

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ANÁLISE E MODELAGEM DA INFLUÊNCIA DE ATRIBUTOS
DO SOLO E PLANTA NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE
DA CANA-DE-AÇÚCAR**

FRANCELINO AUGUSTO RODRIGUES JÚNIOR

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ANÁLISE E MODELAGEM DA INFLUÊNCIA DE ATRIBUTOS
DO SOLO E PLANTA NA PRODUTIVIDADE E QUALIDADE
DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese de Doutorado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola, na área de
concentração em Máquinas Agrícolas.

FRANCELINO AUGUSTO RODRIGUES JÚNIOR

Orientador: Prof. Dr. Paulo S. Graziano Magalhães

Co-orientador: Dr. Domingos Guilherme Pellegrino Cerri

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

R618a Rodrigues Júnior, Francelino Augusto
Análise e modelagem da influência de atributos do
solo e planta na produtividade e qualidade da cana-de-
açúcar / Francelino Augusto Rodrigues Júnior. --
Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientadores: Paulo Sérgio Graziano Magalhães,
Domingos Guilherme Pellegrino Cerri.

Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Modelagem de processos. 2. Cana-de-açúcar -
Qualidade. 3. Geoestatística. 4. Análise de
componentes principais. I. Magalhães, Paulo Sérgio
Graziano. II. Cerri, Domingos Guilherme Pellegrino.
III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Analysis and modelling of influence of soil and plant
attributes on sugar cane yield and quality

Palavras-chave em Inglês: Process modelling, Sugar cane - Quality,
Geostatistics, Principal component analysis

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

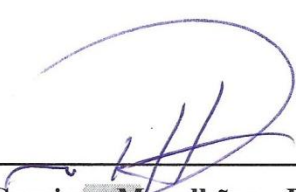
Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Gener Tadeu Pereira, José Paulo Molin, Edgar Gomes
Ferreira de Beauclair, Heitor Cantarella

Data da defesa: 29-02-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

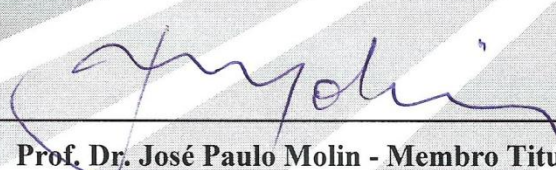
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Francelino Augusto Rodrigues Junior**, aprovada pela Comissão Julgadora em 29 de fevereiro de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



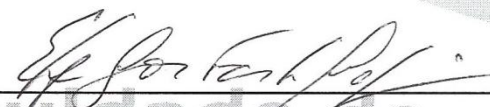
Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira - Membro Titular
FCAV/Unesp



Prof. Dr. José Paulo Molin - Membro Titular
Esalq/USP



Prof. Dr. Edgar Gomes Ferreira de Beauclair - Membro Titular
Esalq/USP



Dr. Heitor Cantarella - Membro Titular
IAC

Aos meus pais Francelino Augusto Rodrigues e Lucélia Maria da Silva Rodrigues,
pela confiança, dedicação e incentivo.

DEDICO

À Deus, pelas bênçãos concedidas na minha vida.

À minha companheira, Taísa Marotta Brosler, pelo incentivo e apoio durante essa
caminhada.

Aos meus pais, pelo amor incondicional.

À família Marotta e Brosler, pela felicidade proporcionada durante os momentos de
descontração – em especial ao Reinaldo, Lumenia, Eric e Larissa.

Aos meus irmãos Sandro e Renata, pelo amor, amizade e apoio.

À minha sobrinha Isabela e afilhado Murilo, pela alegria.

AGRADEÇO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Paulo S. Graziano Magalhães da FEAGRI/UNICAMP pela amizade, transparência e dedicação com que me orientou ao longo desses anos, em todos os momentos, inclusive no incentivo contínuo, sempre rompendo barreiras.

Ao Dr. Domingos Guilherme Pellegrini Cerri, pela orientação, conselhos e atenção despendida ao longo do doutoramento.

Ao pesquisador Henrique Franco do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol, pelas conversas e conhecimento repassado nas discussões da tese.

Ao Professor Jerry A. Johann da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pela amizade, conselhos e conhecimento repassado ao longo do doutoramento.

À Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI/UNICAMP e à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos do programa de doutoramento e doutorado sanduíche.

Ao pesquisador Doutor Rob Bramley, do *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)* – Adelaide/SA, pela supervisão das atividades realizadas durante o programa de doutorado sanduíche realizado na Austrália, acrescentando demasiadamente à minha formação profissional e pessoal.

Aos diretores, funcionários e demais amigos da Usina São João Açúcar e Álcool de Araras–SP, por cederem a área e apoiarem na logística de coleta de dados, em especial aos funcionários de campo, Ademir, Paulo e toda sua equipe, que sem seus esforços seria impossível à execução das coletas no campo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP expressamos nosso reconhecimento pelo auxílio à pesquisa (Processo 2008/09265-9), qual proporcionou as condições financeiras de apoio a esse experimento.

À futura mãe dos meus filhos Taísa Marotta Brosler, pelo amor incondicional, faltando palavras para descrever o apoio e incentivo na superação dos obstáculos que cruzaram essa caminhada.

Aos casais de amigos Cinthya & Edinho e Eli & Henrique, pelas risadas e amizade incondicional ao longo dessa caminhada, proporcionando momentos especiais de descontração.

Aos amigos de laboratório, Thiago Brasco, Henrique Leandro Silveira, Luis Alfredo Pires Barbosa e Marcelo José da Silva, pela amizade sincera, ajudas no decorrer do experimento e sugestões, não podendo esquecer as gargalhadas durante o convívio no laboratório.

À todos aqueles que, de alguma forma contribuíram nas diversas etapas do trabalho,

MUITO OBRIGADO!

“Only two things are infinite, the universe and human stupidity, and I'm not sure about the former.”

Albert Einstein

RESUMO

Dentro da mesma área de produção agrícola existe variabilidade espacial e temporal da produtividade e qualidade da cultura. Técnicas de Agricultura de Precisão (AP) são usadas para a quantificação dessa variabilidade, podendo assim distinguir áreas de maior e menor rentabilidade e qualidade, possibilitando então a identificação dos fatores que ali influenciaram para tal evento. É neste contexto que se insere o projeto proposto utilizar as técnicas de AP para identificar no campo a relação solo-productividade-qualidade da matéria prima. Este trabalho teve como objetivo geral verificar como a produtividade e a qualidade da cana-de-açúcar (porcentagens de brix, pol e fibra) variam dentro do mesmo talhão; verificar como os atributos físicos e químicos do solo, nitrogênio foliar afetam a produtividade e qualidade da cana, e analisar padrões de variabilidade temporal dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar ao longo dos ciclos estudados. Para realização do trabalho foi selecionada e georreferenciada uma área de 10 ha, cultivada com cana-de-açúcar pertencente à Usina São João pertencente ao Grupo SJC Bioenergia, localizada no município de Araras – SP. Nesta área foi feita uma grade de amostragem de 30x30m, utilizada para a coleta dos atributos físicos e químicos do solo, e parâmetros de qualidade da cana, totalizando 117 pontos amostrais. Todas as amostragens foram realizadas nos anos de 2008 (cana planta), 2009-2010 (primeira soca) e 2011 (segunda soca). Para identificar a influência das variáveis em estudo na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar foi feita a análise de correlação linear, com base em zonas de manejo previamente determinadas. Para a seleção das variáveis a fim de propor modelos matemáticos foi utilizado a Análise de Componentes Principais e *Stepwise*, utilizando como variáveis resposta a produtividade e os parâmetros de qualidade de cana-de-açúcar. Por meio de técnicas de geoestatística foi verificada a estabilidade temporal dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar ao decorrer dos ciclos e as porcentagens de erros de estimação dos modelos confeccionados. Não foi possível identificar padrões de estabilidade temporal da qualidade da cana-de-açúcar ao longo do experimento, contudo, com a metodologia proposta pode-se identificar a influência que os atributos do solo e planta possuem na produtividade e nos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar, sendo os teores de matéria orgânica, P, K, pH e H+Al as variáveis que ditaram os modelos propostos, sendo que esses obtiveram coeficientes de determinação variando de 6 a 80%, com valores de resíduos decimais e mostrando distribuição normal, com porcentagens de erros de estimação na sua maioria entre $\pm 1\%$.

ABSTRACT

Within the same crop area there is a spatial and temporal variability in yield and crop quality. Techniques for Precision Agriculture (PA) are used to quantify this variability, thus being able to identify areas of high and low profitability and quality, hence enabling the identification of the factors that may influence for such an event. In this context this project has as proposal by PA techniques identify in the field the relationship between the soil and yield/quality of the raw material. This study aims to assess how the yield and sugar cane quality parameters (Brix, pol and fibre) vary within the field; verify how the physical chemical soil attributes and leaf nitrogen affects the yield and quality of the sugar cane, and analyzes the pattern of the temporal stability of the sugar cane quality parameters throughout the crop cycles. The experiment was carried out an sugar cane crop area selected and georeferenced of 10 ha, belonging to the São João Mill (SJC Bioenergia), located in the Araras – SP. In this area a 30x30m grid sampling was used to sample quality sugar cane parameters and physical-chemical soil attributes, totaling 117 sampling points. All samplings were performed during the years 2008 - plant cane, first ratoon (2009-2010) and second ratoon (2011). To identify the influence of the variables on yield and quality of sugar cane, Pearson's linear correlation analysis was performed, based on predetermined management zones. Principal component analysis and stepwise approach was used to select the variables in order to propose mathematical models, using as response variables the yield and sugar cane quality parameters. By means of geostatistics it was verified the temporal stability of the sugar cane quality parameters during the crop cycles and the percentages of estimations errors made by the models. It was not possible to identify patterns of temporal stability for the quality parameters along the experiment, but with the proposed methodology, it was possible to identify the influence that soil attributes and plant had in yield and sugar cane quality parameters, being the soil organic matter, P, K, pH e H+Al the variables which driven the proposed models, who had R^2 ranging from 6 to 80% with decimals residues showing normal distribution and percentages of estimation errors mostly within $\pm 1\%$ along the whole experiment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área experimental - Fazenda Campo Alto, Usina São João, Araras-SP. Adaptado do Google Earth.....	12
Figura 2 – Balanço hídrico mensal. Fonte: UFSCar/CCA.	13
Figura 3 - Fotos da área experimental em Agosto de 2010.	14
Figura 4 - Área experimental – Google Earth, novembro 2010.	14
Figura 5 – Avaliação da incidência de cigarrinhas.....	16
Figura 6 – Amostragem de solo.	17
Figure 7 - Outlier detection.....	28
Figure 8 – Soil management zones.	29
Figure 9 - Surface maps.	34
Figure 10 – Experimental Layout - Grid sampling, refined grid points and burned area.....	40
Figure 11 - Spatial variation of Brix, pol and fibre in the study area.	53
Figura 12 – Mapas temáticos de Brix, pol e fibra da área experimental.....	67
Figura 13 – a) Monitor de produtividade para cana-de-açúcar (SIMPROCANA [®] , ENALTA Ltda, São Carlos, SP); b) detalhes da balança e do Módulo das células de carga da balança...70	70
Figura 14 – Dados brutos de produtividade – 2008.	71
Figura 15 – Dados de produtividade e mapas resultantes da interpolação - 2010.	72
Figura 16 – Mapa de produtividade – 2011.....	75
Figura 17 – Grade amostral não atingida pela queima.	76

