada para os atributos do solo, ou seja, seus resultados mostram maior fragmentação na distribuição dos atributos avaliados nas áreas de maior variação do relevo.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram a importância de caracterizar a variabilidade espacial da emissão de CO₂ e atributos do solo. Apesar de não ter sido possível definir a estrutura de variabilidade espacial de um considerável número de atributos do solo avaliados na escala de amostragem adotada, a análise geoestatística dos dados de emissão CO₂ do solo forneceu diferentes valores de alcance da dependência espacial para formas côncava e linear. Estes resultados indicam que menor número de pontos de amostragem é necessário para estimar a emissão média de CO₂ em formas côncavas, em relação a áreas localizadas em formas lineares. O maior valor de alcance na forma côncava evidencia uma maior continuidade espacial da emissão de CO₂ nesta área, quando comparada com a distribuição mais descontínua observada nas áreas com relevo mais homogêneo.

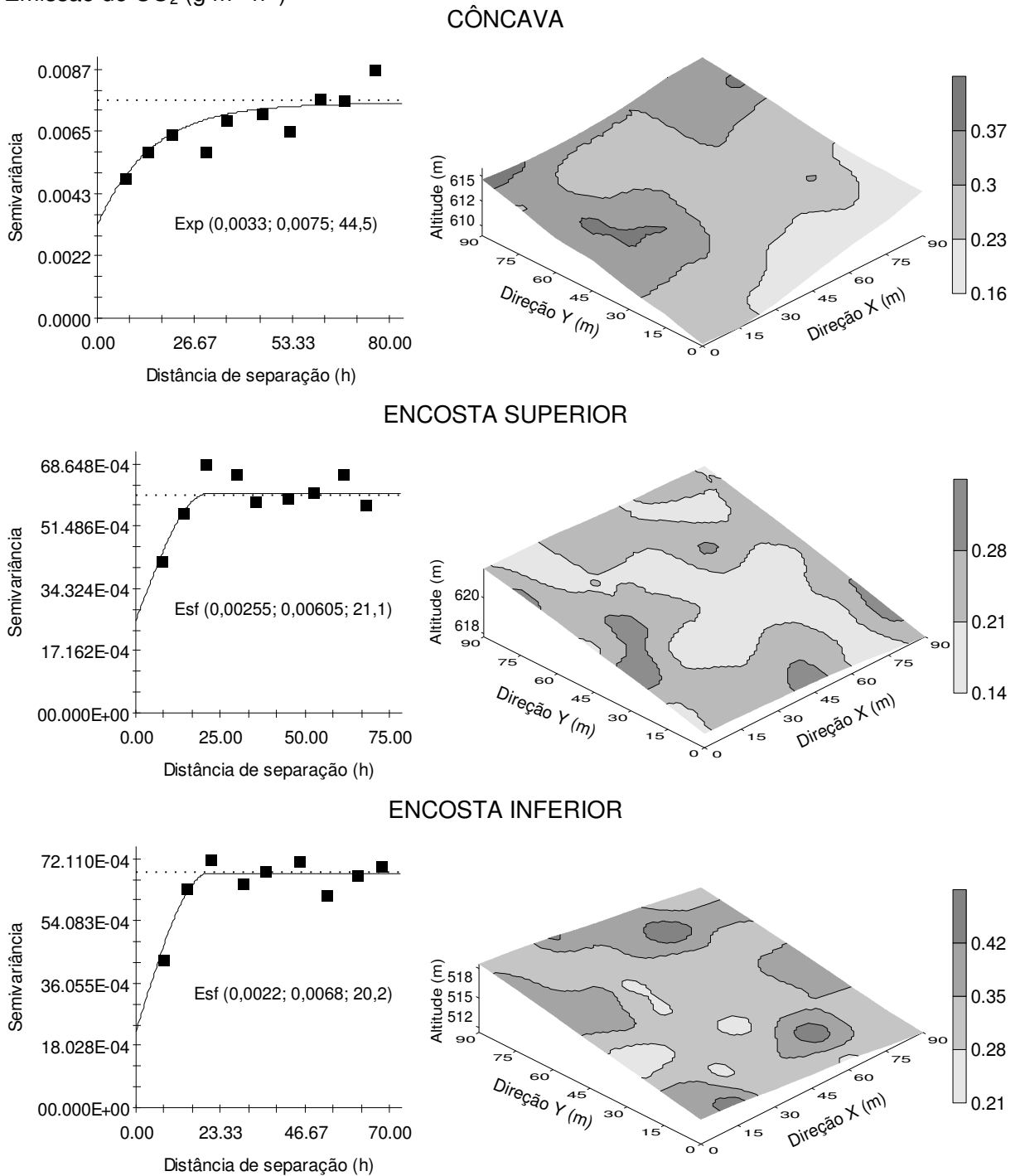
Emissão de CO₂ (g m⁻² h⁻¹)

Figura 3.4. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo (C_0 ; C_0+C ; a (m))) e mapas com valores estimados pela krigagem para emissão de CO₂ do solo (g CO₂ m⁻² h⁻¹) nas áreas cônica, encosta superior e encosta inferior em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

3.4 – Conclusões

Correlações lineares simples com os atributos do solo avaliados não permitem explicar mais que 12,2% (R^2) da variabilidade espacial da emissão de CO_2 do solo.

A estrutura de variabilidade espacial da emissão de CO_2 é descrita por modelo exponencial na forma côncava e por modelos esféricos nas áreas situadas na forma linear.

A forma do relevo determina diferenças no alcance da dependência espacial da emissão de CO_2 do solo e da estabilidade de agregados, sendo superior na forma côncava em relação à forma linear.

A forma do relevo influencia a variabilidade espacial dos atributos do solo estudados, mantendo-se fixos o manejo e a classe de solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R.; NOVAK, J. M.; HUNT, P. G. Soil CO_2 flux from a norfolk loamy sand after 25 years of conventional and conservation tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 90, n. 1-2, p. 205-211, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 2, p. 101-109, 2000.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK J. M.; PARKIN T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono**. 2003. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2^a ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1980. 188p.

DARLYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land surface model. **Geomorphologie**, Zeitschrift für, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.

DUFFERA, M.; WHITE, J. G.; WEISZ, R. Spatial variability of Southeastern US Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. **Geoderma**, Amsterdam, v.137, n. 3-4, p. 327-339, 2007.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento / EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; MOUVONDY, W.; MABIALA, A.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOFFRE, R.; JOURDAN, C.; BONNEFOND, J.; BERBIGIER, P.; HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. **Forest, Ecology and Management**, Amsterdam, v. 202, n. 1-3, p. 149-160, 2004.

EPRON, D.; BOSCH, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

FANG, C.; MONCRIEFF J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dodrecht, v. 205, n. 2, p. 135-146, 1998.

GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analyses**. Madison: ASA, 1986. p. 493-541. (Agronomy Monography, 9)

- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.
- HEALY, R. W.; STRIEGL, R. G.; RUSSELL, T. F.; HUTCHINSON, G. L.; LIVINGSTON, G. P. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: Identification of physical processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 3, p. 740-747, 1996.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1989. 561 p.
- ISHIZUKA, S.; ISWANDI, A.; NAKAJIMA, Y.; YONEMURA, S.; SUDO, S.; TSURUTA, H.; MURIYARSO, D. Spatial patterns of greenhouse gas emission in a tropical rainforest in Indonesia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 71, n. 1, p. 55-62, 2005.
- KANG, S.; DOH, S.; LEE, D.; LEE, D.; JIN, V. L.; KIMBALL, J. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, n. 10, p. 1427-1437, 2003.
- KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: ASA, 1986. p. 425-441. (Agronomy Monography, 9)
- KHOMIK, M.; ARAIN, M. A.; MCCAUGHEY, J. H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 140, n. 1-4, p. 244-256, 2006.
- KILIÇ, K.; OZGOZ, E.; AKBAS, F. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 1-11, 2004.
- LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; CORÁ, J.E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, 2000a.

LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000b.

LA SCALA JÚNIOR, N.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ num latossolo desprovido de vegetação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 88-95, 2003.

MAESTRE, F. T.; CORTINA, J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 199-209, 2003.

OHASHI, M.; GYOKUSEN, K. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 39, n. 5, p. 1130-1138, 2007.

PENGTHAMKEERATI, P.; MOTAVALLI, P. P.; KREMER, R. J.; ANDRESON, S. H. Soil carbon dioxide efflux from a claypan soil affected by surface compaction and applications of poultry litter. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 109, n. 1-2, p. 75-86, 2005.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, C. O. **Análise química do solo para fins de fertilidade**, Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 1, p. 35-45, 2000.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C.; Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystem and Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285-289, 2006.

- ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.
- SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111-128, 2003.
- SOTTA, E. D.; VELDKAMP, E.; GUIMARAES, B. R.; PAIXAO, R. K.; RUIVO, M. L. P.; ALMEIDA, S. S. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuana, Brazil. **Forest, Ecology and Management**, Amsterdam, v. 237, n. 1-3, p. 57-64, 2006.
- SOUZA, C. K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1067-1074, 2003.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Influência da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2004a.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 491-499, 2004b.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 309-319, 2004c.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BENTO, M. J. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 51-58, 2004d.
- STATSOFT. **Statistica**: data analysis software system, version 6. 2001.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Soil Science**, New Haven, v. 263, n. 3, p. 616-627, 1965.

VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C.; LOMBARDI NETO, F.; DECHEN, S. C. F.; CASTRO, O. M. Caracterização da variabilidade espacial de propriedades físicas. In: LOMBARDI NETO, F.; CAMARGO, O. A. **Microbacia do Córrego São Joaquim (Município de Pirassununga – SP)**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1992. p. 27-39. (Documentos, 29)

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V., V. H., SCHAEFER, C. E. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

WARRICK, A. W., NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a Young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 6, p. 667-677, 2001.

APÊNDICE

Tabela 1A. Emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo, avaliados entre 28 de abril e 23 de novembro de 2004, nas posições cônica, encosta superior e encosta inferior, na profundidade de 0,00 - 0,15 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Dia	Emissão de CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)			Temperatura do solo (°C)			Umidade do solo (%)		
	CONC	ESUP	EINF	CONC	ESUP	EINF	CONC	ESUP	EINF
28/04	0,458 b	0,695 a	0,450 b	20,98 b	21,88 ab	22,41 a	29,68 ab	31,12 a	28,52 b
29/04	0,501 c	0,894 a	0,621 b	20,6 b	21,49 ab	22,21 a	27,69	27,36	27,42
05/05	0,380 c	0,901 a	0,525 b	25,51 b	26,12 b	27,52 a	22,89	24,48	24,36
14/05	0,305 b	0,488 a	0,331 b	21,26	21,72	-	23,51 b	27,07 a	24,86 b
09/06	0,269	0,382	0,329	18,7	18,86	18,91	-	-	-
17/06	0,245 b	0,274 b	0,444 a	18,32 b	18,83 ab	19,36 a	-	-	-
02/07	0,227	0,360	0,318	18,83	19,39	19,85	-	-	-
05/08	0,269	0,256	0,309	17,9 b	19,72 a	20,04 a	16,83	18,27	16,5
11/08	0,301	0,305	0,317	24,03 a	22,23 b	23,97 a	13,08 b	14,61 a	12,62 b
18/08	0,272	0,306	0,326	19,59 c	21,55 b	22,48 a	-	-	-
26/08	0,347	0,312	0,351	26,93 a	26,5 ab	25,68 b	-	16,25 b	18,54 a
27/08	0,283	0,340	0,386	21,49	22,13	22,62	-	-	-
27/09	0,714	0,673	0,611	30,22 a	29,1 b	30,6 a	-	-	-
05/10	0,586	0,546	0,625	26,19	26,4	27,13	20,93 a	17,81 b	17,69 b
20/10	0,667	0,603	0,657	24,66 b	25,38 ab	26 a	27,56	26,32	25,95
04/11	0,405	0,466	0,431	27,15 b	28,4 a	28,6 a	13,2	14,57	13,41
23/11	0,419 c	0,645 b	0,801 a	25,31 b	27,14 a	27,89 a	19,79 b	22,81 a	16,87 c

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,10$).

Tabela 2A. Coeficientes de variação da emissão de CO₂, temperatura do solo e umidade do solo, avaliados entre 28 de abril e 23 de novembro de 2004, nas posições côncava, encosta superior e encosta inferior, na profundidade de 0,00 - 0,15 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Dia	Emissão de CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	Temperatura do solo (°C)	Umidade do solo (%)
28/04	51,1	3,3	6,5
29/04	61,3	3,8	5,7
05/05	46,9	3,9	10,6
14/05	38,0	1,4	9,5
09/06	35,2	4,6	-
17/06	43,2	8,3	-
02/07	30,5	3,3	-
05/08	26,1	5,9	17,8
11/08	27,1	7,7	17,2
18/08	34,3	13,2	-
26/08	19,3	5,4	24,4
27/08	23,3	2,8	-
27/09	27,6	5,3	-
05/10	42,1	5,2	13,8
20/10	47,1	4,2	7,9
04/11	32,8	5,1	14,6
23/11	44,4	5,4	18,2

Tabela 3A. Validação cruzada dos semivariogramas gerados para emissão de CO₂ e atributos do solo avaliados nas posições cônica, encosta superior e encosta inferior, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Profundidade (m)	Validação cruzada ²								
		Cônica			Encosta superior			Encosta inferior		
		a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	-	0,03	0,98	0,194	0,60	0,59	0,024	0,35	0,83	0,064
T (°C)	0,00-0,15	0,02	1,00	0,246	0,00	1,00	0,163	-	-	-
U (%)	0,00-0,15	-	-	-	0,02	0,94	0,374	0,01	0,95	0,204
	0,15-0,30	-	-	-	0,02	0,91	0,333	0,02	0,93	0,112
	0,30-0,45	-	-	-	-	-	-	0,03	0,86	0,07
	0,00-0,15	0,01	1,00	0,425	-0,01	1,00	0,192	-	-	-
Argila (%)	0,00-0,15	0,01	1,00	0,278	0,01	1,00	0,097	-	-	-
Silte (%)	0,00-0,15	-	-	-	0,46	0,97	0,409	-	-	-
Areia total (%)	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	0,01	0,99	0,045
Ds (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,15-0,30	0,01	0,98	0,134	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,00-0,15	0,05	0,89	0,036	-	-	-	-	-	-
Micro (m ³ m ⁻³)	0,15-0,30	0,02	0,96	0,144	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Macro (m ³ m ⁻³)	0,15-0,30	0,00	1,00	0,081	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	0,00	1,00	0,100	-	-	-	-	-	-
	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RP (MPa)	0,15-0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DMG (mm)	0,15-0,30	0,08	0,96	0,456	0,02	0,99	0,324	-	-	-
	0,30-0,45	0,01	1,00	0,330	0,00	0,99	0,469	0,00	0,99	0,215
	0,00-0,15	-	-	-	0,01	1,00	0,376	-	-	-
Ø>2mm (%)	0,15-0,30	1,99	0,97	0,467	-	-	-	0,01	1,00	0,272
	0,30-0,45	0,01	1,01	0,387	0,01	0,99	0,503	0,01	1,00	0,187
	0,00-0,15	-	-	-	0,01	0,99	0,323	-	-	-
Ø<1mm (%)	0,15-0,30	0,34	0,98	0,478	-	-	-	0,00	1,00	0,274
	0,30-0,45	0,00	0,99	0,415	0,00	1,02	0,464	0,01	1,00	0,166
	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	0,02	0,88	0,027
CO (g kg ⁻¹)	0,15-0,30	0,01	1,01	0,139	-	-	-	-	-	-
	0,30-0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,00-0,15	-	-	-	0,01	1,00	0,214	0,01	1,00	0,132
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,15-0,30	0,00	1,01	0,154	0,01	1,00	0,156	-	-	-
	0,30-0,45	-	-	-	-	-	-	0,00	1,00	0,275
	0,00-0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração), DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). ²Regressão linear entre valores medidos e valores estimados pela técnica da validação cruzada: parâmetros da equação (a: intercepto; b: coeficiente angular) e coeficiente de determinação (R²).

