

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
MESTRADO EM PRODUÇÃO VEGETAL

VINICIUS ALVES

**ATRIBUTOS TECNOLÓGICOS, STAND E PRODUTIVIDADE DA CANA-
PLANTA CORRELACIONADOS COM ASPECTOS DA FERTILIDADE DO
SOLO EM CHAPADÃO DO CÉU (GO)**

CHAPADÃO DO SUL – MS
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
MESTRADO EM PRODUÇÃO VEGETAL

VINICIUS ALVES

**ATRIBUTOS TECNOLÓGICOS, STAND E PRODUTIVIDADE DA CANA-
PLANTA CORRELACIONADOS COM ASPECTOS DA FERTILIDADE DO
SOLO EM CHAPADÃO DO CÉU (GO)**

Orientador: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia, área
de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS
2014



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Campus de Chapadão do Sul

DISCENTE: Vinicius Alves

ORIENTADOR: Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho

**ATRIBUTOS TECNOLÓGICOS, STAND E PRODUTIVIDADE DA CANA-
PLANTA CORRELACIONADOS COM ASPECTOS DA FERTILIDADE DO
SOLO EM CHAPADÃO DO CÉU (GO)**

Prof. Dr. Presidente Morel de Passos e Carvalho

Prof. Dr. Cassiano Garcia Roque

Prof. Dr. Rafael Montanari

Chapadão do Sul, 23 de Julho de 2014.

DEDICO E OFEREÇO

Aos meus pais, Francisco de Assis Alves e Niuza Dias de Souza Alves pelo bom exemplo, carinho e admirável luta pelo bem que me ensinaram durante a vida.

A minha irmã, Maria Helena Alves Roldan, por me oferecer oportunidade de estudar e pelo imenso apoio prestado durante minha adolescência.

A minha companheira, Heloisa Sugahara Permigiani, por estar ao meu lado me apoiando e amando.

Aos meus queridos familiares e amigos, pela eterna parceria durante toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Á Deus pela conquista de mais uma vitória. Obrigado.

A Usina Cerradinho Bioenergia, pela infraestrutura disponibilizada, total apoio fornecido e grandioso incentivo profissional.

Aos gestores Jose Alcides e Luiz Renato que permitem o crescimento de todos, obrigado por mostrar os caminhos vencedores.

A Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, pela estrutura física e pessoal utilizada para realização desse trabalho.

A Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, pela excelente qualidade de ensino.

Ao professor Dr. Morel de Passos por sempre ajudar e incentivar, obrigado pela excelente orientação.

Ao professor Dr. Rafael Montanari por colaborar nas análises de estatística clássica e geoestatísticas.

Ao professor Dr. Cassiano Roque pela forte parceria.

RESUMO

ALVES, Vinicius. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Atributos tecnológicos, stand e produtividade da cana-planta correlacionados com aspectos da fertilidade do solo em Chapadão do Céu (GO).

Professor Orientador: Dr. Morel de Passos e Carvalho

O setor sucroalcooleiro é um dos mais importantes segmentos no agronegócio brasileiro, o Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Para que o setor se mantenha competitivo e aumente sua produção é necessário que se façam inovações e a difusão de novas tecnologias. A agricultura de precisão tem surgido como uma alternativa para o setor agroindustrial brasileiro, com o objetivo de elevar a produtividade, melhorar o processo de otimização do sistema de produção como um todo e contribuir para a preservação do meio ambiente e, conseqüentemente, possibilitar maior competitividade no mercado mundial. Objetivou-se com este trabalho caracterizar as zonas específicas de manejo do solo, empregando-se correlações lineares e espaciais entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, no sentido de indicar aquele que mais eficientemente esteja relacionado com o aumento da produtividade. O trabalho foi desenvolvido no ano agrícola de 2012/13, no município de Chapadão do Céu, Goiás, Brasil. Foram analisadas as correlações lineares e espaciais entre atributos da cana-de-açúcar e de alguns atributos químicos do solo, em duas profundidades (0-0,25 e 0,25-0,50 m). Para isso, foi instalado um grid geoestatístico (230 m x 228 m; 5,244 ha), onde foram alocados 121 pontos amostrais para coleta dos dados. Portanto, com o aumento do número de plantas por metro quadrado (*stand*) ocorreu também o aumento da produtividade de colmos de cana-de-açúcar. Os teores de fósforo do solo, por evidenciarem correlações lineares e espaciais com a produtividade de colmos, constituíram-se indicadores de zonas específicas de manejo do solo fortemente associadas à produtividade da cana-de-açúcar.

PALAVRAS-CHAVE: *Saccharum* spp. Manejo e conservação do solo. Variabilidade espacial.

ABSTRACT

ALVES, Vinicius. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Technological attributes, stand and sugar-cane productivity relationship with soil fertility characteristics in Chapadão do Céu city, Goiás state, Brazil.

Adviser: Dr. Morel de Passos e Carvalho

The sugarcane industry is one of the most important segments of the Brazilian agribusiness, Brazil is now the world's largest producer of cane sugar. For the industry to remain competitive and increase its production it is necessary to make innovation and diffusion of new technologies. Precision farming has emerged as an alternative to the Brazilian agribusiness sector, with the aim of increasing productivity, improving the optimization process of the production system as a whole and contribute to the preservation of the environment and therefore enable greater competitiveness the world market. The objective of this study was to characterize the specific areas of soil management, using linear and spatial correlations between attributes of the culture of cane sugar and chemical properties of a Oxisol, in order to indicate that it more efficiently is related to the increased productivity. The work was developed in the agricultural year 2012/13, in Chapadão do Céu City, Goiás State, Brazil, we analyzed the linear and spatial correlations between attributes of cane sugar and some soil chemical properties at two depths (0 to 0.25 and 0.25 to 0.50 m). For this, it was installed a geostatistical grid, (230 m x 228 m; 5.244 ha), where were located 121 data collect points. With the increase in the number of plants per m², increasing sugarcane yield of cane sugar per hectare occurs. The phosphorus soil, because they show correlations with sugarcane yield of cane sugar, are indicators of specific areas of soil strongly associated with productivity of cane sugar management.

KEY-WORDS: *Saccharum* spp. Soil conservation and Management. Spatial variability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA	PÁGINA
1 Imagem de satélite da área experimental.	36
2 Precipitação pluvial e médias térmicas, obtidas na área experimental, durante o período de novembro de 2012 a novembro de 2013.....	37
3 Croqui da área amostral	38
4 <i>Base RTK utilizada para correção e receptor de sinais</i>	39
5 Momento da coleta de dados	40
6 Laboratório PCTS e feixes com dez canas etiquetadas para análise de qualidade.....	40
7 Semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem da PRO em função do STD, PRO em função do P2 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.....	51
8 Semivariogramas simples e mapas de krigagem da PRO, do STD e do P2 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO	52

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
1 Análise descritiva inicial de atributos da cultura da cana-de-açúcar	43
2 Análise descritiva inicial de atributos químicos coletados nas camadas do solo de 0,00-0,25 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.....	44
3 Análise descritiva inicial de atributos químicos coletados nas camadas do solo de 0,25-0,50 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.....	45
4 Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar	46
5 Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos químicos coletados nas camadas do solo de 0,00-0,25 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.....	47
6 Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos químicos coletados nas camadas do solo de 0,25-0,50 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO	48
7 Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados ajustados para atributos da cultura da cana-de-açúcar e de alguns atributos químicos do solo de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	14
2.2 SOLO AGRÍCOLA IDEAL	16
2.2.1 Acidez do solo	17
2.2.2 Matéria orgânica	18
2.2.3 Fósforo	18
2.2.4 Potássio.....	19
2.3 AGRICULTURA DE PRECISÃO	20
2.4 GEOESTATÍSTICA.....	21
2.4.1 Semivariograma.....	22
2.4.2 Krigagem	23
2.4.3 Interpolação dos dados por krigagem ordinária.....	23
2.4.4 Semivariograma cruzado	24
2.4.5 Cokrigagem.....	24
3 REFERÊNCIAS.....	25
CAPÍTULO 1	33
RESUMO.....	33
ABSTRACT.....	34
1 INTRODUÇÃO	35
2 MATERIAL E MÉTODOS	36
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
3.1 Análise descritiva de atributos tecnológicos.....	42
3.2 Análise descritiva de atributos do solo	44
3.3 Matriz de correlação	46
3.4 Semivariogramas.....	48
4 CONCLUSÕES.....	52

1 INTRODUÇÃO

O setor sucroalcooleiro é um dos mais importantes segmentos no agronegócio brasileiro, o Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e ocupa a posição de liderança na tecnologia de sua produção, com uma área de cerca 9 milhões de hectares. A cultura configura-se como uma das commodities de maior destaque no cenário internacional, e tem atualmente uma produção total de cana-de-açúcar moída estimada em 671,69 milhões de toneladas dos quais 46,1% serão destinadas à produção de açúcar e 53,9% à produção de álcool (CONAB, 2014).

Para que ocorra que o setor se mantenha competitivo e aumente sua produção é necessário que se façam inovações e a difusão de novas tecnologias. Grande parte das inovações tecnológicas introduzidas na agricultura é constituída por máquinas, equipamentos, defensivos agrícolas, fertilizantes químicos, e outros produtos que são inovações biotecnológicas. A agricultura de precisão tem surgido como uma alternativa para o setor agroindustrial brasileiro, com o objetivo de elevar a produtividade, melhorar o processo de otimização do sistema de produção como um todo e contribuir para a preservação do meio ambiente e, conseqüentemente, possibilitar maior competitividade no mercado mundial (SILVA, 2009).

O sistema de agricultura de precisão envolve conceitos de uso de informações sobre a variabilidade de propriedades locais e climáticas de uma área, visando ao aumento da produtividade, otimização no uso dos recursos e redução do impacto da agricultura ao meio ambiente. O manejo regionalizado do solo e da cultura é parte integrante desse sistema, os processos e os atributos do solo que determinam o desempenho e a produção das culturas, bem como o impacto da agricultura ao meio ambiente, variam no espaço e no tempo. Por essa razão, o conhecimento da variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção da cultura é o primeiro passo para adoção, com êxito, do sistema de agricultura de precisão (RUNGE & HONS, 1999).

A geoestatística é um dos métodos utilizados para realizar esta regionalização, podendo ser definida como um conjunto de técnicas e procedimentos estatísticos aplicados a variáveis regionalizadas, que definem a estrutura de dependência espacial de cada variável, em que os dados são referenciados espacialmente. Desta forma, cada ponto amostral é analisado, além de seu valor, de acordo com a posição geográfica em que se encontra, sendo que este fato faz com que amostras próximas tenham valores

mais semelhantes e sejam mais correlacionadas do que amostras mais distantes do ponto referencial. Assim, podem-se estimar os valores dos atributos do solo e/ou produtividade das culturas em locais não amostrados pela técnica geoestatística de interpolação por Krigagem (MARINS et al., 2008).

Sendo assim, objetivou-se com este trabalho caracterizar as zonas específicas de manejo do solo, empregando-se correlações lineares e espaciais entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, no sentido de indicar aquele que mais eficientemente esteja relacionado com o aumento da produtividade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

O aparecimento dos produtos extraídos da cana-de-açúcar se deu por povos persas, chineses e árabes. No início, os produtos eram raros e caros, consumidos por reis e nobres, e sua expansão marcante foi na difusão do produto no comércio árabe. No século XV, foi levado por europeus às Ilhas do Atlântico e portugueses estabeleceram uma indústria açucareira organizada e difusora da cultura da cana-de-açúcar para as Américas e África. Esse foi o período de estabelecimento em regiões de clima tropical e subtropical. No Brasil, as primeiras plantas foram introduzidas no ano de 1502, no entanto, nesse período, o maior interesse dos colonizadores era a extração de madeiras e metais (FIGUEIREDO, 2008).

O Brasil é hoje o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) e ocupa a posição de liderança na tecnologia de sua produção. A modernização das usinas em operação no país, com a adoção de novas tecnologias desde o plantio até a produção de açúcar, etanol e bioeletricidade, fortaleceram o setor, reconhecido mundialmente por seu pioneirismo e sua eficiência produtiva. A cultura da cana-de-açúcar ocupa posição de destaque no Brasil por ser uma cultura que, além de alto retorno econômico, pode ser usada tanto pela indústria alimentar quanto como fonte alternativa de energia, e ainda tem grande importância social pela mão de obra empregada, além de ser uma cultura renovável e versátil, que pode ser utilizada como fonte de energia limpa e matéria-prima de produtos (LEITE & SOUZA, 2010).

A cultura é uma realidade no quesito energético e, em nível mundial, começa a haver uma corrida por combustíveis mais limpos devido a preocupação com os impactos ambientais, entretanto, quando o assunto é expandir as fronteiras agrícolas para a produção de biocombustíveis, temem-se os seus reflexos na diminuição de áreas para a produção de alimentos. Contudo, é uma das grandes vantagens para o Brasil, país de dimensões continentais, dispondo ainda, de terras para a expansão de cultivo da cana-de-açúcar, além de renovação na extração de etanol, um biocombustível limpo em relação aos combustíveis fósseis (OLIVEIRA et al., 2012).

O Brasil teve um acréscimo na área de cerca de 326,43 mil hectares na safra 2013/14, equivalendo a 3,8% em relação à safra 2012/13. O acréscimo é reflexo do aumento de 5,1% (375,1 mil hectares) na área da Região Centro-Sul, o que compensou

o decréscimo de 4,3% (48,6 mil hectares) na área da Região Norte/Nordeste. São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais foram os estados com maior acréscimo de áreas, com 132,6 mil hectares, 111,8 mil hectares, 92,5 mil hectares e 58,0 mil hectares, respectivamente. Em relação à produtividade obtida na safra 2013/14 apresentou uma considerável melhora em relação à safra passada, com um crescimento de 7,7% na média geral, passando de 69.407 kg/ha para 74.769 kg/ha. Este crescimento ocorreu, principalmente, devido à expansão de novas áreas de plantio das novas usinas em funcionamento (CONAB, 2014).

A cana-de-açúcar é uma gramínea, família das poáceas, onde as variedades hoje utilizadas são todos híbridos melhorados e são chamados, na terminologia atual, de *Saccharum* spp. A quantidade de estudos com cana-de-açúcar não é proporcional a sua importância mundial em termos de alimentação e fonte de energia (FIGUEIREDO et al., 2008). É uma planta que têm por característica o desenvolvimento em forma de touceira e ciclo semi-perene, que dura em média 5 anos. Sua parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e frutos, esses dois últimos são de grande importância, pois tem influência negativa na produção comercial (SEGATO et al., 2006).