LISTA DE TABELAS

Table 1 - Descriptive analysis for the values data	27
Table 2 - Correlation between soil physical & chemical attributes with sugar cane quality parameters.....	30
Table 3 - Variograms parameters.....	33
Table 4 - Descriptive analysis for physical and chemical soil attributes and sugar cane quality parameters.....	43
Table 5 – Selected variables from the First PCA.....	45
Table 6 - Eigenvalues and eigenvectors of each principal component for 2008 data analysis – Second PCA used for 2009 sugar cane quality parameters modelling.....	46
Table 7 - Eigenvalues and eigenvectors of each principal component for 2010 data analysis – Second PCA used for 2011 sugar cane quality parameters modelling.....	46
Table 8 - Predictive models for Brix, pol and fibre	48
Table 9 – Descriptive analysis for the cleaned measured, estimated and residuals data for Brix, pol and Fibre – 1 st and 2 nd ratoon.	49
Table 10 - Semivariograms obtained for Brix, pol and fibre using measured and estimated values.....	50
Table 11 - Sub-levels area percentages of the estimation error (E.E.) maps	52
Tabela 12 – Análise descritiva dos dados físicos e químicos do solo e parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar	59
Tabela 13 – Modelos para Brix, pol e fibra	60
Tabela 14 - Estatística Descritiva para valores reais, estimados e resíduos	63
Tabela 15 – Semivariogramas obtidos para Brix, pol e fibra utilizando os valores mensurados e estimados	64
Tabela 16 – Porcentagens das sub-áreas dos mapas de erros de estimação (E.E.).....	66
Tabela 17 – Pesos registrados pelo sistema de monitoramento de produtividade e pela balança da usina.....	74
Tabela 18 – Estatística Descritiva para os dados de produtividade pós processados, antes (cru) e depois (limpo) pré-tratamento de limpeza	74
Tabela 19 – Análise de variância do modelo de regressão (ANOVA).....	76
Tabela 20 – Estatística Descritiva para valores reais, estimados e resíduos	77

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Agricultura de precisão como ferramenta investigativa na cana-de-açúcar	4
2.2. Influência de atributos do solo na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. Caracterização da área	11
3.2. Métodos de amostragem.....	15
4. DISCUSSÃO GERAL.....	18
4.1. Coleta dos dados e análises de correlação entre atributos do solo e parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar e estabilidade temporal da qualidade	18
4.2. Modelagem da produtividade e dos parâmetros de qualidade de cana-de-açúcar com base em atributos no solo e nitrogênio foliar.....	20
5. CORRELATION BETWEEN SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND SUGAR CANE QUALITY PARAMETERS BASED ON MANAGEMENT ZONES	22
5.1. Abstract.....	22
5.2. Introduction	22
5.3. Material and Methods.....	24
5.4. Results and Discussion	26
5.5. Conclusions	34
6. MODELING QUALITY PARAMETERS OF SUGAR CANE BASED ON SOIL ATTRIBUTES AND LEAF NITROGEN.....	35
6.1. Abstract.....	35
6.2. Introduction	36
6.3. Material and Methods.....	38
6.4. Results and Discussion	41
6.5. Conclusions	54
7. USO DE ATRIBUTOS DO SOLO PARA MODELAGEM DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	55
7.1. Resumo	55
7.2. Introdução.....	55
7.3. Material e Métodos.....	56
7.4. Resultados e Discussão.....	57
7.5. Conclusão	68
8. ANÁLISE DOS DADOS DE PRODUTIVIDADE	69
8.1. Seleção de variáveis e análise de regressão múltipla	75
9. CONCLUSÕES GERAIS.....	80
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
11. APÊNDICE	89
11.1. Estatística descritiva dos dados coletados em 2008 – 1º ciclo	89
11.2. Estatística descritiva dos dados coletados em 2009-2010 – 2º ciclo	90
11.3. Estatística descritiva dos dados coletados em 2011 – 3º ciclo	91
11.4. Variogramas ajustados para os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar – valores reais.....	92
11.5. Variogramas ajustados para os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar – valores estimados pelos modelos	93

11.6. Fotos - Trabalho de campo 2008	94
11.7. Fotos - Trabalho de campo 2009/2010	96
11.8. Fotos - Trabalho de campo 2011	98

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e essa cultura está entre as três mais importantes para o país. A produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2010/11 foi de 624 milhões de toneladas, utilizando 8 milhões de hectares. Do total da produção para a indústria, 288,7 milhões de toneladas foram usadas na fabricação de açúcar e 336,2 milhões de toneladas na produção de etanol (CONAB, 2011).

Com o forte incremento na demanda por etanol, a tendência é que a área plantada com cana-de-açúcar continue a crescer, sendo estimado que na safra de (cana-de-açúcar) 2024/25, no Brasil, deverão ser plantados 17 milhões de hectares (LANDELL *et al.*, 2010). Embora tenha cerca de 90 milhões de hectares disponíveis para a expansão da agricultura no Brasil (LEITE *et al.*, 2009), a cana-de-açúcar deve tomar o lugar não só de novos campos de produção mas sim principalmente deve ter o objetivo de aumentar a produtividade atual de aproximadamente 81 Mg ha^{-1} , tendo em vista que, nas áreas de cana-de-açúcar no Brasil, o potencial genético é de 381 Mg ha^{-1} (WACLAWOVSKY *et al.*, 2010).

Para atingirmos estes números com sustentabilidade e para que o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, que passará a ser conhecida como cana-energia, é preciso que nestas novas áreas de plantio sejam aplicadas tecnologias modernas que tragam, não só maiores retornos financeiros ao produtor, mas também causem menores impactos ao ambiente. A Agricultura de Precisão (AP) pode vir a ajudar a contemplar tais necessidades, colaborando com a identificação de fatores limitantes, possibilitando assim a melhoria da produtividade e qualidade da matéria-prima.

As técnicas de AP, além de colaborarem com a preservação do meio ambiente, racionalizando a aplicação de fertilizantes e, por consequência, obtendo maior otimização do sistema em que a cultura se encontra, podem contribuir para o aumento da produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Ademais, o uso de tais técnicas possibilita um estudo de caráter investigativo, viabilizando a análise da variabilidade de diversos fatores que possam influenciar na qualidade e rendimento do produto final.

A quantidade e composição química da cana-de-açúcar entregue para o processamento industrial é dependente de diversos fatores tais como: condições climáticas; atributos físicos, químicos e biológicos do solo; tipo de cultivo; variedades empregadas, idade do colmo entre outros.

Entre os fatores relacionados à produção e qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar estão os atributos físicos e químicos do solo. MAGALHÃES & CERRI (2008) afirmam que a correlação simples entre os atributos do solo e produtividade da cana-de-açúcar não é suficiente para explicar a variabilidade espacial da cultura, sugerindo que outras características além dos atributos de solo sejam analisadas.

O uso de modelos de produtividade e a identificação do grau de importância e influência que os diversos atributos do solo possuem para cada ciclo da cultura, podem fornecer informações para as adubações e práticas de manejos mais direcionadas. Ainda assim, fornecer informações para o desenvolvimento de ferramentas na área de sensores e atuadores em tempo real.

Diante do exposto pode-se inferir que a quantificação da variabilidade espacial da produtividade e dos atributos físicos e químicos do solo e da planta pode contribuir para o gerenciamento da cultura e que, por meio dessas informações, é possível o mapeamento dos atributos em questão, a elaboração de mapas de prescrição e a identificação dos atributos que individualmente ou em conjunto influenciam na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar.

Recentemente, Bramley (2009) em uma revisão sobre 20 anos de pesquisa em Agricultura de Precisão, recomenda entre vários temas para trabalhos futuros em AP, a análise e investigação em cana-de-açúcar da relação entre produtividade, parâmetros de qualidade e propriedades do solo, como base para um manejo mais direcionado.

Levando em conta a importância de definir quais os fatores que influenciam na produção e na qualidade da cana-de-açúcar, este trabalho baseia-se na hipótese de que é possível identificar a influência que atributos do solo e planta possuem na produtividade e nos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar, podendo então propor modelos matemáticos que expliquem tal evento.

Para tanto, este trabalho apresenta como objetivo geral investigar como a qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar (% de Brix, pol e Fibra) varia em função de atributos físicos e químicos do solo e concentrações de nitrogênio foliar, tendo como objetivos específicos (i) gerar informações temporais de atributos químicos do solo e de qualidade da matéria prima em área comercial com uma grade amostral densa; (ii) propor modelos matemáticos de regressões múltiplas para previsão de qualidade da cana-de-açúcar em anos subsequentes, baseado em atributos físicos e químicos de solo e nitrogênio foliar; iii) avaliar a

validade destes modelos por meio de análise comparativa de resultados utilizando geoestatística. Para atingir os objetivos, os resultados e discussões foram divididos em capítulos, os quais se constituem em artigos científicos que foram ou serão submetidos à publicação em revistas arbitradas com corpo editorial.

O corpo desta tese compõem-se inicialmente de introdução, revisão bibliográfica e material e métodos. O Capítulo 03, referente ao material e métodos, aborda a descrição da área e detalhamento dos eventos compreendidos durante o experimento, bem como detalhes dos métodos de amostragem utilizados nas coletas de dados, que são comuns para os demais capítulos.

O Capítulo 04 refere-se à discussão geral da tese, apresentando as análises dos dados abordadas ao longo dos capítulos seguintes.

O Capítulo 05 refere-se ao artigo *“Correlation between chemical soil attributes and sugar cane quality parameters based on management zones”*, o qual foi apresentado com resultados parciais na “10th International Conference on Precision Agriculture – 2010” e foi submetido à revista Soil & Tillage.

O Capítulo 06 refere-se ao artigo *“Modelling quality parameters of sugar cane based on soil attributes and leaf nitrogen”*, submetido à revista Journal of Precision Agriculture.

O Capítulo 07 refere-se ao artigo *“Uso de atributos do solo para modelagem dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar”*, diferindo-se do capítulo anterior no que diz respeito à abordagem estatística para seleção das variáveis, será apresentado no “11th International Conference on Precision Agriculture – 2012, Indiana/USA” e posteriormente será enviado à revista Biosystems Engineering.

O Capítulo 08 corresponde aos dados de produtividade obtidos durante os três ciclos, assim como a análise da influência dos atributos do solo na produtividade.

O Capítulo 09 corresponde à conclusão geral desta tese.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Agricultura de precisão como ferramenta investigativa na cana-de-açúcar

No desenvolvimento de uma cultura existe variabilidade espacial e temporal da produtividade dentro da mesma área, principalmente devido à disponibilidade nutricional e às propriedades físicas e químicas do solo. Assim, determinando essa variabilidade, podem-se identificar algumas causas que podem ser corrigidas em tempo hábil, aumentando assim a produtividade (DIKER & BAUSCH, 2003).

A adoção de ferramentas de Agricultura de Precisão (AP) se ajusta a propósitos no que diz respeito à investigação, pois trata de elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e o sistema de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados. No entanto, dentro deste conceito de AP na aplicação em cana-de-açúcar, para atingir o patamar de conhecimento já existente em outras culturas mais exploradas por esta técnica, várias pesquisas devem ainda ser conduzidas, possibilitando a geração de informações úteis e precisas sobre produtividade e qualidade da cultura, incluindo a identificação dos seus fatores limitantes.

Entre os fatores relacionados à produção estão os atributos físicos e químicos do solo. Tais atributos, além de variar no espaço, podem variar no tempo, para uma dada posição no espaço (BERNOUX, 1998a e 1998b). Esta variação, decorrente da ação de agentes naturais, assim como da ação do homem, deve se manifestar com maior intensidade em algumas propriedades que em outras (BRAGATO & PRIMAVERA, 1998, BURKE *et al.*, 1999, SLOT *et al.*, 2001). A variabilidade de propriedades do solo tem sido abordada por vários autores sendo atribuída a diversos fatores, tais como características do material de origem e os fatores de formação, os quais não atuam pontualmente, mas sim segundo um determinado padrão.