Tabela 4A. Correlações lineares entre topografia (altitude) da área e atributos do solo avaliados nas posições côncava, encosta superior e encosta inferior, nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Atributo ¹	Profundidade (m)	Altitude (m)		
		Côncava	Encosta superior	Encosta inferior
CO ₂ (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	-	0,24*	NS	NS
T (°C)	0,00-0,15	-0,23*	0,31*	NS
U (%)	0,00-0,15	0,34*	-0,41*	-0,35*
	0,15-0,30	0,34*	NS	-0,28*
	0,30-0,45	0,30*	-0,31*	NS
Argila (%)	0,00-0,15	0,30*	NS	NS
Silte (%)	0,00-0,15	NS	NS	0,48*
Areia total (%)	0,00-0,15	NS	-0,46*	-0,80*
DS (kg dm ⁻³)	0,00-0,15	NS	NS	NS
	0,15-0,30	NS	NS	-0,27*
	0,30-0,45	NS	NS	NS
VTP (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	NS	NS	NS
	0,15-0,30	NS	NS	NS
	0,30-0,45	NS	NS	NS
Micro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	NS	NS	NS
	0,15-0,30	NS	NS	NS
	0,30-0,45	NS	-0,23*	NS
Macro (m ³ m ⁻³)	0,00-0,15	NS	NS	NS
	0,15-0,30	NS	NS	NS
	0,30-0,45	NS	0,38*	NS
RP (MPa)	0,00-0,15	NS	NS	NS
	0,15-0,30	-0,22*	NS	NS
	0,30-0,45	-0,28*	-0,28*	-0,25*
DMG (mm)	0,00-0,15	NS	NS	-0,47*
	0,15-0,30	-0,30*	0,46*	NS
	0,30-0,45	NS	0,34*	NS
Ø>2mm (%)	0,00-0,15	NS	NS	-0,54*
	0,15-0,30	-0,30*	0,45*	NS
	0,30-0,45	NS	0,40*	NS
Ø<1mm (%)	0,00-0,15	NS	NS	0,54*
	0,15-0,30	0,29*	-0,47*	NS
	0,30-0,45	NS	-0,42*	NS
CO (g kg ⁻¹)	0,00-0,15	0,31*	NS	0,31*
	0,15-0,30	0,29*	0,21*	0,38*
	0,30-0,45	0,52*	NS	0,29*
EstC (Mg ha ⁻¹)	0,00-0,15	0,28*	NS	0,23*
	0,15-0,30	0,23*	NS	0,25*
	0,30-0,45	0,52*	NS	0,40*

¹Atributos: CO₂ (emissão de CO₂), T (temperatura do solo), U (umidade do solo), Argila, Silte, Areia total, DS (densidade do solo), VTP (volume total de poros), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade), RP (resistência do solo à penetração), DMG (diâmetro médio geométrico), Ø>2mm (porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2 mm), Ø<1mm (porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1 mm), CO (carbono orgânico oxidável), EstC (estoque de carbono). *Índice de correlação significativo (p < 0,10). NS: índice de correlação não significativo (p < 0,10).

Temperatura do solo (°C)

Profundidade: 0,00 - 0,15 m

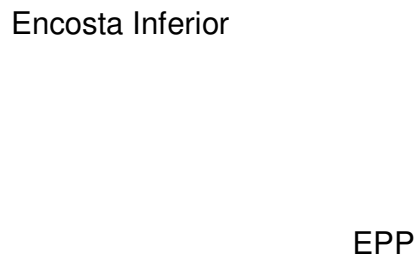
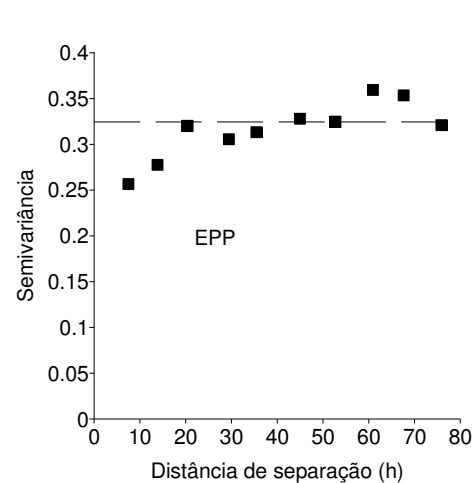
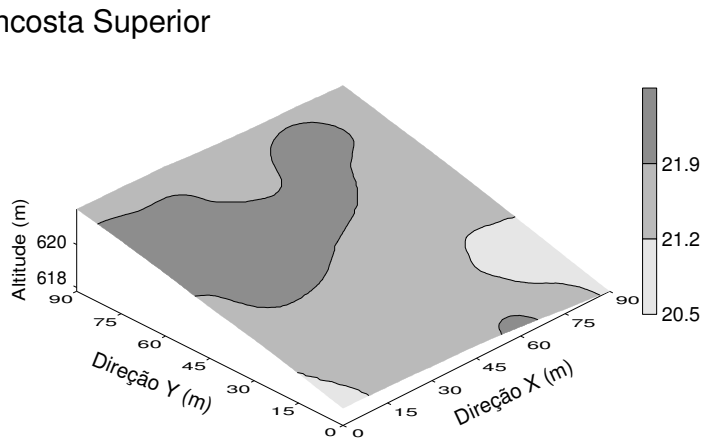
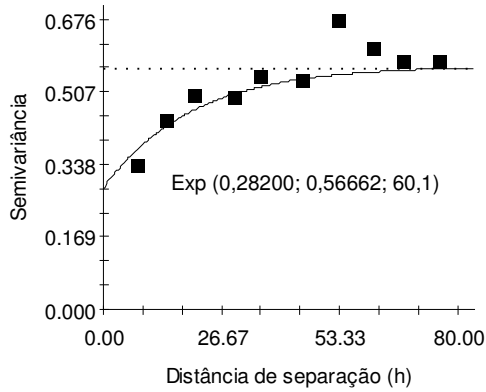
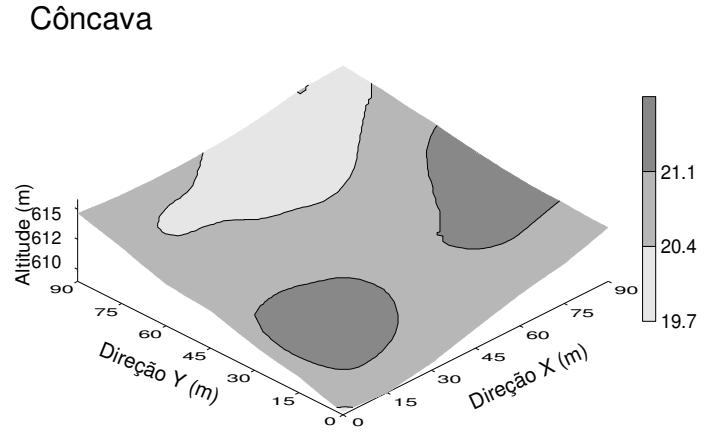
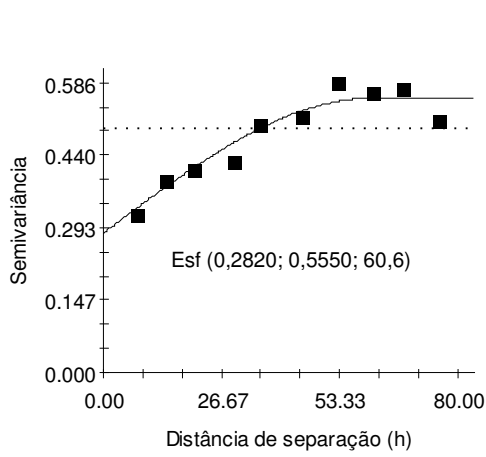
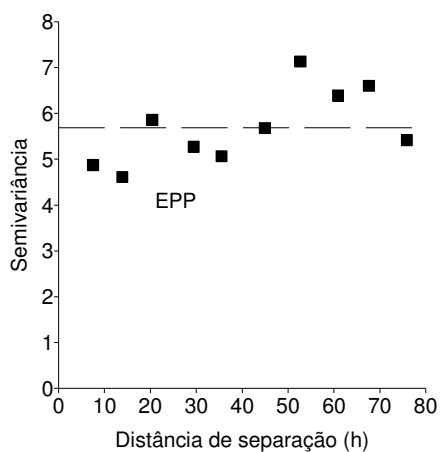
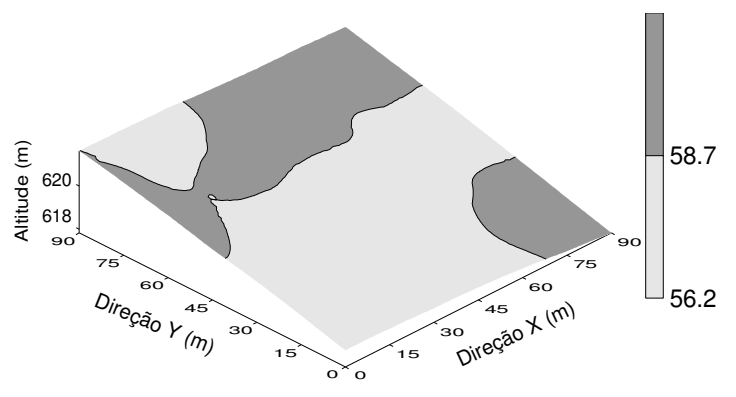
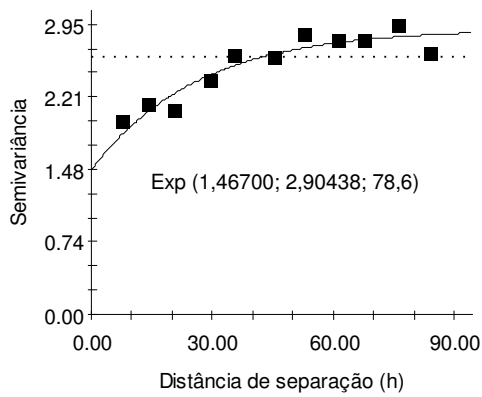
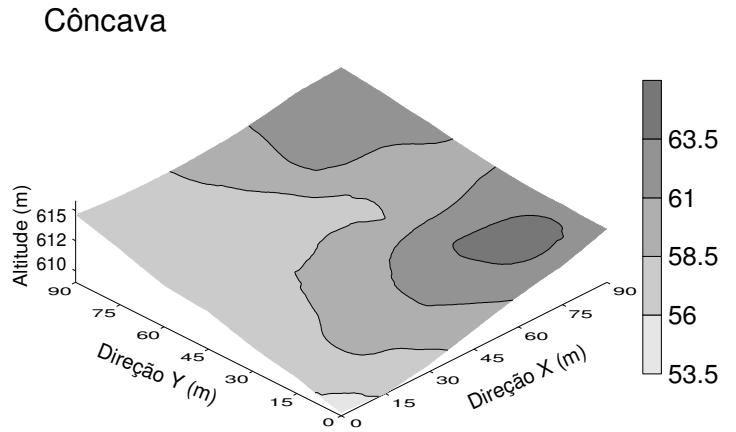
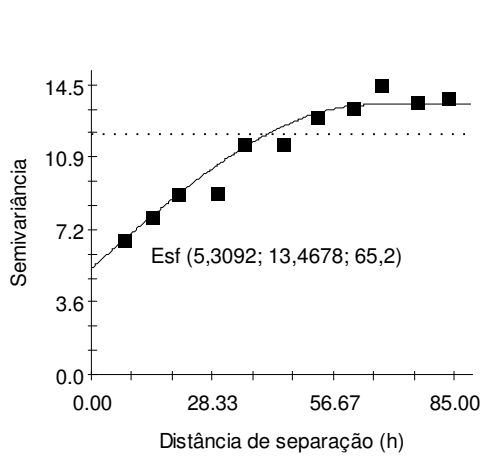


Figura 1A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo $(C_0; C_0+C; a (m))$) e mapas com valores estimados pela krigagem para temperatura do solo (°C) nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

Argila (%)

Profundidade: 0,00 - 0,15 m



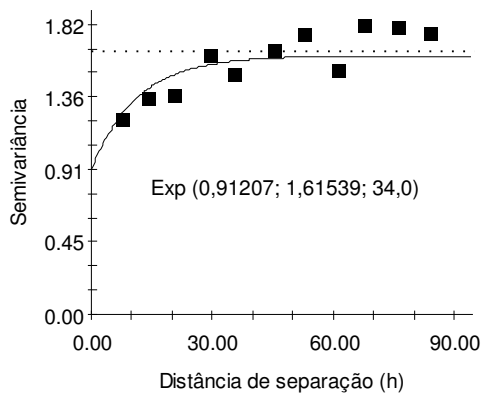
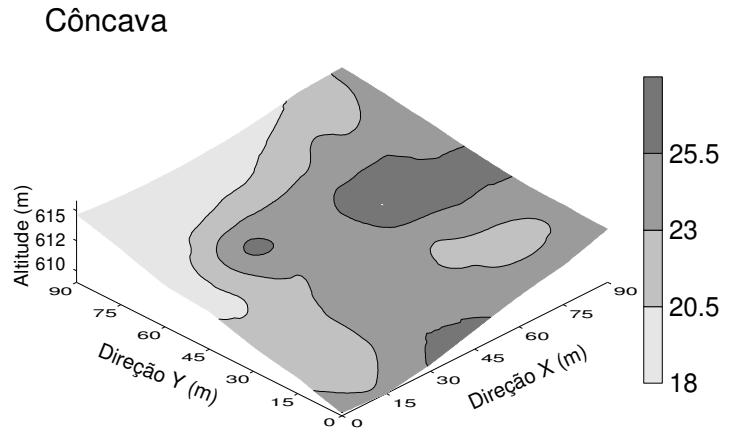
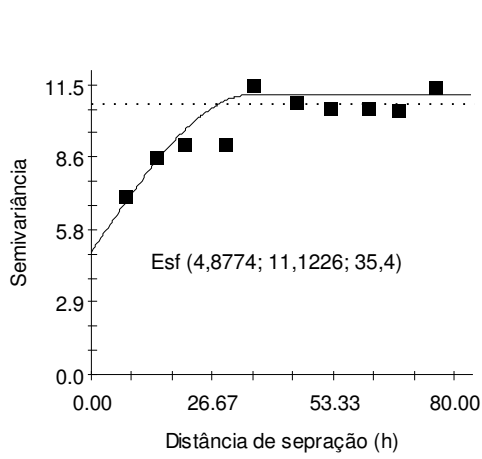
Encosta Inferior