Uma das principais características da cana é a sua ampla adaptação edafoclimática, porém diversos fatores afetam o perfilhamento, que conseqüentemente irá afetar a produtividade final da cultura, entre eles estão temperatura, umidade, espaçamento, manejo de adubação, variedade e luz, sendo o último mais importante, pois a planta precisa da iluminação adequada para ativar o desenvolvimento das gemas basais (DIOLA & SANTOS, 2010).

A parte subterrânea é formada por raízes fasciculadas e rizomas, com função de sustentação e absorção de água e nutrientes, concentrando 85% de sua quantidade total nos primeiros 0,50 m de profundidade do solo, e nos primeiros 0,30 m, 60% do total (MOZAMBANI et al., 2006). Segundo Scapari & Beauclair (2008), a cana planta (cana-de-açúcar no primeiro corte) explora mais as camadas superficiais comparando-se com a soqueira (cana-de-açúcar a partir do primeiro corte), que apresenta um incremento na exploração do solo em subsuperfície. A cana planta apresenta menos raízes, mas sua eficiência de absorção é maior com raízes novas e tenras, já a soqueira, com raízes mais velhas e lignificadas, tem arquitetura que varia com a idade e o número de ciclos da cultura.

A qualidade de cultura pode ser definida por meio dos parâmetros tecnológicos que são açúcares totais recuperáveis (ATR), porcentagem aparente de sacarose (POL),

porcentagem de sólidos solúveis (BRI), porcentagem de pureza (PUR) e porcentagem de fibra (FIB), e estas características podem ser alteradas devido ao manejo agrícola e industrial, fatores esses que definem seu potencial para a produção de açúcar e álcool. E estes parâmetros tecnológicos são as variáveis que serão consideradas na avaliação para a formação do preço final da cultura (FERNANDES, 2000).

Diversos autores mediante observações realizadas em seus trabalhos, afirmaram que a utilização dos componentes tecnológicos da cana (açúcares totais recuperáveis, percentual de sólidos solúveis totais, percentual de sacarose, pureza e percentual de fibra) e da produção (volume de colmos por hectare e população de plantas por metro quadrado), enquanto variáveis independentes, tanto linear quanto espacialmente, utilizados para estimar a produtividade da cana-de-açúcar (variável dependente), são ferramentas extremamente importantes, das quais os agricultores dispõem, uma vez que alterações nesses componentes são responsáveis diretos pelo ajuste da produtividade (GIOIA, 2011; LIMA 2012).

2.2 SOLO AGRÍCOLA IDEAL

Atualmente um dos grandes desafios da agricultura é desenvolver sistemas de produção vegetal e animal que possam manter a alta produtividade e a sustentabilidade ambiental ao mesmo tempo. Em geral, nesses agroecossistemas, há predominância de solos muito intemperizados, que necessitam de tratamentos conservacionistas para manter e melhorar a qualidade dos componentes desse meio. Esta condição de degradação dos solos pode ocorrer devido a ocorrências naturais ou de ações antrópicas, gerando assim redução na qualidade do solo e prejuízos para a produtividade das culturas (NETTO et al., 2009).

De maneira geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas e químicas, adequadas ao satisfatório desenvolvimento das plantas. Entretanto, a medida que estas áreas vão sendo incorporadas aos sistemas produtivos os atributos físicos e químicos sofrem alterações, cuja intensidade varia com as condições de clima, natureza do solo, uso e manejo adotados que podem gerar uma redução na qualidade deste solo (ANDREOLA et al., 2000; SPERA et al., 2004).

Os atributos indicadores da qualidade do solo podem ser definidos como propriedades mensuráveis que influenciam a capacidade do solo na produção das culturas ou no desempenho de funções ambientais. A quantificação das alterações nos

atributos do solo, decorrentes da intensificação de sistemas de uso e manejo, pode fornecer subsídios importantes para a definição de sistemas racionais de manejo, reduzindo assim as perdas da capacidade produtiva dos solos agrícolas (DORAN & PARKIN, 1994).

O manejo adequado dos solos agrícolas é o principal fator a ser considerado quando se deseja uma produção agrícola sustentável, pois os sistemas de preparo e os sistemas de culturas interferem de modo significativo nas propriedades físicas, químicas e biológicas, que são consideradas os aspectos determinantes na avaliação da qualidade do solo para determinação do grau de degradação do solo (DEXTER, 2004).

2.2.1 Acidez do solo

A natureza dos minerais do solo está associada diretamente às características químicas do solo e com a disponibilidade de nutrientes presentes no solo, subsídio esse fundamental para a recomendação da dose de adubação, assim como as transformações a que os nutrientes adicionados ao solo estarão sujeitos. O potencial hidrogeniônico (pH), que é um índice que indica o grau de acidez do solo, é de extrema importância, pois é este atributo do solo que determina a disponibilidade dos nutrientes contidos no solo ou a ele adicionados e também assimilação dos nutrientes pelas plantas. Considerando-se que a maioria dos solos brasileiros apresenta acidez média a alta, a sua correção, ou seja, a calagem é um fator decisivo na eficiência das adubações (ALCARDE et al., 1991).

Os solos da região central ou dos cerrados são geralmente ácidos, o que limita a produtividade agrícola, entre outras limitações encontradas em solos ácidos estão os altos teores de H^+ e Al^{3+} ativos na solução do solo, baixa capacidade de troca catiônica. Alta capacidade da fase sólida em absorver ânion e especialmente o íon fosfato. O pH influencia também na atividade de microrganismos do solo que estão ligados com a mineralização da matéria orgânica, nitrificação, fixação biológica de nitrogênio, que aumentam a disponibilidade de nutrientes. É, portanto, uma das propriedades químicas do solo mais importantes para a determinação da produção agrícola (FAGERIA et al., 2008).

De maneira geral o pH ideal para a grande maioria das culturas é em torno de 6,0, já a cana-de-açúcar desenvolve-se bem em solos que se apresentam dentro de uma

larga faixa de pH (4,0 a 8,3), sendo a cultura muito tolerante à acidez e à alcalinidade, variando de acordo com a cultivar utilizada (VIANA et al., 1983).

2.2.2 Matéria orgânica

A matéria orgânica no solo (MO) apresenta-se como um sistema complexo de substâncias cuja dinâmica é governada pela adição de resíduos orgânicos de diversas naturezas, sejam eles vegetais ou animais, pode variar substancialmente com o clima, vegetação e condições do próprio solo. Ela sofre transformações contínuas sob ação de fatores biológicos, químicos e físicos (CAMARGO et al., 1999).

De acordo com Silva et al. (1994), o estoque de MO em sistemas de manejo que realizam o revolvimento intenso do solo apresenta uma redução significativa, decorrente das perdas por erosão hídrica e também devido a oxidação microbiana. Dessa forma, desenvolve-se o processo de degradação química, física e biológica do solo, tendo como produto a redução de produtividade das culturas exploradas, cada vez mais acentuada com o manejo inadequado e o uso contínuo do solo (XAVIER et al., 2006).

No solo a MO serve como fonte primária de nutrientes às plantas, influenciando ainda na infiltração, retenção de água e susceptibilidade à erosão. E também sobre a ciclagem de nutrientes, capacidade de troca de cátions, complexação de elementos tóxicos e estruturação do solo (GREGORICH et al., 1994; DORAN & PARKIN, 1994).

A mudança que vem ocorrendo no setor canavieiro no manejo de colheita em relação à palhada pode gerar resultados expressivos com relação à dinâmica do carbono no solo, pois com a incorporação de resíduos culturais em grande quantidade juntamente com revolvimento do solo que ocorre na renovação do canavial a mineralização da matéria orgânica será estimulada, e conseqüentemente, há um acréscimo em seu conteúdo (OTTO et al., 2009; RAZAFIMBELO et al., 2006).

2.2.3 Fósforo

O fósforo desempenha função-chave no metabolismo das plantas, particularmente na formação de proteínas, no processo de divisão celular, fotossíntese, armazenamento de energia, desdobramento de açúcares, respiração, fornecimento de energia a partir do ATP, formação de sacarose, enraizamento, perfilhamento e absorção dos demais nutrientes. Ele tem a propriedade de também aumentar a eficiência da utilização de água pela planta, assim como a absorção e utilização de outros nutrientes,

contribuindo assim para aumentar a resistência da cana para algumas doenças, suportar baixas temperaturas e a falta de umidade (LOPES, 1989; KORNDÖRFER, 2004).

De acordo com Santos et al. (2002), o P é o nutriente que mais limita o desenvolvimento e produtividade das culturas. Porém apesar de sua grande importância para o desenvolvimento da cultura, ele é um dos nutrientes que a cana requer em menor quantidade. E apesar disso é um dos nutrientes aplicados em maiores quantidades nos solos brasileiros, devido sua baixa disponibilidade natural e sua afinidade com a argila sendo facilmente complexado, tornando o solo um grande dreno e limitando assim a sua disponibilidade para a planta (RAIJ, 1991).

As fontes de fósforo podem ser divididas basicamente em solúveis e insolúveis. As primeiras, quando adicionadas ao solo, aumentam rapidamente a concentração de fósforo na solução do solo. Porém as fontes solúveis têm sua eficiência diminuída ao longo do tempo devido ao processo de adsorção ou fixação desse elemento pelo solo. Já os fosfatos naturais são insolúveis em água e, assim, se dissolvem lentamente na solução do solo, aumentando a disponibilidade de fósforo para as plantas com o passar do tempo. Os fosfatos naturais (fontes insolúveis), em geral, apresentam menor eficiência que os fosfatos solúveis (industrializados) em curto prazo, porém em longo prazo seu efeito residual é geralmente maior (KORNDÖRFER et al., 2009).

2.2.4 Potássio

O potássio (K) do solo ocorre em quatro formas, que são elas K da solução, K trocável, K não trocável (fixado) e o K estrutural. O suprimento de K para as plantas advém da solução e dos sítios de troca dos coloides do solo, que estão em equilíbrio com o K não trocável e com o K estrutural dos minerais. O teor trocável é a principal fonte de reposição do K para a solução o qual, por sua vez, sendo que o K da solução pode ser absorvido pelas plantas, adsorvido às cargas negativas do solo ou perdido por lixiviação. Dessa maneira, recomenda-se realizar a aplicação desse nutriente conforme as plantas se desenvolvem, visando reduzir as perdas no sistema solo-planta e aumentar a eficiência de utilização desse nutriente (SPARKS & HUANG, 1985; RAIJ, 1991).

O K é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura da cana-de-açúcar, apesar de não fazer parte de nenhum composto orgânico presente na cultura (ORLANDO FILHO, 1993). Participa da síntese de açúcares e proteínas, no aumento da

clorofila bruta e conversão de energia nos cloroplastos, e na abertura e fechamento de estômatos. É cofator de aproximadamente 60 enzimas, principalmente ligadas ao metabolismo de açúcares, transformações anabólicas e catabólicas de sacarose e hexose. Baixos níveis de sacarose são associados à deficiência de K. A cana-de-açúcar, mais que a maioria das outras plantas, parece ter maior necessidade de metabolizar glicose em seus primeiros meses de crescimento e desenvolvimento (ALEXANDER, 1965; VIEIRA, 1983).

2.3 AGRICULTURA DE PRECISÃO

O manejo regionalizado do solo e da cultura é parte integrante de um sistema de Agricultura de Precisão, o qual envolve conceitos de uso de informações sobre a variabilidade de propriedades locais e climáticas de uma área, visando ao aumento da produtividade, otimização no uso dos recursos e redução do impacto da agricultura ao meio ambiente. A agricultura de precisão (AP) compreende o conjunto de técnicas e metodologias que visam aperfeiçoar o manejo de cultivos e a utilização dos insumos agrícolas, proporcionando máxima eficiência econômica (MOLIN, 2007).

Os processos e os atributos do solo que determinam o desempenho e a produção das culturas, bem como o impacto da agricultura ao meio ambiente, variam no espaço e no tempo. Por essa razão, o conhecimento da variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção da cultura é o primeiro passo para adoção, com êxito, do sistema de agricultura de precisão. Este sistema tem sido adotado por diferentes grupos, incluindo fabricantes de equipamentos, fornecedores de insumos, companhias de sementes, consultores agrônômicos, cientistas e produtores, como um caminho para melhorar o retorno econômico da atividade agrícola (RUNGE & HONS, 1999).

A agricultura de precisão determina o “exato” manejo da lavoura tendo como base o mapeamento de zonas específicas de manejo do solo. No Brasil, encontra-se em fase de adoção, na qual o agricultor tenta elaborar mapas de produtividade agrícola que possuam elevada correlação espacial com os mapas dos nutrientes vegetais. Seus maiores benefícios são a redução do custo de produção devido ao menor gasto com insumos e o aumento da produtividade agrícola (TSCHIEDEL & FERREIRA, 2002; MOLIN et al., 2007).

Conforme Campo (2000) atribui à agricultura de precisão, os seguintes benefícios: redução de quantidades de insumos; redução dos custos de produção;

redução da contaminação ambiental; e aumento no rendimento das culturas, com a AP pode ocorrer melhorias nos rendimentos da colheita e lucros, fornecimento de informações para tomar decisões de manejo mais embasadas, provêr registros de fazenda mais detalhados e úteis, reduzir custos de fertilizante, reduzir custos de praguicida e reduzir poluição.

Em sistemas de cultivos altamente tecnificados, como em cana-de-açúcar, é fundamental ter o conhecimento da variabilidade espacial de atributos do solo, o que poderá contribuir para redução dos custos de produção. Da mesma forma, a determinação dos alcances geoestatísticos para estes atributos do solo, é essencial ao mapeamento da área para a utilização na agricultura de precisão, uma vez que o valor do alcance é utilizado nos pacotes geoestatísticos que alimentam os pacotes computacionais empregados na agricultura de precisão. Neste contexto, surge a geoestatística, uma ferramenta que além de analisar a dependência espacial desses valores, ainda proporciona meios para que sejam efetuados os respectivos mapeamentos, por meio da krigagem e/ou da cokrigagem. Portanto, uma vez conhecido o modelo da dependência espacial, é possível mapear a área estudada, estabelecendo zonas específicas de manejo visando à conservação do solo (p.e. descompactação das zonas compactadas), condições necessárias à agricultura de precisão (COELHO, 2003).

2.4 GEOESTATÍSTICA

As variações espaciais dos atributos físico-químicos do solo podem ser avaliadas com o uso de técnicas geoestatísticas, que verificam a relação entre as várias amostras de uma mesma área, usando-se o estudo de variáveis regionalizadas (SILVA & CHAVES, 2001). Paralelamente, a geoestatística também estuda a variabilidade espacial dos atributos da planta auxiliando na escolha, locação de experimentos e interpretação dos resultados. Seu uso requer a coleta de amostras previamente planejadas, com a localização espacial exata de cada ponto amostral (MONTANARI et al., 2012).

