



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - ICIAG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E EMISSÃO DE CO₂
EM UMA PEDOSSEQUÊNCIA SOB PASTAGEM NO CERRADO

JOSEPH ELIAS RODRIGUES MIKHAEL

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

JOSEPH ELIAS RODRIGUES MIKHAEL

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E EMISSÃO DE CO₂
EM UMA PEDOSSEQUÊNCIA SOB PASTAGEM NO CERRADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Solos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Beno Wendling

Coorientador

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

JOSEPH ELIAS RODRIGUES MIKHAEL

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E EMISSÃO DE CO₂
EM UMA PEDOSSEQUÊNCIA SOB PASTAGEM NO CERRADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em solos, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 30 de maio de 2014

Prof. Dr. Bruno Teixeira Ribeiro	UFU
Prof ^a . Dr ^a . Tatiane Pereira Santos Morais	UFU
Prof ^a . Dr ^a . Dalcimar Regina Batista Wangen	UNITRI
Prof. Dr. Beno Wendling	UFU

Prof. Dr. Beno Wendling
ICIAG-UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por sempre iluminar o meu caminho, a minha família que sempre me apoiou, principalmente ao meu maior exemplo de pessoa, meu pai, Elias Mitri Mikhael.

Ao Professor e orientador Beno Wendling, pela oportunidade, pela paciência, dedicação, ensinamentos e amizade que prevalecerá ao longo de nossas vidas.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), e ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) desta instituição, que me concederam o privilégio desta oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio a esta pesquisa.

A todos os funcionários do Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), em especial aos técnicos de laboratório e aos amigos que me ajudaram, Guilherme, Marcel, Risely, Fernando, Mateus, Tatianne, Camila e Daniel.

Serei eternamente grato por ter feito parte da história dessa grande universidade.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Joseph Elias Rodrigues Mikhael, nascido em Uberlândia-MG, filho de Maria Selma Rodrigues e Elias Mitri Mikhael.

Em 2006, ingressou na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para cursar o curso de Engenharia Agronômica, diplomado em 2011.

Em março de 2012, iniciou o mestrado em Agronomia pelo Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), na área de Ciências do solo, a defender o título nesta ocasião.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
1. INTRODUÇÃO GERAL	7
Resumo	11
Abstract	11
2. INTRODUÇÃO	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Coleta de solo	16
3.2 Determinação da emissão de dióxido de carbono	16
3.3 Determinação da textura, densidade e porosidade do solo.....	17
3.3.1 Determinação da macroporosidade e microporosidade	17
3.4 Determinação do teor de carbono orgânico	17
3.5 Fracionamento quantitativo de substâncias húmicas	17
3.5.1 Teor de carbono nas frações ácido fúlvico e ácido húmico	18
3.5.2 Determinação do teor de carbono na fração humina	18
3.6 Determinação da biomassa microbiana e do C-lábil.....	18
3.7 Determinação do teor de carbono solúvel	19
3.8 Determinação do nitrogênio total.....	19
3.9 Geoestatística	19
4. RESULTADOS	22
5. DISCUSSÃO	29
6. CONCLUSÕES	34
7. AGRADECIMENTOS	34
REFERÊNCIAS	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área e grid de coleta dos dados localizado entre os municípios de Uberlândia – Monte Alegre, no Triângulo Mineiro. (Fonte: Google Earth).....	16
Figura 2. Variação espacial do fluxo de CO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração de dióxido de carbono na atmosfera (ppm) e umidade relativa do ar (%).	26
Figura 3. Variação espacial da textura do solo da área em estudo: areia grossa (g Kg^{-1}), areia fina (g Kg^{-1}) e argila (g Kg^{-1}).	26
Figura 4. Variação espacial da porosidade total (%), macroporosidade (%), microporosidade (%), densidade global (g cm^{-3}) e umidade volumétrica (%).	27
Figura 5. Variação espacial da carbono orgânico total (g Kg^{-1}), C-lábil (g Kg^{-1}), BMS ($\mu\text{g g}^{-1}$), nitrogênio total (g Kg^{-1}) e relação C/N.....	28
Figura 6. Variação espacial do fracionamento do carbono, humina (g Kg^{-1}), ácido húmico (g Kg^{-1}) e ácido fúlvico (g Kg^{-1}).	29

1. INTRODUÇÃO GERAL

Alguns atributos químicos, físicos e biológicos do solo, acompanhados ao longo de um determinado período de tempo, servem de indicadores de alteração da qualidade do solo em função do uso e manejo. A dinâmica do carbono orgânico é considerada como um indicador que atua nos atributos químicos, físicos e biológicos (LARSON et al., 1994). Em áreas que não sofreram ação antrópica, o carbono orgânico encontra-se estável, porém, quando esses solos são submetidos ao manejo intensivo, sofrem perdas na sua qualidade e quantidade (ADDISCOT, 1992). Desta forma, deve-se buscar manejos que alterem o mínimo possível o solo. A medição das emissões de CO₂ do solo (FCO₂) em áreas agrícolas é uma ferramenta importante, especialmente quando são observados altos níveis de variabilidade temporal e espacial. O fluxo de CO₂ é altamente variável no espaço e no tempo; isso é verdade, mesmo em solos nus, onde a decomposição de carbono lúbil é a única fonte de carbono. As tentativas de descrever a variabilidade temporal do efluxo de CO₂ em vários sistemas ecológicos têm-se centrado sobre a temperatura do solo, que define a atividade biológica (SCHWENDEMANN et al., 2003; EPRON et al., 2004; KOSUGI et al., 2007), especialmente em climas temperados (SCOTT-DENTON et al., 2003; SHI et al., 2006; FLECHARD et al., 2007; MARTIN et al., 2009). Nos trópicos a umidade tem-se mostrado um dos fatores de maior importância para definir o ritmo das atividades biológicas (MALHI et al., 1998). Em termos de sua variabilidade espacial, o efluxo de CO₂ é controlado por muitas propriedades, estas são principalmente física, por exemplo, porosidade e textura do solo (DILUSTRO et al., 2005).

O bioma Cerrado é importante por sua abrangência, uma vez que ocupa aproximadamente um quarto do território nacional. A existência de uma estação seca e outra chuvosa favorece o planejamento do plantio e colheita, bem como os solos profundos com boas características físicas e a topografia plana. Estas características fizeram do bioma Cerrado a maior fronteira agrícola brasileira nas décadas de 1970 e 1980 (MARQUELLI, 2003). Nesse período, o incentivo à criação de gado e a expansão da área agrícola causaram um aumento maciço das alterações da paisagem na região (RATTER et al., 1997). Mittermeier et al. (1999) estimaram que 67 % das áreas de Cerrado são consideradas altamente modificadas e apenas 20 % encontram-se em seu estado original.

O estudo dos solos em topossequência permite uma visão global e integrada dos vários componentes da paisagem e das atividades antrópicas na área, permitindo o estabelecimento de relações entre atributos dos solos, do relevo e da paisagem, o que elucida as dinâmicas internas e externas do solo, a partir das suas variações verticais e laterais nas vertentes de uma bacia elementar (DRUMOND et al., 1996).

Os modelos de produção devem buscar a sustentabilidade que deveria contemplar os componentes social, ambiental e econômico. O interesse sobre os prejuízos ambientais da pecuária e seus efeitos na produção de gases de efeito estufa (GEE) tem sido mundialmente crescente e estão relacionados com a degradação da qualidade do ar, aquecimento global e seus impactos sobre a perda de nutrientes na qualidade da água (KREBEAB et al., 2011).

As pastagens de um modo geral abrangem as terras não cultivadas e que servem para alimentação dos animais domésticos, ocupando cerca de 70 % da superfície terrestre no mundo (HOLECHEK et al., 2004). Alguns fatores ambientais alteram o padrão de mudanças climáticas e sua relação com a produção animal em grandes escalas. Dentre estes figuram o aumento na população global, com intensificação do uso de recursos naturais; aumento no consumo e demanda de produtos e serviços; incremento na produção mundial de alimento, com uso de agricultura irrigada em áreas de pastagens; degradação do solo (erosão, encharcamento ou salinização); redução na biodiversidade; efeito do dióxido de carbono atmosférico nas plantas e os efeitos dos combustíveis fósseis no gás carbônico atmosférico (PAULINO et al., 2009).

O ecossistema, pastagem, com manejo adequado, tem recebido destaque por seu papel no combate ao aumento do efeito estufa, ao atuar em favor do sequestro de carbono. A condição de fertilidade do solo afeta a produção de biomassa foliar e radicular, que por sua vez, afeta diretamente a quantidade de resíduos depositados no solo e consequentemente o sequestro de carbono. Estudos realizados em diversas partes do mundo estimaram que as práticas de manejo da fertilidade do solo em pastagens podem aumentar de 50 a 150 Mg por hectare a quantidade de carbono sequestrada. Por outro lado, a ausência de N e a utilização menos frequente da pastagem resultaram em perda para a atmosfera de 57 g de C por m² por ano. O que não pode ser admitido é a transformação de floresta em pastagem, pois a floresta contém de 120 a 300 Mg massa seca por hectare, que, se queimados vão gerar 240 a 600 Mg de CO₂ por hectare, o que nenhuma atividade agropecuária consegue repor (PEDREIRA; PRIMAVESI, 2008).

Recuperar uma pastagem degradada e torná-la uma pastagem bem manejada, representa vantagem no aspecto de retirada de CO₂ atmosférico.

A produção de CO₂ no interior do solo está relacionada às atividades biológicas, incluindo a respiração das raízes e a decomposição da matéria orgânica do solo pela atividade microbiana. A emissão de CO₂ é resultado da interação dos processos de produção e transporte desse gás no interior do solo. Tais processos são fortemente influenciados pelas condições de temperatura e umidade do mesmo (SÁ et al., 2001).

No solo, a matéria orgânica é um importante reservatório de nutrientes, estes, através da decomposição, podem ser disponibilizados para as plantas, contribuindo para a fertilidade dos solos (CAMPOS, 2003). Neste processo é metabolizada pelos organismos organotróficos com o objetivo de produzir energia e liberar C-CO₂ e H₂O pela respiração (oxidação) (ROSSETTO et al., 2008). A identificação e correlação dos diferentes aportes do carbono (C), assim como a relação com a emissão de C-CO₂ (dióxido de carbono), em associação com a densidade do solo, tem levado a questionamentos sobre o papel do C no solo e a importância da agropecuária na emissão de gases de efeito estufa (GEE) e consequentemente sua relação como dreno ou fluxo de C-CO₂ para a atmosfera.