EPP

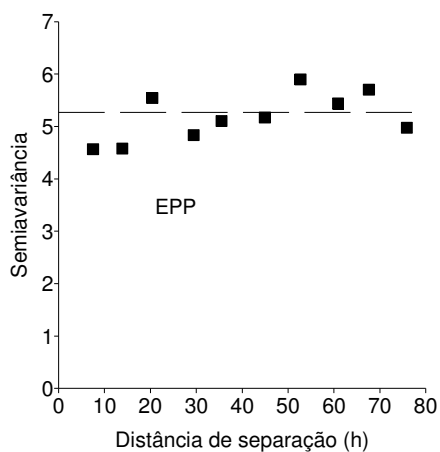
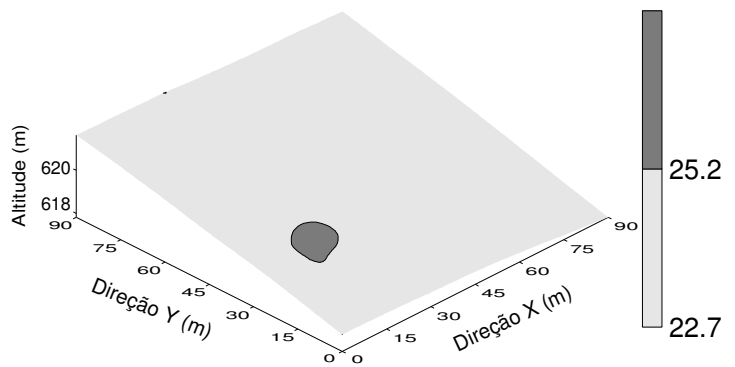
Figura 2A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo (C_0 ; C_0+C ; a (m))) e mapas com valores estimados pela krigagem para argila (%) na profundidade de 0,00 - 0,15 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

Silte (%)

Profundidade: 0,00 - 0,15 m



Encosta Superior



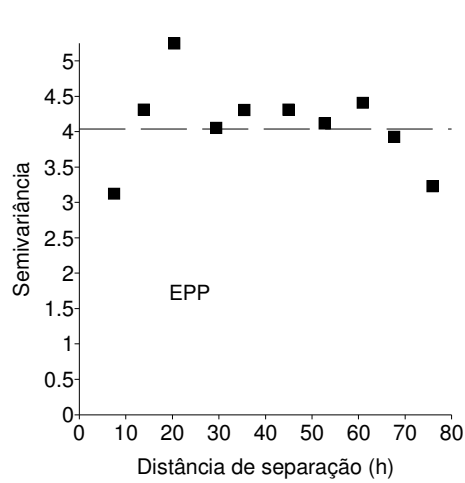
Encosta Inferior

EPP

Figura 3A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo (C_0 ; C_0+C ; a (m))) e mapas com valores estimados pela krigagem para silte (%) na profundidade de 0,00 - 0,15 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

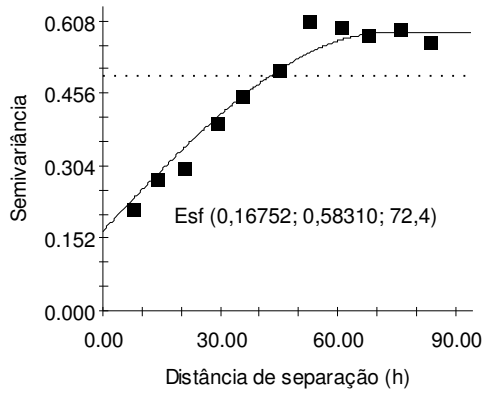
Areia (%)

Profundidade: 0,00 - 0,15 m

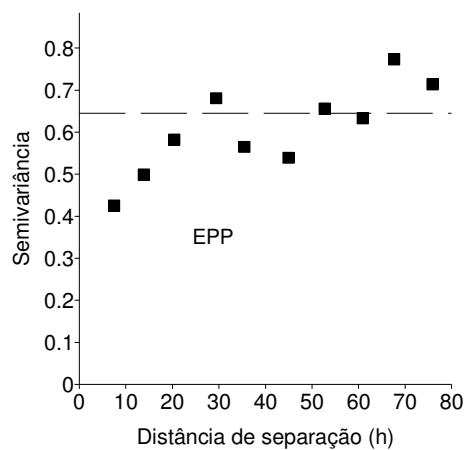
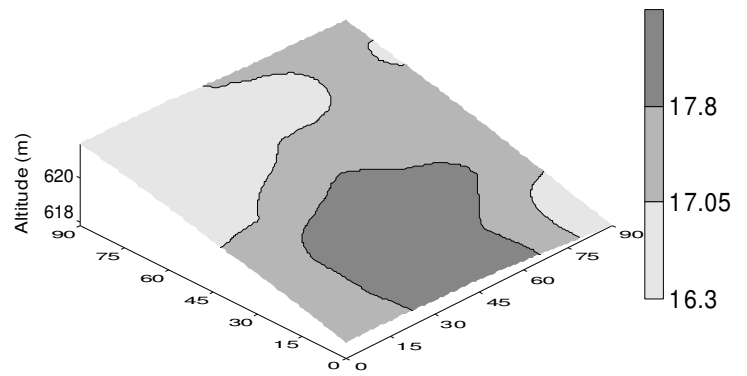


Côncava

EPP



Encosta Superior



Encosta Inferior

EPP

Figura 4A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo $(C_0; C_0+C; a (m))$) e mapas com valores estimados pela krigagem para areia (%) na profundidade de 0,00 - 0,15 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

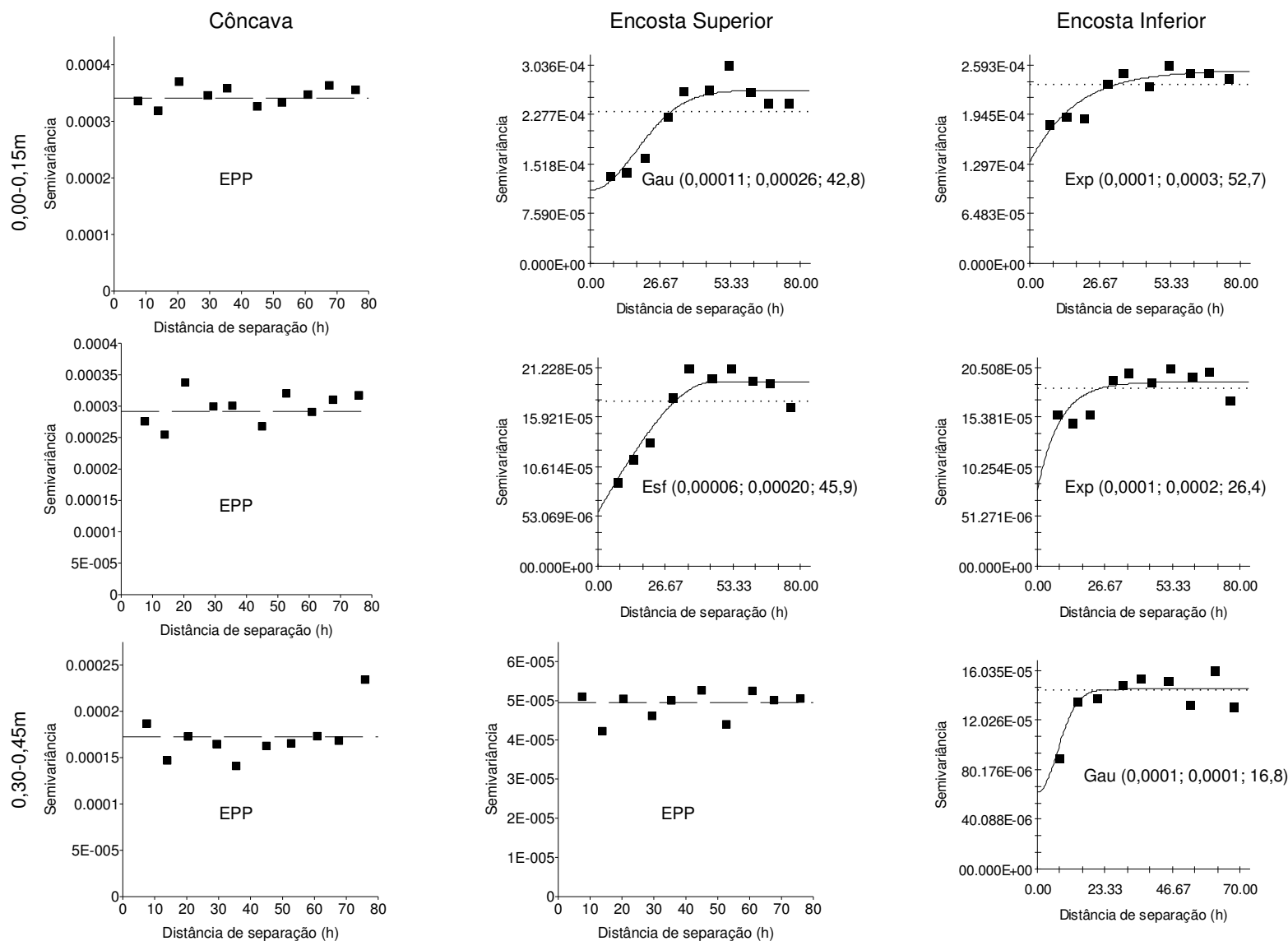


Figura 5A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo (C_0 ; C_0+C ; a)) para unidade do solo (%), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

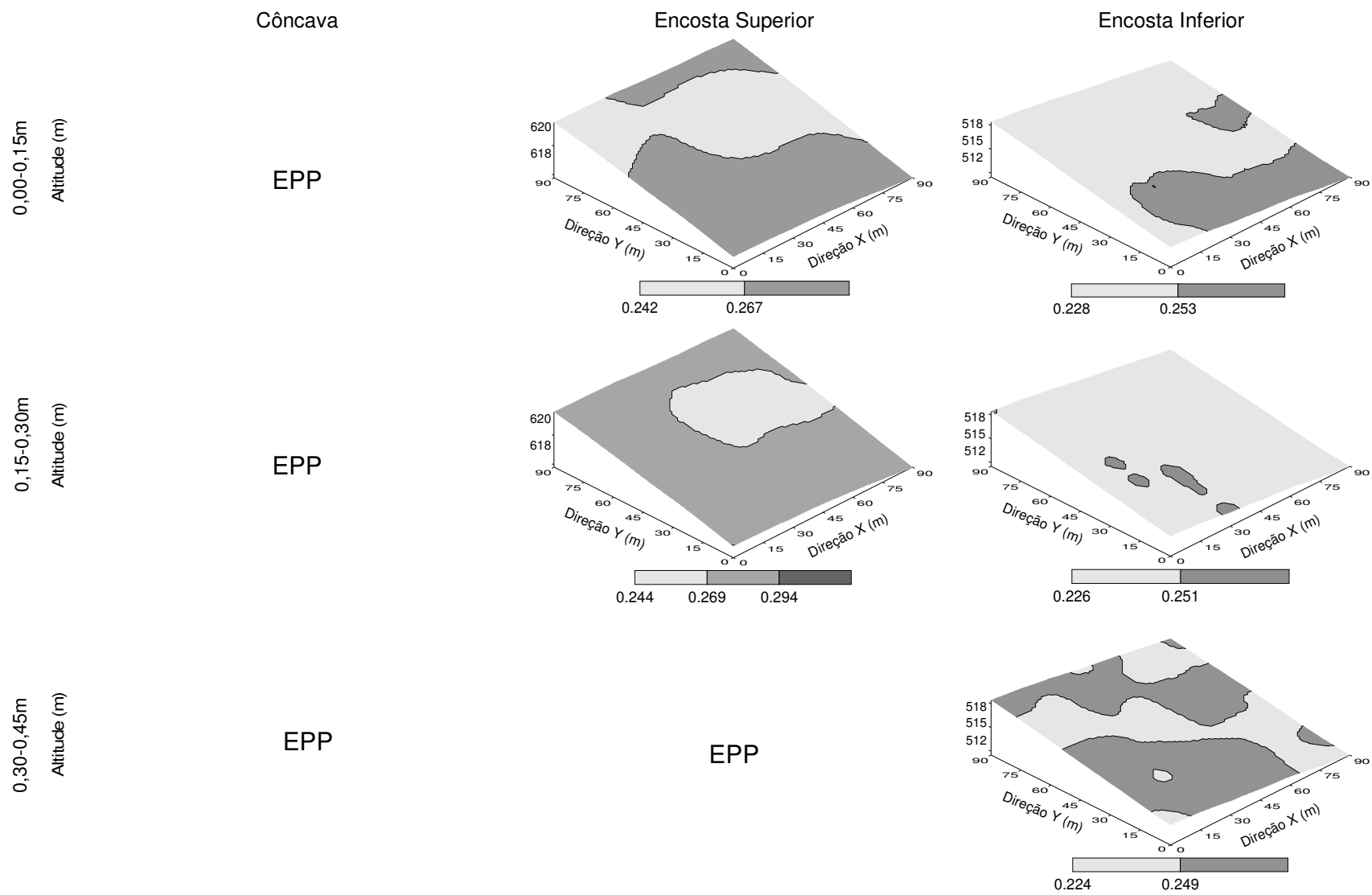


Figura 6A. Mapas com valores estimados pela krigagem para umidade do solo (%), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