Nos estudos de variabilidade espacial na ciência do solo, o esquema amostral espacial é o fator que mais influencia na eficiência e no custo da pesquisa. Amostragens em malhas adensadas fornecem clara visão da variabilidade espacial de uma variável regionalizada, porém, com custos mais elevados quando comparados com esquemas amostrais menos densos (GROENIGEN *et al.*, 1999). Portanto, é preciso aliar um número mínimo de pontos amostrados com a máxima representação do local amostrado, otimizando o esquema de amostragem e barateando os custos (MONTANARI *et al.*, 2005).

Johnson & Richard Jr. (2005), analisando a distribuição espacial de atributos de fertilidade do solo (P, K, Ca, Mg, pH, matéria-orgânica, N estimado, CTC, Ca/Mg e S), produtividade e parâmetros de qualidade da cana durante três anos verificaram que tais atributos obtiveram correlação espacial com alcances variando de 26 a 241m e 26 a 187m respectivamente, com exceção da ATR e porcentagem de fibra. Concluíram que tais dados indicaram variabilidade existente na área comercial em estudo, justificando o manejo sob o uso de agricultura de precisão.

No entanto, de acordo com resultados encontrados por Cerri (2005), analisando a distribuição espacial de atributos químicos e físicos de uma área cultivada com cana-de-açúcar em dois anos subsequentes de coletas de dados, o primeiro ano de coleta utilizando uma malha de 50 x 50 m expôs alcances entre 87 e 611m e para o segundo ano utilizando uma malha de 100 x 100m obteve alcances entre 187 a 1045m.

Podem ser citado inúmeros trabalhos no que diz respeito ao estudo da variabilidade espacial de propriedades químicas do solo sob cultivo de cana-de-açúcar e também propriedades da planta, apresentando diferenças em alcances e malhas amostrais (SOUZA *et al.*, 2004a; SOUZA *et al.*, 2004b; MELLO BERNER *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2007; MARQUES JR. *et al.*, 2008; SCARPARI & BEAUCLAIR, 2008; CHAVES & FARIAS, 2009; SANTOS & CARDIM, 2009). Pode-se inferir então que a dependência espacial de atributos químicos do solo e planta pode variar temporal e espacialmente.

Já trabalhos como o de Johnson & Richard Jr. (2009) comparou a aplicação à taxas variáveis de calcário com a aplicação uniforme em áreas cultivadas com cana-de-açúcar durante três anos consecutivos, avaliando o aumento de produção e qualidade. Os autores não constatarem diferenças significativas entre os dois tratamentos, podendo tais resultados terem sido afetados por níveis nutricionais das áreas início do experimento. Contudo, foi observada uma economia de calcário, gerada na aplicação a taxa variada baseada em mapas de solo, quando comparada à taxa uniforme. Portz *et al.* (2011) mostraram a aplicabilidade do uso de um sensor multiespectral *on-the-go* para indicar a demanda de N em áreas de cana-de-açúcar. Os autores mostraram altas correlações entre os valores obtidos pelo sensor, biomassa e nitrogênio absorvido nas plantas da cana-de-açúcar, apresentando o potencial que tal tecnologia possui no desenvolvimento de algoritmos para o manejo de aplicação nitrogenada em cana-de-açúcar.

Todos os trabalhos citados são exemplos do potencial da AP como ferramenta investigativa, tanto no que diz respeito ao aumento da eficiência na produtividade e qualidade da matéria-prima, como também na geração de informações sobre os fatores limitantes a tais aumentos.

2.2. Influência de atributos do solo na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar

Segundo Rosseto *et al.* (2010), dentro das áreas aptas para a produção de cana-de-açúcar, definem-se cenários de produção, os quais são resultados da somatória das interações dos atributos da superfície e subsuperfície do solo, considerando-se ainda o grau de declividade onde esses solos ocorrem no cenário, associadas com as condições climáticas. Os componentes que elencam esse cenário de produção são representados pela profundidade, a qual tem direta relação com a disponibilidade de água e com o volume de solo explorado pelas raízes; pela fertilidade, como fonte de nutrientes para as plantas; pela textura, relacionada com os níveis de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e disponibilidade hídrica; e pela água, como parte da solução do solo, que é vital para o desenvolvimento das plantas.

O sistema de colheita mecanizada crua para cana-de-açúcar, segundo Cantarella & Rosseto (2010), proporciona ao solo uma cobertura espessa de material vegetal (palha), contendo entre 6 e 8 Mg ha⁻¹ de matéria seca (média de 14 Mg ha⁻¹ na região Centro-Sul). Essa palhada aumenta a reciclagem dos nutrientes, implicando em alterações no manejo da adubação da cana-de-açúcar, sendo tais alterações possivelmente decorrentes das modificações nos atributos físicos e químicos do solo resultantes da manutenção da palhada, tendo grande aumento na retenção de água no solo e mantendo também altas taxas de infiltração de água (ROSSETO *et al.*, 2010).

As alterações dos atributos químicos do solo se dá por colaboração da mineralização da cobertura vegetal remanescente da colheita, sendo que a mineralização desse material vegetal é dependente de fatores ambientais como a temperatura, umidade, aeração e principalmente da composição química da palhada (NG KEE KWONG *et al.*, 1987; SIQUEIRA & FRANCO, 1988), podendo assim haver liberação principalmente de nutrientes como N, K, Ca e Mg (OLIVEIRA *et al.*, 1999) colaborando então para a reciclagem dos nutrientes do solo, os quais influenciam na produção e qualidade da matéria-prima.

Trabalhos como o de Ribeiro *et al.* (1984), Prado *et al.* (1998), Landell *et al.* (1999), Landell *et al.* (2003) e Braga (2011) demonstram a influencia dos atributos do solo na produtividade da cana-de-açúcar com respostas distintas para a camada arável e camada subsuperficial do solo, e também para diferentes ciclos da cultura.

Johnson & Richard Jr. (2005) analisaram também a correlação de atributos de fertilidade do solo com produtividade e parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar durante três anos. Os autores obtiveram correlações não significativas, baixas a moderadas, sugerindo estudos futuros para a verificação da influência dos micronutrientes nos parâmetros de qualidade e produtividade da cana.

Magalhães & Cerri (2008) avaliaram a possível correlação entre produtividade de cana-de-açúcar com alguns atributos físicos e químicos do solo, inclusive MO, V%, índice de cone, CTC. Os autores observaram que as correlações entre a produtividade de cana-de-açúcar com os atributos físicos e químicos do solo são em geral moderadas ($< 0,5$) e concluíram que a correlação simples entre os atributos do solo e produtividade da cana-de-açúcar não é suficiente para explicar a variabilidade espacial da cultura, sugerindo que outras características além dos atributos de solo sejam analisadas.

Estas afirmações contradizem Beauclair (1994) apud Landell (2003) que considera coeficientes de determinação entre 0,2, em modelos que não levam em consideração efeitos do clima, excelentes.

Recentemente, Braga (2011) analisou as correlações entre produtividade e qualidade da cana-de-açúcar com alguns atributos físicos (resistência à penetração e umidade gravimétrica) e químicos (macronutrientes) do solo durante um ciclo da cultura. As principais correlações obtidas foram entre os atributos do solo com produtividade, volume e população de plantas; sendo que tais correlações variaram entre 0,18 (volume de plantas x CTC) e 0,36 (população de plantas x K). Já as correlações entre os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar e os atributos do solo foram em sua maioria não significativas estatisticamente, obtendo a correlação de 0,20 para Brix com saturação por alumínio, 0,22 e 0,18 para fibra com Al e saturação por alumínio respectivamente. Tais correlações podem estar atreladas ao ciclo em que a cultura foi estudada, podendo mudar ao longo dos ciclos; no entanto as correlações com produtividade assemelham-se aos resultados obtidos por Magalhães & Cerri (2008), Souza *et al.* (2008) e Souza *et al.* (2010).

Sartori *et al.* (2008) avaliaram o efeito da adubação nitrogenada da cana-planta, com uréia e o efeito do N e S, aplicado na cana-soca na produtividade e parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar, concluindo que a adubação nitrogenada influenciou positivamente a produtividade de colmos e que a ATR aumentou com a aplicação de sulfato de amônio.

No entanto, clima e manejo mais adequados possuem maiores influências na produtividade final da cana-de-açúcar do que a fertilidade do solo na camada arável (BITTENCOURT *et al.*, 1990). Entretanto, a produtividade mostra correlações significativas com atributos químicos presentes na camada sub-superficial (RIBEIRO *et al.*, 1984; PRADO *et al.*, 1998) e essas correlações são diferentes para cana planta e cana soca (LANDELL *et al.*, 1999).

Segundo Landell *et al.* (2003) a condição química do horizonte subsuperficial é determinante da produtividade da cana-de-açúcar, ampliando-se essa correlação com a produtividade com o avançar dos cortes. Sendo assim, o uso de modelos de produtividade e a identificação do grau de importância dos diversos atributos do solo para cada ciclo da cultura pode fornecer informações para as adubações e práticas de manejo em diferentes ambientes. (BOOTE *et al.*, 1996).

Kumar & Verma (1997), aplicando regressão múltipla entre dados de produtividade de cana-de-açúcar com quantidades de N, P, K, Zn e Cu foliar, obtiveram R^2 de 93%, e R^2 de 95% para dados de produtividade de açúcar com quantidades de N, P, K e Cu foliar; afirmando que para as condições do experimento, análise foliar de nutrientes pode ser usada como meio de predição da produtividade de cana e açúcar.

Landell *et al.* (2003) avaliaram os efeitos dos atributos químicos de subsuperfície de Latossolos da região Centro-Sul do Brasil, na produtividade agrícola dos três primeiros cortes de clones e na variedade RB72454 de cana-de-açúcar. Fizeram estudos de correlação e análise de regressão múltipla com as variáveis selecionadas pelo procedimento stepwise em função do R^2 . Os atributos químicos influenciaram na produtividade da cana-de-açúcar, principalmente no terceiro corte, obtendo R^2 de 0,31 para os clones, sendo o modelo confeccionado em função da saturação de bases e fósforo. No caso da variedade RB72454, foi obtido um R^2 de 0,47 no modelo confeccionado em função da soma de bases, teor de cálcio e matéria orgânica.

Estes resultados confirmam os de Beauclair (1991) apud Landell (2003) que demonstrou que o pH a profundidades de 0-0,25m e que o P aplicado no plantio tem uma boa

correlação com a produtividade da cana-de-açúcar. Entretanto, divergem de Braga (2011) que utilizou metodologia semelhante para análise de regressão múltipla entre produtividade e atributos do solo em cana-de-açúcar de segundo corte, variedade SP 79-1011. O autor obteve R^2 de 0,14 para o modelo de regressão utilizando a resistência à penetração, umidade gravimétrica e matéria orgânica na camada de 0-0,20 m como parâmetros. Já entre os atributos de 0,2-0,4 m de profundidade, umidade gravimétrica foi a única variável selecionada, apresentando R^2 de 0,055 em relação à produtividade. Podem-se apontar inúmeras razões para tais divergências, desde a variedade utilizada para cada experimento, até condições climáticas, tipos de solo, ciclos da cultura e tipo de manejo empregado.

As respostas à aplicação de micronutrientes em cana-de-açúcar têm sido pouco frequentes, como já mostravam os trabalhos pioneiros de Alvarez & Wutke (1963), Espironelo (1972), Alvarez *et al.* (1979), entre outros, entretanto, aumentos de produção de colmos em função da aplicação de micronutrientes têm sido relatados esporadicamente (ALVAREZ & WUTKE, 1963; AZEREDO & BOLSANELLO, 1981; MARINHO & ALBUQUERQUE, 1981; ALVAREZ, 1984; CAMBRIA *et al.*, 1989; ORLANDO FILHO *et al.*, 2001; FRANCO *et al.*, 2008). Tendo em vista a falta de informação no que diz respeito à influência dos micronutrientes na cana-de-açúcar, justifica-se a inclusão dos micronutrientes nas análises de solos para futura averiguação de suas influências individualmente ou em conjunto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar.