Nos solos agrícolas, as principais vias de entrada de C são através de depósito de material vegetal, da deposição de restos de animais e vegetais, assim como do uso de fertilizantes e/ou de condicionantes orgânicos no solo. Por outro lado, as saídas são através da lixiviação do C, da remoção por meio da erosão e da emissão CO₂, isto devido à decomposição da matéria orgânica com a respiração microbiana.

Agricultura de precisão é considerada por boa parte dos especialistas em informação e sensoriamento como um sistema de gestão da produção agrícola, em que são definidas e aplicadas tecnologias e procedimentos, visando otimizar os sistemas agrícolas, com enfoque no manejo das diferenças produtivas e dos fatores envolvidos na produção (NUNES et al., 2012).

A consolidação de tais tecnologias, como ferramentas à disposição do produtor, permitem visualização da variabilidade espacial e temporal dos fatores edafoclimáticos de cada área agrícola, considerando as peculiaridades de cada parte da área no momento do manejo, ao invés de manejá-la como se a mesma fosse uniforme. Os problemas iniciais encontrados no início do desenvolvimento do conceito e das práticas associadas à agricultura de precisão, como dificuldade na interpretação de um volume considerável de dados, elevado custo dos equipamentos, adaptação das tecnologias às diferentes regiões

do globo e de popularização das técnicas envolvidas no processo evoluíram para soluções viáveis, tornando-a uma ferramenta real ao alcance dos produtores.

As perspectivas para a agricultura de precisão são positivas, com possibilidade de aumento da precisão na obtenção de resultados, conforme se forem tornando mais bem entendidos e mapeados os fatores que contribuem para a variabilidade nas áreas agrícolas.

A incorporação de funções que relacionam distância e covariância de propriedades do solo entre os pontos nas análises espaciais torna a determinação dessas propriedades mais corretas do que quando se considera que essas mesmas propriedades não são espacialmente dependentes, assim a geoestatística, que tem sido conduzida para uma série de propriedades do solo, físicas, químicas e biológicas (WANG et al., 2002), é considerada uma ferramenta fundamental para aprimorar a tecnologia de agricultura de precisão.

Desse modo, espera-se que o processo de atribuição de valores, de acordo com certas regras, aos dados de campo ou laboratório e o subsequente tratamento matemático dessas observações, traga uma sensível melhoria nos campos de amostragem, o que pode ser possível através do fornecimento de critérios, segundo os quais as amostras geológicas coletadas sejam representativas das populações sob estudo; de análise de dados, pelo registro sistemático e ordenado dos valores obtidos e pela representação gráfica que representa a distribuição dos valores dos resultados. Também é importante pela identificação de tendências, agrupamentos, correlações, comprovação de hipóteses de trabalho e pela verificação de conceitos ou modelos de processos geológicos e de previsão quantitativa, quando da solução de problemas específicos que envolvam interpolações e extrapolações.

A emissão de CO₂ do solo apresenta alta variabilidade espacial devido à grande dependência observada nas propriedades do solo que a influenciam, sendo que sua relevância, como um parâmetro importante, deve ser analisado. Na dissertação de mestrado intitulada “Variabilidade espacial de atributos do solo e emissão de CO₂ em uma pedossequência sob pastagem no Cerrado”, objetivou-se caracterizar e relacionar a variabilidade espacial da respiração do solo correlacionada e a dinâmica do elemento carbono no solo em conformidade com o efeito da densidade e porosidade do mesmo.

Variabilidade espacial de atributos do solo e emissão de CO₂ em uma pedossequência sob pastagem no Cerrado

Resumo - Agricultura de precisão é considerada uma ferramenta à disposição do produtor que permite visualização da variabilidade espacial dos fatores edafoclimáticos de cada área agrícola, considerando as peculiaridades de cada parte no momento do manejo. É notável a mudança da fase puramente descritiva dos fenômenos geológicos para um enfoque quantitativo. Esse processo de transformação baseia-se em três fatores principais: a introdução do conceito de modelos matemáticos para a explicação de fenômenos geológicos, a integração dos diversos fenômenos geológicos e a facilidade de acesso a computadores digitais. O objetivo deste trabalho foi mapear o padrão espacial da emissão de CO₂ em uma área de uma pedossequência sob o cultivo de pastagem, onde ocorre uma variação do teor de umidade, e correlacionar com os padrões espaciais do aporte de carbono, densidade e porosidade do solo. Os mapas de distribuição espacial mostraram claramente, no sentido do declive, a transição gradual entre a condição aeróbica e a condição de hidromorfismo.

Palavras-chaves: mapas, transição, carbono e geoestatística.

Spatial variability of soil attributes and CO₂ emission in a pedological sequence under pasture in the Cerrado

Abstract - Precision Agriculture is a tool available to the producer that allows visualization of the spatial variability of edaphoclimatic factors in each agricultural area, considering the peculiarities of each one at the management time. The change from a purely descriptive phase of geological phenomena to a quantitative approach is remarkable. This process of transformation is based on three main factors: the introduction of the concept of mathematical models to explain geological phenomena, the integration of the geological phenomena, and access to digital computers. This study mapped the spatial pattern of CO₂ emission in an area of a pedological sequence under pasture, where a variation of moisture content occurs, and correlate it with the spatial patterns of carbon input, soil bulk density and porosity. The spatial distribution maps clearly showed, following the slope, a gradual transition between soil aerobic condition and the hydromorphism one.

Keywords: maps, transition, carbon and geostatistics.

2. INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial das propriedades do solo ocorre naturalmente devido a fatores pedogênicos diversos. Em adição, muito da variabilidade pode ser causada ainda pelo uso e manejo dos solos e, como consequência, as propriedades do solo podem exibir uma variação espacial em macro, meso e microescalas (PANOSSO et al., 2008). Por constituir a fração viva da matéria orgânica, a biomassa microbiana é responsável por diversos processos biológicos e bioquímicos no solo (MOREIRA et al., 2003), possuindo relação direta com as condições do solo.

Segundo Geraldes (1995), além da diferença na biomassa microbiana ocorrida entre diferentes sistemas de preparo, ocorre uma variação sazonal da biomassa microbiana, onde em estudos com solos arenosos sob pastagens da Amazônia foi encontrada relação direta entre o aumento da população da biomassa microbiana com a disponibilidade de nutrientes advindos da serrapilheira e do aumento da umidade do solo, no início da estação chuvosa. Com isso pode-se inferir que o carbono orgânico do solo, a biomassa e a atividade microbiana são bons indicadores da qualidade do solo. Por isso devem-se definir níveis adequados de cada atributo do solo, a fim de se realizar o manejo com menor degradação do solo.

Na superfície do solo o CO₂ é produzido naturalmente por meio de um processo mediado por microrganismos durante a decomposição aeróbica da matéria orgânica e respiração do sistema radicular das plantas. A emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, por intermédio do solo, microrganismos, fauna e processos químicos, é controlada por gradientes de temperatura e umidade, pela população microbiana, pela quantidade e composição química do material orgânico, bem como pelas propriedades físicas do solo. Assim, o balanço do principal gás do efeito estufa adicional, o dióxido de carbono (CO₂), capturado pela vegetação e trocado entre o solo e a atmosfera, passa a ser uma das principais tarefas em atividades de pesquisas (SALISBURY; ROSS, 1985).

Apesar de ainda não existir um consenso nas validações de projetos de sequestro de carbono ou redução de emissões de CO₂ em solos de áreas agrícolas, existe um consentimento de que atividades relacionadas ao uso e ao manejo de solos poderiam auxiliar em metas de redução das emissões já acordadas (IPCC, 2013).

Estudos têm sido conduzidos no Brasil, onde foi registrada uma variação das médias mensais do fluxo de CO₂ do solo em florestas com mata nativa e eucalipto, com aumento das emissões nos meses mais quentes do ano (de outubro a fevereiro), o que foi

atribuído às condições favoráveis à atividade dos microrganismos do solo (LIRA et al., 1999), assim como a precipitação pluviométrica também causou interferências no padrão das emissões de CO₂ do solo (LA SCALA JÚNIOR et al., 2000).

Nos últimos 40 anos, tem sido notável a mudança da fase puramente descritiva dos fenômenos geológicos para um enfoque quantitativo. Esse processo de transformação das Ciências da Terra baseia-se em três fatores principais: na introdução do conceito de modelos matemáticos para a explicação de fenômenos geológicos, na procura da integração dos diversos fenômenos geológicos, através da Teoria da Deriva Continental e na facilidade de acesso a computadores digitais (LANDIM, 2006).

As discussões geológicas geralmente tratam de questões sobre o que aconteceu no passado e em que ordem cronológica. Em outras palavras, após entendida a sequência de fenômenos geológicos, torna-se necessário estabelecer equações matemáticas que os representem e talvez aqui resida a grande dificuldade.

Somente desse modo é que a pedologia conseguirá, além da sua característica fundamental de ciência que estuda o presente para interpretar o passado, passar a ser também uma ciência que entende o presente para prever o futuro. As amostras, com teores conhecidos, é que irão estimar o teor médio do bloco ou área analisados. Supondo que ocorra uma relação espacial entre os teores, os valores serão muito próximos em dois pontos vizinhos e progressivamente mais diferentes à medida que os pontos vão ficando mais distantes.

A crescente necessidade de diminuir os custos e aumentar a produtividade nas propriedades rurais, levando-se em conta os elevados preços dos combustíveis, a diminuição de terras produtíveis e a preservação do meio ambiente, tem aumentado o interesse em pesquisas científicas, e o desenvolvimento de equipamentos na área agricultura de precisão. A agricultura de precisão surgiu como um sistema de gerenciamento de informações e teve seu crescimento potencializado a partir de avanços da tecnologia de referenciamento e posicionamento, como o GPS (do Inglês Global Positioning System) e de tecnologias de sensoriamento remoto. Conceitos surgiram a partir do emprego destas técnicas na agricultura, como os de aplicação de insumos em taxas variáveis e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

De acordo com Landim (2006), atualmente o termo Geoestatística acha-se consagrado como um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um comportamento espacial,

mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas.

O peso da influência de cada amostra é inversamente correspondente à distância e essa noção pode ser aplicada à estimativa do valor médio do bloco utilizado, tanto para amostras com valores conhecidos, mas situadas a distâncias julgadas “convenientes”, quanto para as que estiverem mais próximas, assim maior será o seu peso no processo de estimativa.

As variáveis regionalizadas são constituídas por um duplo aspecto contraditório. Pela sua característica “aleatória”, apresenta irregularidades e variação imprevisível de um ponto para outro e, pela sua característica “estrutural”, apresenta relações existentes entre os pontos no espaço, motivadas pela sua gênese.