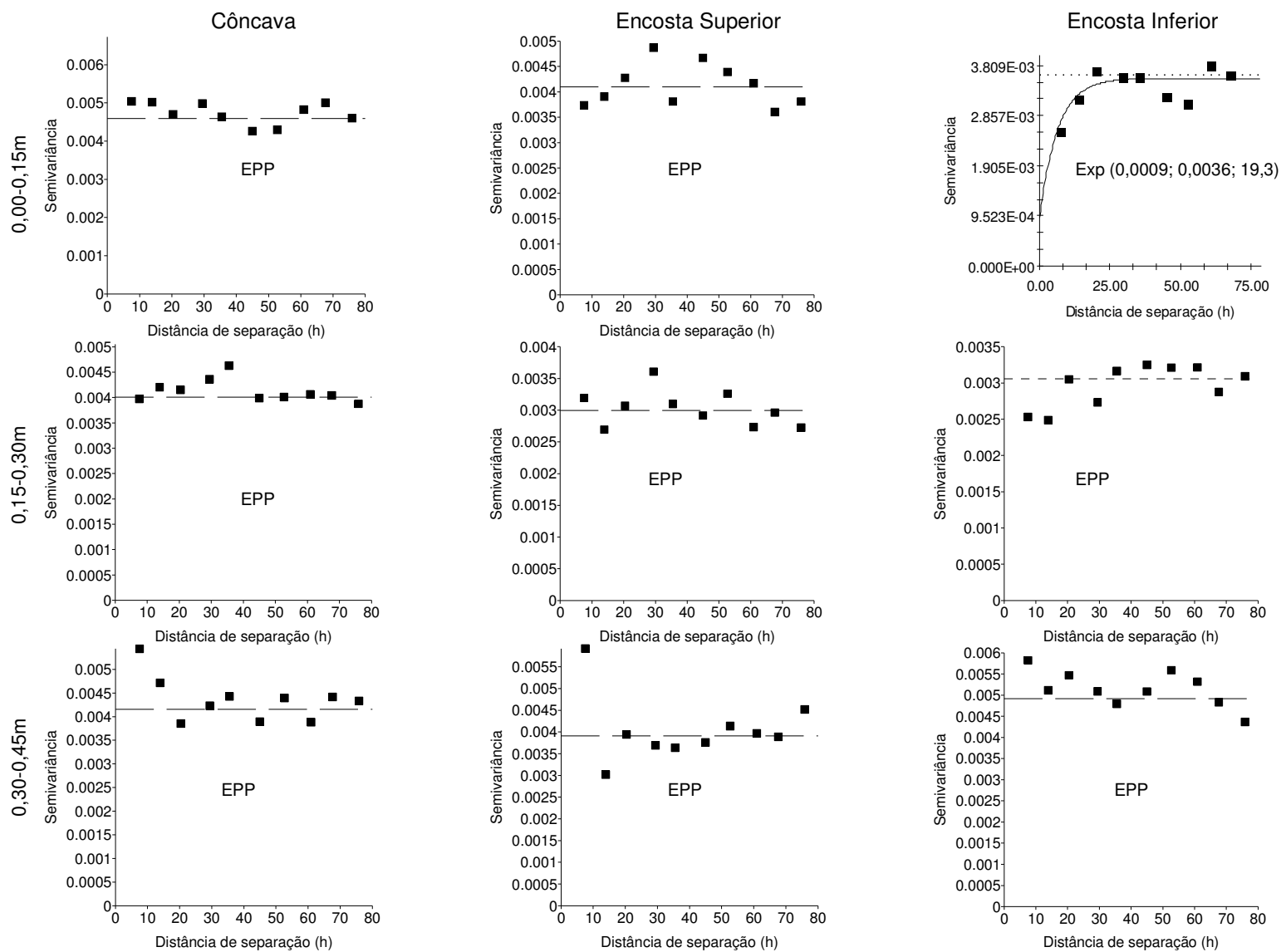


Figura 7A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo (C_0 ; C_0+C ; a)) para densidade do solo (kg dm^{-3}), nas profundidades 0,00-0,15m, 0,15-0,30m e 0,30-0,45m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

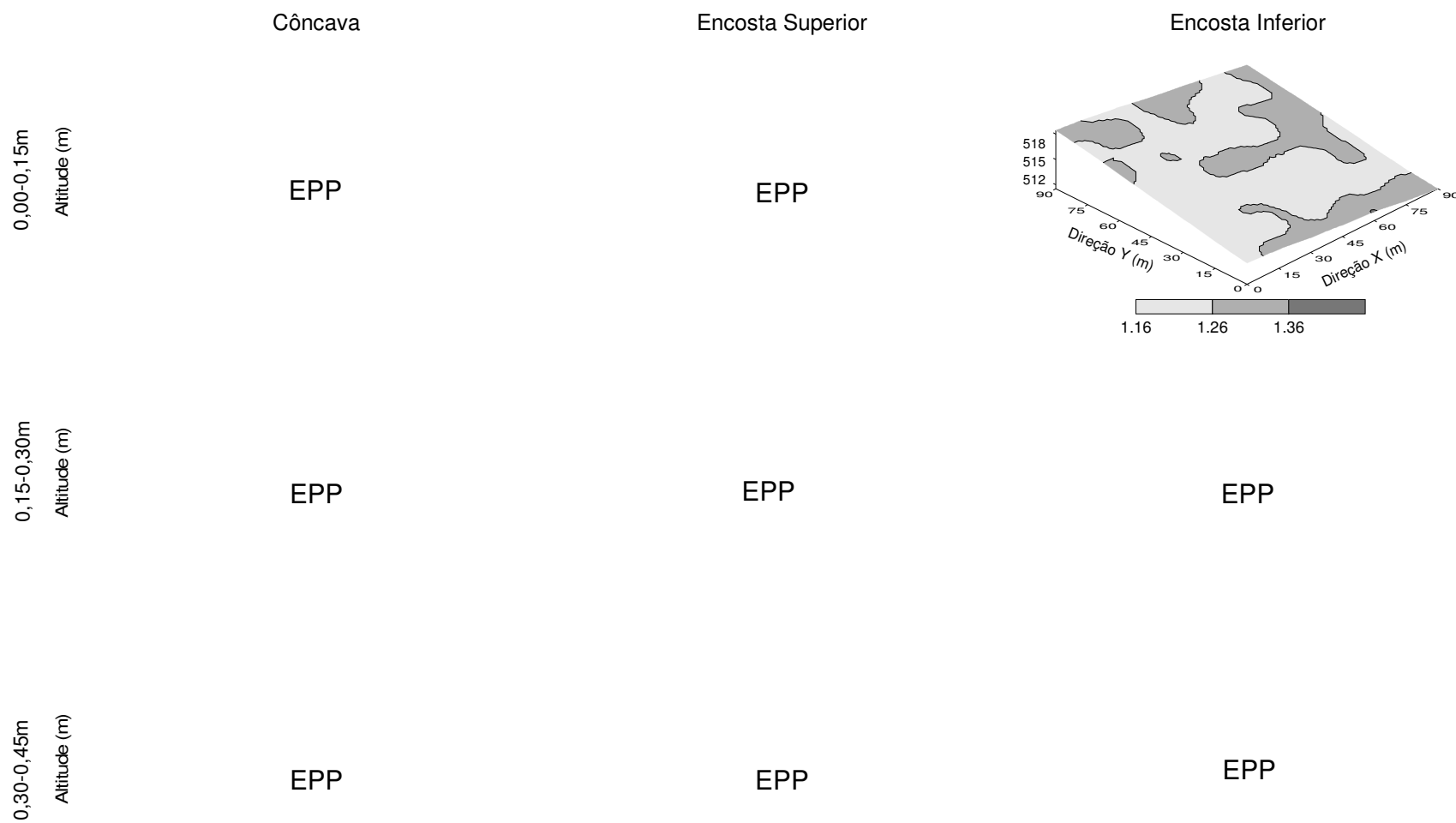


Figura 8A. Mapas com valores estimados pela krigagem para densidade do solo (kg dm^{-3}), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

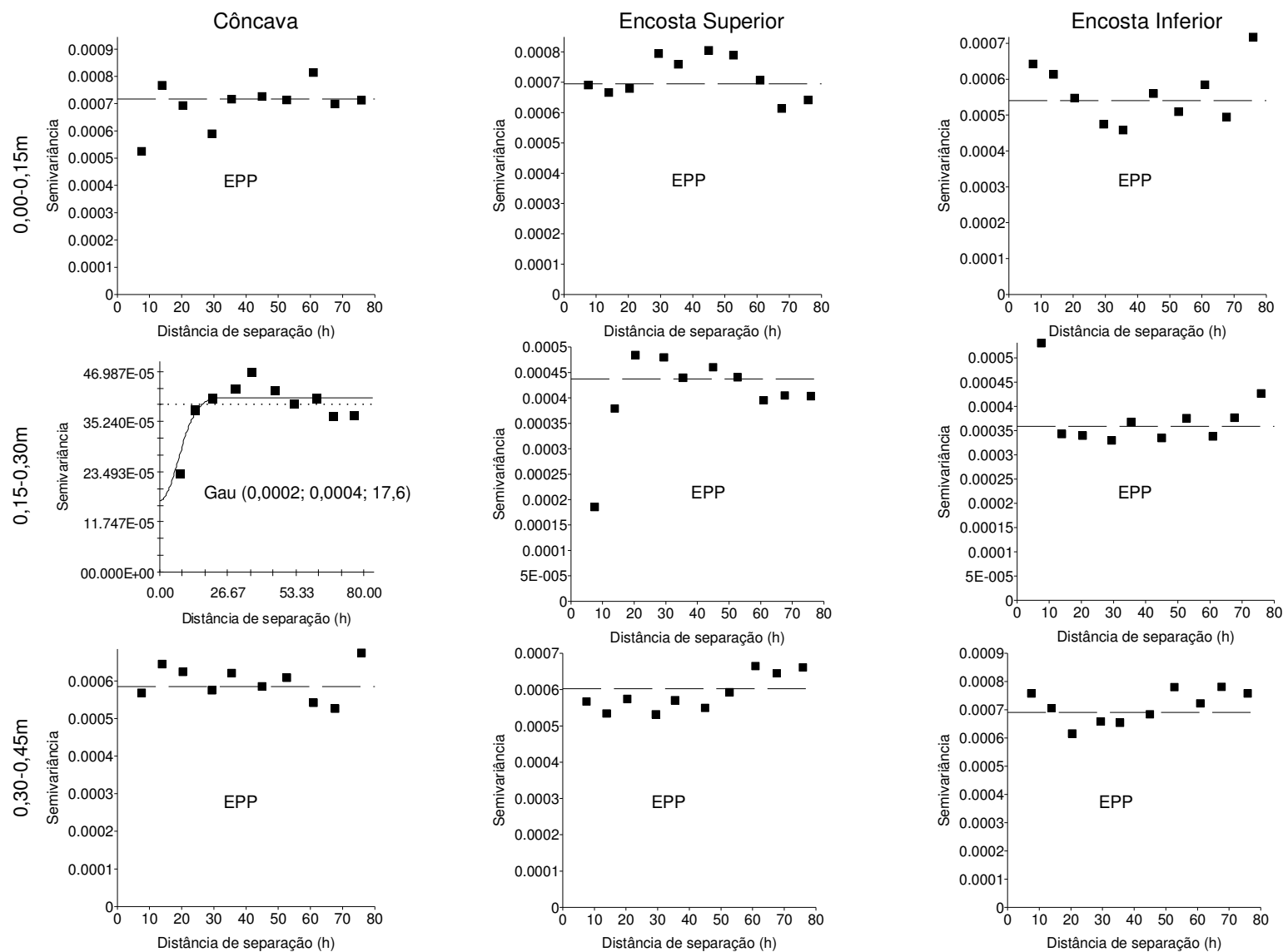


Figura 9A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo $(C_0; C_0+C; a)$) para volume total de poros ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), nas profundidades 0,00-0,15m, 0,15-0,30m e 0,30-0,45m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

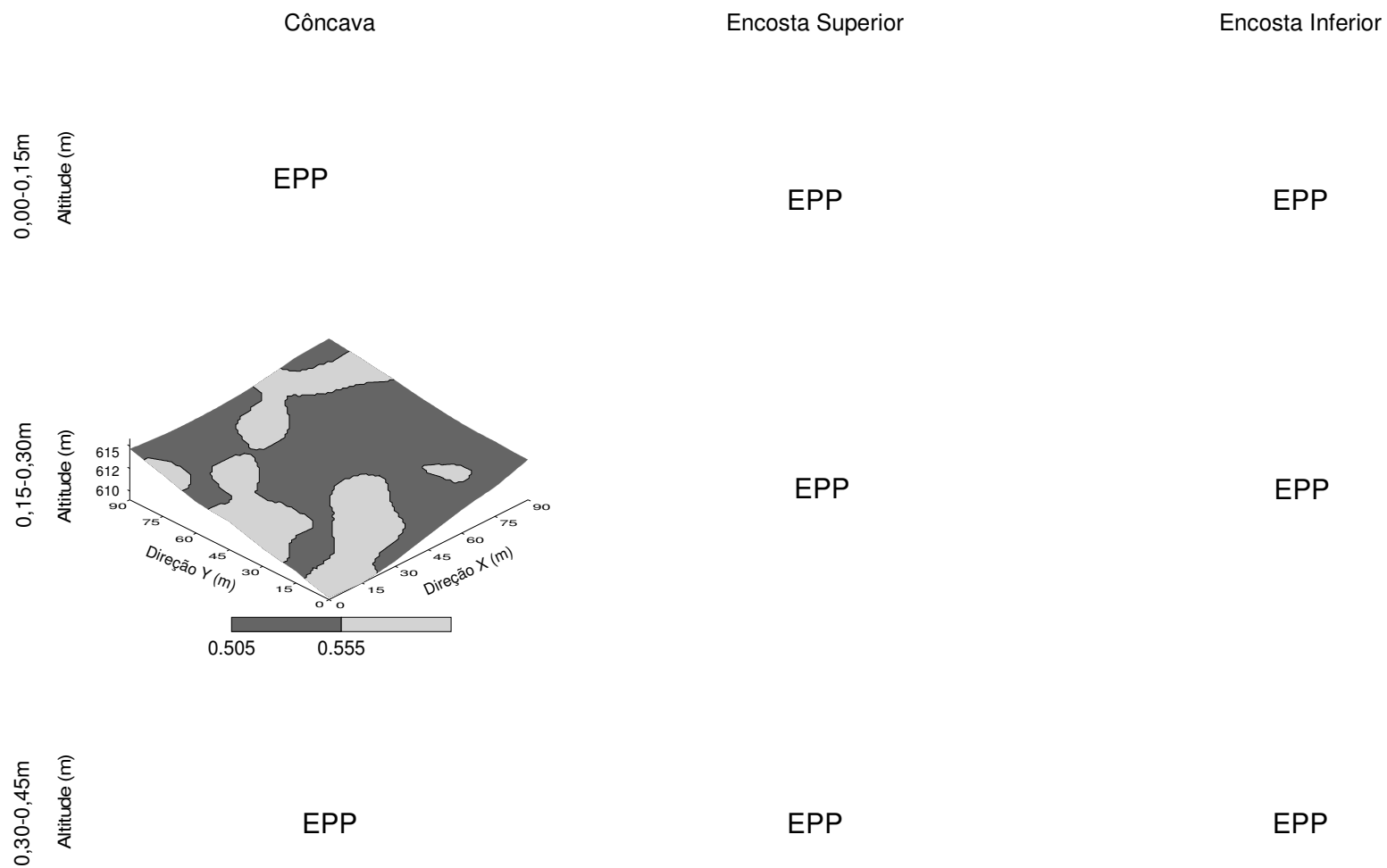


Figura 10A. Mapas com valores estimados pela krigagem para volume total de poros ($m^3 m^{-3}$), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