Considerando-se que a qualidade da matéria-prima¹ é definida como o conjunto de características que o produto deve apresentar atendendo as exigências da indústria por ocasião do processamento, verifica-se que há uma variação natural dos valores destes parâmetros, que deve ser compatível com o processo. A ocorrência de fatores limitantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar pode resultar em prejuízos para a qualidade, com reflexos diretos e indiretos sobre o processamento industrial dos colmos (MUTTON, 2008). Kunert (2000) define este fator limitante como estresse, caracterizando-o como resultante de

¹ Entre os parâmetros de importância da qualidade da cana-de-açúcar encontra-se o Brix, pol e o teor de fibra. Brix é a porcentagem aparente de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada impura; pol é a porcentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares e o teor de fibra é a matéria insolúvel em água contida na cana (FERNANDES, 2003).

condições sub-ótimas, incluindo as de clima, limitações de nutrientes, competição biológicas e seus danos, além da influência do homem.

Frente às possibilidades que se projetam para a agroindústria da cana-de-açúcar, a identificação das perdas de açúcares no setor agrícola é fundamental. Segundo Mutton & Mutton (2005) durante a formação do canavial, as perdas de produção iniciam-se a partir da avaliação da fertilidade do solo e as práticas de adubação, irrigação e fertirrigação. Outra fase importante a ser considerada é a de desenvolvimento do canavial. Nesta etapa, verifica-se que a condição climática é de suma importância, chegando a ser decisiva para o estabelecimento da cultura. Pode-se dar atenção a fatores que podem ser controlados, além da avaliação da fertilidade do solo, o controle inadequado de plantas daninhas e ocorrência de pragas e doenças.

Neste contexto, verifica-se que a quantidade e composição química da cana-de-açúcar entregue para o processamento industrial é dependente de diversos fatores, os quais constituem um complexo cenário que abarca desde propriedades climáticas, do solo e da planta, até o sistema de colheita/carregamento e transporte dos colmos (MUTTON, 2008).

De acordo com Dinardo-Miranda *et al.* (2000) e Gonçalves *et al.* (2003) a cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata*) além de reduzir a produtividade de colmos, altera a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, utilizada como matéria-prima na indústria, reduzindo o teor de açúcar nos colmos e aumentando o teor de fibra. Também são frequentes os prejuízos causados pela praga aos processos industriais, pois os colmos mortos e secos, em decorrência de seu ataque, diminuem a capacidade de moagem e, como muitas vezes, estão rachados e deteriorados, os contaminantes dificultam a recuperação de açúcar e inibem a fermentação (DINARDO-MIRANDA, 2003). Dinardo-Miranda *et al.* (2007) constataram por meio de análise da distribuição espacial de cigarrinha-de-raízes, em campo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua, que os alcances das mesmas foram de 33 a 53m.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área

Para realização do trabalho foi selecionada e georreferenciada uma área de 10 ha, cultivada com cana-de-açúcar pertencente à Usina São João Açúcar e Álcool (USJ), localizada no município de Araras – SP. O georreferenciamento foi feito por meio de aparelho receptor DGPS (GEOExplorer® III, Trimble® Navigation Limited - USA), com correção pós processada, utilizando-se de arquivos de correção obtidos da estação base referencial da Escola Superior Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) localizada em Piracicaba – SP. Na área em estudo localizada nas coordenadas geográficas 22°23'37,96" S e 47°18'31,4" O, apresenta a variedade SP80-3280 e o plantio foi realizado em 26 de setembro de 2007. O solo é caracterizado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com textura argilosa.

A área experimental teve como adubação em plantio a aplicação de torta (38 Mg ha⁻¹) em sulco (taxa uniforme), com concentração de 3% de P, 1,69% de N e 0,43% de K a 55% de umidade. Como tratos culturais ao decorrer do primeiro ciclo, foram feitos o controle de plantas daninhas por meio de capina química costal/mecanizada com aplicação de herbicida e aplicação de inseticida de cobertura para controle de pragas. Após a primeira colheita, foram feitos os mesmos tratos culturais para controle de plantas daninhas e pragas, exceto adubações de cobertura, pois fora determinado anteriormente não haver adubações na área experimental durante todo o desenvolvimento do experimento.

A área apresenta colheita mecanizada desde a safra de 2006. Na Figura 1 é possível visualizar a localização e croqui da área experimental, juntamente com a grade amostral e sentido da declividade (1,2%).

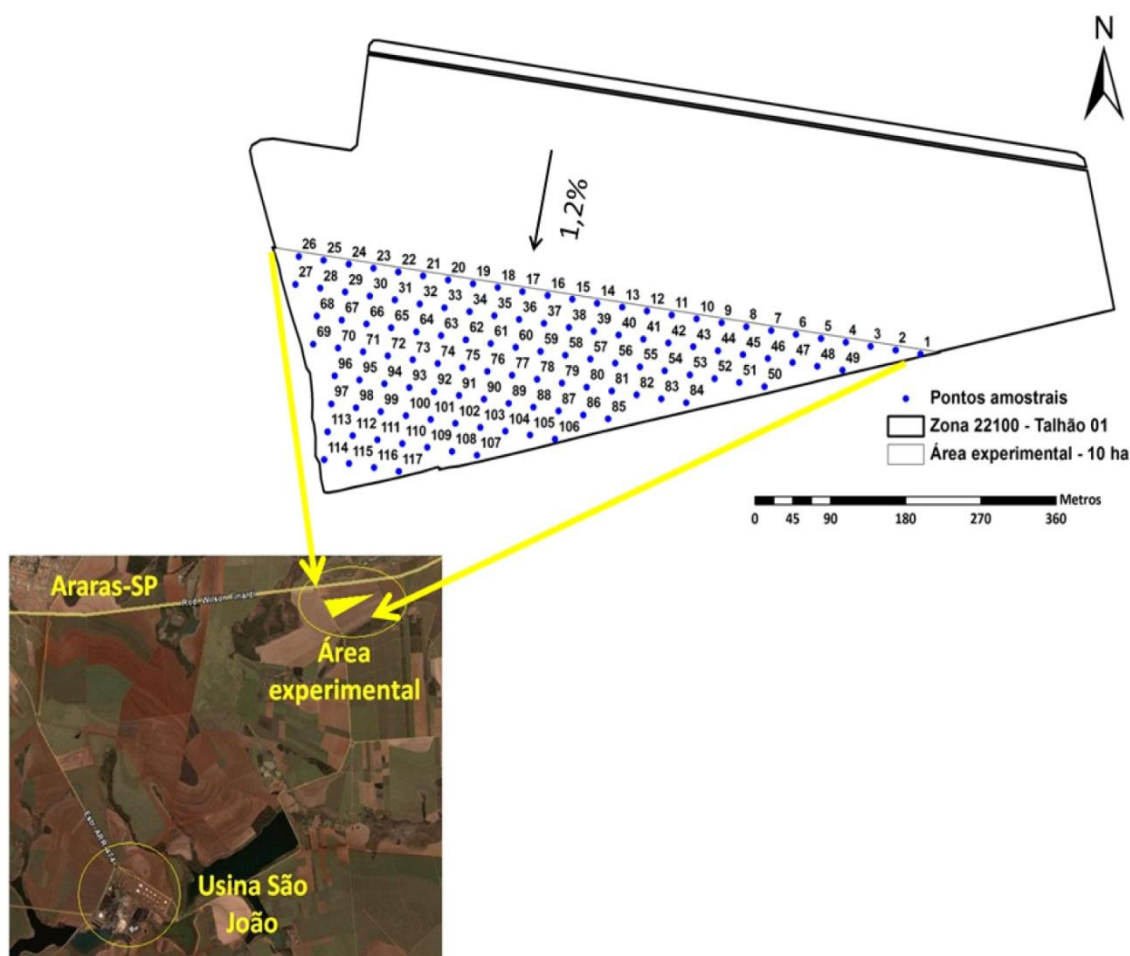


Figura 1 - Área experimental - Fazenda Campo Alto, Usina São João, Araras-SP. Adaptado do Google Earth.

A determinação da grade amostral foi feita por meio do programa computacional ArcGIS após a correção dos dados do perímetro, sendo os pontos georreferenciados da grade transferidos para o receptor DGPS possibilitando serem encontrados por navegação para a realização da amostragem na grade criada. A grade de amostragem criada foi de 30x30 m no sentido da linha de plantio, a qual foi utilizada para a coleta das amostras de solo para análise dos atributos físicos e químicos do solo nas profundidades de 0-0,2 m e 0,2-0,5 m, verificação da incidência de cigarrinha e plantas para análise dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar, totalizando 117 pontos amostrais na área.

O clima da região é do tipo CWa, mesotérmico de inverno seco, segundo o sistema Köppen (Oliveira *et al.*, 1982). A distribuição das chuvas segue o regime típico das zonas tropicais de baixa altitude, verão chuvoso e inverno seco. O balanço hídrico histórico assinala

significativo período de deficiência hídrica, que se estende geralmente de maio a setembro. As médias de temperatura no inverno chegam em junho e julho a valores inferiores a 15° C, superando 22° C em janeiro e fevereiro. A Figura 2 mostra o balanço hídrico mensal da região em que o experimento estava alocado para o período de setembro de 2007 a julho de 2011, período compreendido pelos três ciclos da cultura em que se deu o experimento.

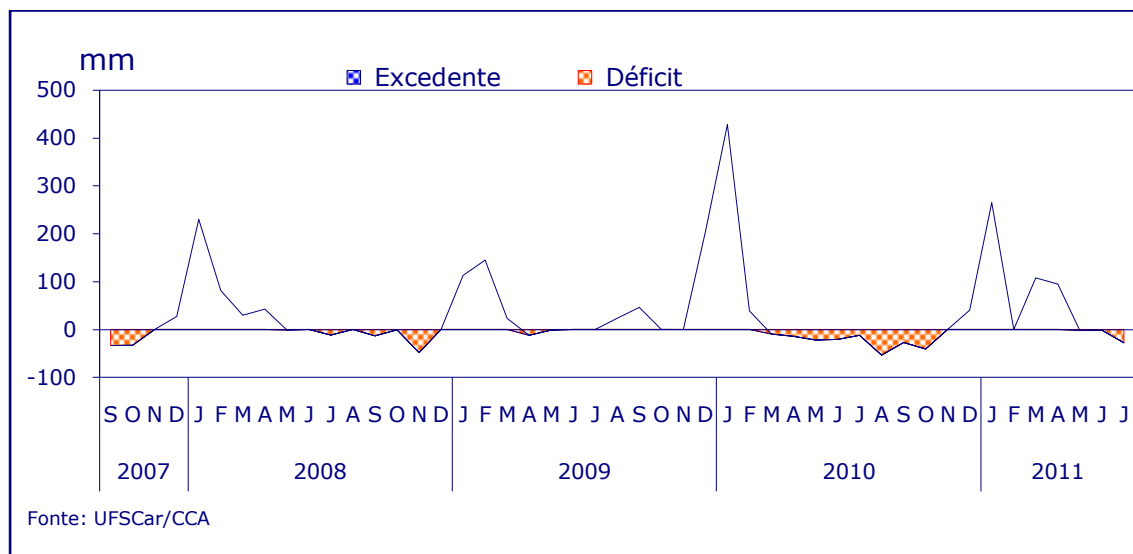


Figura 2 – Balanço hídrico mensal. Fonte: UFSCar/CCA.