No estudo do comportamento das variáveis regionalizadas, duas são as ferramentas fundamentais dos métodos geoestatísticos: o semivariograma e a krigagem. O semivariograma mostra a medida do grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico e, para sua construção, são usados simplesmente as diferenças ao quadrado dos valores obtidos, assumindo-se uma estacionaridade nos incrementos. Isso significa que o semivariograma é uma medida da variabilidade geológica condicionada pela distância.

Atualmente os semivariogramas têm sido utilizados para reduzir a necessidade de amostragem intensa na chamada agricultura de precisão (WEBSTER et al., 1990). Entretanto, ainda são poucos os trabalhos que caracterizaram a variabilidade da emissão de CO₂ de solos, utilizando técnicas de análise de semivariância (OHASHI et al., 2007). Num estudo geoestatístico, a parte fundamental refere-se à determinação do semivariograma. Isso é importante e todo o cuidado deve ser tomado na análise variográfica para que se possa obter uma criteriosa análise geoestatística.

A krigagem é um método estatístico que visa a melhor estimativa local da variável pela minimização da estimativa da variância, resultando na suavização dos detalhes espaciais. Ou seja, independentemente se os dados variam pouco ou muito, a krigagem sempre vai subestimar os valores altos e superestimar os valores mais baixos. É um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Trata-se, em último caso, de um método de estimativa por médias móveis.

A krigagem usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, uma área ou um bloco. Como o semivariograma é uma função da distância entre locais de amostragens, mantendo o mesmo número de amostras, os pesos são diferentes de acordo com o seu arranjo geográfico.

A krigagem é como um estimador que se baseia em técnicas de análise de regressão, que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. Assim é determinada a melhor estimativa possível para locais não amostrados, pela minimização da variância do erro.

Existem também à disposição as ferramentas da simulação, que permitem infinitas realizações de mapas, cada qual com aproximadamente o mesmo semivariograma e a mesma variância que os dados originais. Teoricamente a média de um grande número de mapas simulados deve fornecer resultados mais reais e, consequentemente, mais confiáveis para previsões.

Assim, a geoestatística serve como uma ferramenta que auxilia uma maximização das informações, influenciando na redução dos efeitos da variabilidade do solo sobre a produção (TRANGMAR et al., 1985), na eficiência do manejo e desenvolvimento das culturas (MULLA et al., 1990) e também na estratégia de amostragem e planejamento agrícola (BHATTI et al. 1991).

O objetivo deste trabalho foi mapear o padrão espacial das emissões de CO₂ em uma pedossequência sob cultivo de pastagem, onde ocorre variação do teor de umidade, devido à proximidade com área de vereda, através de pontos georreferenciados descritos pelas análises de geoestatística e correlacionar com os padrões espaciais do aporte de carbono, densidade e porosidade do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Vertente Grande, localizada em Uberlândia, BR 365 - KM 663, estado de Minas Gerais, nas coordenadas 18°53'14,350" S e 48°37'09,552" W e altitude média de 830 metros.

O clima da região é classificado, segundo Köepen, como Aw, tropical de verão chuvoso e inverno seco. A área é mantida sob cultivo de braquiária implantada há 7 anos

e é reservada para a criação de matrizes bovinas da raça Semental, se caracteriza por apresentar uma sequência de transição entre solos classificados como Neossolo Quartzênico, Gleissolo Háplico e Gleissolo Melânico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

No dia 9 de fevereiro de 2014 foi instalado uma malha regular com 72 pontos, que cobre uma área de 60 x 120 metros, em intervalos regulares de 10 metros de distância (Figura 1).



Figura 1. Área e grid de coleta dos dados localizado entre os municípios de Uberlândia – Monte Alegre, no Triângulo Mineiro. (Fonte: Google Earth)

3.1 Coleta de solo

Foram coletadas cinco amostras simples na camada de 0 - 30 cm em cada ponto, portanto 72 amostras compostas para análise. Em laboratório o solo foi seco ao ar, peneirado (<2 mm) para obtenção da TFSA (Terra Fina Seca ao Ar). Uma alíquota do solo foi direcionada para caracterização da dinâmica do carbono, nitrogênio e umidade do solo.

3.2 Determinação da emissão de dióxido de carbono

As avaliações da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) foram realizadas no dia 10 de fevereiro, entre 8 h e 11 h, em 72 pontos, e também a concentração (ppm) de dióxido de carbono na atmosfera no momento da leitura foi usado do aparelho analisador de trocas gasosas por infravermelho - IRGA (“Infrared Gas Analyser” - Li-Cor 8100^a - Li-Cor Inc. Lincoln, NE, USA). Este aparelho possui uma câmara que é um sistema fechado com volume interno de 854,2 cm³ e área de contato com o solo de 83,7 cm². A câmara do

sistema quantifica a concentração de CO₂ em seu interior por meio de espectroscopia de absorção ótica na região espectral do infravermelho.

3.3 Determinação da textura, densidade e porosidade do solo

Para a determinação da textura do solo utilizou-se o método da pipeta conforme Kilmer e Alexander (1949). A densidade e a porosidade total (PT) foram determinadas de acordo com Embrapa (1997). Foram coletadas amostras indeformadas em anéis volumétricos de bordas cortantes com volume interno conhecido. A densidade do solo (g cm⁻³) foi calculada pela relação entre a massa de solo seco em estufa a 105°C, por 48 horas. A determinação da porosidade tem como princípio determinar o volume de poros do solo ocupados por água ou ar.

3.3.1 Determinação da macroporosidade e microporosidade

Os anéis volumétricos com as amostras foram saturados, elevando-se gradualmente uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de dois terços da altura do anel, durante 24 h. Após saturadas as amostras são pesadas e colocadas em uma mesa de tensão, aplica-se uma pressão de 0,006 MPa (60 cm de coluna de água), quando cessar o gotejamento o anel é pesado para determinação dos macroporos e depois é levado para estufa a 105°C por 24 h para determinação dos microporos. Os valores obtidos são submetidos a equações que determinam a quantidade de distribuição dos vazios.

3.4 Determinação do teor de carbono orgânico

Para as análises do carbono orgânico (COT), foi utilizado o método descrito em Yeomans e Bremner (1988), de modo que 5 mL de K₂Cr₂O₇ 0,167 mol L⁻¹ e 10 mL de H₂SO₄ concentrado foram adicionados em tubo de vidro contendo 0,3 g de solo seco ao ar. Essa mistura foi, então, digerida em bloco digestor, previamente aquecido a 170 °C, sendo a digestão realizada durante 30 min. Posteriormente, o dicromato remanescente no extrato digerido foi titulado com solução de sulfato ferroso amoniacial 0,4 mol L⁻¹

3.5 Fracionamento quantitativo de substâncias húmicas

No fracionamento das substâncias húmicas, utilizou-se método adaptado de Benites et al. (2003), em que amostras de 1 g de TFSA foram colocadas em contato com

10 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ e agitadas, manualmente, por 30 s, permanecendo em repouso por 24 h. Ao término desse período, as amostras foram centrifugadas a 2500 g, por 10 min, sendo, em sequência, armazenados os sobrenadantes. Ao precipitado foram adicionados 10 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹, seguindo-se agitação manual e repouso por 1 h. Após esse período, as amostras foram novamente centrifugadas e o sobrenadante, adicionado ao extrato anterior. A fração precipitada, insolúvel em meio alcalino, é humina. No sentido de separar as frações húmicas, ao sobrenadante obtido anteriormente, foi adicionado ácido sulfúrico a 20 %, visando ajustar o pH para próximo de 2. Esse extrato acidificado permaneceu em repouso por 18 h, para a decantação da fração ácido húmico. Posteriormente, o sobrenadante foi retirado e armazenado com o intuito de separar as frações ácido fúlvico (solúvel em meio ácido) e ácido húmico (insolúvel em meio ácido).

3.5.1 Teor de carbono nas frações ácido fúlvico e ácido húmico

Para determinação do teor de carbono nessas frações, uma alíquota de 5 mL foi retirada de cada fração (ácido húmico e ácido fúlvico), à qual foi adicionado 1 mL de K₂Cr₂O₇ 0,042 mol L⁻¹ e 5 mL de H₂SO₄ concentrado; essa mistura foi, então, digerida em bloco digestor por 30 min, a 150 °C. Posteriormente, as amostras foram tituladas com sulfato ferroso amoniacial 0,0125 mol L⁻¹. O volume gasto na titulação de cada amostra foi anotado e o teor de C nas frações ácido húmico e ácido fúlvico foi estimado de acordo com Benites et al. (2003).

3.5.2 Determinação do teor de carbono na fração humina

Após a secagem das amostras obtidas no primeiro fracionamento, 0,3 g do precipitado foi colocado em contato com 5 mL de K₂Cr₂O₇ 0,167 mol L⁻¹ e 10 mL de H₂SO₄ concentrado. Essa mistura foi digerida a 150°C por 30 min e, em seguida, o extrato de digestão foi titulado com sulfato ferroso amoniacial 0,25 mol L⁻¹ (BENITES et al., 2003).

3.6 Determinação da biomassa microbiana e do C-lábil

O C da biomassa microbiana solo (C-BMS) foi determinado pelo método descrito por Vance et al. (1987), utilizando o forno de micro-ondas para irradiação das amostras

(ISLAM; WEIL, 1998). O C lável (C-lável) foi determinado de acordo com Mendonça e Matos (2005) baseado na oxidação do carbono com permanganato de potássio ($KMnO_4$).

3.7 Determinação do teor de carbono solúvel

Para determinar o carbono solúvel em água (CSA), utilizou-se uma amostra de 5 g de solo de cada tratamento em 10 mL de H_2O , sendo a suspensão agitada por 15 min, centrifugada e, posteriormente, foi retirado 1 mL do sobrenadante. A determinação do carbono foi feita de acordo com o método descrito por Benites (2003).

3.8 Determinação do nitrogênio total

O nitrogênio total (NT) do solo foi determinado de acordo com o método de Kjeldahl (BLACK, 1965). O método consiste de duas fases, sendo uma de completa digestão das amostras em ácido sulfúrico concentrado com catalisadores, tais como sais de selênio e lítio para conversão do nitrogênio da amostra em sulfato de amônio e outra de destilação em meio alcalino para a liberação da amônia coletada por uma solução de ácido bórico. O nitrogênio total é quantificado através de titulação com solução de ácido sulfúrico.

3.9 Geoestatística

Para construir um semivariograma é necessário, portanto, dispor de um conjunto de valores obtidos em intervalos regulares dentro de um mesmo suporte geométrico.