Alguns autores têm demonstrado que os atributos de solo muitas vezes não revelam uma variação puramente aleatória ao longo de um terreno, apresentando correlação espacial (GOMES et al., 2007). Assim, a geoestatística tem sido utilizada como importante ferramenta de análise dos dados, a fim de modelar e estudar a

estrutura de dependência espacial dos atributos do solo, por meio do ajuste de semivariogramas experimentais.

A teoria das variáveis regionalizadas, desenvolvida por Krige (1951), conforme citado por Vieira (2000), concluiu que somente a informação dada pela variância dos dados é insuficiente para explicar um fenômeno em estudo. Para tal, seria necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surgiu o conceito de geoestatística. Essa teoria passou a ser utilizada em diversos campos do conhecimento, como hidrologia, ciência do solo, ciência florestal e estudos de poluição, entre outros, algumas dessas áreas viram essa técnica como uma ferramenta adequada para análise dos dados.

Libardi et al. (1996) relataram que, enquanto na estatística clássica as amostras são coletadas ao acaso, na geoestatística os locais de amostragem são definidos. Os autores observaram ainda que nos dois tipos de coleta pode-se calcular a média e a variância, entretanto, somente por meio da geoestatística, que considera a dependência espacial entre as medidas, pode-se obter a estrutura da variância, evidenciando aspectos não disponíveis por outros métodos.

A eficácia das estratégias de amostragem do solo pode ser aumentada com a incorporação de um modelo de variabilidade espacial dos atributos, podendo ser aplicado esse conhecimento na escolha de área experimental, locação das unidades experimentais, coleta de amostras e interpretação de resultados (LEÃO et al., 2007). As técnicas da geoestatística trabalham com problemas de espacialização de variáveis e representam uma promissora ferramenta para trabalhos em Sistema de Informação Geográfica em três aplicações básicas: (a) estimativas: para inferir atributos em pontos diferentes daqueles originais, isto é, onde estes não foram coletados; (b) previsões: para detectar tendências e locais de máximos e mínimos; (c) desenhos de experimentos: para otimizar a segmentação da área em unidades de espaço (VALERIANO & PRADO, 2001).

2.4.1 Semivariograma

O semivariograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (DALCHIAVON et al., 2011) ou no tempo, definido por três parâmetros: o efeito pepita (C_0), o patamar ($C_0 + C$) e o alcance (A_0).

No ajuste dos modelos experimentais (linear, esférico, exponencial e gaussiano), que depende do atributo e da camada de solo analisada (REICHERT et al., 2008), são considerados: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); b) o maior coeficiente de determinação (r^2) e c) o maior avaliador do grau da dependência espacial (ADE). O ajuste é validado pela técnica da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem.

2.4.2 Krigagem

A krigagem é um processo de interpolação que estima valores de atributos em locais não amostrados, sem tendência e com variância mínima, podendo expressar os resultados em forma de mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional. O valor da variável espacial, num local não amostrado, é estimado por combinação linear de valores medidos em outros locais vizinhos, levando-se em conta a modelagem da dependência espacial da variável, expressa pelo semivariograma. Pontos próximos dos locais não amostrados têm maior peso do que os afastados e aqueles agrupados têm maior peso do que os isolados, (VIEIRA et al., 1983; BORGELT et al., 1994).

A estimativa de valores para locais não amostrados, pela técnica de krigagem, possibilita estabelecer um mapa da área de estudo para os atributos do solo, permitindo a definição de linhas de isovalores, que podem ser de grande utilidade no planejamento experimental e na interpretação do comportamento espacial dos dados (BURGESS & WEBSTER, 1980), auxiliando no planejamento das atividades agrícolas e no fornecimento de subsídios para tomadas de decisões.

Cristóbal et al. (1996) e Robaina & Seijas (2002), estudando a distribuição espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em uma área com cana-de-açúcar, afirmaram que o método de interpolação por krigagem pode ser muito útil quando se quer obter os mapas de isolinhas de um atributo com altos coeficientes de variação, como no caso da condutividade hidráulica do solo saturado.

2.4.3 Interpolação dos dados por krigagem ordinária

Pelo método da krigagem ordinária, determinando-se o semivariograma da variável e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar linearmente valores em qualquer posição na área de estudo, sem tendência e com

variância mínima. Este é o método de interpolação dos dados mais utilizado no mapeamento dos atributos do solo (SCHLOEDER et al., 2001).

Os resultados do estudo podem ser expressos em forma de mapa de isolinhas ou de superfície tridimensional. Porém, a maneira mais utilizada para representar a variabilidade espacial dos atributos do solo em uma área é por meio de mapas de isolinhas (CORÁ & BERALDO, 2006).

2.4.4 Semivariograma cruzado

O semivariograma cruzado é uma ferramenta geoestatística que permite verificar a continuidade cruzada entre as variáveis regionalizadas, tornando possível avaliar se a variabilidade de uma série é acompanhada pela da outra, de forma direta como indireta (SOUZA, 1992).

Em situações em que existe a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas expressas no semivariograma cruzado. Este método é chamado de cokrigagem, o qual pode ser mais preciso do que o da krigagem em si (VIEIRA, 2000).

2.4.5 Cokrigagem

A cokrigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar uma variável primária de interesse por intermédio de uma variável secundária. Para que sua aplicação seja possível é necessário que ambas estejam correlacionadas, para que o variograma cruzado seja representativo (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

O conhecimento das relações entre as variáveis pode contribuir para a realização de estimativas de variáveis em função de outros atributos (KIEHL, 1979), modelada pelo semivariograma cruzado, sendo possível estimar o valor de uma variável para um determinado local não amostrado pela técnica de cokrigagem, com base na correlação espacial de outra variável.

3 REFERÊNCIAS

ALCARDE, J.C.; GUIDOLIN, J.A., LOPES, A.S. **Os Adubos e a eficiência das adubações**. 2. ed. ANDA, São Paulo. 35p., 1991.

ALEXANDER, A. G. Physiological studies of enzymes catalyzing the synthesis and hydrolysis of sucrose, starch and phosphorylated hexose in sugar cane. **Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico**. Rio Pedras, vol. 48, n. 3, p. 165-231, 1965.

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N.; JUCKSCH, I. A cobertura vegetal de inverno e a adubação orgânica e, ou, mineral influenciando a sucessão feijão/milho. R. **Bras. de Ci. do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 867-874, 2000.

BORGELT, S.C.; SEARCY, S.W.; STOUT, B.A.; MULLA, D.J. Spatially-variable liming rates - a method for determination. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.37, n.5, p.1499- 1507, 1994.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.31, n.3, p.315-331, 1980.

CAMARGO, A. O. de; SANTOS, G. A. de; GUERRA, J. G. M. Macromoléculas e Substâncias Húmicas. In: Santos, G. A.; Camargo, F.A.O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Ed. Genesis.1999, 49p.

CAMPO, P. do. Agricultura de precisão. **Inovações do campo**. Piracicaba, 2000. Disponível em: <http://www1.Portaldocampo.Com.br/inovacoes/agric_precisao>. Acesso em 15 jun. 2014.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e da cultura. In: CURI, N. et al. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p. 249-290.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Cana-de-açúcar**. Quadro Comparativo de Área, Produção e Produtividade, Safra 2014/2015 - 1º Levantamento. Abril 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 374-387, 2006.

CRISTÓBAL, A.; PALACIOS, V.; RUIZ, F. Comparación de métodos de interpolación em variables hídricas del suelo. **Agrociência**, Havana, v.30, n.2, p.329-343, 1996.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Eds.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool** - tecnologia e perspectivas. Viçosa: UFV, 2010. p.25-49.

DORAN, J. W. & PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (SSA Special Publication, 35).

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. & STONE, L. F. Índices adequados de pH e de saturação por bases na produtividade do feijoeiro em solo de cerrado no sistema plantio direto. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. Embrapa Arroz e Feijão, 16 p., 2008.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2000. 193 p.

FIGUEIREDO, P. Breve historia da cana-de-açúcar e do papel do instituto agrônômico no seu estabelecimento In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-Açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico e Fundação-IAC, 2008. Cap.1, p. 31-44.

GIOIA, M.T. Produtividade e componentes produtivos da cana-de-açúcar correlacionados com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico. 2011, 91f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) Ilha Solteira, SP, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia, 2011.

GOMES, N. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.4, p.427-435, 2007.

GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M. & ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Can. J. Soil Sci.**, 367-375, 1994.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561p.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-água**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

KORNDÖRFER, G. H.; MELO, S. P. Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 92-97, 2009.

KORNDÖRFER, G.H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S. R. S. (Eds). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa de Potassa e do Fosfato, 2004. p.290-306.

KRIGE, D. G. **A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand**. Journal South African. Institute. Mining Metall, n. 52, p. 119-139, 1951.

LEÃO, A. B.; ANDRADE, A. R. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B.; GUERRA, H. O. C. **Variabilidade espacial de fósforo em solo do perímetro irrigado Engenheiro Arcoverde, PB**. Revista Ciência Agronômica, v.38, n.1, p.1-6, 2007.

LEITE, S. C. F. & SOUZA, R. F. **Uma investigação da relevância do setor canavieiro no Brasil em 2005**. PRACS: Revista de Humanidades do Curso de Ciências Sociais da UNIFAP Macapá, n. 3, p. 189-204, dez. 2010.

LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG**, v.20, p.1-12, 1996.

LIMA, C. G. R. Análise linear e espacial entre alguns atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH de um Argissolo Vermelho de Suzanópolis (SP). 2012, 101 p. **Tese** (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

LOPES, A.S. **Manual de Fertilidade do Solo**. Trad. e adapt. De soil Fertiliy manual. Piracicaba: ANDA/POTAFÓS, 1989. 153p.

MARINS, A. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Estimadores New1 e New2 no estudo de dependência espacial da produtividade da soja e atributos físicos do solo de uma área comercial. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 16, n. 1, p. 133-143, 2008.

MOLIN, O. P.; VIEIRA JUNIOR, P. A.; DOURADO NETO, D.; FAULIN, G. C.; MASCARIN, L. Variação espacial na produtividade de milho safrinha devido aos

macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.6, n.3, p.309-324, 2007.

MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milho. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 59, n. 1, p. 407-410, 2012.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP. 2006. p. 11-18.

NETTO, I. T. P.; KATO, E.; GOEDERT, W. J. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. vol.33 n.5 Viçosa, 2009.

OLIVEIRA, F. M.; ASPIAZÚ, I.; KONDO, M. K.; BORGES, I. D.; PEGORARO, R. F.; VIANNA, E. J. Avaliação tecnológica de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e supressões de irrigação. **Rev. Ceres**. vol.59 n.6 Viçosa, 2012.

ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana de açúcar. In: CÂMARA, G. M. S. & OLIVEIRA, E. A. M. (eds). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ/USP, 1993. p. 133-146.

OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 44, n. 4, p. 398-405, 2009.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFÔS, 1991. 343 p.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHE`S, B.; LARRE´-LARROUY, M. C.; 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 Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285-289, 2006.

REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.4, p.981-988, 2008.

ROBAINA, F.G.; SEIJAS, T.L. Distribución espacial de la conductividad hidráulica de saturación en un área cañera de la llanura Habana-Matanzas. **Revista Ciência Técnica Agropecuaria**, Havana, v.11, n.1, p.71-76, 2002.

RUNGE, E.C.A. & HONS, F.M. **Precision agriculture – development of a hierarchy of variables influencing crop yields**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., Minnesota, 1998. Proceedings. Madison, ASA-CSSA-SSSA, 1999. p.143-158.

SCAPARI, M. S.; BEUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico e Fundação IAC, 2008. Cap. 2, p. 47-56.

SCHLOEDER, C. A.; ZIMMERMAN, N. E.; JACOBS, M. J. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.65, n.2, p.470-479, 2001.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fonológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, M. H.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2006. Cap. 2, p. 19-36.

SILVA, C. B. Inovação na indústria sucroalcooleira paulista: os determinantes da adoção das tecnologias de agricultura de precisão. Piracicaba, 2009. 89 p. **Tese** (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 431-436, 2001.

SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.541-547, 1994.

SOUZA, L.S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. 1992. 162 f. **Tese** (Doutorado em Agronomia) - Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SPARKS, D.L. & HUANG, P.M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R.D., ed. **Potassium in agriculture**. Madison, American Society of Agronomy, 1985. p.201-276.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.533-542, 2004.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M.F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.

VALERIANO, M. M.; PRADO, H. Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 997-1005, 2001.

VIANA, A. R.; ANDRADE, L. A. B. & NETTO, A. J. Efeito da calagem e tolerância à acidez em 100 cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): estudo preliminar. **Ciência prática**, Bebedouro, v. 7, n. 6, p.205-215, 1983.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-53.

VIEIRA, I. M. S. Efeito do potássio sobre a atividade de invertases, teores de açúcares e compostos nitrogenados em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. Var. NA56-79) cultivada em solução nutritiva. Piracicaba, 1983. 97 p. **Dissertação** (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.1, p.1-75, 1983.

XAVIER, F. A. S.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, T. S. & MENDONÇA, E. S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba – CE. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:247-258, 2006.

CAPÍTULO 1 – ATRIBUTOS TECNOLÓGICOS, STAND E PRODUTIVIDADE DA CANA-PLANTA CORRELACIONADOS COM ASPECTOS DA FERTILIDADE DO SOLO EM CHAPADÃO DO CÉU (GO)

RESUMO

A agricultura de precisão, que pode ser aplicada em qualquer etapa da produção de cana-de-açúcar, visa proporcionar maior produtividade, redução do impacto ambiental e melhor rendimento econômico pela aplicação correta dos insumos agrícolas. Objetivou-se com este trabalho caracterizar as zonas específicas de manejo do solo, empregando-se correlações lineares e espaciais entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, no sentido de indicar aquele que mais eficientemente esteja relacionado com o aumento da produtividade. O trabalho foi desenvolvido no ano agrícola de 2012/13, no município de Chapadão do Céu, Goiás, Brasil. Foram analisadas as correlações lineares e espaciais entre atributos da cana-de-açúcar e de alguns atributos químicos do solo, em duas profundidades (0-0,25 e 0,25-0,50 m). Para isso, foi instalado um grid geoestatístico (230 m x 228 m; 5,244 ha), onde foram alocados 121 pontos amostrais para coleta dos dados. Portanto, com o aumento do número de plantas por metro quadrado (*stand*) ocorreu também o aumento da produtividade de colmos de cana-de-açúcar. Os teores de fósforo do solo, por evidenciarem correlações lineares e espaciais com a produtividade de colmos, constituíram-se indicadores de zonas específicas de manejo do solo fortemente associadas à produtividade da cana-de-açúcar.

Termos de indexação: fósforo disponível, atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, correlação espacial.