O histórico pluviométrico para o ano corrente do primeiro ciclo a partir do mês de plantio apresentou precipitação anual de 1734 mm, tendo duas importantes exceções em relação a média da região, precipitação nula em julho e extensão do período de déficit hídrico até novembro. Para o segundo ciclo, a média de precipitação foi de 2451 mm, não possuindo meses com precipitação nula e ainda, é possível verificar no gráfico que no período entre novembro e dezembro, a região apresentou alto excedente hídrico. Para o terceiro ciclo a média de precipitação foi de 1603 mm, mostrando um período de déficit hídrico, compreendido entre abril e novembro de 2010.

A primeira colheita ocorreu em dezembro de 2008, fechando o primeiro ciclo da cultura com 15 meses. Antecedendo a colheita foi executada a amostragem de planta e após a colheita foi feita a amostragem de solo nos mesmos pontos amostrais². A colheita do segundo

² Maiores detalhes são expostos no próximo item

ciclo da cultura, programada para dezembro de 2009, ocorreu em março de 2010 devido a problemas de excesso de chuvas no final de novembro e meados de dezembro, antecipando o final da safra pela USJ.

Durante o terceiro ciclo, devido ao período de estiagem durante os meses de abril a novembro de 2010, tendo como períodos críticos os meses de agosto e setembro, totalizando cerca de 50 dias sem chuva nas proximidades do experimento, a área experimental sofreu dois incêndios acidentais, iniciando nas estradas que contornam o talhão, avançando sobre o mesmo. Nas Figura 3 e Figura 4 é possível observar o dano causado pelo incêndio e também uma imagem proveniente do banco de dados do Google Maps (<http://g.co/maps/jn9nq>) de novembro de 2010, mostrando o dano causado na área.



Figura 3 - Fotos da área experimental em Agosto de 2010.

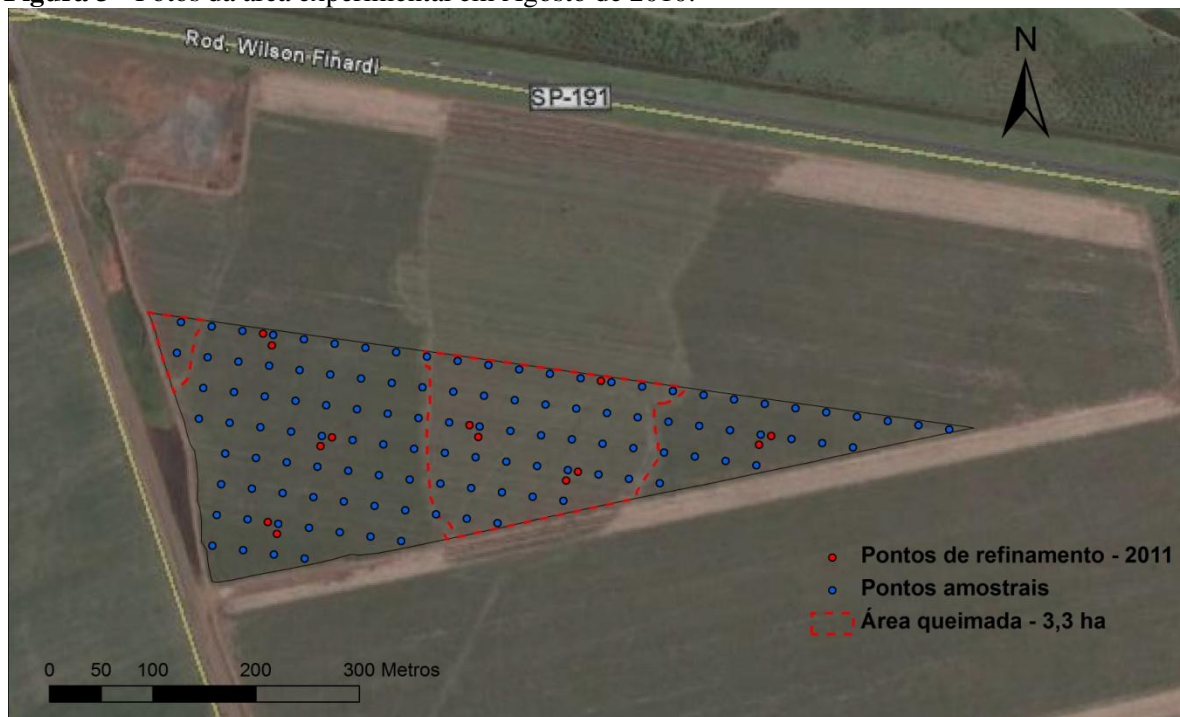


Figura 4 - Área experimental – Google Earth, novembro 2010.

A área queimada totalizou 3,3 ha, 33,8% do total da área experimental e 39 pontos dentre os 117 totais da grade amostral. O ocorrido acarretou em um crescimento tardio da área atingida, comparando-se com o restante do experimento. Devido os diferentes estágios da cultura, optou-se por adiar a terceira colheita para meados de julho de 2011, com o intuito de a área atingida pelo fogo alcançar estágio mais avançado de maturação. Tal evento causou prejuízos no cronograma do projeto. Na Figura 4 também é possível visualizar pontos de refinamento da grade amostral. Tais pontos foram adotados para a coleta de plantas e solo feita em 2011, aumentando de 117 para 130 pontos amostrais.

3.2. Métodos de amostragem

Com exceção do segundo ciclo (primeira soca), as amostragens de plantas para análise de qualidade da cana-de-açúcar foram realizadas antecedendo as colheitas, em dezembro de 2008 (cana planta), dezembro de 2009 (primeira soca – sendo colhida em março de 2010) e junho de 2011. Cada ponto amostral foi constituído de 10 colmos seguidos na mesma fileira, aleatoriamente coletados em dois metros lineares, sendo que em cada planta foi amostrada a terceira folha a partir do ápice onde a bainha é totalmente visível (folha +3), sendo levadas para análise laboratorial de nitrogênio foliar utilizando o método de Kjeldahl.

A determinação dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar (% de Brix, pol e fibra) foi realizada nos 10 colmos do ponto amostral segundo normas da Consecana (2006), analisadas pelo Laboratório de Análises e Simulação Tecnológica/LAST da Universidade Federal de São Carlos. A amostra a ser analisada é preparada em aparelhos desintegradores que mantêm as suas características originais. A amostra desintegrada é homogeneizada em betoneiras adaptadas com raspador, de maneira a impedir a retenção de amostra no fundo do tambor. A extração do caldo, a pesagem do bagaço úmido e as leituras de Brix e de pol são feitas imediatamente após a desintegração e homogeneização das amostras.

Para a avaliação da incidência da cigarrinha, no ato da coleta dos colmos para análise dos parâmetros de qualidade, foram avaliadas as fileiras em que se encontravam os 10 colmos que constituíram os pontos amostrais, sendo que foram contadas eventuais ninfas e adultos nas raízes. Para visualizar os insetos nas raízes, a palha foi afastada da linha de cana-de-açúcar (Figura 5) e foi feita a retirada dos insetos da região radicular, na subsuperfície do solo. Tal

avaliação foi feita no intuito de justificar possíveis prejuízos na qualidade da cana-de-açúcar que poderiam advir da infestação de cigarrinhas nas raízes.



Figura 5 – Avaliação da incidência de cigarrinhas.

Após a amostragem de planta, foi realizada a colheita da cana-de-açúcar utilizando uma colhedora (marca CASE, modelo C7700, ano 2001), equipada com o monitor de produtividade SIMPROCANA® - fabricado pela ENALTA Soluções Tecnológicas. O Sistema de Pesagem de Rebolos de Cana-de-açúcar (SPRC) que compõem o SIMPROCANA utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida e é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo. Estes dados, juntamente com as informações obtidas por um GPS instalado na colhedora, permitem, com o auxílio de um SIG, a elaboração de um mapa digital que representa a superfície de produção para a área colhida. Além destes equipamentos, sensores para indicar a rotação da esteira, ângulo do elevador e status de operação também fazem parte do sistema. Estas informações são necessárias para que um programa dedicado, instalado em um computador de bordo localizado na cabine da colhedora, gerencie as informações e gere ao final, uma base de dados que represente a superfície de produtividade colhida.

Após as colheitas, foram feitas as amostragens de solo na grade regular proposta para as profundidades de 0-0,20 m e 0,2-0,5 m com auxílio de trados. Cada amostra foi composta por três subamostras, as quais foram retiradas em torno do ponto amostral (Figura 6), nas entre linhas. As análises em laboratório dos atributos químicos (macro e micro nutrientes para ambas profundidades) foram feitas segundo Rajj *et al.* (1987) e físicos (frações do solo em

ambas profundidades para o primeiro ano apenas) foram feitas utilizando os métodos descritos por Embrapa (1997).



Figura 6 – Amostragem de solo.

Todas as amostragens de solo foram realizadas nos anos de 2008, 2010 e 2011, sendo que a partir da colheita de 2008 não foram feitas adubações na área experimental até o término do experimento.

Todas as análises de dados, incluindo a análise exploratória descritiva para identificação de dados discrepantes e da normalidade das distribuições, análise multivariada para a confecção dos modelos de predição da qualidade da cana-de-açúcar e análise dos dados advindo do monitor de produtividade, foram executadas utilizando os programas computacionais JMP 8.0.2 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA), VESPER 1.6 (The University of Sydney, Sydney, Au) e ArcGIS 9.3 (ESRI, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA) e compõem os capítulos consequentes, sendo expostos com maiores detalhes nos mesmos.

4. DISCUSSÃO GERAL

O presente trabalho baseou-se na hipótese de que é possível identificar a influência que atributos do solo e planta possuem na produtividade e nos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar, podendo então propor modelos matemáticos que expliquem tal evento. Para tanto, este trabalho foi constituído de diversas etapas a fim de elucidar a hipótese em questão, gerando informações concisas para sua constatação.

A seguir será apresentada uma breve discussão geral de cada uma das principais etapas que compuseram essa pesquisa.

4.1. Coleta dos dados e análises de correlação entre atributos do solo e parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar e estabilidade temporal da qualidade

A pesquisa iniciando em 2008 teve como primeira fase a amostragem de planta em 117 pontos amostrais na área de 10 ha em malha regular de 30 x 30 m. Essas amostras constituíram-se de informações dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar antecedendo a colheita. Para execução da colheita foi instalado o monitor de produtividade SIMPROCANA a fim de obter dados de produtividade ao longo de toda área. Por fim, deu-se a amostragem de solo nos mesmos pontos amostrais da grade, no intuito de avaliar as concentrações dos atributos químicos do solo em profundidade de 0-0,2 e 0,2-0,5 m e teores de argila e areia.

Nos anos seguintes repetiu-se a mesma logística de amostragem, exceto a colheita que foi impedida de ser realizada por excesso de chuva na data estabelecida para colheita, acabando por se tornar “cana bisada” (cana colhida na safra seguinte), sendo colhida em março de 2010 e posterior amostragem de solo na mesma sistemática do ano anterior. Neste ano ainda, por consequência de longo período de estiagem, ocorreram dois incêndios na área, atingindo cerca de 1/3 da área total, tal incidente ocorreu em meados de agosto, havendo então diferenças de estágios da cultura na segunda cana-soca.

Por fim para o terceiro ciclo (segunda cana-soca), a qual a amostragem de planta, seguida da colheita e amostragem de solo, que se deu durante os meses de junho e julho, fechou a coleta de dados do experimento, permitiu então a execução das análises necessárias para investigação da influência que os atributos químicos do solo tiveram na qualidade e produtividade da cana-de-açúcar. Para a amostragem desse ano foram acrescentados à grade

amostral 13 pontos de refinamento, distribuídos aleatoriamente na área, espaçados 10 m do ponto mais próximo da grade original.