Os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada e mostram:

a) o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, pois toda amostra, cuja distância do ponto a ser estimado for menor ou igual ao alcance, fornece informações sobre o ponto;

b) a anisotropia, quando os semivariogramas mostram diferentes comportamentos para diferentes direções de linhas de amostragem e de estudo da variável; neste caso a anisotropia pode ser geométrica quando o alcance varia de acordo com as diversas direções consideradas, mantendo constante a soleira e zonal quando o alcance permanece constante e a soleira varia conforme for modificada a direção;

c) continuidade, pela forma do semivariograma, em que para $h \cong 0$, $\gamma(h)$ já apresenta algum valor. Essa situação é conhecida como efeito pepita (nugget effect) e é representada por C_0 . O efeito pepita pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados em intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente do fenômeno em estudo.

De posse do semivariograma experimental é necessário ajustá-lo a um modelo teórico, ou seja, a uma função que definirá os parâmetros do semivariograma, “efeito pepita”, “alcance” e “patamar”. Entre os modelos disponíveis estes são os mais utilizados:

a) Modelos com patamar

a.1) Modelo esférico: neste modelo a inclinação da tangente junto à origem ($h \cong 0$) é $3C/2^a$. É o modelo mais comum, podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal da estatística clássica.

a.2) Modelo exponencial: neste modelo a inclinação da tangente junto à origem é C/a . C é a assíntota de uma curva exponencial e pode ser equalizada junto à soleira; “ a ” corresponde ao alcance prático igual à distância, segundo a qual 95% da soleira foi alcançada.

a.3) Modelo gaussiano: a curva é parabólica junto à origem e a tangente nesse ponto é horizontal, o que indica pequena variabilidade para curtas distâncias. “ a ” corresponde ao alcance prático igual à distância, segundo a qual 95% da soleira foi alcançada.

b) Modelos sem patamar

b.1) Modelo potencial: é o modelo mais simples e representado por uma reta, passando pela origem do gráfico.

A krigagem pode ser usada, como algoritmo estimador, para:

a) previsão do valor pontual de uma variável regionalizada, em um determinado local, dentro do campo geométrico. É um procedimento de interpolação exato que leva em consideração todos os valores observados, o qual pode ser a base para a cartografia automática por computador, quando se dispõe de valores de uma variável regionalizada, dispostos por uma determinada área;

b) cálculo médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico, como por exemplo, no cálculo do teor médio de uma jazida, a partir de informações obtidas de testemunhas de sondagens;

Assim a variabilidade dos dados foi descrita pela estatística descritiva e ajuste de modelos aos semivariogramas experimentais da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo. A semivariância pode ser estimada por:

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

Em que $\gamma(h)$ é a semivariância na distância de separação h , $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h , $z(x_i)$ é o valor da variável z no ponto x_i ; $z(x_i + h)$ é o valor assumido pela variável z no ponto $x_i + h$. O gráfico do semivariograma pode apresentar um comportamento puramente aleatório ou sistemático, podendo ser descrito por modelos teóricos (ISAAKS; SRIVATAVA, 1989).

O valor da semivariância aumenta com o aumento da distância de separação entre locais amostrados até um valor constante chamado de patamar ($C_0 + C_1$). A distância onde ocorre essa estabilização é chamada de alcance (a). O efeito pepita (C_0) é o valor do intercepto do modelo com o eixo y . O modelo ajustado ao semivariograma experimental é utilizado na técnica de interpolação denominada de krigagem, a qual fornece a melhor estimativa de um atributo em locais não amostrados dentro da área de estudo. Nesse processo as estimativas são feitas baseadas nos valores dos pontos vizinhos, e no conhecimento da correlação espacial existente entre os dados, fornecida pelos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais (WEBSTER; OLIVER, 1990).

O alcance (a) é um importante parâmetro no estudo do semivariograma, pois representa a distância, na qual não há correlação espacial entre os pontos de uma mesma variável. O semivariograma experimental dos dados da emissão de CO₂ foi ajustado a um modelo exponencial, determinado pela seguinte equação:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3 \frac{h}{a}\right) \right]$$

Enquanto os semivariogramas dos demais atributos foram ajustados a um modelo esférico, determinado pela equação:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]$$

Neste trabalho os modelos de semivariograma da emissão de CO₂, e da dinâmica do carbono do solo foram estimados a partir do programa GS+ (GAMMA DESIGN, 1998) e os mapas dos padrões espaciais foram obtidos a partir do programa Surfer (GOLDEN SOFTWARE, 1995).

4. RESULTADOS

A condição de normalidade não é um pré-requisito fundamental para o emprego da análise geoestatística. O importante é que a distribuição não apresente grandes fugas nas extremidades da curva, que poderiam comprometer a análise (GONÇALVES; FOLEGATTI; MATA, 2001). Não importa se a distribuição é exatamente normal, mas se ela é aproximadamente normal. O teste de normalidade tem como hipótese nula a normalidade. Assim, se o “p-valor” for menor do que 5% (ou 10%), $p<0,05$ ($p<0,10$), então o autor rejeita a normalidade. Já se $p>0,05$, aceita-se a normalidade. Portanto não irá dizer o quão grande é o desvio em relação à normalidade.

A assimetria ou obliquidade é a medida de uma determinada distribuição de frequência, que calcula a assimetria das caudas da distribuição. Distribuições assimétricas que têm uma cauda mais "pesada" que outra apresentam obliquidade. Distribuições simétricas têm obliquidade zero. Assim, se $v>0$, então a distribuição tem uma cauda direita (valores acima da média) mais pesada. Se $v<0$, então a distribuição tem uma cauda esquerda (valores abaixo da média) mais pesada e se $v=0$, então a distribuição é aproximadamente simétrica.

A curtose é uma medida de dispersão que caracteriza o pico ou "achatamento" da curva da função de distribuição de probabilidade. Alguns autores definem a curtose como a razão entre o quarto momento central e o quadrado do terceiro momento central, neste caso a curtose da normal é 3. A curtose não tem limite superior, porém seu limite inferior é -2. Se o valor da curtose for = 0 (ou 3, pela segunda definição), então tem o mesmo achatamento que a distribuição normal. Se o valor é > 0 (ou > 3), então a distribuição em questão é mais alta (afunilada) e concentrada que a distribuição normal. Se o valor é < 0 (ou < 3), então a função de distribuição é mais "achatada" que a distribuição normal.

Foi elaborado a Tabela 1, para demonstrar as estatísticas descritivas necessárias para a verificação da normalidade da distribuição do dados. Os coeficientes de assimetria

e curtose indicam se a distribuição dos dados de uma variável está próxima à distribuição normal (coeficientes iguais a zero).

Tabela 1. Estatísticas descritivas de todos os dados utilizados para todos os pontos.

Pontos	Média	Desvio Padrão	Assimetria	Curtose	C.V.
Emissão de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹)					
72	11,81	5,12	2,96*	14,18*	0,43
Umidade Volumétrica (%)					
72	11,56	16,63	2,62*	6,06*	1,44
Areia Grossa (g Kg⁻¹)					
72	508,68	91,93	0,54*	1,37*	0,18
Areia Fina (g Kg⁻¹)					
72	267,41	85,08	-0,57**	-0,08**	0,32
Argila (g Kg⁻¹)					
72	186,82	63,05	1,40*	6,65*	0,34
Densidade global (g cm⁻³)					
72	1,46	0,17	-1,68**	3,53*	0,11
Porosidade Total (%)					
72	44,9	6,69	2,22*	6,87*	0,15
Macroporosidade (%)					
72	20,13	5,25	0,04*	0,23*	0,26
Microporosidade (%)					
72	24,77	8,06	2,17*	4,63*	0,33
Carbono Orgânico Total (g Kg⁻¹)					
72	12,75	5,15	2,77	8,01*	0,40
C-Biomassa (μg g⁻¹)					
72	211,41	131,87	0,81*	0,41*	0,62
C-Solúvel (g Kg⁻¹)					
72	0,46	0,20	0,39*	-1,14**	0,43
C-Lábil (g Kg⁻¹)					
72	3,73	0,00	0,09*	0,22*	0,00
Humina (g Kg⁻¹)					
72	6,00	2,37	2,82*	12,27*	0,39
Ácido Húmico (g Kg⁻¹)					
72	2,03	1,61	3,88*	18,32*	0,79
Ácido Fúlvico (g Kg⁻¹)					
72	1,23	0,72	1,12*	0,98*	0,59
Nitrogênio Total (g Kg⁻¹)					
72	0,58	0,29	3,12*	13,04*	0,50
Relação C/N					
72	24,10	8,35	1,19*	1,39*	0,35

Quarta coluna: *Distribuição assimétrica com valores acima da média; ** Distribuição assimétrica com valores abaixo da média; Quinta coluna: *Distribuição mais afunilada que a normal; **Distribuição mais achatada que a normal.

As variáveis não apresentaram altos valores para os coeficientes de assimetria, sendo que a emissão de CO₂, umidade volumétrica, areia grossa, argila, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, C-biomassa, C-solúvel, C-lábil, humina, ácido húmico, ácido fúlvico, nitrogênio total e relação C/N possuem uma distribuição com uma cauda direita (valores acima da média) mais pesada e a areia fina e densidade global tiveram uma distribuição com uma cauda esquerda (valores abaixo da média) mais pesada.

Enquanto a curtose dos dados de fluxo de emissão de CO₂, umidade volumétrica, areia grossa, argila, densidade global, porosidade total, microporosidade, carbono orgânico total, humina, ácido húmico, nitrogênio total, relação C/N tiveram a distribuição em questão mais alta (afunilada) e concentrada que a distribuição normal, os dados de macroporosidade, C-Biomassa, C-Lábil e ácido fúlvico obtiveram valores mais próximos a 0, o que indica que a distribuição é semelhante ao “achatamento” da distribuição normal, e os dados de areia fina e C-solúvel têm a função de distribuição mais "achatada" que a distribuição normal. Portanto a distribuição dos dados foi considerada próxima à distribuição normal, e a análise geoestatística foi realizada.

Não foi possível ajustar um modelo teórico de mapas aos semivariogramas experimentais do dados de C-Solúvel, que apresentou efeito pepita puro, devido a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados em intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente.

Os valores de alcance obtidos a partir dos semivariogramas determinam o limite da dependência espacial, ou seja, está associado à existência de estrutura de dependência espacial e aplicação dos princípios da correlação espacial. Os valores de alcance foram entre 66,58 metros para Ácido Húmico e 19,2 metros para Areia Fina pelo modelo esférico.