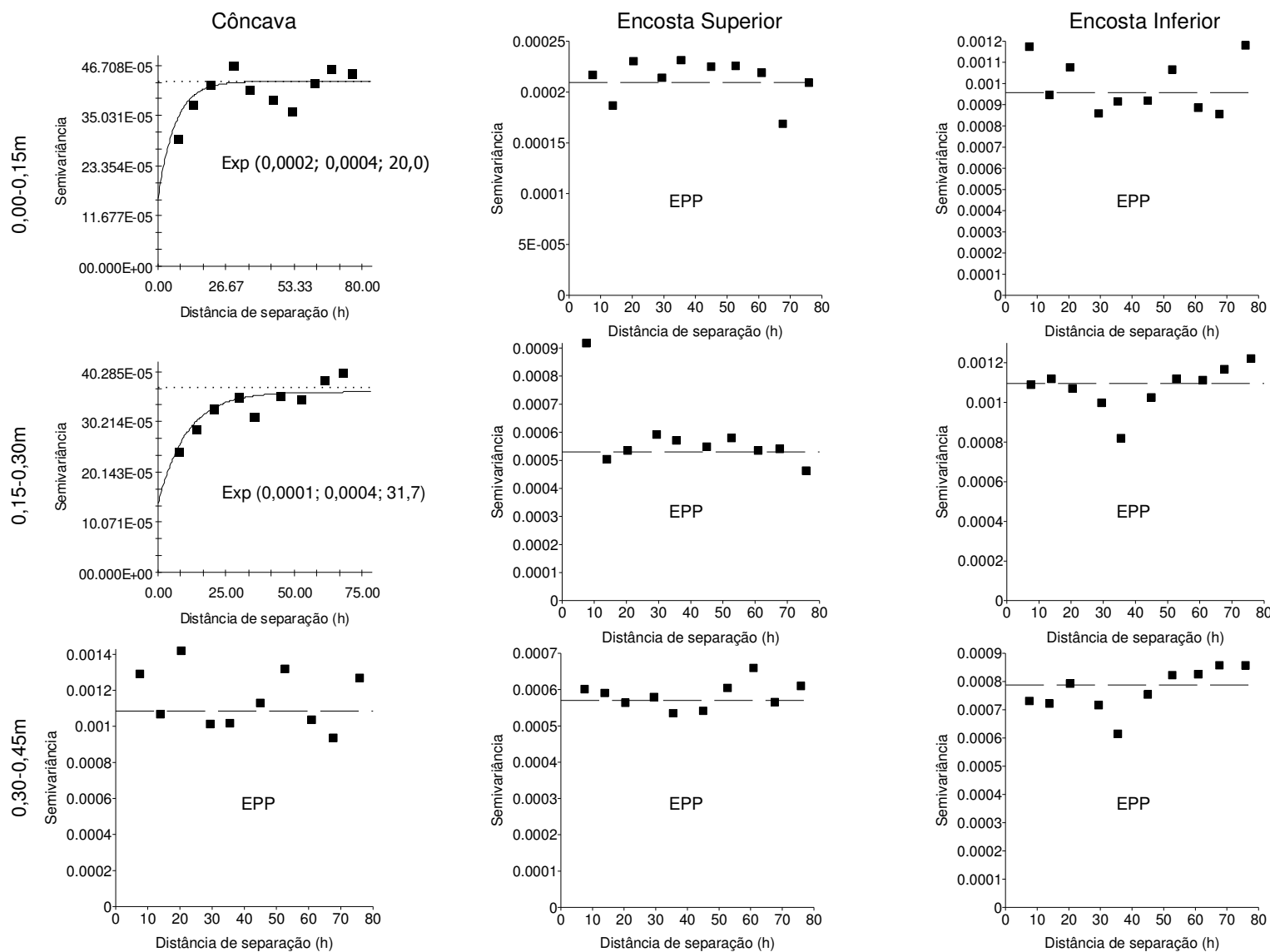


Figura 11A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo $(C_0; C_0+C; a)$) para microporos ($m^3 m^{-3}$), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

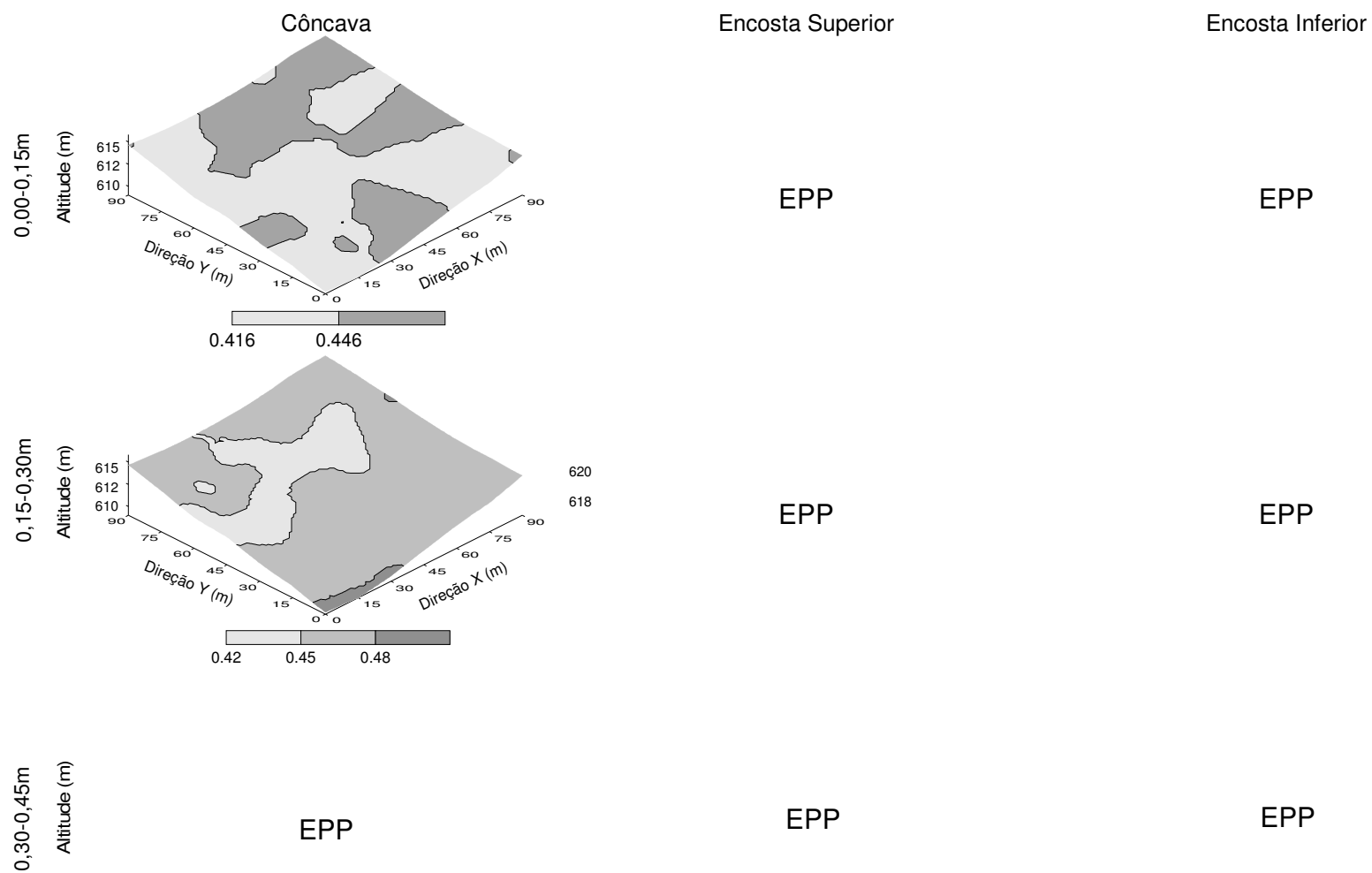


Figura 12A. Mapas com valores estimados pela krigagem para microporos ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

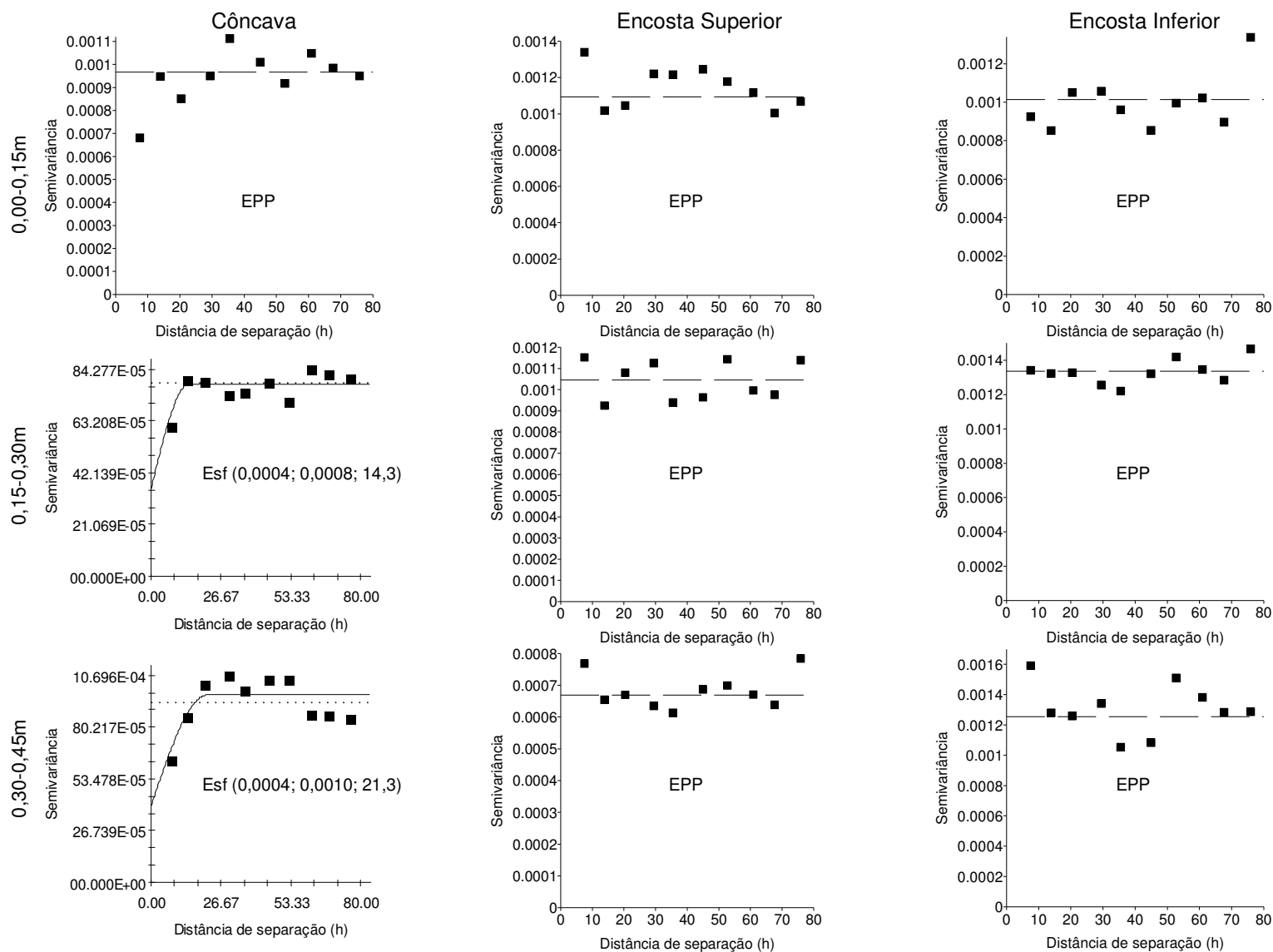


Figura 13A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo $(C_0; C_0+C; a)$) para macroporos ($m^3 m^{-3}$), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

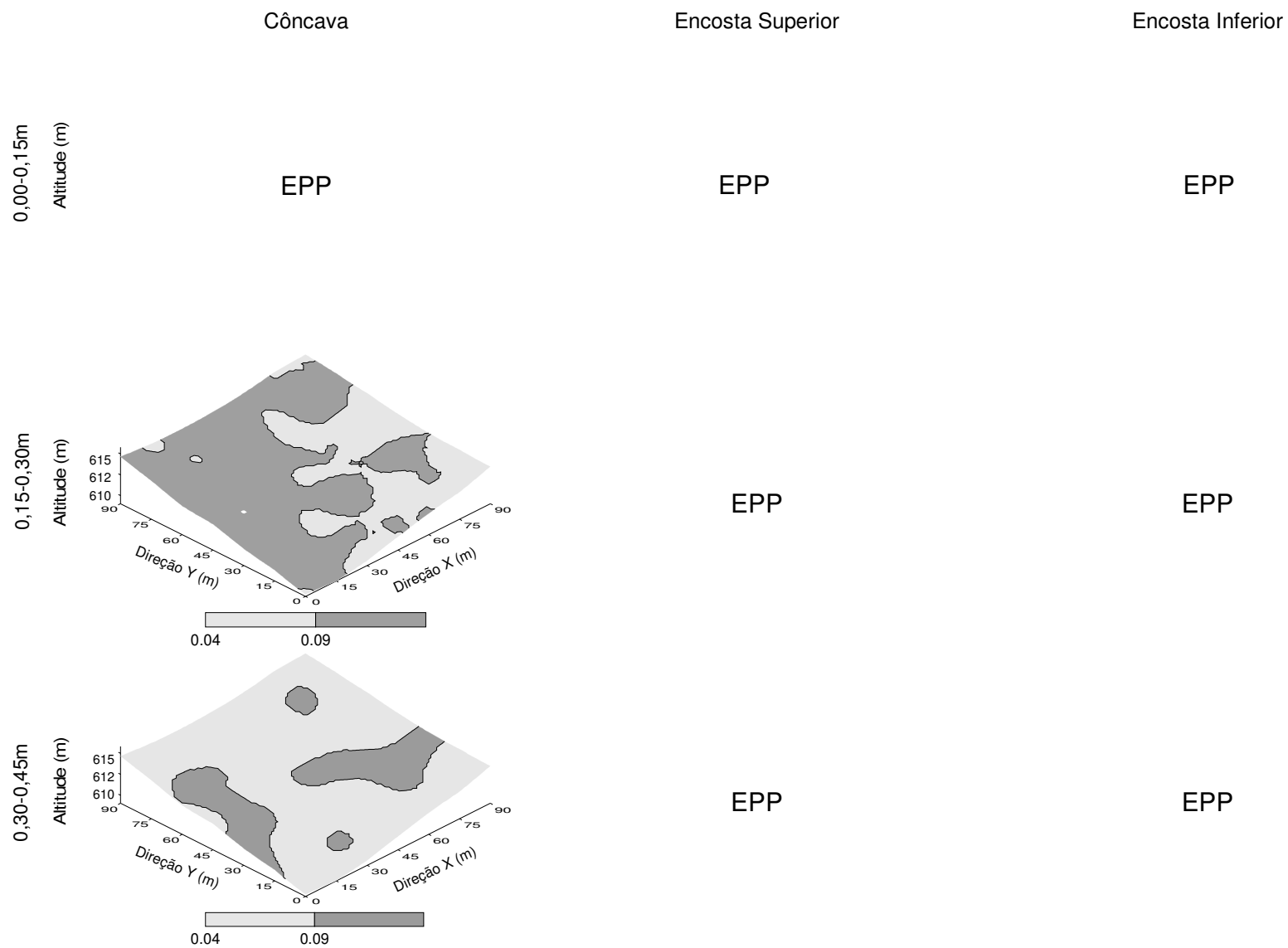


Figura 14A. Mapas de isolinhas com a distribuição espacial de macroporos ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