Para a investigação das correlações simples entre tais atributos, foi proposta a separação da área em zonas de manejo, com base nos teores de argila e areia constatados no primeiro ano do experimento. Com a delimitação em Zonas mais e menos Argilosas, partiu-se para análises individuais de correlação entre os atributos químicos do solo e qualidade da cana-de-açúcar, utilizando os atributos do solo do ano base com parâmetros de qualidade do ano seguinte, dados de solo coletados após a colheita de 2008 confrontados com a qualidade coletada em 2009 e dados de solo coletados após a colheita de 2010 com qualidade obtida em 2011.

Foi constatado que tais correlações ocorreram com diferentes coeficientes entre as zonas, e mais, apresentando coerência a luz das referências bibliográficas em relação aos atributos do solo que participam na maturação e crescimento da cana-de-açúcar, obtendo como principais correlações, coeficientes negativos para P, Ca, Mg em solo argiloso com Brix e pol para a primeira-soca – sendo a planta amostrada em dezembro de 2009, ápice de maturidade do ciclo – e coeficientes positivos com fibra em solo argiloso para a segunda-soca – planta amostrada em junho, período no qual o balanço hídrico (Figura 2) mostrou-se excedente, colaborando para o aumento de fibra. As diferenças nas correlações obtidas entre solo mais argiloso e solo menos argiloso podem ser explicadas segundo Oliveira *et al.* (2011), os quais averiguaram que solos com maior teor de umidade favorecem a absorção de Ca pela planta – favorecendo tais correlações tanto em fase de maturação (Brix e pol) como em fase de crescimento (fibra).

Já a análise da estabilidade temporal dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar foi possível executar utilizando apenas os dados de 2008 e 2009, pois a queima ocorrida em meados de 2010 ocasionaram diferentes teores de qualidade na segunda cana-soca pela diferença entre idade das plantas. Visualmente não foi possível averiguar nenhum padrão de manchas dos teores de Brix e pol ao decorrer dos dois anos. Aprofundando a análise, foi utilizada metodologia similar com a executada para delimitar a área em solo argiloso e arenoso. Por meio da análise de agrupamento de dados *k-means* teve o intuito de separar os teores de qualidade decorrentes dos dois anos em classes que se difeririam estatisticamente entre si. O teste de significância proposto por Cuppitt & Whelan (2001), embora não

recomendado para este tipo de banco de dados, segundo Bramley (2005), devido ter sido criado para dados de produtividade e/ou dados advindos de sensores *on-the-go*, apresentando grande quantidade de pontos - não apresentou diferença entre as classes, sendo também importante ressaltar que os dados interpolados por krigagem utilizados na análise de agrupamento reproduziram uma distribuição demasiadamente suavizada, não sendo confiáveis. Propondo então que estudos com períodos prolongados, abrangendo mais ciclos da cultura, sejam feitos a fim de investigar possíveis padrões de estabilidade temporal dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar.

4.2. Modelagem da produtividade e dos parâmetros de qualidade de cana-de-açúcar com base em atributos no solo e nitrogênio foliar

Para confecção dos modelos que descreveram os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar, foi utilizada a análise de componentes principais (ACP – Cap. 06) como processo de seleção das variáveis, buscando os atributos que explicassem 90% da variância do banco de dados, independente da variável resposta a ser utilizada no modelo. Esse processo foi executado para o banco de dados de 2008, 2009-2010 e 2011. Assim sendo, de 29 variáveis iniciais foram selecionadas 13 variáveis que carregavam 90% da variância do banco de dados, tanto para 2008 quanto para 2009-2010 e 14 variáveis para o banco de dados de 2011. As variáveis que se repetiram ao menos duas vezes durante os três ciclos em estudo foram selecionadas, criando então um grupo de variáveis remanescentes com 12 atributos. Esse grupo remanescente foi utilizado para executar novamente a ACP, individualmente ano a ano e essas foram utilizadas como variáveis independentes nos modelos, tendo como variáveis dependentes os teores de Brix, pol e fibra. As componentes principais (PCs) utilizadas como variáveis independentes foram do ano base, sendo os teores de qualidade utilizados como variáveis dependentes do ciclo seguinte, as PCs de 2008 foram utilizadas para modelar os teores de Brix, pol e fibra de 2009 e as PCs de 2010 foram utilizadas para modelar os teores de qualidade de 2011.

Os modelos obtidos possuíam coeficientes de determinação R^2 variando de 0,06 até 0,52, com resíduos de predição decimais; em média mais de 60% da área obtiveram porcentagens de erro de predição variando entre -1% a +1%, apresentando ao longo da área baixas porcentagens de erro.

Todas as variáveis escolhidas para o modelo possuíram sua parte de contribuição para a explicação do evento, mas MO, P e K mostraram ser as variáveis mais importantes a serem focadas.

Já no capítulo 07, foi aplicada uma abordagem estatística distinta do capítulo anterior para seleção das variáveis que melhor explicam a qualidade da cana-de-açúcar, sendo ela *Stepwise* no sentido *forward* com 0,25 de probabilidade das variáveis entrarem no modelo. Sendo possível confirmar a importância da MO para a descrição dos parâmetros de qualidade e ainda, mostrando a importância do pH e H+Al – sendo eles protagonistas no que diz respeito ao favorecimento da absorção de nutrientes do solo pela planta. Ainda, tais resultados diferiram de pesquisas como a de Braga (2011), Johnson & Richard Jr. (2005) e Kumar & Verma (1997), mostrando que para cada cenário terão variáveis pertinentes que determinarão o teor de qualidade da cana-de-açúcar, mas que ao analisar a literatura, de fato variáveis como MO, P, K, pH e H+Al possuem suas importâncias na maturação e concentração de açúcar pela cana-de-açúcar.

Já para a modelagem da produtividade, devido aos eventos compreendidos do uso do monitor de produtividade SIMPROCANA (descritos em detalhes no Capítulo 8), foi possível utilizar os dados da colheita de 2011 para confecção do modelo. Para a seleção das variáveis optou-se por utilizar a metodologia *Stepwise* com nível de significância de 0,25 para a entrada das variáveis no modelo. As variáveis escolhidas explicaram 41% da variabilidade da produção, obtendo distribuição normal dos resíduos e o modelo sendo estatisticamente significativo a 5%.

5. CORRELATION BETWEEN SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND SUGAR CANE QUALITY PARAMETERS BASED ON MANAGEMENT ZONES

5.1. Abstract

With the high increment in the ethanol demand, the trend is that the planted area with sugar cane in Brazil will increase from the actual 8 million ha up to 12 million ha in 15 years. The sugar cane expansion demands, beyond the enlargement of the boundaries with the installation of new industrial units, better use of the production areas and improvement of the yield and quality, together with production costs reduction. In such a way, the adoption of Precision Agriculture (PA) can be an important tool in the management of the sugar cane industries. The objective of this work was to study the Pearson's correlation between chemicals soil attributes with sugar cane quality parameters based on soil physical management zones, as well as verifying the spatial variability of the quality attributes throughout the years. This work was carried out in an area of 10 ha located in Araras/SP - Brazil, in November 2008 until July 2011. A grid of 30x30 m was made totalizing 117 sample points. To measure sugar cane juice quality samples were taken from each point, constituted by 10 plants in the same row, just before harvesting. Laboratory analyzes of Brix, pol and fibre were made. Soil samples were collected immediately after harvesting in the same grid points. The chemical soil attributes analyzed were macro and micro nutrients and soil physical attributes were the soil texture. The correlation obtained between sugar cane quality parameters and soil chemical attributes were different between the management zones and there was no clearly pattern of the temporal stability of the quality parameters.

Key-words: precision agriculture, *k*-means clustering analysis, geostatistics.

5.2. Introduction

Brazil is the largest sugar cane producer in the world and this crop is among the three more important to the country. The Brazilian sugar cane production in the 2010/11 season was of 624 million tons. Of the total of the production for the industry, 288.7 million tons were used in sugar production and 336.2 million tons for ethanol production (CONAB, 2011).

With the high demand for increased ethanol production, the trend is that the planted area with sugar cane continues to rise. In such a way, the adoption of precision agriculture

(PA) may be an important contribution to increasing sugar cane yield and quality of raw material.

The quality of the raw material is defined as the group of characteristics that the product should present assisting the demands of the industry for occasion of processing. The parameters used to express sugar cane quality are juice Brix, pol, and fibre content. The occurrence of restraining factors for the development of the sugar cane can result in reduction for its quality, with direct and indirect reflexes on the industrial processing of the biomass (MUTTON, 2008). Kunert (2000) defines this restraining factor as stress, characterizing as resultant of crop development in conditions below the ideal, including among others, climate conditions (hydro stress), nutrients limitations and biological competition.

Among the factors related to the crop yield are the soil physical and chemical attributes, which besides having a spatial variability, can vary in time for a given position (BERNOUX, 1998a and 1998b). Those variations, due to the natural agents' action, as well as of the human action, can manifest with larger intensity in some properties more than in others (BRAGATO & PRIMAVERA, 1998, BURKE et al., 1999, SLOT et al., 2001). The variability of soil properties has been approached by several authors being attributed to several factors, such as characteristics of the origin material and the formation factors, which do not act on time, but according a certain pattern.

Johnson & Richard Jr. (2005) analyzed the correlation of soil chemical attributes (P, K, Ca, Mg, soil pH, soil OM, soil estimated N release (ENR), soil cation exchange capacity (CEC), soil buffer pH, Ca/Mg and S), yield and sugar cane quality parameters for three years. A high degree of variability and spatial correlation was observed in both soil properties and sugar yield and quality, suggesting that PA approach can be justified. The authors concluded that correlations between soil properties and biomass and sugar yield did occur but were marginal and further studies should include micronutrients.

The objective of this paper is to present the correlation analysis between soil chemical attributes and parameters of sugar cane quality (Brix, pol and fibre) obtained by laboratorial analysis, as well as verifying the spatial variability of the quality parameters through the years of study.

5.3. Material and Methods

The experiment was conducted in a 10 ha sugar cane field at the sugar cane mill “Usina São João Açúcar e Álcool” in Araras during 2008 to 2011. The area is located 166 km north of the city of São Paulo in the southeast region of Brazil at 22° 23’ 38” S latitude and 47° 18’ 04” W longitude. The field is 657 m above sea level and with a slope of 1.2%. The sugar cane variety planted in 2007 is SP80-3280 and was mechanically green harvested throughout the years with no fertilizers application after the first harvest.

A total of 117 sample points was established on a 30x30 m grid for sampling the physical chemical soil attributes and sugar cane quality parameters. Each point contained 10 plants randomly distributed in 2 linear meters, of the same row, sampled in the area on November 2008, December 2009 and June 2011 just before the respective harvestings; except the second cycle that became standover cane and it was harvested on March 2010. The three crop cycles completed 15, 15 and 16 months respectively. Laboratory analyzes was conducted at UFSCar (Araras, SP) for Brix, pol and fibre, where Brix was determined by refractometer, pol was determined by using a polarimeter and fibre was determined based on the bagasse (CONSECANA, 2006). Soil samples (0 – 0.2 m and 0.2 – 0.5 m) were collected immediately after the harvestings on the same grid points. The chemical soil attributes analyzed were macro and micronutrients (soil organic matter (SOM), soil pH, P, K, Ca, Mg, H+Al, Some of Bases (SB), cation exchange capacity (CEC), Base Saturation (V), B, Cu, Fe, Mn, Zn) that were extracted using the ion exchange resin method proposed by Raij et al. (1987), and soil physical attributes clay and sand content. The particle-size analysis was performed using the hydrometric method (EMBRAPA, 1979). It was created a refined grid points for the 2011 sampling data (Figure 8), adding more 13 points randomly on the original grid, spaced 10 m from the closest point.