A estrutura de variabilidade espacial para a emissão de CO₂ do solo e os demais atributos avaliados, foi constatada por meio dos modelos variográficos. Foram ajustados os modelos esférico e exponencial aos semivariogramas experimentais, sendo que os parâmetros estimados: efeito pepita (C0), patamar (C0 + C1) e alcance (a), estão na Tabela 2, assim como a soma de quadrados do resíduo (SQR) e o coeficiente de determinação (r^2). Portanto foram observados os seguintes modelos de padrões de variabilidade.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas, grau de variabilidade espacial, coeficiente de determinação e soma de quadrados de resíduo para todos os atributos avaliados.

Modelo*	C0	C0+C1	C0/(C0+C1)	a (m)	SQR	r ²
Emissão de CO₂						
Exp.	4,44	8,19	0,54	33,06	0,45	0,87
Umidade Volumétrica						
Esf.	41,9	104,1	0,4	57,19	136	0,94
Areia Grossa						
Esf.	592,38	4754	0,12	54,88	749534	0,9
Areia Fina						
Esf.	155,52	1403	0,11	19,2	9284	0,94
Argila						
Esf.	0,08	0,15	0,56	55,1	0	0,95
Densidade global						
Esf.	0	0,01	0,15	24,3	0	0,87
Porosidade total						
Esf.	0	0,01	0,24	47,04	0	0,88
Macroporosidade						
Esf.	8,56	20,33	0,42	27,06	6,66	0,83
Microporosidade						
Esf.	4,99	28,01	0,18	34,53	2,22	0,99
Carbono Orgânico Total						
Esf.	2,45	8,56	0,29	57,24	2,7	0,91
C-Biomassa						
Esf.	7823,37	12139,4	0,64	44,42	1279166	0,84
C-Solúvel						
EPP	0,04	0,04	1	-	-	-
C-Lábil						
Esf.	0	0	0,6	27,16	0	0,53
Humina						
Esf.	0,98	2,08	0,47	46,25	0,1	0,79
Ácido Húmico						
Esf.	0,04	0,49	0,09	66,58	0,02	0,85
Ácido Fúlvico						
Esf.	0,07	0,14	0,5	49,49	0	0,89
Nitrogênio Total						
Esf.	0,04	0,1	0,42	40,47	0	0,93
Relação C/N						
Esf.	0,05	0,08	0,63	21,87	0	0,68

*Esf = esférico, Exp = exponencial, Gau = gaussiano, EPP = efeito pepita puro.

Nas figuras 2 e 3 são apresentados os mapas da variação espacial do fluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e a concentração de dióxido de carbono na atmosfera (ppm) no momento da coleta dos dados e da textura - areia grossa (g Kg^{-1}), areia fina (g Kg^{-1}) e argila (g Kg^{-1}) do solo da área estudada, respectivamente. Na figura

2, a distribuição dos valores na área, nesse dia, indica uma tendência de concentração dos maiores valores no terço superior do mapa, mais próximo à vereda. Na figura 3, nota-se que houve uma concentração dos maiores valores nos mapas de areia grossa no terço superior e de areia fina no terço inferior, no entanto o de argila não indicou tendência de concentração de valores, sendo assim apresentou uma distribuição homogênea na área.

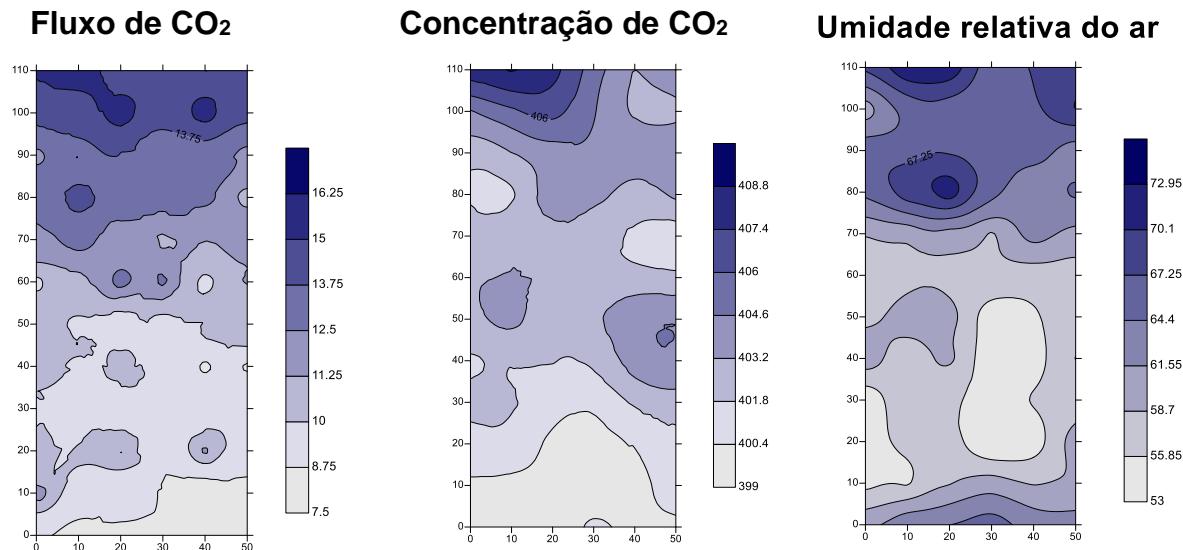


Figura 2. Variação espacial do fluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração de dióxido de carbono na atmosfera (ppm) e umidade relativa do ar (%).

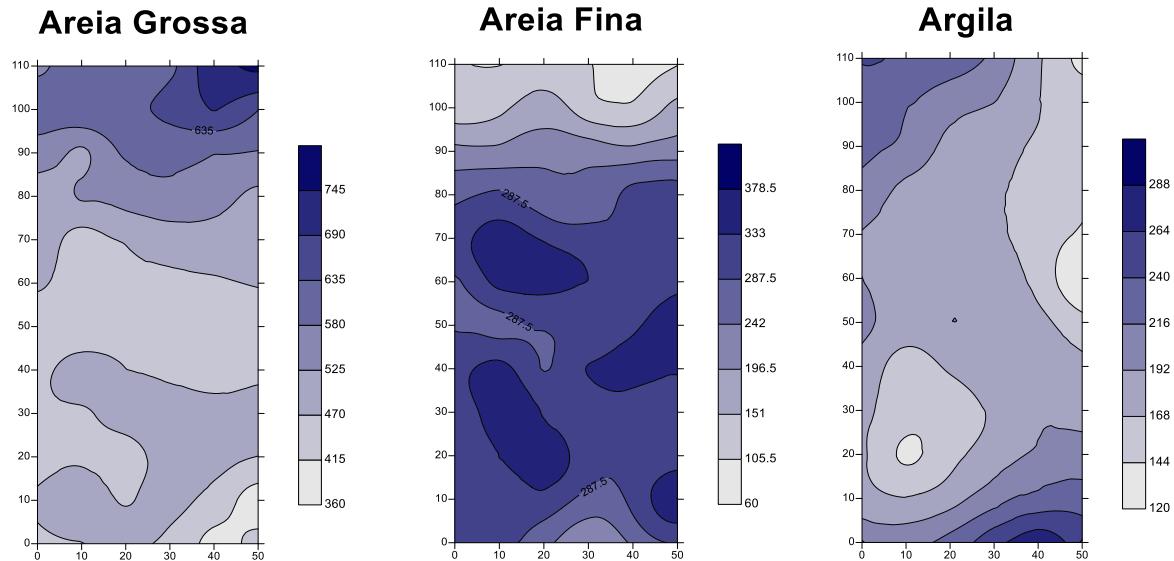


Figura 3. Variação espacial da textura do solo da área em estudo: areia grossa (g Kg^{-1}), areia fina (g Kg^{-1}) e argila (g Kg^{-1}).

A figura 4 apresenta os mapas de propriedades físicas do solo da área, com a variação espacial da porosidade total, macroporosidade e microporosidade, o padrão de

distribuição espacial da densidade global e umidade volumétrica (v/v), que caracteriza a dinâmica dos atributos do solo analisado.

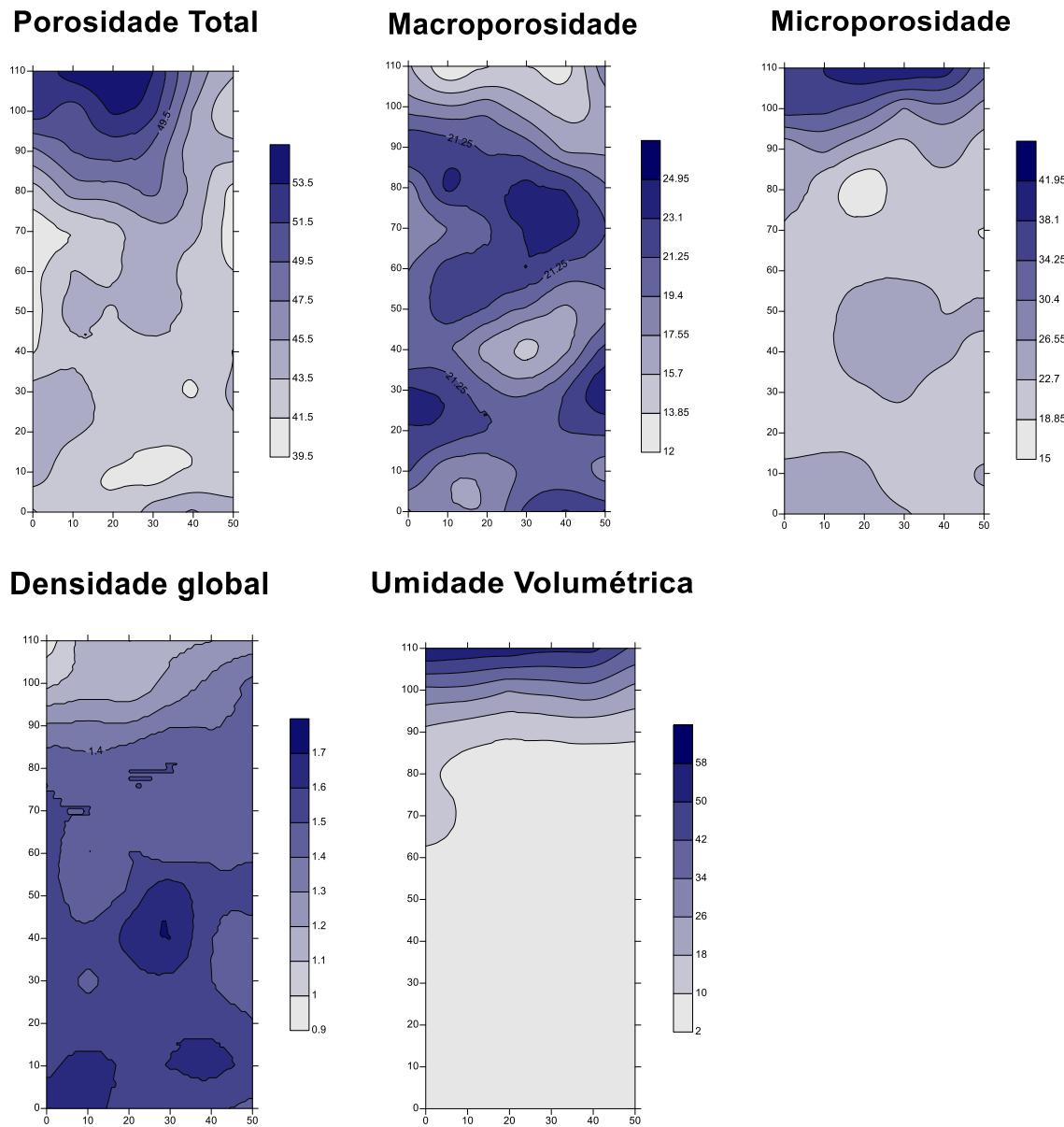


Figura 4. Variação espacial da porosidade total (%), macroporosidade (%), microporosidade (%), densidade global (g cm^{-3}) e umidade volumétrica (%).