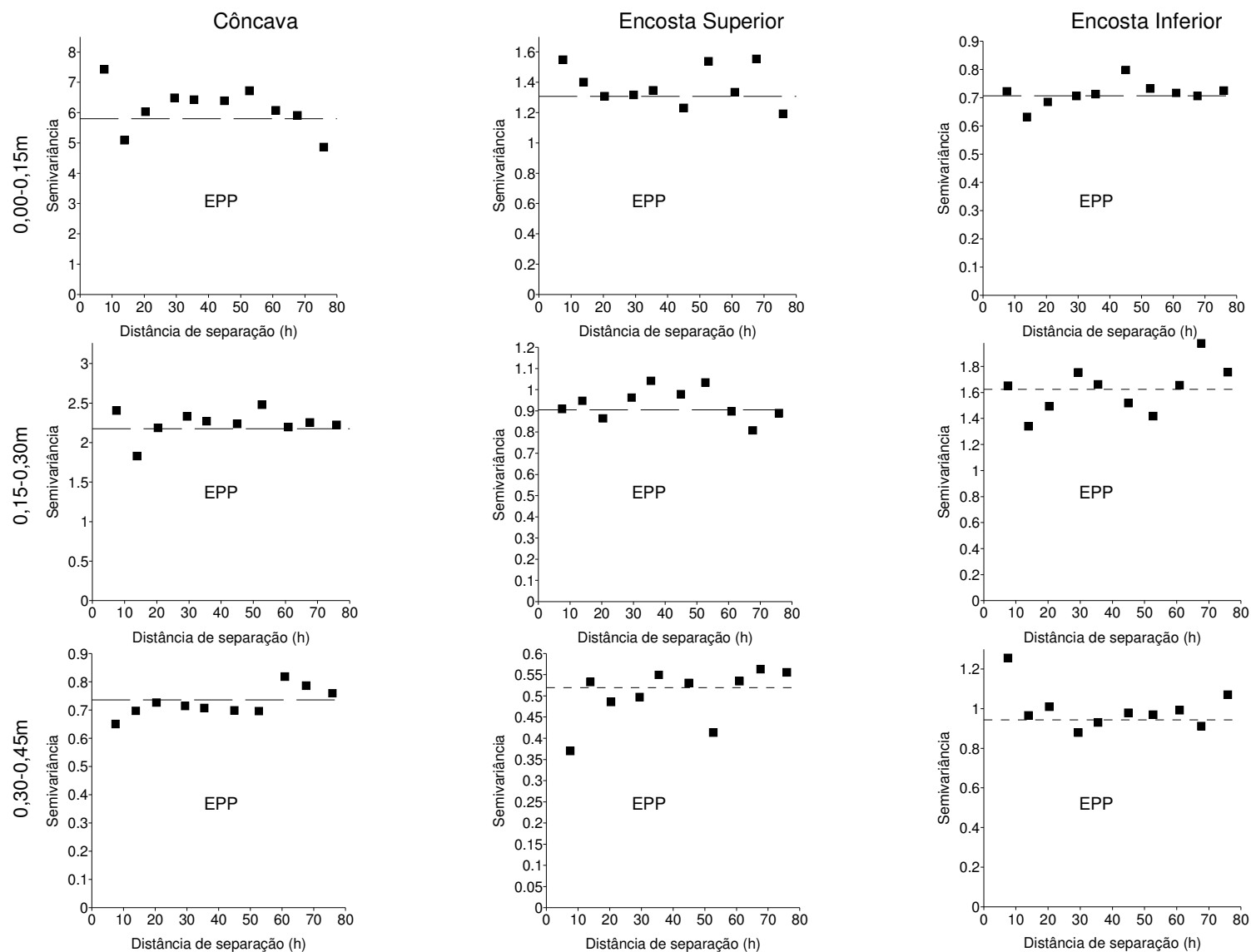


Figura 15A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo $(C_0; C_0+C; a)$) para resistência do solo à penetração (MPa), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

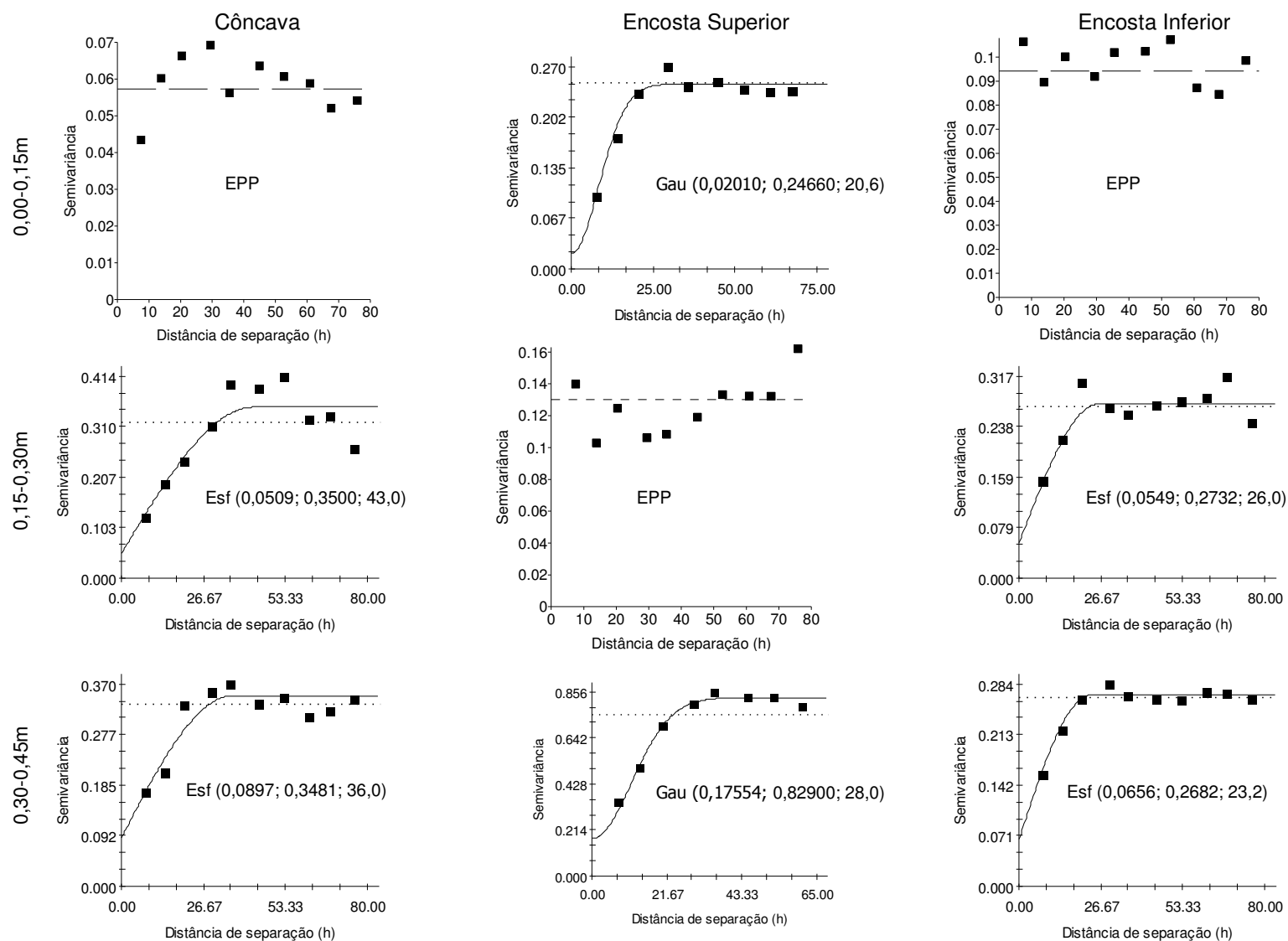


Figura 16A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo (C_0 ; C_0+C ; a)) para diâmetro médio geométrico (mm), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

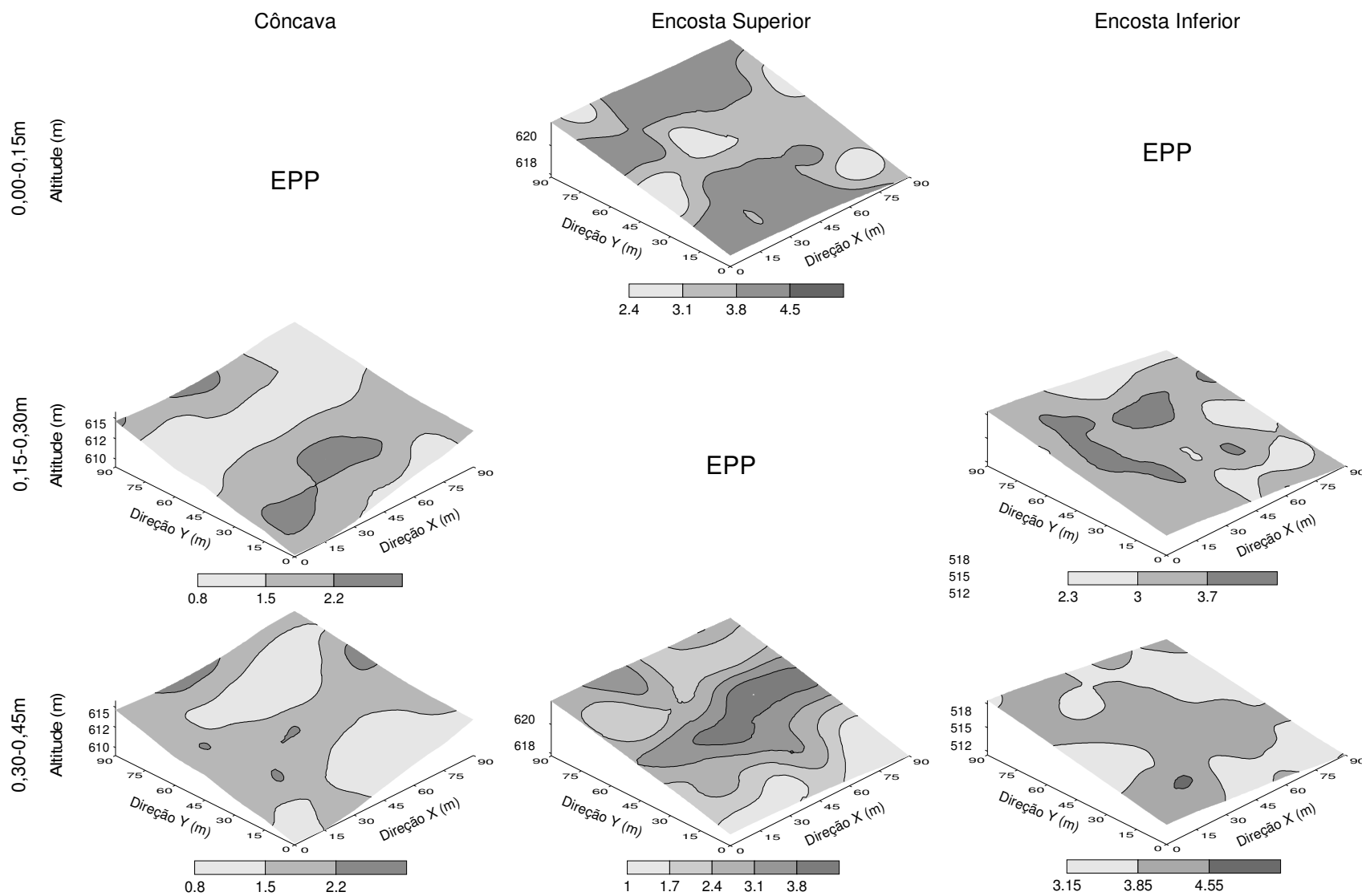


Figura 17A. Mapas com valores estimados pela krigagem para diâmetro médio geométrico (mm), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

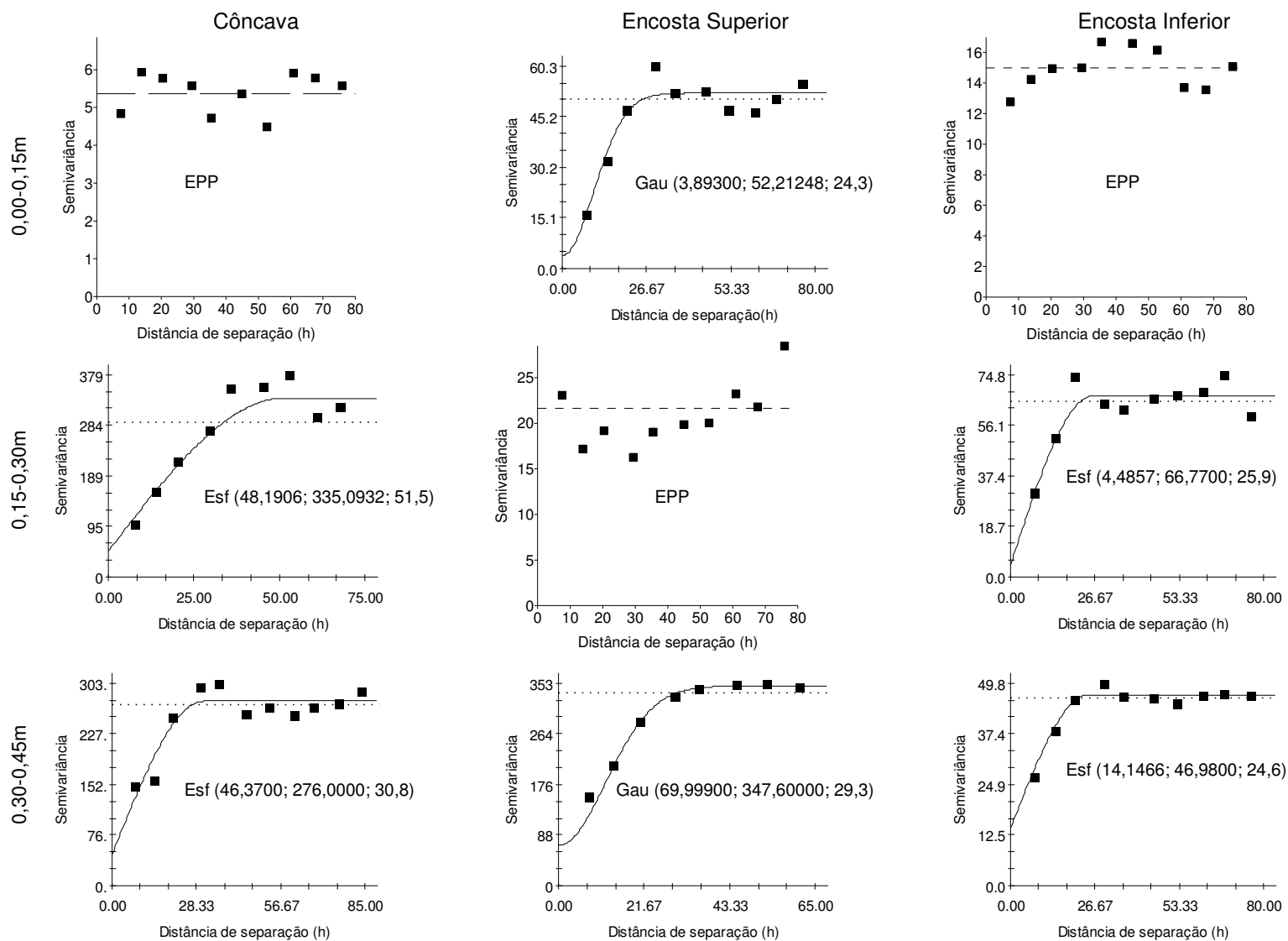


Figura 18A. Semivariogramas experimentais com modelos (Modelo (C₀; C₀+C; a)) para porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2mm, nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