CHAPTER 1 – TECHNOLOGICAL ATTRIBUTES, STAND AND SUGAR-CANE PRODUCTIVITY RELATIONSHIP WITH SOIL FERTILITY CHARACTERISTICS IN CHAPADÃO DO CÉU CITY, GOIÁS STATE, BRAZIL

ABSTRACT

Precision agriculture can be applied at any stage of the production of cane sugar, this practice aims to provide increased productivity, reduced environmental impact and improved economic performance through the correct application of inputs in the area. The objective of this study was to characterize the specific areas of soil management, using linear and spatial correlations between attributes of the culture of cane sugar and chemical properties of a Oxisol, in order to indicate that it more efficiently is related to the increased productivity. The work was developed in the agricultural year 2012/13, in Chapadão do Céu City, Goiás State, Brazil, we analyzed the linear and spatial correlations between attributes of cane sugar and some soil chemical properties at two depths (0 to 0.25 and 0.25 to 0.50 m). For this, it was installed a geostatistical grid, (230 m x 228 m; 5.244 ha), where were located 121 data collect points. With the increase in the number of plants per m², increasing sugarcane yield of cane sugar per hectare occurs. The phosphorus soil, because they show correlations with sugarcane yield of cane sugar, are indicators of specific areas of soil strongly associated with productivity of cane sugar management.

KEY WORDS: Available phosphorus, Sugar-cane technological attributes, Spatial correlation.

1 INTRODUÇÃO

A produção total no Brasil de cana-de-açúcar moída na safra 2014/15 foi estimada em 671,69 milhões de toneladas, com aumento de 2,0% em relação à safra 2013/14 o que corresponde a uma área total de aproximadamente 9.130,1 mil hectares, distribuídas em todos estados produtores. Nesta safra o Brasil terá um acréscimo na área estimado em 318,7 mil hectares, e Goiás está entre os quatro principais responsáveis por este aumento de área plantada com um acréscimo em cerca de 59,9 mil hectares. Goiás é o segundo maior produtor desta cultura entre os estados brasileiros, sendo responsável por cerca de 9,3% (878,27 mil hectares) da área total cultivada no país (CONAB, 2013).

A importância na produção dessa cultura, contudo, tem intensificado a utilização de máquinas agrícolas buscando uma melhor eficiência produtiva e um melhor rendimento econômico para o produtor. O aumento no uso dessas máquinas agrícolas tem gerado cada vez mais discussões a respeito da exploração agrícola sustentável. Assim como a degradação dos solos devido ao elevado uso de máquinas agrícolas no processo de produção (MONTANHA, 2011).

Para que o aumento se mantenha crescente no sistema de produção da cana-de-açúcar, o uso de fertilizantes e corretivos pode ser classificado como os insumos de maior importância, devido à capacidade que estes têm de influenciar a produtividade da cultura. Uma alternativa para a otimização do sistema é a adoção da agricultura de precisão (AP), que promove o conhecimento da variabilidade dos solos (CAMARGO et al., 2013).

O setor sucroalcooleiro vem investindo fortemente nessas tecnologias, estimativas informais apontam que 10% da área de cana-de-açúcar vem sendo cultivada com AP, especificamente a tecnologia de aplicação em taxa variada. Muitas ainda estão em desenvolvimento, como a aplicação localizada de defensivos e o mapeamento da produtividade (MOLIN, 2001). No Estado de São, que é o maior produtor de cana-de-açúcar do país, verificou-se que cerca de 56% das usinas fazem uso de algum tipo de tecnologia de agricultura de precisão, mostrando assim que esta é uma tecnologia que vem se difundindo no setor (CIRANI & MORAES, 2010).

A agricultura de precisão pode ser aplicada em qualquer etapa da produção de cana-de-açúcar, porém a forma mais conhecida é na aplicação de insumos a taxas variadas, tendo como base a realização de uma amostragem de solo realizada na área.

O objetivo principal dessa aplicação é proporcionar ao produtor maior produtividade, redução do impacto ambiental e melhor rendimento econômico pela da aplicação correta de insumos na área (MONTANHA, 2011).

Para que se possa realizar este tipo de aplicação utiliza-se a geoestatística que é uma das ferramentas da agricultura de precisão, permitindo realizar o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo, podendo assim indicar alternativas de manejo que propiciem a minimização do efeito da variabilidade dos atributos do solo sobre os cultivos. Assim, permite-se modelar e analisar a variabilidade espacial dos atributos de interesse agrícola gerando mapas de variabilidade espacial sem tendência e com variância mínima por meio da técnica de interpolação por krigagem (MONTANARI et al., 2011).

Sendo assim, objetivou-se com este trabalho caracterizar as zonas específicas de manejo do solo, empregando-se correlações lineares e espaciais entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, no sentido de indicar aquele que mais eficientemente esteja relacionado com o aumento da produtividade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área deste estudo localiza-se na Fazenda Campo Bom, Quadra 2 (18°35'50.68" S; 52°36'34.02" W), parte do conjunto de terras da Usina Cerradinho, situada no município de Chapadão do Céu, Goiás, Brasil.



Figura 1: Imagem de satélite da área experimental.

Segundo a classificação de Koeppen, o tipo climático da região é Aw, caracterizado como tropical de estação seca, com estação chuvosa no verão e inverno seco. A região apresenta precipitação média anual de 1740 mm, temperatura média anual ao redor de 23,2°C e déficit hídrico médio anual de 156 mm.

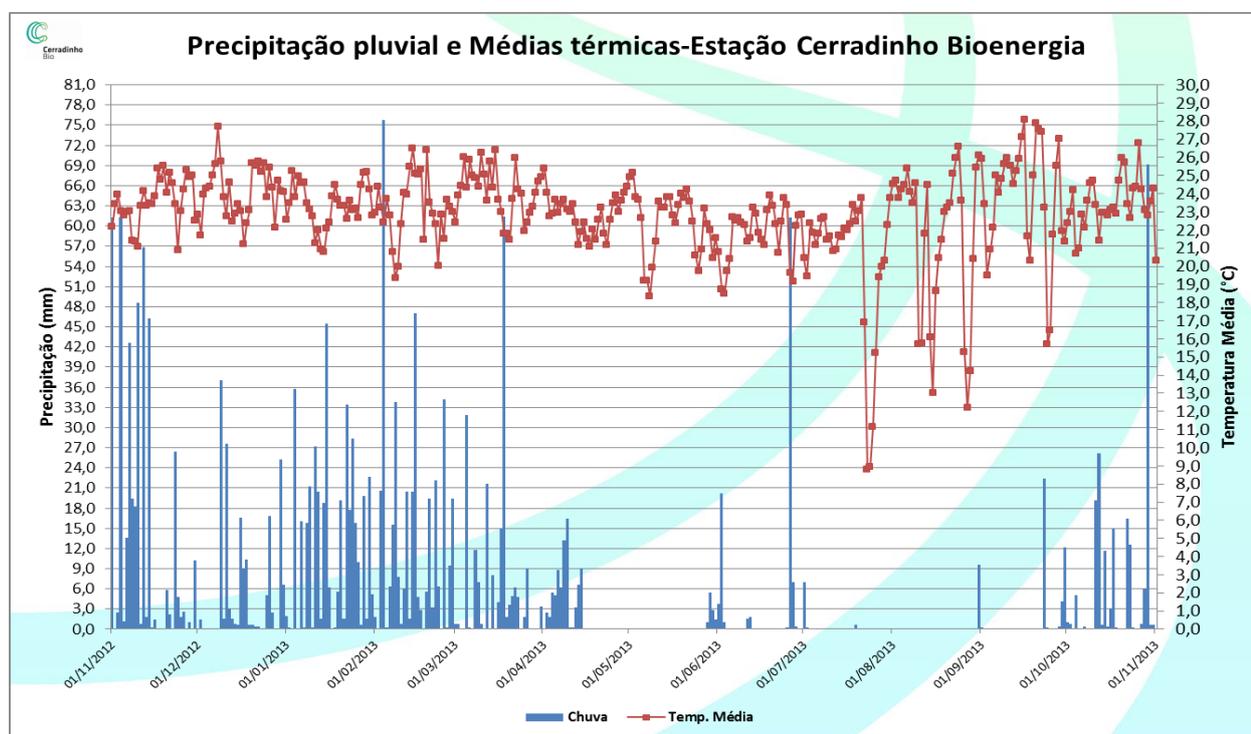


Figura 2: Precipitação pluvial e médias térmicas, obtidas na área experimental, durante o período de novembro de 2012 a novembro de 2013.

A altitude local predominante é de 800 m, com relevo plano e declividade média inferior a 0,007 m/m. O solo da área experimental, classificado segundo preceitos da Embrapa (2013), é um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico.

Para a implantação da cultura da cana-de-açúcar foi utilizada a variedade IACSP 955000, em área de plantio direto de culturas graníferas há mais de 10 anos, dessecada com glifosato na dose de 3,5 L ha⁻¹ do produto comercial. Em seguida, foi distribuído, a lanço calcário dolomítico na dose 3,6 t ha⁻¹ (PRNT 83%), 2,4 t ha⁻¹ de gesso agrícola e 1,0 t ha⁻¹ de AGROFFOS com dose fixa. Foi feita incorporação de corretivos e após foi realizado a subsolagem.

O plantio do talhão foi executado no dia 22/10/2012, no espaçamento entrelinhas de 1,50 m. No plantio mecanizado utilizou-se 500 kg ha⁻¹ do fertilizante 08-28-20, com 0,6% de Zn e 0,3% de B, 150 L ha⁻¹ Ac. Húmico, fipronil na dose de 250 g ha⁻¹ e 0,5 L ha⁻¹ de piraclostrobina. A adubação de cobertura foi realizada aos 45 dias após a brotação da cultura, com 120,0 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio. Para o controle de plantas invasoras foi aplicado 1,7 L ha⁻¹ de sulfentrazone e 1,6 L ha⁻¹ de clomazine em pré-emergência das plantas daninhas. Aos 60 dias após a brotação da cultura foi realizado o cultivo químico, junto com a operação de quebra-lombo. Utilizou-se 4,0 kg ha⁻¹ de ácido bórico 19% e 1,8 kg ha⁻¹ de tetuthiuron. A maturação da cana-de-açúcar foi induzida aos 20 dias antes da colheita, utilizando-se 20 g ha⁻¹ de sulfometuron metil, aplicado com avião agrícola. Para a coleta de dados, a cultura encontrava-se no primeiro corte, com 12 meses no campo.

Distribuíram-se simetricamente 121 pontos amostrais de forma a cobrir toda área do talhão escolhido, cuja malha geoestatística teve 230 m x 228 m, representando então 5,244 ha (Figura 3). Suas coordenadas geográficas foram convertidas em coordenadas planas, com o eixo cartesiano Y coincidente à longitude, enquanto que, o X, à latitude. Cada ponto amostral representou um quadrado de 433,39 m², com o lado tendo em média 20,82 m.

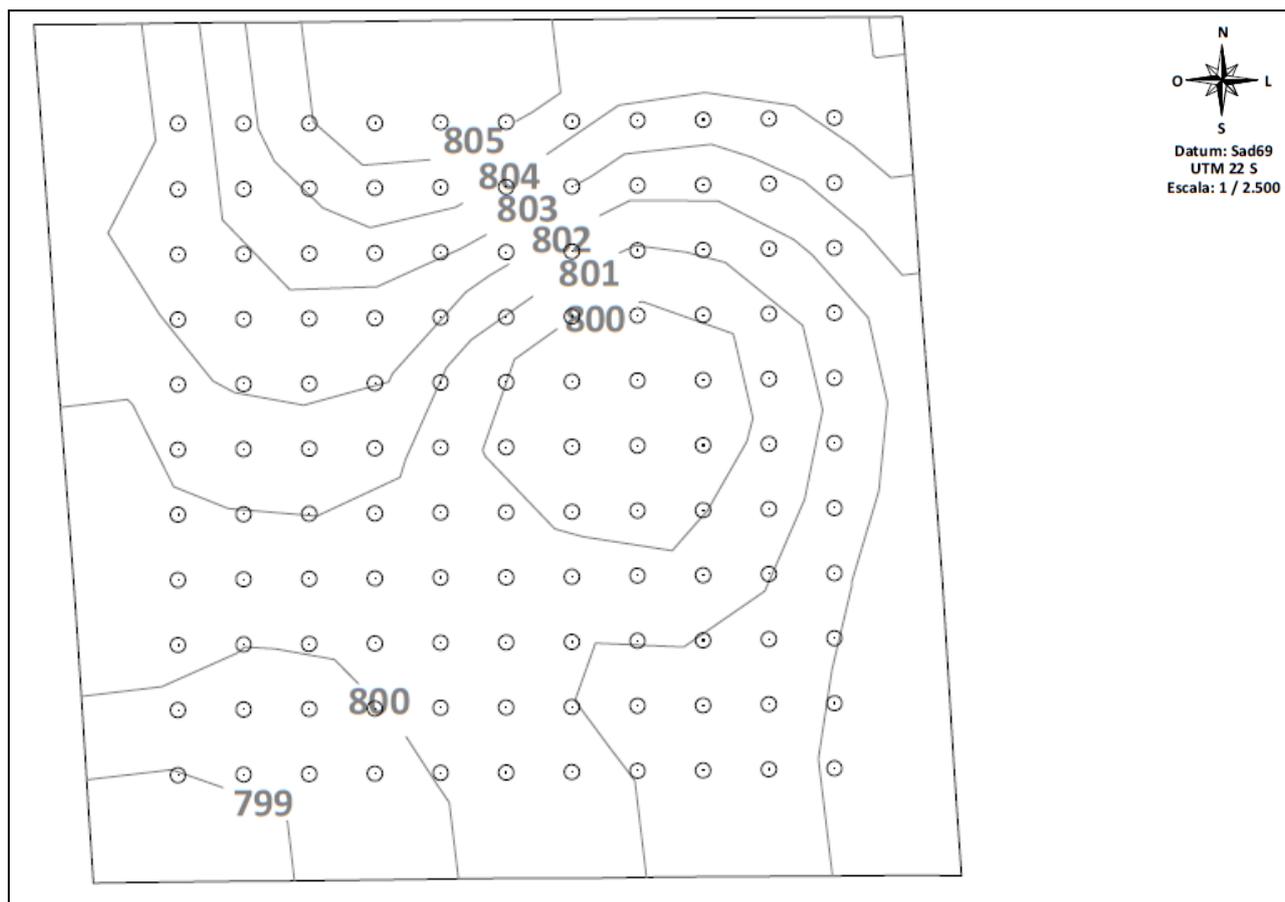


Figura 3: Croqui da área amostral.

Para o posicionamento em campo, as coordenadas foram inseridas no aparelho GPS topográfico geodésico, com receptor GS10 L1/L2 (Figura 4), com projeção UTM (*universal transverse mercator*) e Datum SAD 69, na zona 22S, com precisão milimétrica devido à correção instantânea em duas fases, por meio da tecnologia RTK (*real time kinematic*).