Os mapas apresentaram concentração dos maiores valores de porosidade e microporosidade próxima à extremidade superior, onde foi constatado um maior teor de água através do mapa de umidade volumétrica e a concentração de macroporos foi oposta ao padrão de distribuição dos microporos. O mapa do padrão espacial de densidade apresentou uma distribuição quase sem agrupamentos de maiores ou menores valores em

locais específicos da área, porém observou-se menores valores de densidade na extremidade superior do mapa.

A figura 5 apresenta os mapas do aporte do carbono, nitrogênio e relação C/N. Nos mapas de COT e nitrogênio do solo constatou-se o mesmo padrão de distribuição de valores que o de emissão de C-CO₂ e umidade, enquanto o de C-lábil, BMS e relação C/N não apresentaram o mesmo padrão de agrupamento de valores altos ou baixos.

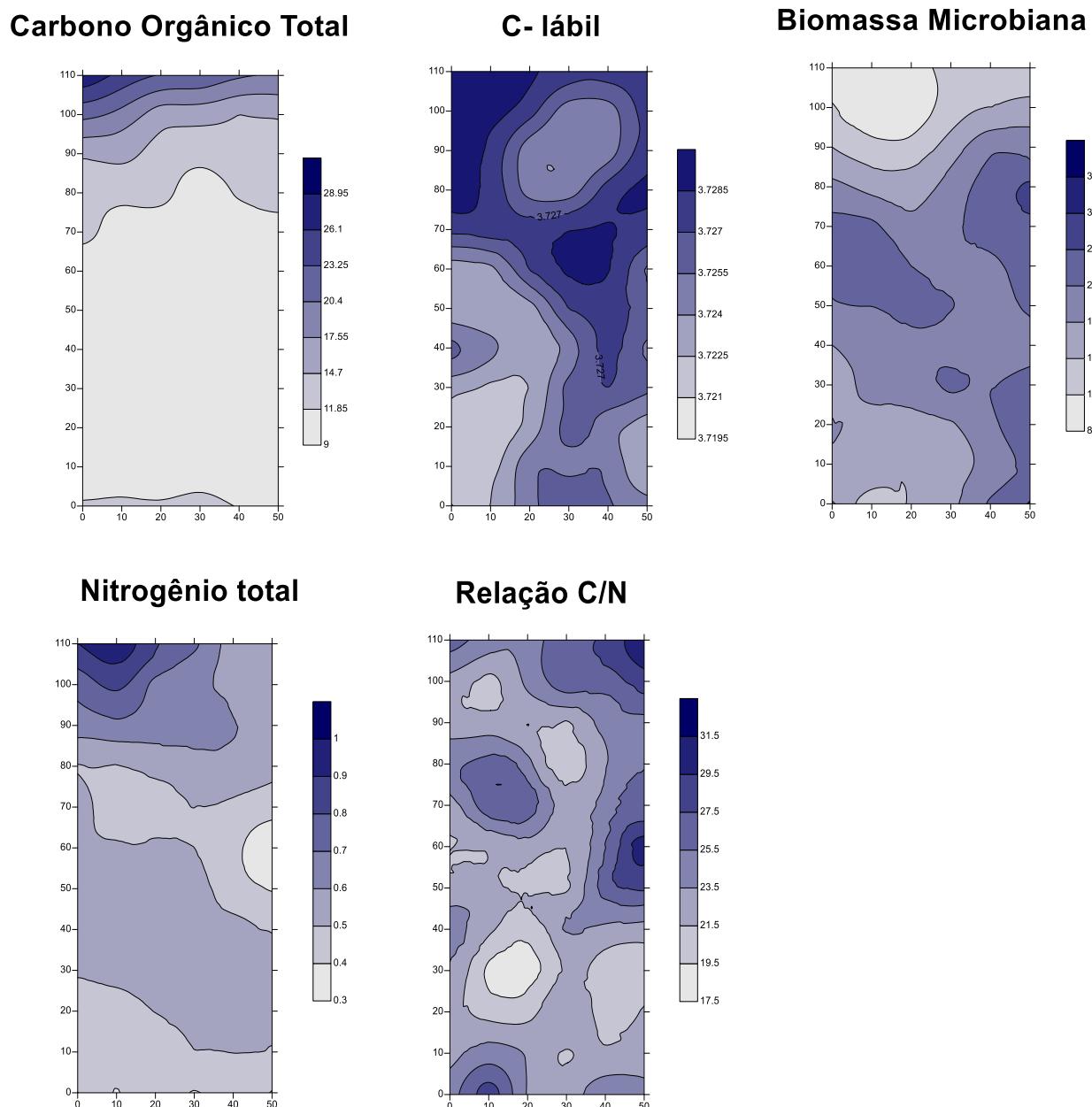


Figura 5. Variação espacial da carbono orgânico total (g Kg^{-1}), C-lábil (g Kg^{-1}), BMS ($\mu\text{g g}^{-1}$), nitrogênio total (g Kg^{-1}) e relação C/N.

A figura 6 apresenta os mapas do fracionamento do COT (humina, ácido húmico e ácido fúlvico), que obtiveram o mesmo modelo de acumulação de valores altos na extremidade superior, local de maior teor de umidade.

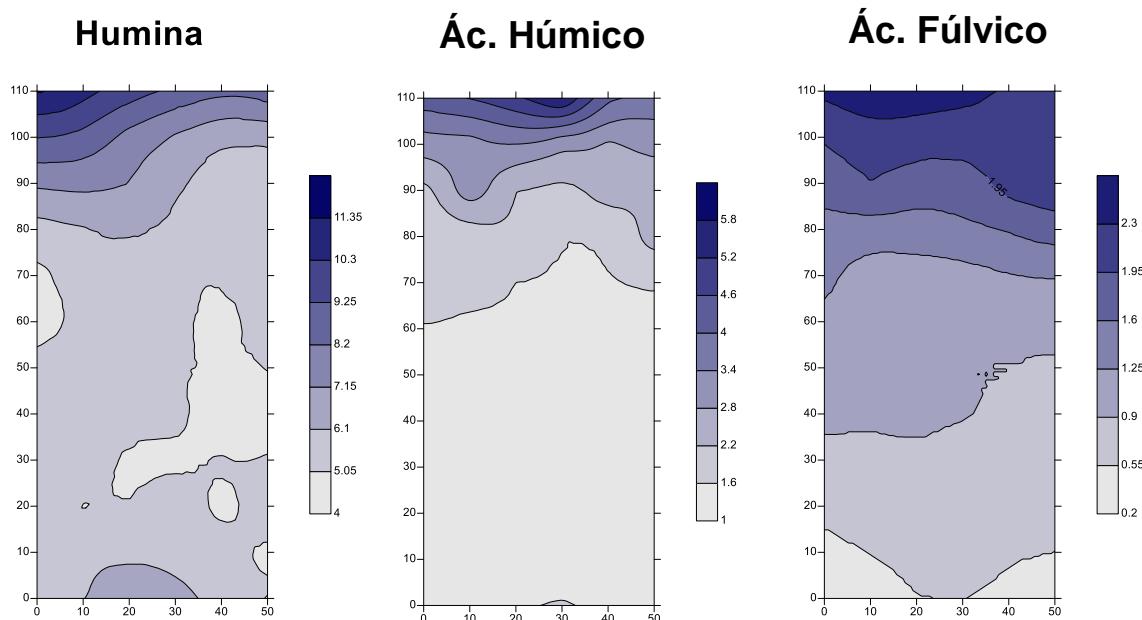


Figura 6. Variação espacial do fracionamento do carbono, humina (g Kg^{-1}), ácido húmico (g Kg^{-1}) e ácido fúlvico (g Kg^{-1}).

De acordo com as figuras apresentadas, constata-se que a emissão de C-CO₂ apresenta um acúmulo de valores maiores na parte que concentra os maiores teores de umidade volumétrica do solo; maior quantidade de poros, especificamente de microporos, responsáveis pela armazenagem de água no interior do perfil do solo; maiores valores de carbono orgânico e nitrogênio total e também maior concentração das frações do carbono.

5. DISCUSSÃO

A umidade do solo é comumente observada em estudos do efluxo de CO₂ do solo. A quantidade de água no solo pode tanto favorecer como inibir a produção de CO₂ por microorganismos, se houver uma quantidade ótima para a condição de produção. A respiração microbiana do solo é limitada pela difusão de O₂ (oxigênio necessário para a respiração aeróbica) através dos poros quando o solo encontra-se muito úmido. Por outro lado, na condição seca, o solo não permite a solubilidade de substratos de carbono orgânico que constitui fontes de energia para os microorganismos heterotróficos (ROSOLEM et al., 2002).

O clima, o material de origem, a forma da vertente, os processos geomorfológicos e a infiltração de água, tudo isso atuando de maneira conjunta, são alguns dos elementos responsáveis pela formação de solos diferenciados em uma mesma vertente. Nas últimas décadas, o estudo pedológico da vertente, por meio de toposequências de solos, tem apontado para a influência de outros fatores de formação no desenvolvimento das características e propriedades dos solos (ROCHA; CARVALHO, 2003).

Na Tabela 3 apresentam-se as estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis: CO₂ (emissão de dióxido de carbono), umidade volumétrica (UV), areia grossa (ARG), areia fina (ARF), argila (AG), densidade (DS), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi). Para a emissão de CO₂ do solo verificou-se correlações tanto positivas como negativas com a textura, densidade e porosidade do solo.