Exploratory and descriptive analyses were performed using the methodology proposed by Johnson and Richard Jr. (2005) by first calculating univariate statistics using JMP 8.0.2 software (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA). The Kolmogorov-Smirnov statistic was also calculated for the data, testing the presence of normality. If the calculated statistic p-value was significant at $p \leq 0.05$, the distribution was considered nonnormal. Additionally, box-plots were generated for each variable, and an analysis of spatial distribution was performed using three-dimensional surface plots to identify the outliers and

artefacts. The outliers detected were treated using the mean of the four nearest neighbours from the outlier, as adapted from Jolliffe (1986). This methodology was used as an alternative to reject the detected outliers from each variable.

As pointed out by Warrick and Nielsen (1980) dealing with data obtained in the nature, the adjustment to a theoretical distribution is just approximate. In agreement with Cressie (1991) the normality of the data is not mandatory in geostatistics, it is convenient just that the distribution does not presents prolonged tails (values of kurtosis too low or to high), what could compromise the analyses. Before variogram analysis, the three-dimensional surface plots were used to determine the strategy for variogram analysis.

The physical soil attributes and sugar cane quality parameters were submitted to the geostatistics analysis and interpolated into a 2-m grid by global point kriging using VESPER 1.6 (The University of Sydney, Sydney, Au). For all the attributes, variograms were adjusted considering the distribution as being isotropic. The choice of which variogram was better fitted to the data, preceding kriging, was based on the Root Mean Square Error, Akaike criteria and additional to those indices, it were calculated the Space Dependence Index (SDI) (CAMBARDELLA et al., 1994) for each variogram, which is the ratio of the nugget variance and sill, expressed as a percentage. Taking in account that light soils may influence on the quality of the raw matter with a different way comparing with heavy soils, the area were split into two zones, light and heavy soils zones, using multivariate *k*-means clustering approach; the software JMP 8.0.2 was used for this analysis. The *k*-means is a non-hierarchical method of data clustering in which the variance within cluster is minimized while the variance among clusters is maximized. It has been successfully used in PA for the delineation of management zones (MZ) in any kind of crop area, enabling the use of a large range of data as input. The cluster analysis was carried out using the kriged map surfaces rather than the raw soil data. All the maps were carried out in ArcGIS 9.3 (ESRI, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA) and the required analysis were done using the Spatial Analyst extension.

Pearson's correlation analysis were performed between chemical soil attributes and sugar cane quality parameters for each kind of soil MZs separately, The correlations were performed using the chemical soil attributes of the base year together with the sugar cane quality parameters of the next year crop (i.e., the 2008 soil data were correlated with the 2009 sugar cane quality parameters and the 2010 soil data were correlated with the 2011 sugar cane

quality parameters). Correlation results were considered significant if the probability was significant at $p \leq 0.05$.

5.4. Results and Discussion

Exploratory statistical analysis

Based on the descriptive analyses of the soil physical and chemical attributes and sugar cane quality parameters (Table 1), at the first year, all parameters with the exception of P, SB and CEC at first layer and P and SB at second layer along the 117 sampled points presented a distribution where means and medians were similar, revealing distributions that were only slightly asymmetrical. A similar case repeated for the following years, with exception of Fe and SB at first layer of the second year, P at both layers for the second and third year. Phosphorus shows throughout the literature to have such difficulty about the study of its variability, mainly because it has low mobility especially in clay soils, becoming usual to have samples defiled by residual particles of fertilizers.

The skewness and/or kurtosis coefficients were negative and near zero values with exception of P, K, Ca, Mg, SB, CEC, Cu and Zn at first layer and P, K, Ca, Cu, Fe Mn and Zn at second layer which presented high values of skewness and/or kurtosis in 2008 data. The 2011 data showed similar behaviour about those coefficients, just including $SOM_{0-0.2}$ and taking off the Cu and Fe at 0.2-0.5 m that presented lower values of skewness and kurtosis. The majority variables from 2010 dataset showed values higher than 2 for skewness and/or kurtosis. Johnson & Richard Jr. (2005) detected significant positive skew with the mean greater than the median, for the majority of these properties, with K, Mg, CEC, and S not significantly skewed.

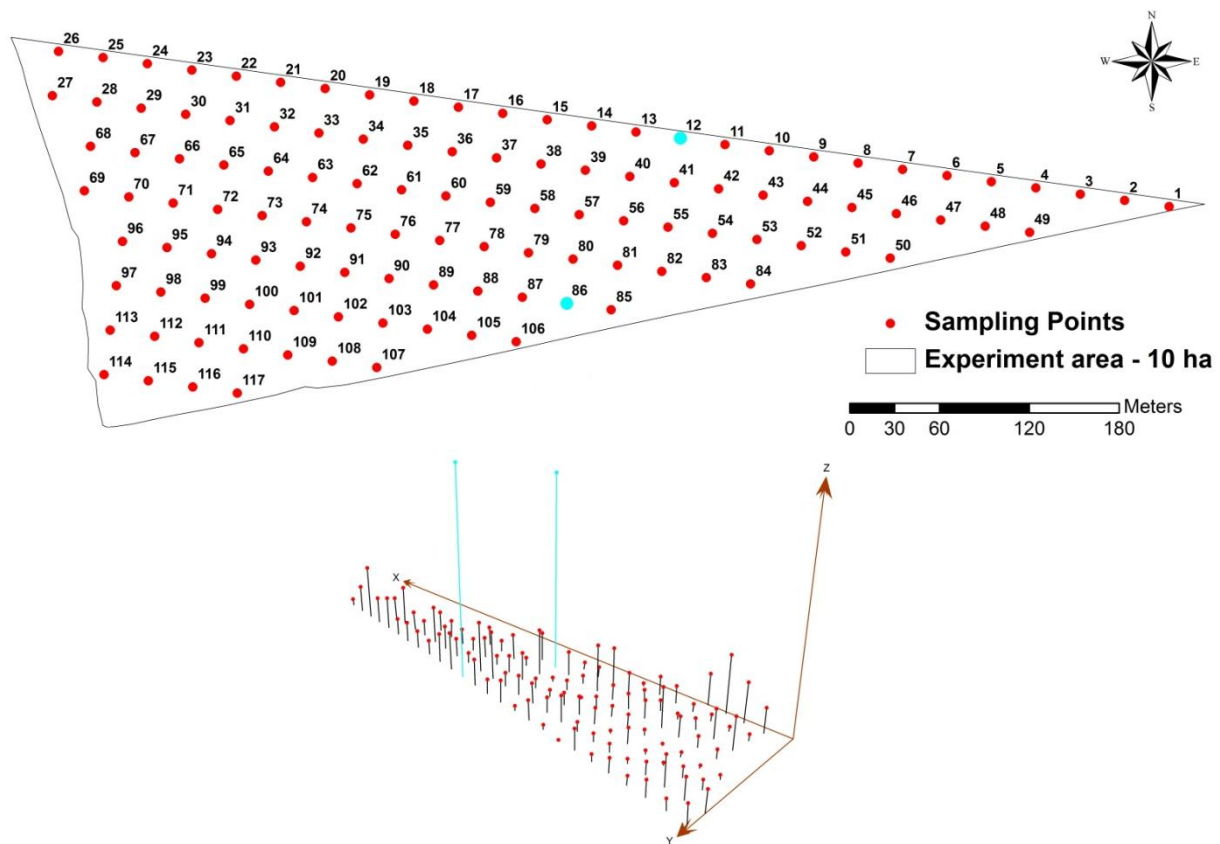
Table 1 - Descriptive analysis for the values data

	2008 (n = 117)						2009-2010 (n = 117)						2011 (n = 130)					
	med	mean	CV	sk	k	p-value	med	mean	CV	sk	k	p-value	med	mean	CV	sk	k	p-value
Brix	21.6	21.6	2.6	-0.40	-0.20	>0.15	20.8	20.7	2.6	-0.36	0.31	0.02	19.2	19.1	4.1	-0.28	0.76	>0.15
pol	16.6	16.5	3.1	-0.20	-0.20	>0.15	15.9	15.9	3.3	-0.59	0.41	>0.15	14.5	14.4	5.8	-0.59	1.17	>0.15
fibre	-	-	-	-	-	-	12.4	12.4	3.6	2.07	12.68	>0.15	11.5	11.7	7.2	0.93	1.14	<0.01
Sand_{0-0.2}	678.0	677.7	6.1	0.03	-0.30	>0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clay_{0-0.2}	235.5	232.5	14.0	-0.06	-0.10	>0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOM_{0-0.2}	20.0	19.6	12.1	-0.20	-0.10	<0.01	18.0	18.7	11.6	0.51	2.51	<0.01	12.0	11.9	17.7	2.22	9.58	<0.01
pH_{0-0.2}	5.5	5.5	7.3	0.60	-0.04	<0.01	5.3	5.3	6.5	0.41	-0.29	<0.01	5.5	5.5	5.2	0.07	-0.70	<0.01
P_{0-0.2}	51.0	65.2	103.6	5.40	34.60	<0.01	45.0	60.4	92.2	5.22	37.88	<0.01	34.0	42.3	125.9	9.08	93.30	<0.01
K_{0-0.2}	1.0	1.1	31.8	1.50	3.30	<0.01	0.9	0.9	34.7	2.23	8.10	<0.01	0.7	0.7	38.0	1.88	6.91	<0.01
Ca_{0-0.2}	37.0	39.4	40.4	2.40	9.40	<0.01	32.0	34.6	35.3	2.60	13.21	<0.01	27.0	27.6	26.0	2.00	6.20	<0.01
Mg_{0-0.2}	12.0	13.4	45.7	2.30	8.70	<0.01	10.0	10.6	38.6	2.22	8.25	<0.01	10.0	10.2	30.2	1.46	3.68	<0.01
H+Al_{0-0.2}	16.0	17.3	26.0	0.40	0.10	<0.01	22.0	21.4	23.6	0.27	-0.52	<0.01	24.0	23.5	19.7	0.32	-0.26	<0.01
SB_{0-0.2}	50.9	54.1	39.8	2.13	6.55	<0.01	43.6	46.2	33.8	2.66	13.39	<0.01	37.3	38.6	24.9	1.95	6.30	<0.01
CEC_{0-0.2}	68.1	71.4	26.1	2.40	8.60	<0.01	66.0	67.8	19.7	3.13	19.27	<0.01	61.2	62.1	14.1	1.94	6.27	<0.01
V_{0-0.2}	74.0	73.5	13.6	-0.13	-0.59	>0.15	67.0	66.9	14.5	0.17	-0.50	>0.15	61.0	61.6	13.3	0.09	-0.21	>0.01
B_{0-0.2}	0.1	0.1	24.2	0.06	0.50	<0.01	0.1	0.1	14.3	0.35	-0.26	<0.01	0.5	0.6	31.2	0.53	0.24	<0.03
Cu_{0-0.2}	0.9	0.9	29.0	2.50	11.70	<0.01	1.1	1.2	103.1	9.59	98.61	<0.01	1.4	1.4	27.7	1.76	7.92	<0.01
Fe_{0-0.2}	34.0	34.4	33.4	0.80	1.60	>0.05	55.0	61.5	95.0	9.41	96.69	<0.01	50.0	48.1	34.6	-0.04	-0.23	>0.05
Mn_{0-0.2}	2.9	2.9	34.0	0.60	0.03	<0.03	4.8	5.5	85.7	8.61	85.41	<0.01	4.8	4.7	25.4	0.44	1.24	>0.15
Zn_{0-0.2}	0.4	0.4	43.4	3.70	21.20	<0.01	0.4	0.5	75.8	4.67	27.90	<0.01	0.6	0.6	47.0	5.21	40.47	<0.01
Sand_{0.2-0.5}	652.0	649.8	6.2	-0.03	-0.18	>0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clay_{0.2-0.5}	253.5	253.9	12.2	0.16	-0.18	>0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOM_{0.2-0.5}	14.0	13.8	11.3	0.95	2.88	<0.01	12.0	12.6	11.9	0.68	-0.12	<0.01	8.0	8.5	25.7	4.06	25.98	<0.01
pH_{0.2-0.5}	5.3	5.3	6.8	0.01	-0.35	<0.01	5.2	5.2	7.0	0.09	-0.36	0.02	5.4	5.4	6.5	0.04	-0.86	<0.01
P_{0.2-0.5}	20.0	29.1	96.0	3.12	12.92	<0.01	20.0	25.7	77.8	3.34	18.19	<0.01	19.5	24.5	127.0	9.66	103.16	<0.01
K_{0.2-0.5}	0.6	0.6	40.7	1.71	3.38	<0.01	0.4	0.4	46.9	0.68	0.78	<0.01	0.4	0.4	38.2	1.76	4.45	<0.01
Ca_{0.2-0.5}	23.0	24.5	32.9	1.41	3.67	<0.01	20.0	21.2	34.6	1.65	7.04	<0.01	21.0	21.4	26.8	0.95	1.87	<0.01
Mg_{0.2-0.5}	9.0	9.9	34.9	0.81	0.54	<0.01	8.0	8.4	35.9	1.59	6.48	<0.01	9.0	9.1	30.6	0.40	-0.23	<0.01
H+Al_{0.2-0.5}	18.0	17.5	24.4	0.60	0.72	<0.01	20.0	19.9	20.9	0.33	-0.16	<0.01	22.0	22.7	21.1	0.71	0.64	<0.01
SB_{0.2-0.5}	33.2	35.1	31.7	1.04	1.63	<0.01	29.1	30.0	33.4	1.69	7.77	<0.05	30.7	31.1	26.0	0.68	1.20	>0.15
CEC_{0.2-0.5}	51.4	52.7	16.7	1.11	2.21	<0.01	49.0	50.1	15.8	2.13	10.36	<0.01	53.5	53.7	12.5	0.74	1.03	<0.05
V_{0.2-0.5}	65.0	65.3	16.6	-0.08	-0.53	>0.15	60.0	58.7	19.0	-0.16	-0.19	>0.15	58.0	57.2	17.3	-0.36	-0.32	<0.01
B_{0.2-0.5}	0.1	0.1	24.1	-0.19	-0.45	<0.01	0.1	0.1	17.7	-0.66	3.08	<0.01	0.4	0.4	34.6	0.58	-0.15	<0.03
Cu_{0.2-0.5}	0.6	0.6	34.0	2.78	14.19	<0.01	0.6	0.6	29.6	1.15	2.79	<0.01	0.8	0.9	34.5	1.00	1.14	<0.01
Fe_{0.2-0.5}	22.0	22.2	38.4	2.51	13.45	<0.01	30.0	31.6	31.7	1.83	7.08	<0.01	27.0	29.0	30.5	0.94	0.76	<0.01
Mn_{0.2-0.5}	1.0	1.5	243.1	9.31	92.59	<0.01	1.6	1.8	53.7	2.05	7.29	<0.01	1.8	1.9	44.4	2.42	9.84	<0.01
Zn_{0.2-0.5}	0.2	0.2	47.4	2.46	8.41	<0.01	0.2	0.2	68.5	1.18	1.77	<0.01	0.5	0.5	39.2	4.07	20.75	<0.01