Figura 4: Base RTK utilizada para correção e receptor de sinais

As amostragens foram realizadas em 21/10/2013. Para a coleta dos atributos trabalhados, da planta e do solo, foram definidas duas linhas de 3 m no sentido de plantio, totalizando uma área de 9 m² no entorno do ponto amostral, uma vez que o espaçamento entre linhas foi de 1,50 m. Para a obtenção do atributo população de plantas (STD), expresso em pl m⁻², utilizou-se uma trena para marcar 3 m lineares e assim executou-se a contagem do número de colmos industrialmente viáveis por ponto. Para a produtividade de colmos de cana-de-açúcar (PRO), expressa em t ha⁻¹, utilizou-se uma balança eletrônica portátil com capacidade de 100,00 kg (+/- 0,04 kg) (Figura 5). Os colmos foram organizados em feixes, pesados e somando-se para a obtenção da massa de colmos por ponto. Após a coleta dos dados de PRO, em uma planilha Excel, realizou-se a extrapolação da área útil de 9 m² para 1 ha.

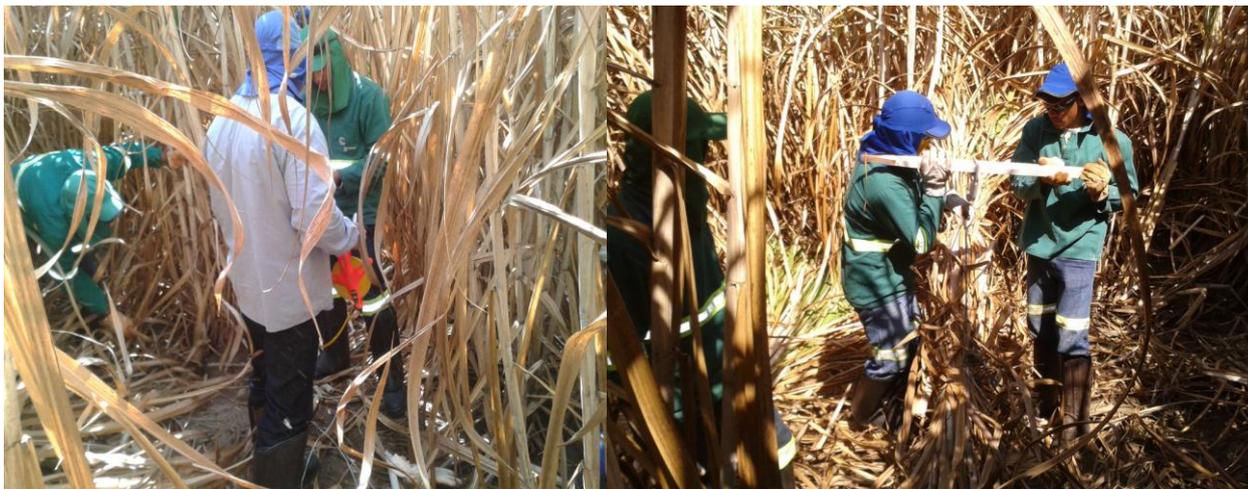


Figura 5: Momento da coleta de dados

O atributo tecnológico trabalhado foi o teor de açúcares totais recuperáveis (ATR), expresso em kg t^{-1} . Para tanto, tomaram-se 10 colmos industrializáveis, retirados em sequência nas duas linhas da área amostral, sendo seus feixes despontados, despalhados, numerados e encaminhados ao laboratório PCTS (Pagamento da Cana-de-açúcar pelo Teor de Sacarose) (Figura 6) da Usina Cerradinho (CONSECANA, 2006).



Figura 6: Laboratório PCTS e feixes com dez canas etiquetadas para análise de qualidade.

Os atributos químicos do solo pesquisados foram os teores de fósforo (P) e de matéria orgânica (MO), valor do pH em CaCl_2 (pH), capacidade de troca catiônica (T), a soma de bases (SB), a saturação por bases (V%) e a saturação por alumínio (m%). Para a obtenção dos atributos do solo, foram coletadas amostras deformadas individualmente no entorno do ponto amostral, nas profundidades de 0-0,25 m e 0,25-0,50 m, com um trado de caneca (diâmetro = 0,08 m, altura = 0,20 m, volume = $1,005 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$). Obteve-se a terra fina seca ao ar (TFSA) passando-a por uma peneira com malha de 2,0 mm,

sendo as análises químicas realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo Athenas de Jaboticabal (SP). Na caracterização química do solo foram determinados, a acidez ativa (pH em CaCl_2), obtida potenciométricamente utilizando-se a relação 1:2,5 (solo: CaCl_2). O fósforo disponível (P) foi extraído pelo método da resina trocadora de íons, proposta por Raij et al., (2001); os valores V% e m% foram quantificados respectivamente pelas seguintes expressões: $V\% = (S/T) \times 100$; $m\% = (Al^{+3} / Al^{+3} + S) \times 100$, onde V% e m% são, respectivamente, a saturação por bases e a saturação por alumínio, expressas em porcentagem (%). A determinação da matéria orgânica (MO) foi realizada por combustão a seco, utilizando-se um analisador Leco CN-2000, em amostras moídas e peneiradas a 60 meshes. Posteriormente, calculadas a capacidade de troca catiônica (T) e soma de bases (SB) segundo procedimentos descritos por Raij et al. (2001).

Para cada atributo estudado foi efetuada a análise descritiva auxiliada pela estatística clássica utilizando-se o SAS (SCHLOTZHAVER & LITTEL, 1997). Também foi efetuada a análise da distribuição de frequência por meio do teste de Shapiro & Wilk (1965) com 1 % probabilidade de erro. A modelagem geoespacial foi realizada com o programa GS+ 7.0 (GS+, 2004). A técnica de krigagem foi utilizada para estimar valores nos locais não amostrados por ser um estimador linear não enviesado. Uma vez determinados os valores, para os locais não amostrados, pela krigagem, foram construídos os mapas de isolinhas utilizando-se o programa GS+ (GS+, 2004), que emprega os mesmos valores estimados por meio da técnica de krigagem para determinação e localização das isolinhas; desta maneira, os mapas representam linhas bem definidas e embasadas em um algoritmo de regressão linear, conforme descrito por Siqueira et al., (2008). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme a Equação 1 (GS+, 2004):

$$ADE = [C / (C + Co)] \cdot 100 \dots \dots \dots (1)$$

onde: **ADE** é o avaliador da dependência espacial; **C**, a variância estrutural; e **C+Co**, o patamar. A interpretação proposta para o ADE foi a seguinte: a) $ADE < 20\%$ = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) $20\% \leq ADE < 40\%$ = baixa dependência (BA); c) $40\% \leq ADE < 60\%$ = média dependência (ME); d) $60\% \leq ADE < 80\%$ = alta dependência (AL) e $80\% \leq ADE < 100\%$ = muito alta dependência (MA) (DALCHIAVON et al., 2012).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise descritiva de atributos tecnológicos

De acordo com Pimentel Gomes & Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV). Suas classes foram determinadas como baixa ($CV \leq 10\%$), média ($10\% < CV \leq 20\%$), alta ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$).

De acordo com a Tabela 1, para produtividade de colmos de cana-de-açúcar por hectare (PRO), número de plantas por m^2 (STD), porcentagem de sólidos solúveis totais (BRI), porcentagem de sacarose (POL), porcentagem de pureza (PUR), porcentagem de Fibras (FIB), porcentagem de açúcares redutores do caldo (ARC), pH do caldo (pHC) e açúcares totais recuperáveis (ATR), foram encontradas respectivamente média variabilidade (18,43 %), média variabilidade (16,31 %), baixa variabilidade (3,34 %), baixa variabilidade (3,94 %), baixa variabilidade (2,62 %), baixa variabilidade (7,92 %), média variabilidade (11,6 %), baixa variabilidade (2,15 %) e baixa variabilidade (3,94 %).

Souza et al., (2010a) também encontraram média variabilidade para produtividade de colmos (18,51 %), o atributo ATR apresentou baixa variabilidade, corroborando com o encontrado por Dutra Filho et al., (2011) trabalhando com cana-de-açúcar em um Argissolo Vermelho-Amarelo.

A distribuição de frequência normal é a ideal para um estudo estatístico (análise de regressão e/ou geoestatística), ainda que na geoestatística, mais importante que a normalidade dos dados é a ocorrência ou não do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo (DALCHIAVON et al., 2012).

Os atributos de planta PRO, STD, BRI, POL, FIB e ATR, apresentaram distribuição de frequência do tipo normal, com valores do teste de normalidade de Shapiro & Wilk (1965), variando de 0,187 a 0,428 a 5 % de probabilidade (Tabela 1). Esse tipo de distribuição para atributos de origem biológica é comum, assim esses atributos podem ser representados por seus valores médios.

A média do atributo PRO (Tabela 1) foi $112,12 \text{ t ha}^{-1}$ valor acima da média nacional ($74,10 \text{ t ha}^{-1}$), da região centro-oeste ($72,52 \text{ t ha}^{-1}$) e do estado de Goiás ($74,86 \text{ t ha}^{-1}$) (CONAB, 2013). Por ser cana planta estando no seu primeiro ano produtivo com seu melhor potencial, pode estar explicando a alta produtividade.

Para o atributo ATR observa-se uma média de 160,68 kg t⁻¹ superior ao referencial nacional (135,7 kg t⁻¹) de acordo com Conab (2013) e ao encontrado por Carvalho et al., (2011) trabalhando com cana-de-açúcar sob plantio direto em Rio Brilhante-MS (117,57 kg t⁻¹).

Tabela 1. Análise descritiva inicial de atributos da cultura da cana-de-açúcar.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Pr<w	DF
			Máximo	Mínimo			Curtose	Assimetria		
	<i>Atributos da planta</i>									
PRO (t ha ⁻¹)	112,12	111,67	170,00	47,78	20,66	18,43	0,178	-0,272	0,4277	NO
STD (pl m ⁻²)	8,07	8,11	11,00	3,56	1,31	16,31	0,492	-0,402	0,2278	NO
BRI (%)	22,52	22,47	24,37	20,49	0,75	3,34	0,099	0,071	0,1838	NO
POL (%)	16,69	16,70	18,33	14,91	0,66	3,94	0,167	0,042	0,1198	NO
PUR (%)	86,60	86,57	94,40	81,93	2,27	2,62	0,550	0,832	<0,0001	IN
FIB (%)	11,24	11,27	13,49	9,35	0,89	7,92	-0,347	-0,054	0,2089	NO
ARC (%)	0,67	0,67	0,83	0,40	0,08	11,60	0,636	-0,847	<0,0001	IN
pHC (%)	5,32	5,30	5,50	5,10	0,11	2,15	-0,873	-0,020	<0,0001	IN
ATR (kg t ⁻¹)	160,68	160,68	176,55	143,61	6,33	3,94	0,160	0,073	0,1869	NO

^(a)PRO, STD, BRI, POL, PUR, FIB, ARC, pHC e ATR são respectivamente, Produtividade de Cana-de-açúcar, Número de Plantas por m², Porcentagem de Sólidos Solúveis Totais, Porcentagem de Sacarose, Porcentagem de Pureza, Porcentagem de Fibras, Porcentagem de Açúcares Redutores do Caldo, pH do Caldo e Açúcares Totais Recuperáveis; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO e IN, respectivamente do tipo normal e indeterminado

A média da porcentagem de sacarose foi de 16,69%, valor dentro da faixa de referência recomendada por Lavanholi (2008) (14 a 24%), e corrobora com os resultados encontrados por Correia et al. (2014) que obtiveram uma média de 18,12%. Assim como a média de FIB que se encontra dentro do padrão recomendado por Scapari & Beuclair (2008) que comenta que o valor de fibras na cultura pode variar de 9 a 20% durante a safra. Já em relação aos valores de PUR e BRI, observou-se, respectivamente os valores de 86,60 e 22,52, valores acima do encontrado por Dalchiavon et al. (2014) que obtiveram valores de 79,3 e 15,25 respectivamente e semelhante aos encontrado por Correia et al. (2014) trabalhando em um Argissolo Vermelho Amarelo com valores de 87,16 e 20,62.

O atributo STD apresentou uma média de 8,07 plantas por m² (Tabela 1), inferior ao encontrado por Braga (2011) em um Argissolo Vermelho eutrófico que obteve uma população de 10,5 plantas por m². Para Silva (2008) a recomendação para um bom

estande de plantas de cana-de-açúcar é de 10 a 12 plantas por metro. Porém podem sofrer interferência de acordo com as variáveis utilizadas e de fatores climáticos.

3.2 Análise descritiva de atributos do solo

Para os atributos químicos do solo, os valores do coeficiente de variação (CV %) oscilaram entre baixo e muito alto (Tabelas 2 e 3). Constatou-se baixa variabilidade para pH1 e pH2 (9,40; 8,77 %). Esse baixo coeficiente de variação indica que o pH não teve muita variação no solo, a variabilidade desses dados apresentaram comportamento semelhante aos de Souza et al., (2010a), que encontraram os seguintes valores (7,69; 7,05 %), porém discordaram do encontrado para MO1 e MO2 onde os autores encontraram alta variabilidade e com o presente trabalho foi encontrada média variabilidade sendo (13,96; 16,20 %). Souza et al., (2010b) em um Latossolo Vermelho distrófico encontraram valores próximos para os atributos MO1 e MO2 de 14,05 e 19,89 %.