Tabela 3. Correlação de Pearson para as variáveis: CO₂ (emissão de dióxido de carbono), umidade volumétrica (UV), areia grossa (ARG), areia fina (ARF), argila (AG), densidade (DS), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi).

	CO₂	UV	ARG	ARF	AG	DS	Pt	Ma	Mi
CO₂	-	0,57*	0,45*	-0,42*	-0,06	-0,64*	0,64*	-0,11	0,60*
UV	-	-	0,54*	-0,68*	0,17	-0,65*	0,62*	-0,48*	0,83*
ARG	-	-	-	-0,76*	-0,37*	-0,57*	0,50*	-0,12	0,50*
ARF	-	-	-	-	-0,19	0,62*	-0,63*	0,2	-0,65*
AGL	-	-	-	-	-	-0,03	0,11	-0,08	0,15
DS	-	-	-	-	-	-	-0,84*	0,03	-0,72*
Pt	-	-	-	-	-	-	-	0,1	0,76*
Ma	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,56*

* Variáveis consideradas significativas com P < 0,050.

Descreve-se como correlações positivas com as emissões de CO₂ do solo as variáveis, UV ($r = 0,57$), ARG ($r = 0,45$), Pt ($r = 0,64$) e Mi ($r = 0,60$) e as variáveis com correlações negativas, ARF ($r = -0,42$), DS ($r = -0,64$) e Ma ($r = -0,11$), em que o aumento dos seus valores contribuem para a diminuição da emissão de CO₂ do solo. Para a umidade volumétrica descreve-se correlações diretamente proporcionais para ARG ($r = 0,54$), Pt ($r = 0,62$) e Mi ($r = 0,83$) e as variáveis com correlações inversamente proporcionais são ARF ($r = -0,68$), DS ($r = -0,65$) e Ma ($r = -0,48$).

D'Andréa (2009), observando variações de curto prazo nas emissões de CO₂ do solo em diferentes sistemas de manejo, observou que os fatores abióticos, temperatura e umidade parecem não ser determinantes na emissão de CO₂ e que os fatores bióticos como planta e microbiota do solo são os que parecem condicionar a respiração do solo. Contudo

é necessário um maior período de tempo de avaliação para determinar as variações nas emissões de CO₂, tanto a curto quanto a longo prazo. De acordo com Vicent et al. (2006) os valores ótimos de umidade do solo variam entre 25% a 40%; acima disso ela limita a emissão de CO₂ pelo excesso de água e falta de oxigênio no solo; e abaixo disso ela limita a respiração do solo pela seca.

Na Tabela 4 apresentam-se as estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis: CO₂ (emissão de dióxido de carbono), umidade volumétrica (UV), carbono orgânico total (COT), biomassa microbiana (C-BMS), carbono solúvel (CS), carbono lábil (C-Lábil), nitrogênio total (NOT), relação carbono/nitrogênio (C/N). Para a emissão de CO₂ do solo verificou-se correlações com alguns atributos avaliados. Dentre estes, descreve-se como correlações positivas, ou seja, diretamente proporcionais que quanto maior os seus valores, maiores as emissões de CO₂ do solo as variáveis: UV ($r = 0,57$) e COT ($r = 0,52$), portanto é mais influenciado pela umidade volumétrica do que pela concentração de carbono orgânico do solo, e não se obteve nenhuma correlação com os demais atributos. Portanto o teor de carbono orgânico do solo é o principal atributo que influencia a emissão de dióxido de carbono. Para a umidade volumétrica descreve-se como correlações positivas: COT ($r = 0,86$), C-Lábil ($r = 0,43$) e NOT ($r = 0,78$) e a variável com correlação inversamente proporcional (negativa), o C-BMS ($r = -0,34$), em que o aumento do valor da umidade volumétrica contribui para a diminuição do carbono da biomassa microbiana.

Tabela 4. Correlação de Pearson para as variáveis: CO₂ (emissão de dióxido de carbono), umidade volumétrica (UV), carbono orgânico total (COT), biomassa microbiana (C-BMS), carbono solúvel (CS), carbono lábil (C-Lábil), nitrogênio total (NOT), relação carbono/nitrogenio (C/N).

	CO ₂	UV	COT	C-BMS	CS	C-Lábil	NOT	C/N
CO₂	-	0,57*	0,52*	-0,24	0,2	0,20	0,24	0,11
UV	-	-	0,86*	-0,34*	0,09	0,43*	0,78*	-0,03
COT	-	-	-	-0,37	0,03	0,41*	0,68*	0,17
C-BMS	-	-	-	-	-0,11	-0,08	-0,19	-0,03
CS	-	-	-	-	-	0,04	0,05	-0,19
C-Lábil	-	-	-	-	-	-	0,34*	0,00
NOT	-	-	-	-	-	-	-	-0,46*

* Variáveis consideradas significativas com P < 0,050.

A quantidade de CO₂ emitida do solo está relacionada com o seu manejo e uso, assim como a quantidade de C-lábil ou prontamente metabolizável do solo e a atividade

biológica da biomassa microbiana do solo (BMS). As características físicas e químicas do solo também têm influência na emissão de CO₂, dentre elas a densidade, porosidade, espaço poroso preenchido por água e a disponibilidade de nutrientes (LIN et al., 2009).

Na Tabela 5 apresentam-se as estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis: CO₂ (emissão de dióxido de carbono), umidade volumétrica (UV), carbono orgânico total (COT), humina (C-HU), ácido húmico (C-AH) e ácido fúlvico (C-AF).

Tabela 5. Correlação de Pearson para as variáveis: CO₂ (emissão de dióxido de carbono), umidade volumétrica (UV), carbono orgânico total (COT), humina (C-HU), ácido húmico (C-AH), ácido fúlvico (C-AF).

	CO₂	UV	COT	C-HU	C-AH	C-AF
CO₂	-	0,57*	0,52*	0,44*	0,70*	0,57*
UV	-	-	0,86*	0,61*	0,84*	0,70*
COT	-	-	-	0,79*	0,89*	0,74*
C-HU	-	-	-	-	0,66*	0,51*
C-AH	-	-	-	-	-	0,79*
C-AF	-	-	-	-	-	-

* Variáveis consideradas significativas com P < 0,050.

Para a emissão de CO₂ do solo verificou-se correlações positivas apenas com o carbono orgânico e suas frações do solo. Dentre estes, as variáveis: UV ($r = 0,57$), COT ($r = 0,52$), C-HU ($r = 0,44$), C-AH ($r = 0,70$) e C-AF ($r = 0,57$). Descrevem-se como diretamente proporcionais. Para a umidade volumétrica descreve-se apenas correlações positivas: COT ($r = 0,86$), C-HU ($r = 0,61$), C-AH ($r = 0,84$) e C-AF ($r = 0,70$). Assim é possível compreender a dinâmica de influência de cada atributo nas principais variáveis que interferem na emissão de C-CO₂ e umidade volumétrica do solo.

Fortes correlações entre o solo e seus atributos facilitam a compreensão do estudo do comportamento de ambos no ambiente. É importante ressaltar que variações temporais dos valores da emissão de CO₂ do solo podem estar relacionados às mudanças nos padrões de variação espacial, associadas a outros fatores, como a temperatura e a umidade do solo (EPRON et al., 2006). Assim, os resultados obtidos podem estar relacionados a algum tipo de tendência no processo de produção ou modificação das propriedades do solo, como, por exemplo, a direção do preparo do solo, o tipo de implemento utilizado e mesmo o sentido da declividade do terreno (VÁZQUEZ et al., 2005). D'Andréa (2010) caracterizou o fluxo de CO₂ como um processo complexo, difícil de ser relacionado

mesmo com propriedade do solo, como fertilidade e matéria orgânica, e variáveis ambientais, necessitando de um período mais prolongado de análises.

Dasselaar et al. (1998) encontraram valores de alcance da emissão de CO₂ do solo entre 55 e 75 metros para diferentes dias, em áreas vegetadas, maiores que o encontrado neste trabalho, cujo alcance foi de 33,06 metros, enquanto Ohashi e Gyokusen (2007) encontraram alcances variando de 12 a 80 metros e Kosugi et al. (2007) encontraram valores de alcance variando de 4,4 a 24,7 metros para a respiração e de 5,3 a 28,1 metros para umidade do solo.

A relação C0/(C0+C1) permite a classificação da dependência espacial das propriedades estudadas (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). As emissões de CO₂, umidade volumétrica, teor de argila, macroporosidade, COT, C-Biomassa, C-Lábil, humina, ácido fúlvico, nitrogênio total e relação C/N registradas podem ser classificadas como moderadas espacialmente dependentes, isto é, a componente aleatória é importante, pois $0,25 < C0/(C0+C1) < 0,75$. Por outro lado, o teor de areia grossa e areia fina, densidade global, porosidade total, microporosidade e ácido húmico são considerados de alta dependência espacial, isto é, a componente aleatória é pequena, pois $C0/(C0+C1) \leq 0,25$ (CAMBARDELLA et al., 1994; CHIEN et al., 1997). A forte dependência espacial das características do solo é atribuída aos fatores intrínsecos, tais como material de origem, clima, relevo, processos físicos, químicos e atividade biológica (componentes de formação do solo) e a dependência espacial moderada é atribuída aos fatores extrínsecos como o manejo exercido pelas práticas agrícolas (CAMBARDELLA et al., 1994). Estudos conduzidos por La Scala Júnior et al. (2000) mostraram padrões de dependência espacial moderados em sua maioria para a emissão de CO₂ em solos.

Os maiores erros em classificação e mapeamento de solos são decorrentes da definição de unidades de mapeamento a partir de um pequeno conjunto de perfis de uma mesma classe de solo, o que é feito de modo subjetivo, provocando incongruências entre o sistema de classificação e a variabilidade contínua natural dos solos (TRIANTAFILIS et al., 2001). Novos estudos de correlação específicos às diversas classes de solo e respectivas formações florestais são recomendados (JACOMINE, 2004). Esta carência em conhecimentos sobre as relações solo-vegetação será suprida, em boa parte, com a interação entre trabalhos de diversas áreas do conhecimento, incluindo a dinâmica de água no solo, gerando uma base de dados capaz de promover a compreensão dos processos geradores e mantenedores da biodiversidade em um dos principais biomas do Brasil.

6. CONCLUSÕES

Na pedossequência estudada, a partir dos mapas de distribuição espacial obtidos, o teor de carbono orgânico total, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, humina e umidade volumétrica mostraram claramente, no sentido do declive, a transição gradual entre a condição aeróbica (ocorrência de Neossolos Quartzênicos) e a condição de hidromorfismo (Gleissolos). O fluxo de CO₂, facilmente mensurado no campo, também mostrou essa transição.

7. AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e principalmente à Universidade Federal de Uberlândia, pelo apoio e incentivo à produção.

REFERÊNCIAS

- ADDISCOT, T.M. Entropy and sustainability. **Europe Journal Soil Science**, Dordrecht, v. 46, p. 161-168, 1992.
- BENITES, V.M.; MADARI, B.; MACHADO, P.L.O.A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo.** Comunicado Técnico 16, EMBRAPA Solos, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 7pp, 2003.
- BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; FRAZIER, B. E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Rem. Sens. Envir.**, St. Paul, v. 37, p.181-191, 1991.
- BLACK, C. A. Methods of Soil Analisys: Part 2 – **Chemical and Microbiological Properties.** Madison: American Society of Agronomy, p. 1159, 1965.
- 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 par o sequestro de carbono.** 2003. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11138/tde-26112003-151547>>. Acesso em: 2014-05-23
- CHIEN, Y.; LEE, D.; GUO, H.; HOUNG, K. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, n. 4, p. 291-298, 1997.
- DASSELAAR, A. V. P. V.; CORRÉ, W. J.; PRIEMÉ, A.; KLEMEDTSSON, A. K.; WESLIEN, P.; STEIN, A.; KLEMEDTSSON, L.; OENEMA, O. Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained grassland. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 62, n. 33, p. 810-817, 1998.
- D'ANDREA, A. F.; SILVA. Variações de curto prazo nas emissões de CO₂ do solo em diferentes sistemas de manejo do cafeeiro. **Química nova**, São Paulo, v. 32, p. 2314-2317, 2009.
- D'ANDREA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F. F.; CURI, N; SILVA, C. A. Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 62, p. 85-92, mai./jul, 2010.
- 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. 87– 97, 2005.

- DRUMOND, M.A.; BARROS, N.F. de; SILVA, A.F. da; MEIRA NETO, J.A.A. Alterações fitossociológicas e edáficas da mata atlântica em função das modificações da cobertura vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.20, n.4, p. 451-466, 1996.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. rev. ampl. – Brasília, DF: EMBRAPA Solos p. 353, 2013.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rev. Atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, p. 212, 1997.
- 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.
- EPRON D., NOUVELLON Y., ROUPSARD O., MOUVONDY W., MABIALA A., SAINT-ANDRÉ L., JOFFRE R., JOURDAN C., BONNEFOND JM., BERBIGIER P., HAMEL O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 202 p.149–160, 2004.
- FLECHARD CR, NEFTEL A, JOCHER M, AMMANN C, LEIFELD J, FUHRER J. Temporal changes in soil pore space CO₂ concentration and storage under permanent grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.142 p. 66–84, 2007
- GAMMA DESIGN. (GS+) **Geostatistics for the environmental sciences**. Plainwell: Gamma Design Software, p. 152, 1998.
- GERALDES, A.P.A. et al. Biomassa microbiana de solo sob pastagens na Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 55-60, 1995.
- 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.
- GOLDEN SOFTWARE. **Surfer for windows, Release 6.01**. Surface Mapping System, 1995.
- HOLECHEK, J. L.; PIEPER R. D.; HERBEL C. H. **Range management: principles and practices**. 5. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall. p. 607, 2004.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Fifth assessment report, climate change 2013**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/news_and_events/press_information.shtml>. Acesso em: 02 mai. 2014.
- ISLAM, K. R; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, [S.l] v. 27, n. 1, p. 408-416, 1998.

ISAAKS, E. H.; SRIVATAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, p. 56, 1989.

JACOMINE, P.K.T. **Solos sob matas ciliares**. In: RODRIGUES, R.R. e LEITÃO FILHO, H.F., eds. *Matas ciliares: Conservação e recuperação*. 2.ed. São Paulo, Universidade de São Paulo, FAPESP, p.27-31, 2004.

KILMER, V. J.; ALEXANDER, L. T. Methods of making mechanical analysis of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 68, n. 1, p. 15–24, 1949.

KOSUGI, Y.; MITANI, T.; ITHO, M.; NOGUCHI, S.; TANI, M.; MATSOU, 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 1/2, p. 35-47, 2007.

KREBEAK, E.; MORAES, L. STRATHE, A.; FADEL, J. Technological innovations in animal production related to environmental sustainability. In: XXI Congresso Brasileiro de Zootecnia, 23 a 27 de maio de 2011, 1-15p. CD- ROM. MIRANDA, E.E. Enganos e mentiras sobre emissões de CO₂ no Brasil. **DBO Agrotecnologia**, [S.I] ano 7, n. 26, julho/ agosto, 2011.

LANDIM P.M.B. 2006. Sobre Geoestatística e mapas. **Terraé Didatica**, Campinas, v.2, n.1, p.19-33. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>> Acesso em: 22 abr. 2014.

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

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W. et al. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: ASA/SSSA, 1994. p. 37-51.

LIRA, A.C.S. de; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J.L. de. Respiração do solo sob eucalipto e cerradão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 56, p. 15-28, 1999.

LIN, X.; WANG, S.; MA, X.; XU, G.; LUO, C.; LI, Y.; JIANG, G.; XIE, Z. Fluxes of CO₂, CH₄, and N₂O in an alpine meadow affected by yak excreta on the Qinghai-Tibetan plateau during summer grazing periods. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 41, n. 1, p. 718-725, 2009.

MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.G.P., CULF, A.; SCOTT, S. Carbon Dioxide Transfer Over a Central Amazonian Rain Forest. **Journal of Geophysical Research**, [S.I], v. 103, p. 31593-31612, 1998.

MARIKO, S.; URANO, T.; ASANUMA, J.; Effects of irrigation on CO₂ and CH₄ fluxes from Mongolian steppe soil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 333, n. 1, p. 118-123, 2007.

- MARQUELLI, R.P. **O desenvolvimento sustentável da agricultura no cerrado brasileiro.** 2003. f 54, Monografia (Especialização em Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada) - Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2003.
- MARTIN, J.G., BOLSTAD, P.V., RYU, S.R., CHEN, J. Modeling soil respiration based on carbon, nitrogen, and root mass across diverse Great Lake forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149 p. 1722–1729, 2009.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo:** métodos de análises. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, p. 107, 2005.
- MITTERMEIER, N.; MYERS, R.A. e MITTERMEIER, C.G. HOTSPOTS - **Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions.** CEMEX Conservation International, Mexico, p. 430, 1999.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** Lavras: UFLA, 2003.
- MULLA, D. J.; BHATTI, A. U.; KUNKEL, R. Methods for removing spatial variability from field research trials. **Adv. Soil Sci.**, New York, v. 13, p.201-213, 1990.
- NUNES, J. L. S.; NETTO, H.; GUIMARAES, J. A.; PEREIRA, V. V.; INAMASU, R. Agricultura de precisão - tecnologia a toda prova. **Revista Campo & Negócios**, Uberlândia - Minas Gerais, p. 50 - 55, 2012.
- 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 & Biochemistry**, Oxford, v. 39, n. 5, p. 1130-1138, 2007.
- PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T. MARQUES JR., J.; LA SCALA JR., N. Variabilidade especial da emissão de CO₂ em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em dois sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 227-236, 2008.
- PAULINO, V. T.; TEIXEIRA, E. M. L. **Sustentabilidade de pastagens – Manejo adequado como medida redutora da emissão de gases de efeito estufa,** CPG-Produção animal sustentável, Ecologia de Pastagens, IZ, APTA/SAA, p.11. 2009
- PEDREIRA, M.S.; PRIMAVESI, O. Atuações zootécnicas para a adequação ambiental na bovinocultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, João Pessoa, PB, 2008. **Anais...** João Pessoa, 2008.
- RATTER, J.A.; RIBEIRO, J.F. & BRIDGEWATER, S. The Brazilian Cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Ann. Bot.**, v. 80, p. 223-230, 1997.
- REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SPERA, S.T.; MARTINS, E.S. Solos do bioma cerrado: aspectos. In: SANO, S.M. (ORG.). **Cerrado: ecologia e flora.** Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, p. 107-149, 2008

ROCHA, L.C.; CARVALHO, V.L.M. Gênese e evolução dos solos na bacia do Córrego do Quebra, Gouveia - MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10, Rio de Janeiro, 2003. **Anais...** Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003. CD-ROM

ROSOLEM, R.; ROCHA H. R.; FREITAS H.C. Controles físicos de temperatura e umidade do solo nas emissões de CO₂ do solo em áreas de cerrado e cana-de-açúcar. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Foz do Iguaçu, 2002. **Anais...** Foz do Iguaçu, v.1, p. 2576 – 2585, 2002.

ROSSETTO, R.; DIAS, F.L.F.; VITTI, A.C.; TAVARES, S. Potássio In: DINARDOMIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G. de A (ed.). **Cana de-açúcar.** Campinas, Instituto Agronômico, p. 289-312, 2008.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant Physiology.** 3. ed. Belmont: Wadsworth Publishing Company, p. 682, 1985.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; FILHO, S. P. V. B; PICCOLO, M. C.& FEIGL, B. E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 65 p. 1486–1499, 2001.

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, **Biogeochemistry**, La Selva, Costa Rica v. 64 p. 111–128, 2003.

SCOTT-DENTON, L.E.; SPARKS, KL. ; MONSON, R.K.; Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high- elevation, subalpine forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford v. 35 p.525–534, 2003.

SHI, P.L.; ZHANG, X.Z.; ZHONG, Z.M.; OUYANG, H.; Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam v. 137 p. 220–223, 2006

TRIANTAFILIS, J.; WARD, W.T.; ODEH, I.O.A.; McBRATNEY, A.B. Creation and interpolation of continuous soil layer classes in the lower Namoi Valley. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65 p. 403-413, 2001.

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

VANCE, E. D., P.C. BROOKES; D. S. JENKINSON. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford v. 19, n. 1, p. 703–707, 1987.

VÁZQUEZ, E. V.; MIRANDA, J. G. V.; GONZÁLEZ, A. P. Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 182, n. 3-4, p. 337-353, 2005.

VICENT, G.; SHAHRIARI, A. R.; LUCOT, E.; BADOT, P. & EPRONB, D. Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford v. 38, p. 2527–2535, 2006.

YEOMANS, J.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method four routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v. 19, n. 1, p. 1467–1476, 1988.

WANG, G.; GERTNER, G.; SINGH, V.; SHINKAREVA, S.; PARYSOW, P.; ANDERSON, A. Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall-runoff erosivity R factor. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 153, n. 1/2, p. 143-155, 2002.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. New York: Oxford University Press, p. 316, 1990.