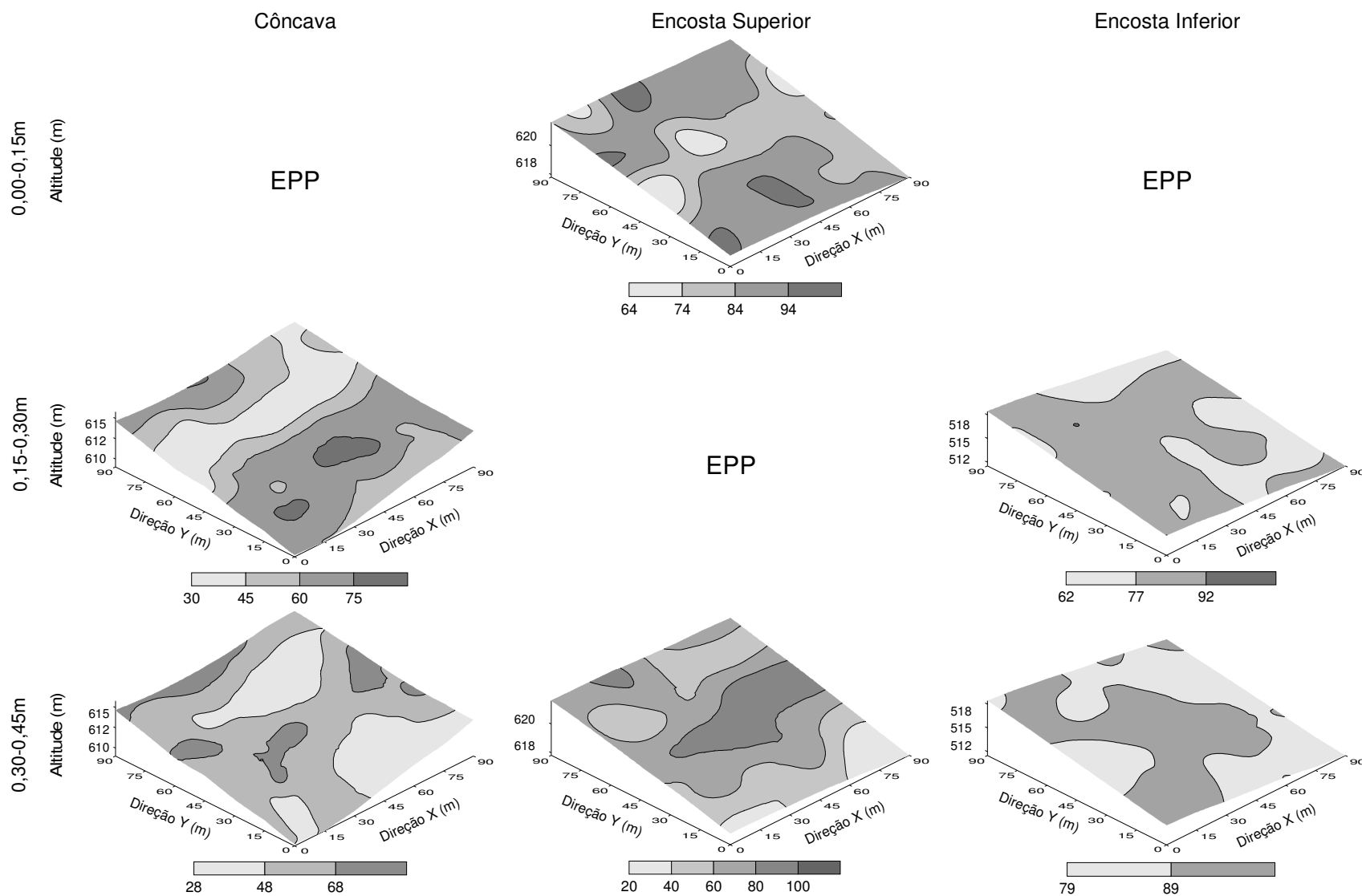


Figura 19A. Mapas com valores estimados pela krigagem para porcentagem de agregados com diâmetro maior que 2mm (%), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

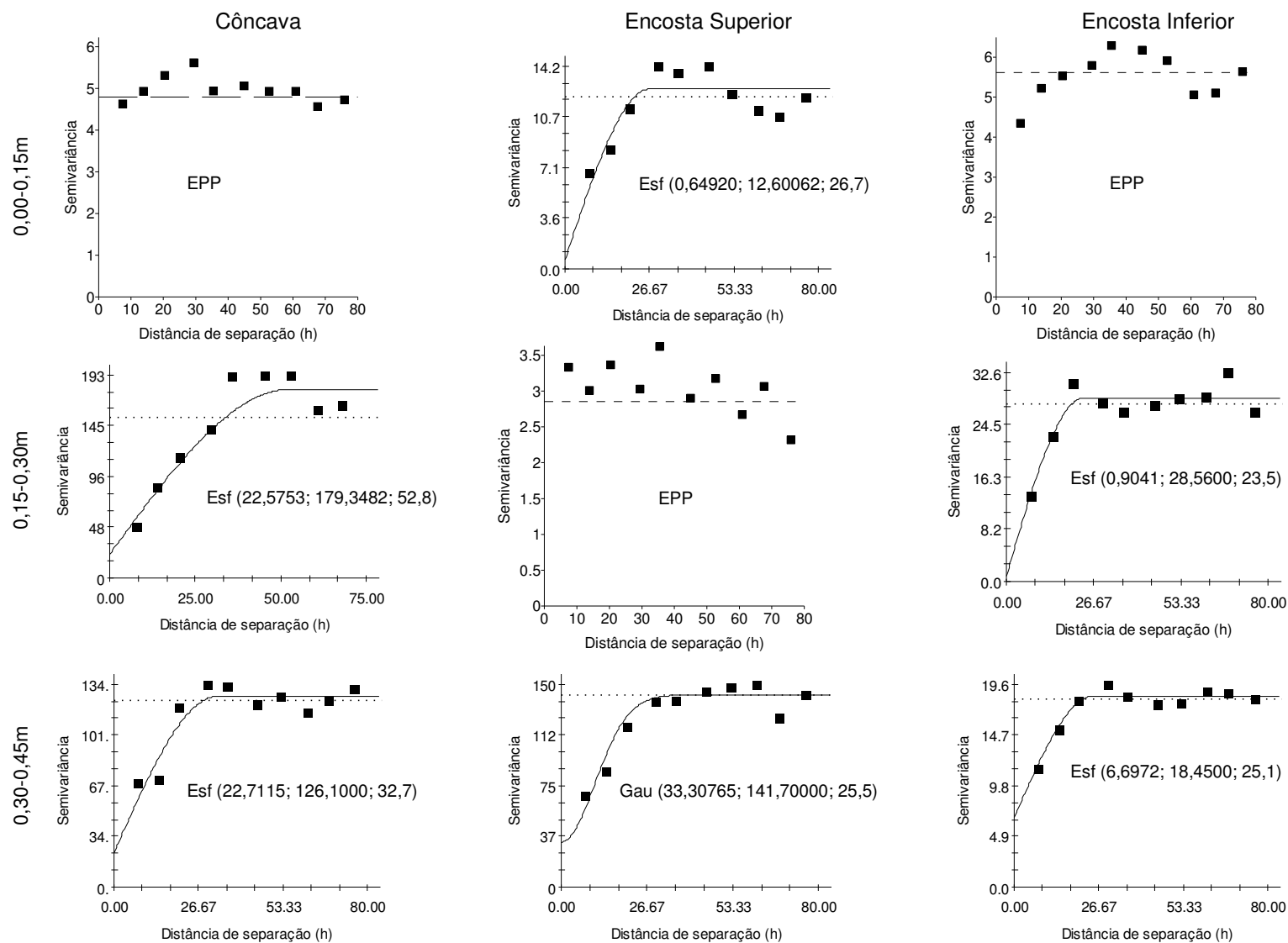


Figura 20A. Semivariogramas experimentais com modelos (Modelo (C_0 ; C_0+C ; a)) para porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1mm, nas profundidades 0,00-0,15m, 0,15-0,30m e 0,30-0,45m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

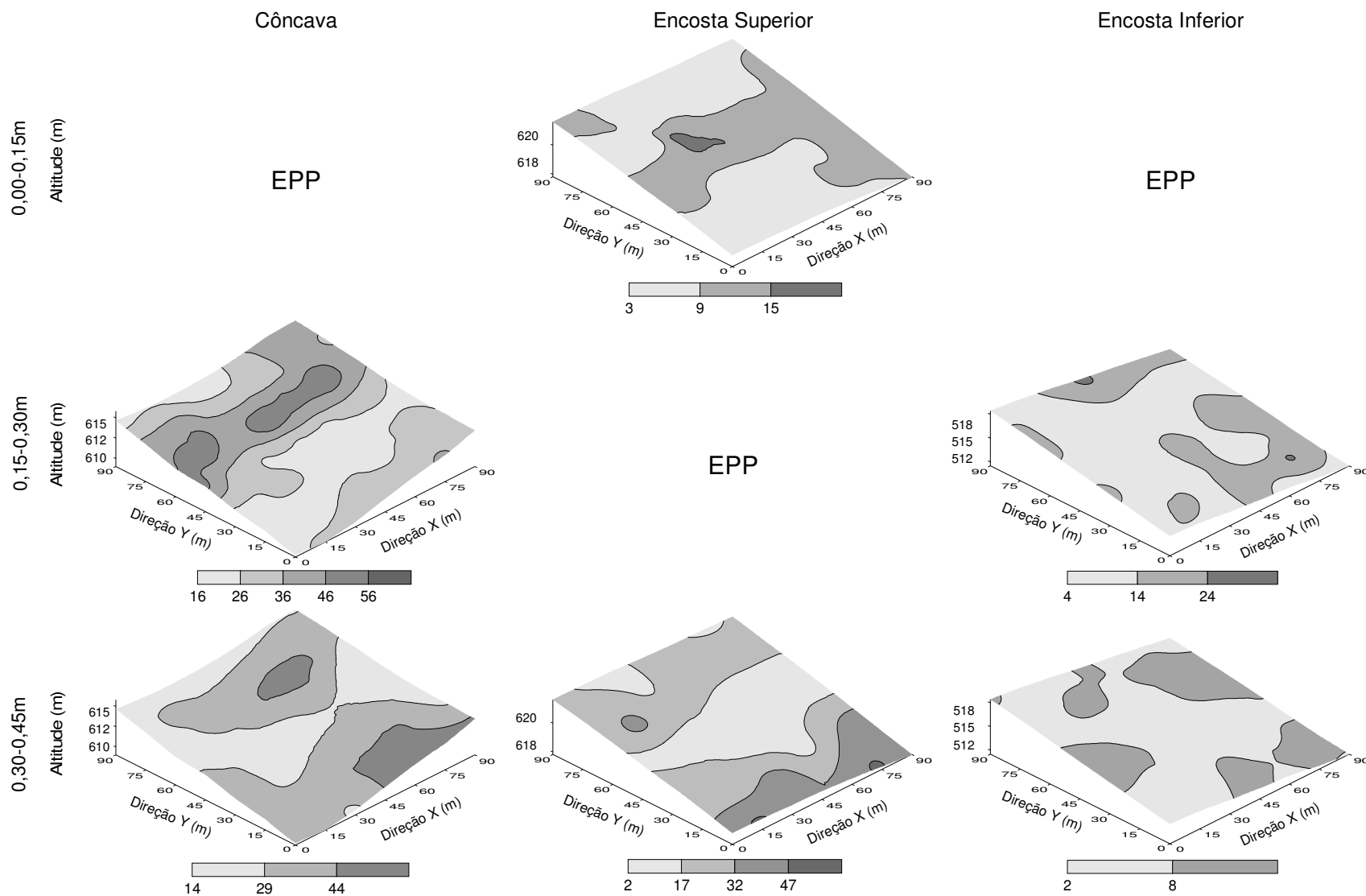


Figura 21A. Mapas com valores estimados pela krigagem para porcentagem de agregados com diâmetro menor que 1mm (%), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