Tabela 2. Análise descritiva inicial de atributos químicos coletados nas camadas do solo de 0,00-0,25 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas									
	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste ^(b)			
	Média	Mediana		Máximo	Mínimo	Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Atributos do solo										
pH1	5,31	5,30	6,60	4,30	0,50	9,40	-0,556	0,125	0,1812	NO
MO1 (g dm ⁻³)	24,11	23,40	32,70	17,60	3,37	13,96	0,013	0,623	0,0011	IN
P1 (mg dm ⁻³)	34,51	32,20	83,40	4,50	16,50	47,81	-0,286	0,583	0,0021	IN
S1 (mg dm ⁻³)	19,87	17,40	49,40	7,60	9,10	45,79	0,823	1,068	<0,0001	IN
Ca1 (mmol _c)	31,44	30,00	83,00	8,00	14,09	44,81	1,876	1,014	<0,0001	IN
Mg1 (mmol _c)	10,00	10,00	25,00	2,00	4,63	46,35	1,026	0,751	0,0004	IN
K1 (mmol _c)	1,28	1,30	2,30	0,50	0,371	29,07	-0,240	0,182	0,2113	NO
Al1 (mmol _c)	0,85	0,60	3,10	0,00	0,68	79,79	1,419	1,405	<0,0001	IN
H+Al1 (mmol _c)	21,83	19,50	45,00	9,00	7,40	33,88	0,293	0,996	<0,0001	IN
SB1 (mmol _c)	40,17	40,10	87,10	11,3	15,20	37,83	-0,347	0,253	0,1608	NO
T1 (mmol _c)	64,59	63,80	124,40	29,5	17,09	26,46	1,879	0,947	0,0001	IN
V1 (%)	64,11	67,90	87,70	26,10	14,16	22,09	-0,440	-0,602	0,0002	IN
m1 (%)	3,03	1,40	19,30	-1,80	3,96	130,32	4,064	2,128	<0,0001	IN

^(a)pH, MO, P, S, Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, T, V e m são respectivamente, pH do solo, teor de matéria orgânica do solo, teor de fósforo do solo, teor de enxofre do solo, teor de cálcio do solo, teor de magnésio do solo, teor de potássio do solo, teor de alumínio do solo, acidez potencial do solo, soma de bases do solo, capacidade de troca catiônica do solo, índice de saturação por bases do solo e índice de saturação por alumínio do solo, coletados nas camadas do solo de 0,00-0,25 m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO e IN, respectivamente do tipo normal e indeterminado.

Em relação à saturação por base (V%1 e V%2) mostraram-se com alta variabilidade (22,09; 26,65 %), discordando dos resultados encontrados por Souza et al., (2010a) em um Argissolo Vermelho-Amarelo e Souza et al., (2004) em um Latossolo Vermelho eutroférico ambos com média variabilidade.

Segundo Vanni (1998), coeficiente de variação maior que 35 % revela que a série é heterogênea, e a média tem pouco significado. Assim, m%1 e m%2, apresentaram muito alta variabilidade, sendo respectivamente 130,32 e 100,53 %.

Para P1 e P2 foram constatados coeficientes de variação 47,81; 51,84 %, respectivamente (Tabela 2 e 3), Oliveira et al., (2013) também encontraram variabilidade muito alta para fósforo. De acordo com Camargo et al., (2013) essa grande amplitude de variação dos teores de P está relacionada à forma de aplicação do fertilizante, que geralmente é realizada no sulco de plantio e na linha, que apresenta teores variáveis de P e a pouca mobilidade do P, o que pode causar acúmulo desse elemento, justificando os valores mais altos. Já os valores mais baixos podem estar relacionados ao fenômeno de adsorção desse nutriente aos óxidos de Fe e Al.

Tabela 3. Análise descritiva inicial de atributos químicos coletados nas camadas do solo de 0,25-0,50 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas								Probabilidade do teste ^(b)	
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação (%)	Coeficiente		Pr<w	DF
			Máximo	Mínimo			Curtose	Assimetria		
Atributos do solo										
pH ₂	4,86	4,80	6,40	4,10	0,43	8,77	1,309	1,073	<0,0001	IN
MO ₂ (g dm ⁻³)	18,32	18,00	27,20	12,20	2,97	16,20	0,071	0,271	0,1199	NO
P ₂ (mg dm ⁻³)	12,82	11,50	38,00	3,10	6,65	51,84	2,376	1,438	<0,0001	IN
S ₂ (mg dm ⁻³)	32,82	33,10	60,50	8,20	10,87	33,14	-0,513	0,230	0,1866	NO
Ca ₂ (mmol _c)	17,21	16,00	47,00	4,00	7,47	43,39	2,799	1,379	<0,0001	IN
Mg ₂ (mmol _c)	6,53	5,00	20,00	2,00	3,93	60,14	2,274	1,426	<0,0001	IN
K ₂ (mmol _c)	1,02	1,00	2,20	0,10	0,35	34,37	0,588	0,454	0,0601	NO
Al ₂ (mmol _c)	1,50	1,00	5,70	0,00	1,22	81,35	0,436	1,038	<0,0001	IN
H+Al ₂ (mmol _c)	23,26	20,70	47,90	11,70	7,76	33,37	1,018	1,191	<0,0001	IN
SB ₂ (mmol _c)	24,69	22,20	67,20	7,50	11,10	44,97	3,011	1,518	<0,0001	IN
T ₂ (mmol _c)	48,56	47,20	84,00	26,40	12,88	26,53	0,384	0,833	0,0001	IN
V ₂ (%)	50,51	49,60	80,70	15,30	13,46	26,65	-0,024	-0,040	0,5711	NO
m ₂ (%)	7,25	5,00	35,80	0,00	7,29	100,53	3,342	1,700	<0,0001	IN

^(a)pH, MO, P, S, Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, T, V e m são respectivamente, pH do solo, teor de matéria orgânica do solo, teor de fósforo do solo, teor de enxofre do solo, teor de cálcio do solo, teor de magnésio do solo, teor de potássio do solo, teor de alumínio do solo, acidez potencial do solo, soma de bases do solo, capacidade de troca catiônica do solo, índice de saturação por bases do solo e índice de saturação por alumínio do solo, coletados nas camadas do solo de 0,25-0,50 m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo NO e IN, respectivamente do tipo normal e indeterminado.

Pode-se verificar nas tabelas 2 e 3 as médias para pH1 e pH2 (5,31 e 4,86), valores estes próximos ao encontrado por Souza et al., (2007) em um Latossolo Vermelho eutroférico. Para P1 e P2 podem-se observar médias (34,51; 12,82 mg dm⁻³) respectivamente, Souza et., (2007) constataram valores de 26,4 mg dm⁻³ na profundidade 0,00-0,20m. Para MO1 e MO2 as médias foram (24,11; 18,32 g dm⁻³), superiores ao encontrado por Souza et., (2010a) sendo 15,45; 15,18 g dm⁻³, respectivamente.

Os valores médios de Ca1, Ca2, Mg1 e Mg2 (31,44; 17,21; 10,0 e 6,53) encontrados foram semelhantes aos encontrados por Souza et al. (2004) trabalhando em um Latossolo Vermelho eutroférico que verificou médias de 37,6; 24,3; 12,3 e 6,5 respectivamente. Já os valores V% verificados no presente trabalho foram maiores (64,11) na primeira profundidade e inferiores na segunda profundidade (50, 51) em relação aos encontrados por Souza et al. (2004) (59,3 e 57,3) na primeira e segunda produtividade respectivamente.

3.3 Matriz de Correlação

Na tabela 4 estão apresentadas as correlações lineares entre os atributos da planta, onde pode se observar a relação direta entre PRO x STD onde evidenciou que com o aumento da STD houve um aumento da PRO. As demais correlações significativas entre os atributos estão expressas na tabela 4.

Tabela 4. Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar.

Atributos ^(a)	Coeficiente de Correlação ^(b)							
	PRO	STD	BRI	POL	PUR	FIB	ARC	pH
STD	0,8742**	-	-	-	-	-	-	-
BRI	-0,0913	-0,0789	-	-	-	-	-	-
POL	-0,1507	-0,1913*	0,6867**	-	-	-	-	-
PUR	-0,1719	-0,2447**	0,1840*	0,6956**	-	-	-	-
FIB	0,0324	0,0572	0,6356**	0,4298**	0,3283**	-	-	-
ARC	0,1733	0,2453**	-0,1828*	-0,6947**	-0,9992	-0,3249**	-	-
pH	0,0021	0,0451	-0,0988	-0,1529	-0,4152**	-0,3647**	0,4137**	-
ATR	-0,1553	-0,1960*	0,6841**	0,9987**	0,7021**	0,4311**	-0,7016**	-0,1679

^(a) PRO, STD, BRI, POL, PUR, FIB, ARC pH e ATR são respectivamente, Produtividade de Cana-de-açúcar, Número de Plantas por m², Porcentagem de Sólidos Solúveis Totais, Porcentagem de Sacarose, Porcentagem de Pureza, Porcentagem de Fibras, Porcentagem de Açúcares Redutores do Caldo, pH do Caldo e Açúcares Totais Recuperáveis; ^(b) ** significativo a 1%, * significativo a 5%.

Os atributos de fertilidade ressaltaram a importância da matéria orgânica no solo, onde apresentou correlação significativa positiva nas duas profundidades com P, Ca, Mg, SB, T e V% e correlações negativas em ambas as profundidades com o Al e m,

tais correlações indicam que a M.O. contribui de forma significativa para a manutenção da fertilidade, mostrando que este é um atributo de grande importância para a conservação do potencial produtivo deste solo.

Na profundidade 1 (Tabela 5), a produtividade não apresentou correlação significativa com nenhum dos atributos de solo, e na profundidade 2 (Tabela 6) apresentou correlações significativas, porém baixas, com o P (0,199*) e H + Al (-0,179*). Souza et al. (2010a) afirmaram que baixa correlação da produtividade de culturas com atributos do solo vem sendo observada em diversas pesquisas (CERRI & MAGALHÃES, 2012; SANTI, 2007).

A correlação encontrada entre PRO e o P apresentou comportamento direto, sendo assim, 19,9 % da variância da PRO é explicada pela variância do P2, com o aumento do P2, haverá também um aumento da produtividade (PRO). E a PRO negativamente correlacionada com o H + Al discorda dos resultados encontrados por Cerri & Magalhães (2012), que encontraram uma correlação positiva (0,32) entre estes atributos.

Tabela 5. Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos químicos coletados nas camadas do solo de 0,00-0,25 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Atributos ^(a)	Coeficiente de Correlação ^(b)												
	pH1	MO1	P1	S1	Ca1	Mg1	K1	Al1	H+Al1	SB1	T1	V1	m1
pH1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MO1	0.3679**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P1	0.5523**	0.3991**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S1	-0.0621	-0.1291	-0.2596**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca1	0.8367**	0.3541**	0.4876**	-0.0454	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg1	0.8049**	0.2810*	0.4052**	-0.0262	0.8886**	-	-	-	-	-	-	-	-
K1	-0.2179*	0.0141	-0.0967	-0.2395**	-0.0910	-0.0935	-	-	-	-	-	-	-
Al1	-0.6252**	-0.2582**	-0.2317*	0.0114	-0.5566**	-0.5354**	0.2107*	-	-	-	-	-	-
Ha1	-0.5969**	-0.0162	-0.4594**	-0.0252	-0.3786**	-0.3749**	0.3688**	0.3470**	-	-	-	-	-
SB1	0.6884**	0.4676**	0.4676**	-0.0280	0.6603**	0.6708**	-0.1911*	-0.5200**	-0.3493**	-	-	-	-
T1	0.6473**	0.3607**	0.3111**	0.9081**	0.9081**	0.8412**	0.0874*	-0.4513**	0.0273	0.5655**	-	-	-
V1	0.8757**	0.2779*	0.5710**	0.8238**	0.8238**	0.7910**	-0.2728**	-0.6272**	-0.7586**	0.7444**	0.5637**	-	-
m1	-0.6967**	-0.3074**	-0.3180**	-0.6326**	-0.6326**	-0.6351**	0.1383	0.7990**	0.3586**	-0.6559**	-0.5364**	-0.7558**	-
PRO	0.0434	0.0271	0.1628	-0.0427	-0.0172	0.0080	0.1203	0.0250	-0.0820	-0.0727	-0.0447	0.0209	0.0781
STD	0.0212	-0.0323	0.1231	0.0118	-0.0437	-0.0101	0.0102	0.0270	-0.0672	-0.0281	-0.0689	0.0114	0.0831
BRI	0.08826	0.0619	0.0408	0.1364	0.0606	0.0569	0.0400	-0.1909*	-0.0091	0.0168	0.0608	0.0962	-0.2224*
POL	0.1065	0.0333	-0.0735	0.1885*	0.0814	0.0438	0.0545	-0.1365	0.0317	0.0047	0.0927	0.0469	-0.1828*
PUR	0.0528	-0.0271	-0.1462	0.1276	0.0520	-0.0037	0.0981	0.0061	0.0566	-0.0633	0.0665	-0.0299	-0.0675
FIB	0.0104	-0.0696	0.0609	0.1006	-0.0181	-0.0597	-0.0190	-0.0124	-0.1324	-0.0424	-0.0916	0.0742	-0.0776
ARC	-0.0456	0.0292	0.1515	-0.1264	-0.0466	0.0090	-0.0966	-0.0050	-0.0598	0.0692	-0.0620	0.0361	0.0654
pHC	0.0334	0.0763	0.1828*	-0.0625	0.0228	0.1102	-0.0797	-0.0305	-0.0593	0.2062*	0.0267	0.0884	-0.273
ATR	0.1059	0.0268	-0.0908	0.1977*	0.0780	0.0396	0.0489	-0.01395	0.0380	-0.0009	0.0914	0.0402	-0.1807

(a) PRO, STD, BRI, POL, PUR, FIB, ARC, pHC, ATR, pH, MO, P, S, Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, T, V e m, são respectivamente, Produtividade de Cana-de-açúcar, Número de Plantas por m², Porcentagem de Sólidos Solúveis Totais, Porcentagem de Sacarose, Porcentagem de Pureza, Porcentagem de Fibras, Porcentagem de Açúcares Redutores do Caldo, pH do Caldo e Açúcares, Totais Recuperáveis, pH do solo, teor de matéria orgânica do solo, teor de fósforo do solo, teor de enxofre do solo, teor de cálcio do solo, teor de magnésio do solo, teor de potássio do solo, teor de alumínio do solo, acidez potencial do solo, soma de bases do solo, capacidade de troca catiônica do solo, índice de saturação por bases do solo e índice de saturação por alumínio do solo, coletados nas camadas do solo de 0,00-0,25 m; (b) * significativo a 1%, ** significativo a 5%.

Tabela 6. Matriz de correlação entre atributos da cultura da cana-de-açúcar e atributos químicos coletados nas camadas do solo de 0,25-0,50 m de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Atributos ^(a)	Coeficiente de Correlação ^(b)												
	pH2	MO2	P2	S2	Ca2	Mg2	K2	Al2	H+Al2	SB2	T2	V2	m2
pH2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MO2	0.4481**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P2	0.4930**	0.4539**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	-0.1998*	-0.0977	-0.2489**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca2	0.6960**	0.3650**	0.3981**	-0.0397	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg2	0.6749**	0.3622**	0.4022**	0.0691	0.9001**	-	-	-	-	-	-	-	-
K2	0.1191	0.1929*	0.1438	-0.2033*	-0.0048	-0.0204	-	-	-	-	-	-	-
Al2	-0.7105**	-0.3168**	-0.2832**	0.1793*	-0.4915**	-0.4255**	-0.0961	-	-	-	-	-	-
Ha2	-0.4067**	-0.0648	-0.3072**	0.3259**	-0.1669	-0.1667	0.1026	0.2570**	-	-	-	-	-
SB2	0.6912**	0.3704**	0.3910**	-0.0242	0.9898**	0.9424**	0.0206	-0.4802**	-0.1635	-	-	-	-
T2	0.3992**	0.3094**	0.2512**	0.2294*	0.7261**	0.7443**	0.0888	-0.2229*	0.4410**	0.7364**	-	-	-
V2	0.7323**	0.3154**	0.4911**	-0.1010	0.7882**	0.7723**	-0.0753	-0.5584**	-0.6459**	0.7868**	0.2894**	-	-
m2	-0.6743**	-0.3583**	-0.3169**	0.0956	-0.6146**	-0.5416**	-0.0624	0.9205**	0.2426**	-0.6007**	-0.3244**	-0.6878**	-
PRO	0.0759	0.1733	0.1993*	-0.0316	0.0974	0.0584	0.0240	0.0669	-0.1787*	0.0962	-0.0357	0.1402	0.0486
STD	0.0441	0.1365	0.1853*	0.0014	0.0968	0.0618	-0.0377	0.0483	-0.1528	0.0880	-0.0228	0.1566	0.0149
BRI	-0.0224	0.1128	0.0345	-0.0221	-0.0582	-0.0483	0.1006	-0.0175	0.0600	-0.0553	-0.0192	-0.0614	0.0212
POL	0.1131	0.0710	0.0059	0.0742	-0.0011	0.0050	0.1604	-0.0987	0.0975	0.0055	0.0989	-0.0619	-0.0242
PUR	0.1613	0.0888	-0.0666	0.0679	-0.0061	-0.0338	0.1503	-0.1379	0.0548	-0.0077	0.0676	-0.0860	-0.0322
FIB	-0.0541	0.0230	0.0199	-0.1273	-0.0858	-0.1322	-0.0380	0.0434	-0.1041	-0.0975	-0.1764	-0.0234	0.0737
ARC	-0.1565	-0.0852	0.0702	-0.0660	0.0087	0.0361	-0.1538	0.1305	-0.0539	0.0102	-0.0649	0.0893	0.0255
Phc	-0.0528	-0.0196	0.0669	0.0008	0.0056	0.0333	-0.0449	-0.0541	-0.0213	0.0151	-0.0453	0.0741	-0.1055
ATR	0.1147	0.0735	-0.0120	0.0835	-0.0072	-0.0015	0.1573	-0.0966	0.1017	-0.0010	0.0962	-0.0697	-0.0200

(a) PRO, STD, BRI, POL, PUR, FIB, ARC, pHC, ATR, pH, MO, P, S, Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, T, V e m, são respectivamente, Produtividade de Cana-de-açúcar, Número de Plantas por m², Porcentagem de Sólidos Solúveis Totais, Porcentagem de Sacarose, Porcentagem de Pureza, Porcentagem de Fibras, Porcentagem de Açúcares Redutores do Caldo, pH do Caldo e Açúcares, Totais Recuperáveis, pH do solo, teor de matéria orgânica do solo, teor de fósforo do solo, teor de enxofre do solo, teor de cálcio do solo, teor de magnésio do solo, teor de potássio do solo, teor de alumínio do solo, acidez potencial do solo, soma de bases do solo, capacidade de troca catiônica do solo, índice de saturação por bases do solo e índice de saturação por alumínio do solo, coletados nas camadas do solo de 0,00-0,25 m; (b) * significativo a 1%, ** significativo a 5%.

3.4 Semivariogramas

Na tabela 7 estão apresentados os parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados ajustados para os componentes tecnológicos da cana-de-açúcar, bem como para os atributos químicos do solo no qual o experimento foi instalado. Assim, ficou atestado que, com exceção de BRI, FIB, Al1 e m%1 que apresentaram efeito pepita puro, todos os demais atributos mostraram dependência espacial.

Os atributos da cana apresentaram dependência espacial variando de média a muito alta, onde STD, PUR e ARC apresentaram ADE médio (54,7 %, 50 % e 50,1 %) e os atributos PRO, POL, PHC e ATR mostraram dependência espacial muito alta (90,4 %, 89,8 %, 92,4 %, 91 %) (Tabela 7), cujos modelos de semivariogramas foram do tipo exponencial. Em relação aos atributos de solo a dependência espacial também variou de média a muito alta. O Ca (50 % e 50 %) e Mg (52,1 % e 56,6 %) em ambas as profundidades apresentaram variabilidade média, e S2 e V%2 apresentaram

dependência alta (68,4 % e 61,8 %) e os demais atributos apresentaram dependência espacial muito alta ($80 \% \leq ADE < 100 \%$), cujos modelos de semivariograma foram do tipo exponencial. Os valores de ADE altos indicam que se tem melhor estrutura espacial e que maior precisão pode ser obtida no mapeamento das propriedades estudadas usando técnicas de geoestatística como a krigagem (KRAVCHENKO et al. 2006).

Tabela 7. Parâmetros dos semivariogramas simples e cruzados ajustados para atributos da cultura da cana-de-açúcar e de alguns atributos químicos do solo de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Atributos ^(a)	Parâmetros										
	Modelo ^(b)	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ + C)	Alcance (A ₀) (m)	r ²	SQR ^(c)	ADE ^(d)		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	r
<i>γ(h) simples dos atributos da planta</i>											
PRO (t ha ⁻¹)	exp.(219)	3,100.10	4,200.10	87,3	0,826	6,398. 10 ³	90,4	MA	3,18	0,972	0,585
STD (pl m ⁻²)	exp.(217)	7,78.10 ⁻¹	1,717	166	0,267	4,42.10 ⁻²	54,7	ME	0,26	0,968	0,517
BRI (%)	EPP	5,810.10 ⁻¹	5,810.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
POL (%)	exp.(217)	4,3.10 ⁻²	4,220.10 ⁻¹	30	0,143	6,28.10 ⁻⁴	89,8	MA	2,31	0,862	0,378
PUR (%)	exp.(217)	2,587	5,175	104,2	0,195	2,69.10 ⁻¹	50	ME	12,50	0,856	0,442
FIB (%)	exp.(EPP)	0,795	0,795	-	-	-	-	-	-	-	-
ARC (%)	exp.(217)	2,99.10 ⁻³	6.10 ⁻³	99	0,200	1,667.10 ⁻⁷	50,1	ME	0,10	0,857	0,447
pHC (%)	exp.(212)	9,40.10 ⁻⁴	1,238.10 ⁻²	40,5	0,078	4,059.10 ⁻¹	92,4	MA	1,25	0,765	0,279
ATR (kg t ⁻¹)	exp.(199)	3,05	3,374.10	46,8	0,156	1,830.10	91	MA	18,31	0,887	0,395
<i>γ(h) simples dos atributos do solo</i>											
pH1	exp.(208)	2,13.10 ⁻²	2,226.10 ⁻¹	50,7	0,095	5,485.10 ⁻⁴	90,4	MA	1,63	0,693	0,308
pH2	exp.(210)	9,8.10 ⁻³	1,666.10 ⁻¹	50,4	0,096	6,641.10 ⁻⁴	94,1	MA	1,27	0,740	0,310
MO1 (g dm ⁻³)	exp.(213)	7.10 ⁻¹	1,07.10	38	0,066	1,39	93,5	MA	8,73	0,638	0,257
MO2 (g dm ⁻³)	exp.(193)	8,5.10 ⁻¹	7,512	50,4	0,153	0,951	88,7	MA	3,10	0,832	0,391
P1 (mg dm ⁻³)	exp.(217)	2,600.10	2,689.10 ²	42,9	0,081	8,33.10 ²	90,3	MA	11,51	0,664	0,285
P2 (mg dm ⁻³)	exp.(188)	3,5	4,358.10	33	0,062	2,210.10	92	MA	6,07	0,547	0,249
S1 (mg dm ⁻³)	exp.(206)	1,020.10	7,919.10	68,40	0,172	1,56.10 ²	87,1	MA	3,98	0,791	0,415
S2 (mg dm ⁻³)	exp.(217)	3,660.10	1,160.10 ²	55	0,188	1,870.10 ²	68,4	AL	6,70	0,789	0,434
Ca1 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(217)	1,02.10 ²	2,04.10 ²	106	0,174	4,66.10 ²	50	ME	4,62	0,853	0,417
Ca2 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(217)	2,926.10	5,853.10	132,5	0,201	1,23.10	50	ME	1,28	0,928	0,448
Mg1 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(217)	1,047.10	3,187.10	105,3	0,255	5,17	52,1	ME	0,27	0,974	0,505
Mg2 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(217)	7,17	1,653	150	0,215	3,38	56,6	ME	0,25	0,966	0,966
K1 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(217)	9,3	1340.10 ⁻¹	55,8	0,145	3,293.10 ⁻⁴	93,1	MA	0,26	0,803	0,381
K2 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(212)	8.10 ⁻³	1,12.10 ⁻¹	53,7	0,127	5,210.10 ⁻⁴	92,9	MA	0,270	0,738	0,356
Al1 (mmol _c dm ⁻³)	EPP	4,709.10 ⁻¹	4,709.10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-
Al2 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(208)	1,750.10 ⁻¹	1,323.10	44,4	0,089	3,58.10	86,8	MA	0,470	0,664	0,298
H+Al1 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(193)	4,6	4,33.10	67,8	0,214	7,5.10	89,4	MA	2,710	0,880	0,463
H+Al2 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(217)	3,6	6.10	59,4	0,245	1,27.10 ²	94	MA	1,66	0,927	0,495
SB1 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(205)	2,68.10	2,111.10 ²	51,9	0,073	1,16.10 ²	87,3	MA	16,42	0,586	0,270
SB2 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(206)	5,50.10	1,1.10 ²	149,8	0,223	1,30.10 ²	99,2	MA	1,77	0,930	0,472
T1 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(217)	1,06.10 ²	3,07.10 ²	125,2	0,363	1,31.10 ³	95	MA	2,67	0,960	0,602
T2 (mmol _c dm ⁻³)	exp.(217)	7,6	1,74.10 ²	105,3	0,497	4,28.10 ²	95,4	MA	-2,04	1,043	0,705
V1 (%)	exp.(217)	2,29.10	2,02.10 ²	48,6	0,099	2,69.10 ²	87,2	MA	17,93	0,718	0,315
V2 (%)	exp.(213)	2,54.10	1,839.10 ²	54,6	0,072	1,065.10 ³	61,8	AL	19,57	0,613	0,268
m1 (%)	EPP	1,573.10	1,573.10	-	-	-	-	-	-	-	-
m2 (%)	exp.(217)	9,6	5,7.10	45,9	0,071	4,29.10	72,8	AL	2,65	0,622	0,266
<i>γ(h) cruzado planta x planta e solo</i>											
PRO=f(STD)	exp.(217)	1,83	2,282.10	84,9	0,882	1.10	92,0	MA	22,90	0,796	0,574
PRO=f(P2)	gau.(217)	4,06	2,396.10	81,8	0,841	4,26.10	83,1	MA	22,89	0,796	0,574

(a)PRO, STD, BRI, POL, PUR, FIB, ARC, pHC, ATR, pH, MO, P, S, Ca, Mg, K, Al, H+Al, SB, T, V e m são respectivamente, Produtividade de Cana-de-açúcar, Número de Plantas por m², Porcentagem de Sólidos Solúveis Totais, Porcentagem de Sacarose, Porcentagem de Pureza, Porcentagem de Fibras, Porcentagem de Açúcares Redutores do Caldo, pH do Caldo e Açúcares Totais Recuperáveis, pH do solo, teor de matéria orgânica do solo, teor de fósforo do solo, teor de enxofre do solo, teor de cálcio do solo, teor de magnésio do solo, teor de potássio do solo, teor de alumínio do solo, acidez potencial do solo, soma de bases do solo, capacidade de troca catiônica do solo, índice de saturação por bases do solo e índice de saturação por alumínio do solo; os índices 1 e 2 referem-se às profundidades de solo 0,00-0,25 e 0,25-0,50 m; (b)exp = exponencial, epp = efeito pepita puro, gau = gaussiano, com seus devidos pares de lags; (c)SQR = soma dos quadrados dos resíduos; (d)ADE = avaliador da dependência espacial, sendo MA = muito alta, AL = alta, ME = média e BA = baixo.

O valor do r^2 determinado de 0,826 para PRO, indicou ser esse atributo o de melhor ajuste semivariográfico, com ADE classificado em muito alto (90,4 %) e o modelo ajustado foi do tipo exponencial com alcance de 87,3 m. Gioia (2011) constatou valor do $r^2=0,882$ próximo ao presente trabalho, com modelo exponencial, porém diferindo no alcance que foi 274,8 e dependência espacial média (ADE = 50 %), trabalhando com uma malha de 118 pontos em um Argissolo Vermelho distrófico abrupto. Seguido pela T2 ($r^2 = 0,497$) na classificação dos atributos com melhor ajuste, que apresentou ADE muito alta (95,4%), modelo exponencial e um alcance de 105,3 m, diferindo assim dos resultados encontrados por Montanari et al. (2008) que trabalhando em um Latossolo Vermelho distrófico encontraram valores superiores de r^2 (0,68) e se ajustou ao modelo esférico com alcance de 259 m.

Na análise das cokrigagens (Tabela 7), o ajuste $PRO=f(P2)$, evidenciou que 84,1 % da variabilidade espacial do atributo PRO pode ser explicada pela variabilidade do P2. De acordo com Camargo et al., (2013) se a aplicação de fertilizantes for feita considerando apenas a média dos teores de P, em alguns locais podem ser sub ou superdimensionada. Grande parte da aplicação de fertilizantes fosfatados é realizada sem considerar a variabilidade espacial dentro de uma área de manejo, o que causa aumento no custo do processo produtivo, uma vez que áreas com pouca necessidade de P recebem as mesmas quantidades que as com deficiência (MARQUES JÚNIOR et al., 2008).

Buscando minimizar essa pratica pode-se recomendar práticas para as zonas de manejo, nas quais o P2 apresentou seus menores valores, visando elevar a produtividade de colmos de cana-de-açúcar por hectare (Figura 7d). Sendo assim, do ponto de vista espacial, o P2 apresentou-se como um satisfatório indicador da qualidade do solo estudado, quando considerado a PRO.