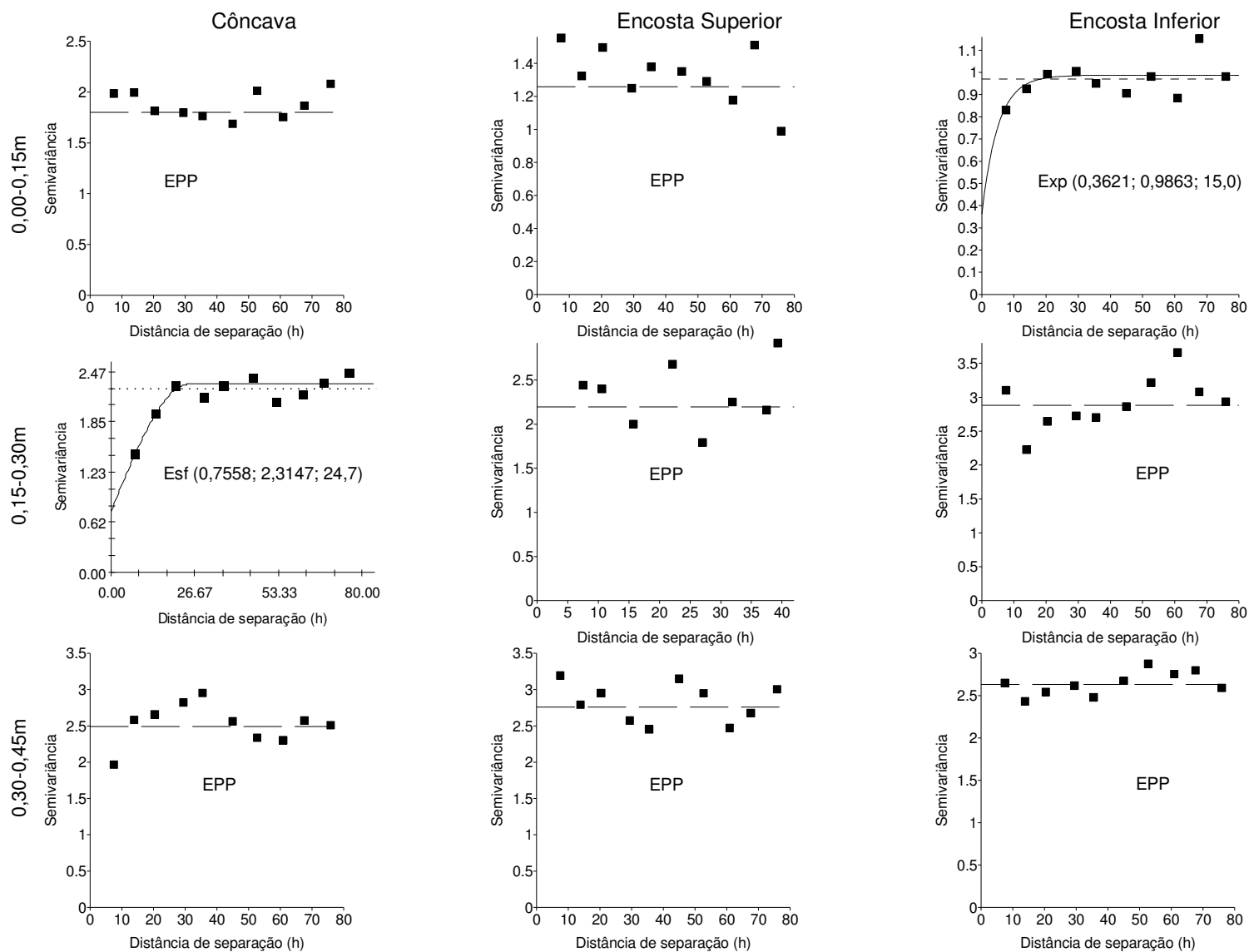


Figura 22A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo $(C_0; C_0+C; a)$) para teor de carbono orgânico oxidável (g kg^{-1}), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

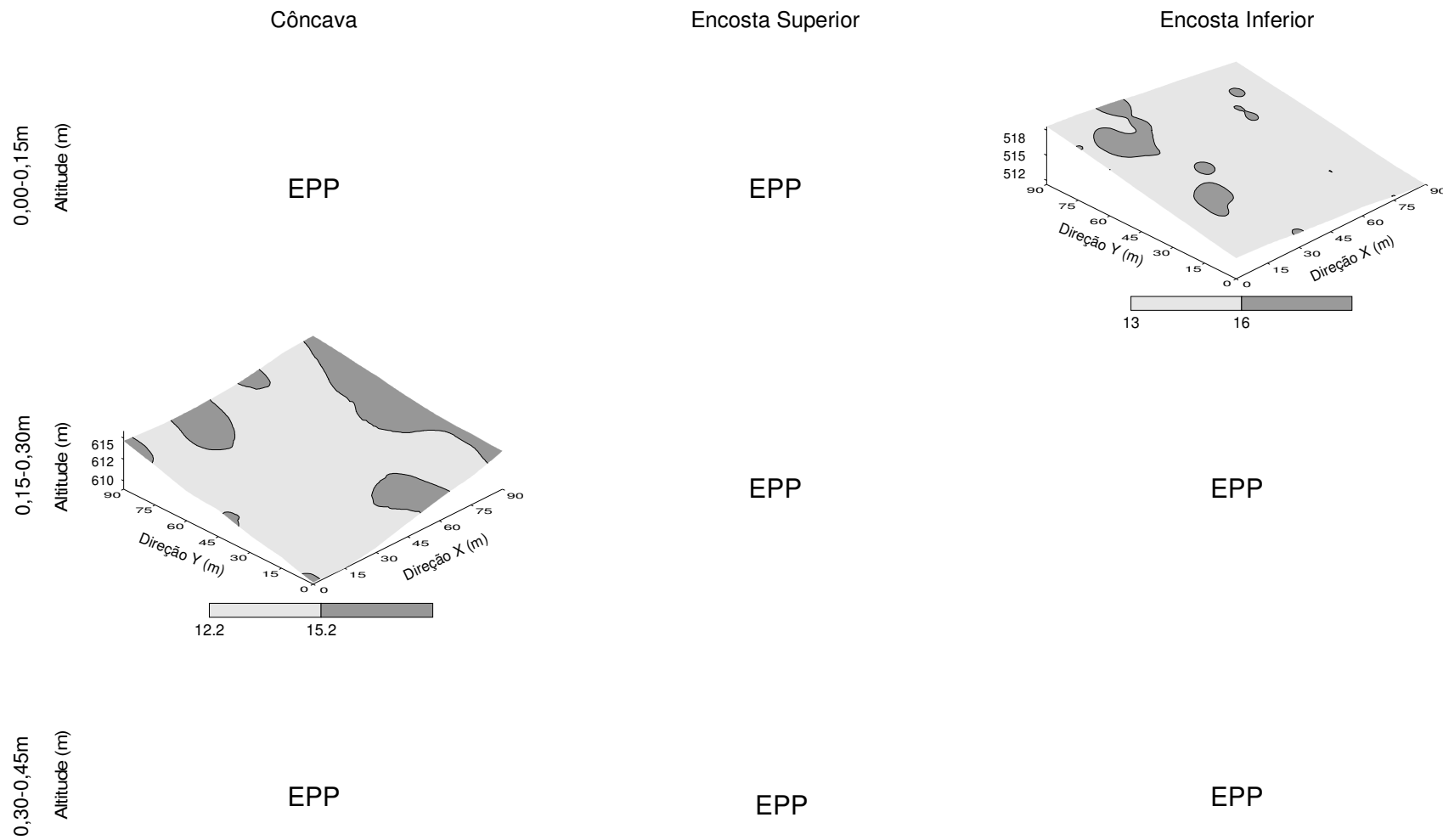


Figura 23A. Mapas com valores estimados pela krigagem para teor de carbono orgânico oxidável (g kg^{-1}), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

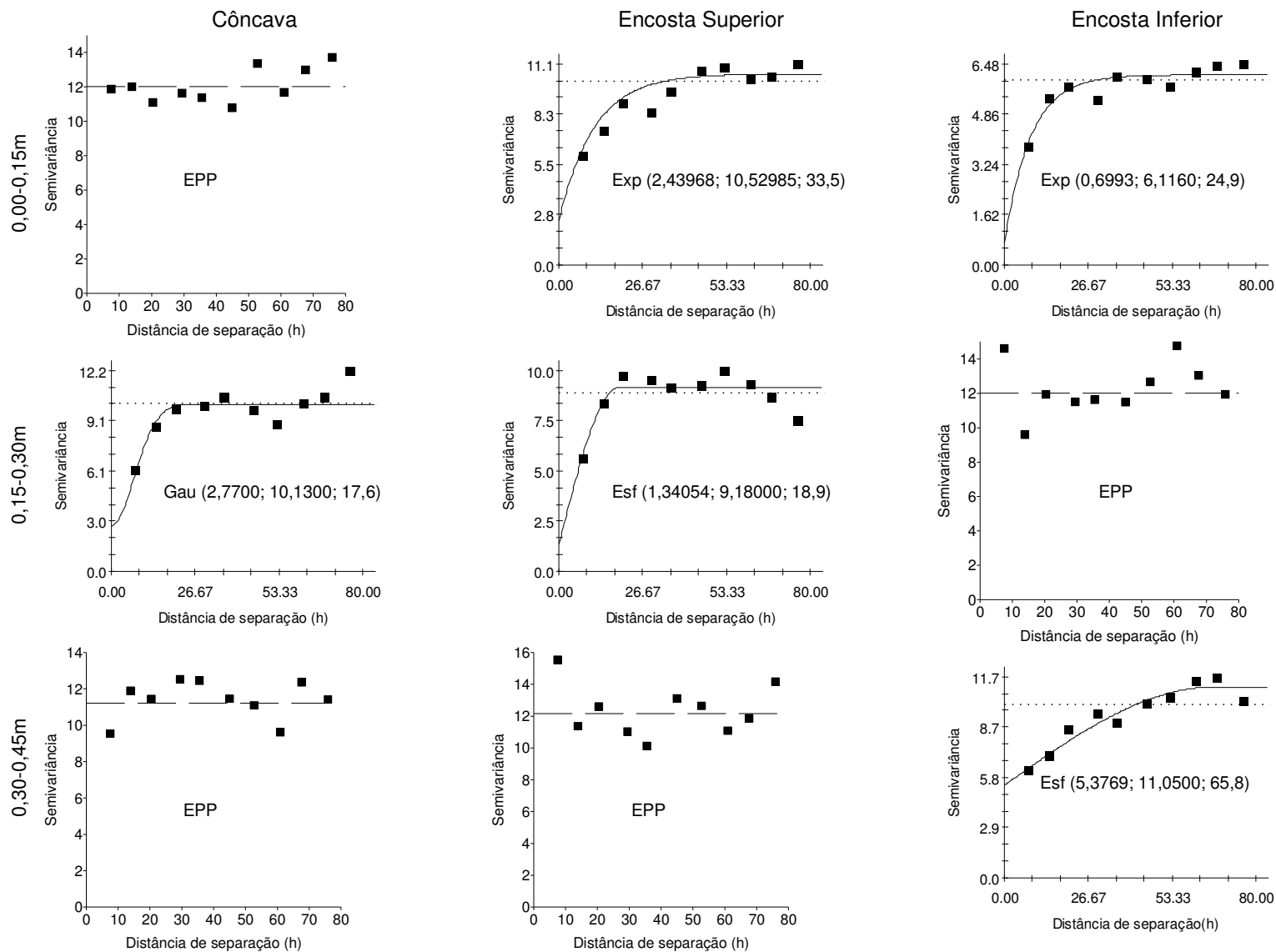


Figura 24A. Semivariogramas experimentais com modelos ajustados (Modelo (C_0 ; C_0+C ; a)) para estoque de carbono ($Mg\ ha^{-1}$), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

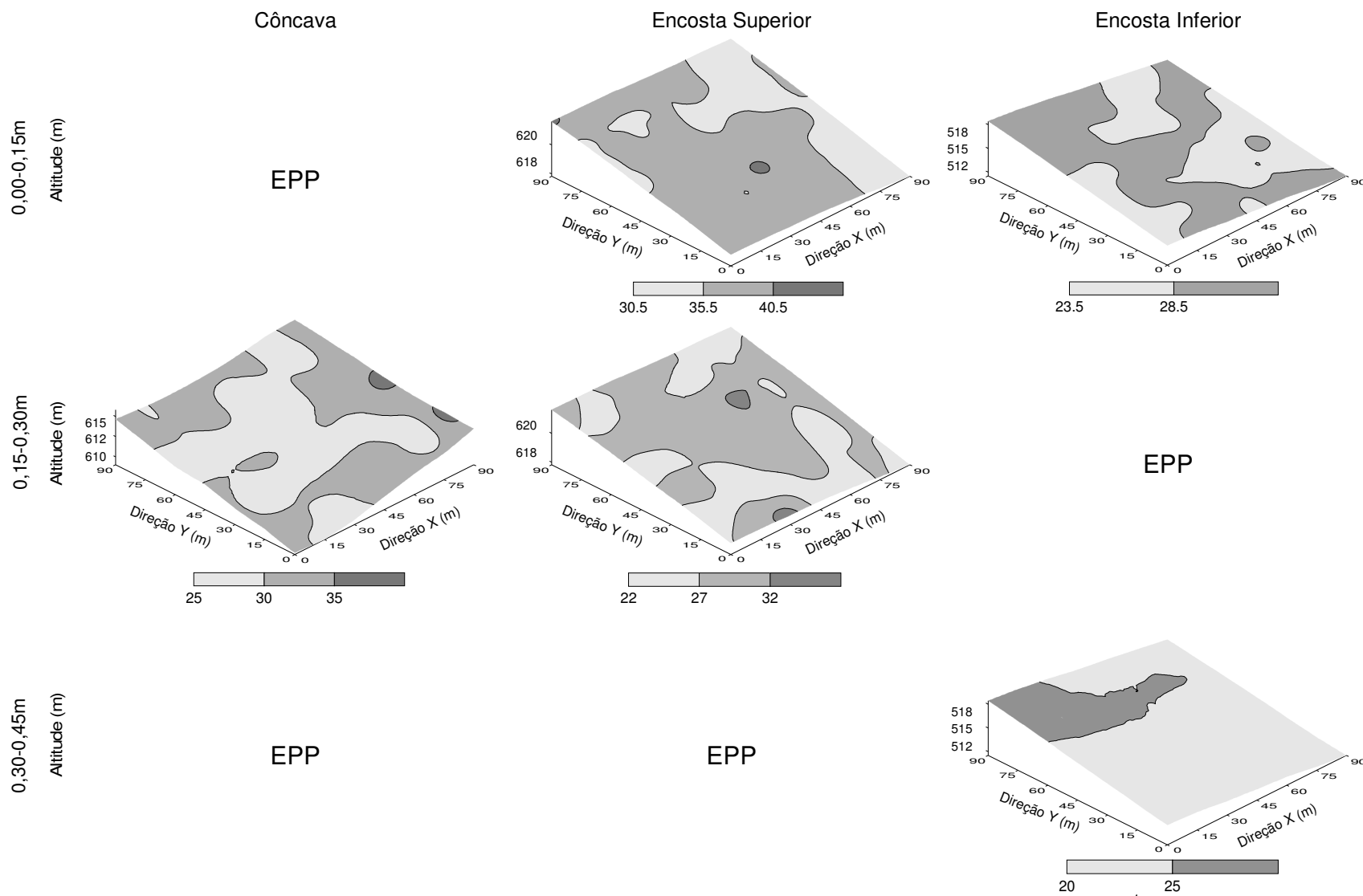


Figura 25A. Mapas com valores estimados pela krigagem para estoque de carbono (Mg ha^{-1}), nas profundidades 0,00 - 0,15 m, 0,15 - 0,30 m e 0,30 - 0,45 m, nas áreas côncava, encosta superior e encosta inferior.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)