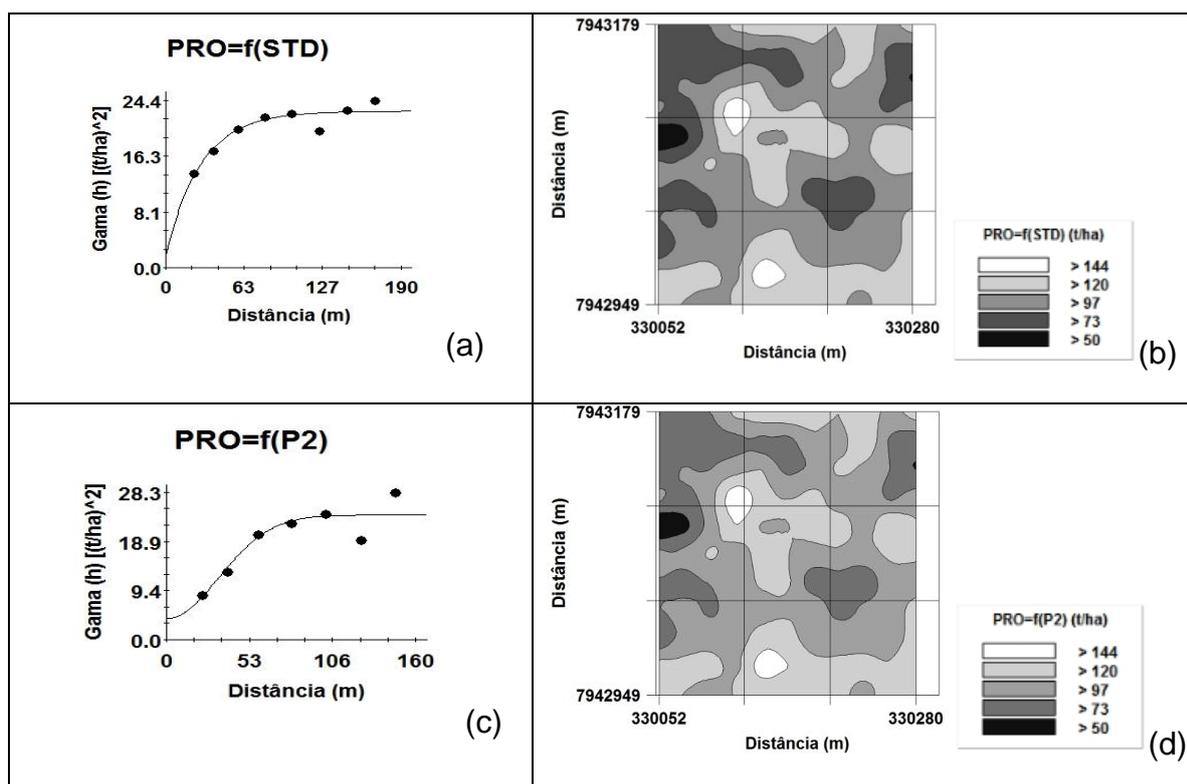


Figura 7. Semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem da PRO em função do STD, PRO em função do P2 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

Para o ajuste $PRO=f(STD)$, pode se observar que 88,2 % da variabilidade espacial da PRO pode ser explicada pela variabilidade do STD. Podendo, a partir dos dados desse atributo, localizar as zonas de manejo para a PRO. Constatando que onde ocorreram os maiores valores de número de plantas por m^2 (STD) foram mapeados os maiores valores de PRO (Figura 8b).

Esse comportamento provavelmente pode ser relacionado com o ajuste $PRO=f(P2)$, segundo Santos et al., (2002) o P desempenha papel importante no crescimento do sistema radicular, bem como no perfilhamento das gramíneas, que são fundamentais à maior produtividade. Sendo assim onde foram encontrados maiores teores de fósforo na profundidade 0,25-0,50 m, ocorreram melhor desenvolvimento nas plantas, resultando assim em maior produtividade. Podendo ser explicado pelo efeito da adubação fosfatada que proporciona aumento de produtividade e do número de perfilhos (CAIONE et al., 2011).

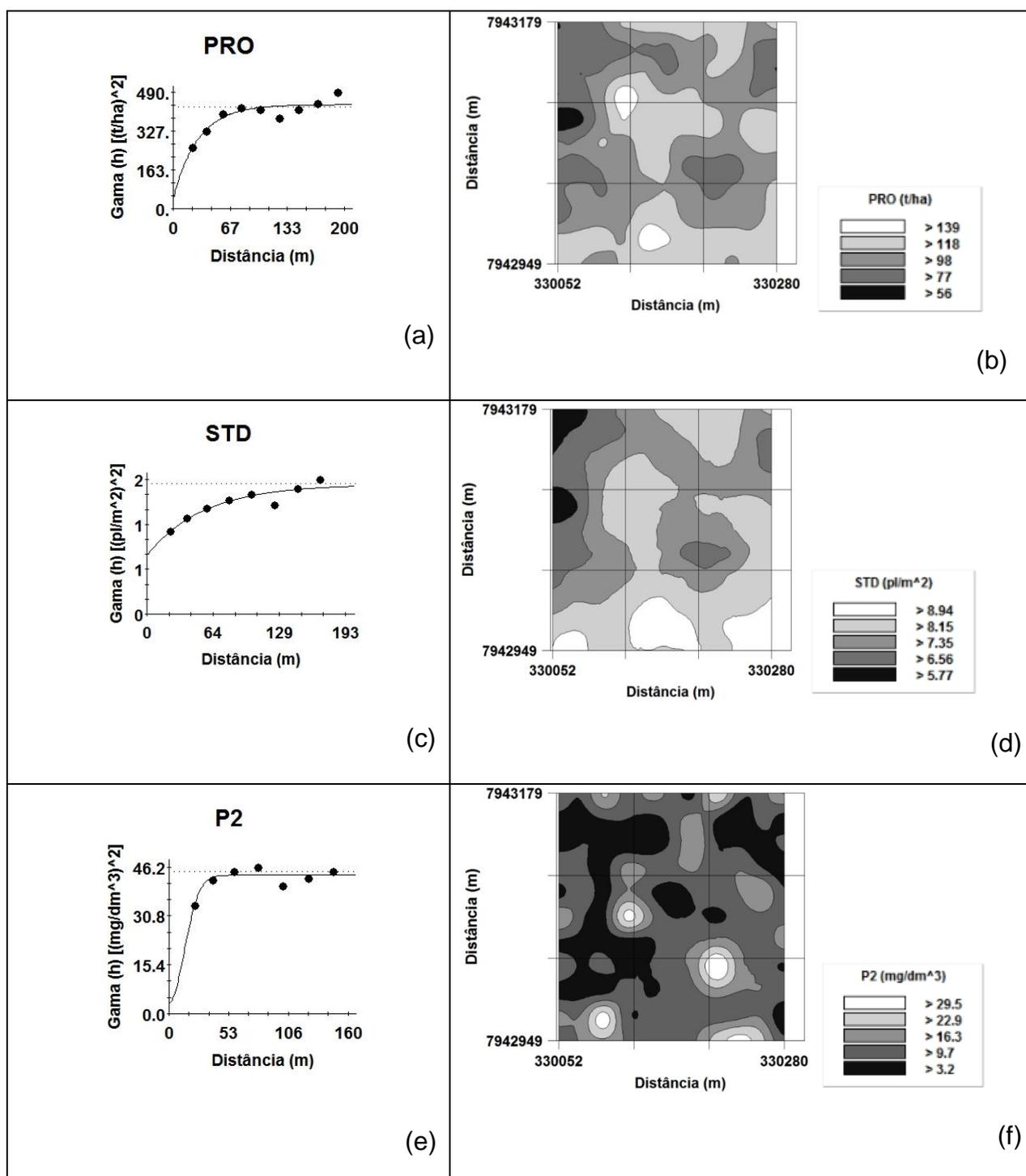


Figura 8. Semivariogramas simples e mapas de krigagem da PRO, do STD e do P2 de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Chapadão do Céu, GO.

4 CONCLUSÕES

Não existiram correlações significativas da produtividade com nenhum dos atributos de fertilidade da primeira camada de solo (0-0,25 m).

Os teores de fósforo do solo na camada de 0,25-0,50 m e o número de plantas por metro quadrado (*stand*), por evidenciarem apreciáveis correlações com a produtividade de colmos da cana-de-açúcar (19,93% e 87,42%), foram indicadores de zonas específicas de manejo do solo fortemente associados à produtividade da cana-de-açúcar.

Novas tecnologias de plantio de cana, onde a distribuição das mudas é realizada com precisão, devem contribuir com o aumento de produtividade dos canaviais brasileiros. Visto que 88,2% da variabilidade espacial da produtividade podem ser explicadas pela variação do *stand*.

O aumento do atributo STD está correlacionado em 18,52 % com os teores de fósforo em profundidade.

A matéria orgânica é fundamental para uma boa fertilidade do solo. Sua correlação é positiva e significativa com os principais atributos de fertilidade (P1, P2, Ca1, Ca2, Mg1, Mg2 e K2), ressaltando a correlação com o fósforo nas duas camadas de 0-0,25 m (39,9 %) e de 0,25-0,50 m (45,4 %).

Solos do cerrado brasileiro, na maior parte, têm baixos teores de fósforo. Manejos específicos que aumente o teor de fósforo em profundidade podem contribuir com um melhor perfilhamento e melhores produtividades, já que 84,1 % da variabilidade espacial do atributo PRO podem ser influenciadas pela variação do atributo P2.

A acidez potencial do solo na camada 0,25-0,50 m correlaciona negativamente com a produtividade de colmos (-17,87 %).

5 REFERÊNCIAS

BRAGA, J.A. Inter-relações da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um argissolo vermelho eutrófico do noroeste paulista. **Tese** (Mestrado em Sistema de Produção) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia, p.87, 2011.

CAIONE, G.; LANGE, A.; BENETT, C.G.S. & FERNANDES, F.M. Fontes de fósforo para adubação de cana-de-açúcar forrageira no cerrado. **Pesq. Agropec. Trop**, 41:66-73, 2011.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JUNIOR., J. & PEREIRA, G.T. Mineralogy of the clay fraction of Alfisols in two slope curvatures. III - Spatial Variability. **R. Bras. Ci. Solo**, 37:295-306, 2013.

CARVALHO, L. A.; JUNIOR, C. A. S.; NUNES, W. A. G. A.; MEURER, I.; JÚNIOR, W.S.S. Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no Centro-Oeste do Brasil. **R. Ci. Agrárias**, v.34, 2011.

CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.4, p.613-620, 2012.

CIRANI, C.B.S.; MORAES, M.A.F.D. Inovação na indústria sucroalcooleira paulista: os determinantes da adoção das tecnologias de agricultura de precisão. **Rev. Econ. Sociol. Rural Brasília** v.48. 2010.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2013** - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab 2013.

CONSECANA - Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do estado de São Paulo -. **Manual de instruções**. 5.ed. Piracicaba, 2006. 112p.

CORREIA, C. B. G.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS NETO, J.; CARVALHO, C. M.; SILVA, L. L. & FEITOSA, S. O. Cana-de-açúcar: parâmetros tecnológicos em função de diferentes lâminas de irrigação e adubação de cobertura. **Rev. Bras. Agric. Irrigada** v. 8, nº. 1, p. 26 – 37, 2014.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M. & PANOSSO, A. R. Produtividade da cana-de-açúcar: variabilidade linear e Espacial entre componentes tecnológicos e da produção. **Biosci. J.**, Uberlandia, v. 30, supplement 1, p. 390-400, 2014.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M. & MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob Sistema Plantio Direto. **R. Ci. Agron**, 43:453-461, 2012.

DUTRA FILHO, J.A.; MELO, L.J.O.T.; RESENDE, L.V.; ANUNCIÇÃO FILHO, C.J. & BASTOS, G.Q. Aplicação de técnicas multivariadas no estudo da divergência genética em cana-de-açúcar. **R. Ci. Agron**, 42:185-192, 2011.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 3 ed., 2013. 353p.

GDS: **Geostatistics for environmental sciences**. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 7.ed. 2004. 159p.

GIOIA, M.T. Produtividade e componentes produtivos da cana-de-açúcar correlacionados com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho distrófico. 2011, 91f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) Ilha Solteira, SP, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia, 2011.

GS+: Geostatistics for environmental sciences. 7.ed. Michigan, Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159p.

KRAVCHENKO, A.N.; ROBERTSON, G.P.; SNAP, S.S.; SMUCKER, A.J.M. Using information about spatial variability to improve estimates of total soil carbon. **Agronomy Journal**, 98: 823–829. 2006.

LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria prima para produção de açúcar e álcool. In DINARDO-MIRANDA, L. L., VASCONCELOS, A. C. M., LANDELL, M. G. A. **Cana-de-Açúcar** (eds.), Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 2008.

MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. & BARBIERI, D.M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **R. Biol. Ci. Terra**, 8:143-152, 2008.

MONTANARI, R.; LIMA, R.C.; BONINI, A.S.; MARQUES, L.S.; MINGUINI, R.; CARVALHO, M.P.; FERREIRO, J. & COSTA, N.R. Variabilidade dos atributos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto no cerrado brasileiro e produtividade da soja. **Cad. Lab. Xeol. Laxe**, 36:61-78, 2011.

MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PAZETO, R. J. & CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo e Argissolos. **Ciência Rural**, v.38, n.5, ago, 2008.

MONTANHA, G.K. Agricultura de Precisão Reduz Perdas na Lavoura de Cana. **R. Camp. Negoc.** p.1-8, 2011.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão: o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba, o autor, 2001. 83p.

OLIVEIRA, I.R.; TEIXEIRA, D.B.; PANOSSO, A.R.; CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Modelagem geoestatística das incertezas da distribuição espacial do fósforo disponível no solo, em área de cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, 37:1481-1491, 2013.

PIMENTEL GOMES, F.P. & GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. 309p. 2002. Piracicaba. Brasil.

RAIJ, van B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

SANTI, A.L. Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão. 2007. 175p. **Tese** (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SANTOS, H. Q.; FONSECA, D. M.; CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ, V. H.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. Níveis críticos de fósforo no solo e na planta para gramíneas forrageiras tropicais, em diferentes idades. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 173-182, 2002.

SCAPARI, M. S.; BEUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 2008. Cap. 2, p. 47-56.

SCHLOTZHAVER, S.D. & LITTELL, R.C. **SAS system for elementary statical analysis**. 2.ed. Cary, SAS, 1997. 441p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysys of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, 52:591-611, 1965.

SILVA, M.A. Interação genótipo x ambiente e estabilidade fenotípica de cana-de-açúcar em ciclo de cana de ano. **Bragantia**, 67:109-117, 2008.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; CEDDIA, M.B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, 67:203-211, 2008.

SOUZA, Z.M.; CERRI, D.G.P.; COLET, M.J.; RODRIGUES, L.H.A.; MAGALHÃES, P.S.G. & MANDONI, R.J.A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ci. Rural**, 40:840-847, 2010a.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ci. Rural**, 40:48-56, 2010b.

SOUZA, Z.M.; BARBIERI, D.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & CAMPOS M.C.C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na

aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciênc. Agrotec**, 31:371-377, 2007.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & MOREIRA, L.F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ci. Rural**, 34:1763-1771, 2004.

VANNI, S.M. **Modelos de regressão: estatística aplicada**. São Paulo, Legmar Informática & Editora, 1998. 177p.