where: med - median; CV – coefficient of variation; sk – skewness; k – kurtosis; p-value for normality test. Brix, pol, fibre, V in (%); sand, clay in (g.kg⁻¹); SOM – soil organic matter in (g.dm³); P, B, Cu, Fe, Mn, Zn in (mg.dm³); K, Ca, Mg, H+Al, SB and CEC in (mmolc.dm³).

All distributions were considered as non-normal for the Kolmogorov-Smirnov statistic at 5% of significance with exception of Brix in 2008 and 2011 dataset, pol for the three years dataset, fibre from 2010 dataset, sand and clay at both layers, V at both layers in the first two years, $Fe_{0-0.2}$ in 2008 and 2011 dataset as well as $Mn_{0-0.2}$ and $SB_{0.2-0.5}$ in 2011. The coefficients of variation showed that only Brix, pol, fibre and pH (both layers) along the three years and sand (both layers) had low variation ($CV \leq 12\%$), in agreement with the Warrick and Nielsen (1980) criteria.

The box-plot and the analysis of spatial distribution proved that the mainly cause of those high values of skewness, kurtosis and CV, as well as the non normality of those distributions were the outliers detected by means of these analysis (Figure 7). The outlier values were replaced by the mean of the neighbour's points, and used throughout the rest of the analysis as explained on the material and methods.



Data Source: RawData_2008 Attribute: P_0_20

Figure 7 - Outlier detection.

Clustering analysis

First a preliminary test was conducted using the physical soil data to investigate which layers influence on the MZ definition. It was performed a test of significance based on the kriging variance (CUPPITT & WHELAN, 2001) with 5% of significance ($p < 0.05$) to check the difference between the MZ and the results showed that only the first layer influenced on the MZ. After the geostatistical analysis of the physical soil attributes of the first layer (Table 3), the kriged file from VESPER 1.6 (The University of Sydney, Sydney, Au) was used to create MZ based on the soil type. The numbers on the Figure 8 represent the mean cluster of each zone; different letters indicate that the mean are significantly different ($p \leq 0.05$).

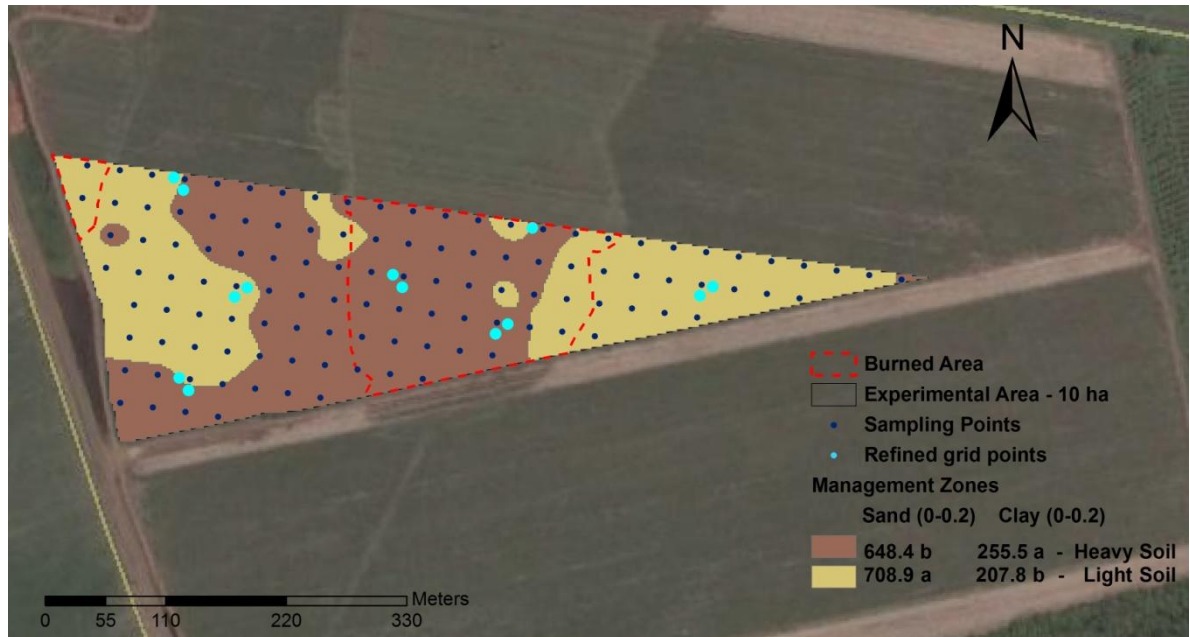


Figure 8 – Soil management zones.

The *k*-means clustering analysis performed using sand and clay contents defined the two MZs successfully, being possible to identify sub-areas that can be called as heavy and light soil zones. Based on the soil MZs, the dataset was split creating two sub-datasets aiming to perform the Pearson's correlation between chemical soil attributes and sugar cane quality parameters individually, for each zone. The points located on the area reached by the fire were taken off the sub-dataset for the 2010-2011 analysis.

Correlation between soils chemical attributes with sugar cane quality parameters

The correlations results (Table 2) differed through the years studied and along the soil defined zones. Nevertheless, the analyzed sugar cane quality parameters in 2009 (Brix and pol) from the heavy soil zone presented moderate negative correlations at first layer with P ($r = -0.42$; -0.41), Ca ($r = -0.40$ both), Mg ($r = -0.36$; -0.40), SB (-0.39 ; -0.41), CEC (-0.38 both) and V (-0.31 ; -0.34) and at second layer with Mg (-0.31 ; -0.37), getting as positive moderate correlations 0.25 and 0.29 (H+Al at both layers). On the other hand, the correlations obtained from the light soil zone were in general weak, with statistically significant correlations for $Zn_{0.2}$ (-0.36) and $Ca_{0.2-0.5}$ (-0.30) with fibre and $MO_{0.2-0.5}$ (-0.29) with pol.

Table 2 - Correlation between soil physical & chemical attributes with sugar cane quality parameters

2009							2011					
Cluster 1 – Heavy soil (n = 65)			Cluster 2 – Light soil (n = 52)				Cluster 1 – Heavy soil (n = 37)			Cluster 2 – Light soil (n = 49)		
Brix	pol	fibre	Brix	pol	fibre		Brix	pol	fibre	Brix	pol	fibre
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	2010	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2008												
SOM _{0-0.2}						SOM _{0-0.2}						
pH _{0-0.2}						pH _{0-0.2}		0.50		-0.37		
P _{0-0.2}	-0.42	-0.41				P _{0-0.2}		0.77				
K _{0-0.2}						K _{0-0.2}						
Ca _{0-0.2}	-0.40	-0.40				Ca _{0-0.2}		0.67				
Mg _{0-0.2}	-0.36	-0.40				Mg _{0-0.2}		0.43				-0.41
H+Al _{0-0.2}	0.25	0.30				H+Al _{0-0.2}				0.47	0.37	0.52
SB _{0-0.2}	-0.39	-0.41				SB _{0-0.2}		0.64				
CEC _{0-0.2}	-0.38	-0.38				CEC _{0-0.2}		0.64				
V _{0-0.2}	-0.31	-0.34				V _{0-0.2}		0.57		-0.38		-0.42
B _{0-0.2}						B _{0-0.2}				0.48	0.38	0.51
Cu _{0-0.2}						Cu _{0-0.2}		0.39				0.41
Fe _{0-0.2}						Fe _{0-0.2}				0.37		0.50
Mn _{0-0.2}						Mn _{0-0.2}		0.53				
Zn _{0-0.2}					-0.36	Zn _{0-0.2}		0.68				
SOM _{0.2-0.5}				-0.29		SOM _{0.2-0.5}		0.36				0.38
pH _{0.2-0.5}		-0.25				pH _{0.2-0.5}						-0.52
P _{0.2-0.5}		-0.28				P _{0.2-0.5}						
K _{0.2-0.5}						K _{0.2-0.5}						
Ca _{0.2-0.5}					-0.30	Ca _{0.2-0.5}						-0.35
Mg _{0.2-0.5}	-0.31	-0.37				Mg _{0.2-0.5}						-0.52
H+Al _{0.2-0.5}	0.25	0.29				H+Al _{0.2-0.5}						0.48
SB _{0.2-0.5}						SB _{0.2-0.5}		0.34				-0.42
CEC _{0.2-0.5}						CEC _{0.2-0.5}						
V _{0.2-0.5}		-0.25				V _{0.2-0.5}						-0.49
B _{0.2-0.5}						B _{0.2-0.5}		0.39		0.35	0.33	0.60
Cu _{0.2-0.5}						Cu _{0.2-0.5}		-0.49				
Fe _{0.2-0.5}						Fe _{0.2-0.5}						0.48
Mn _{0.2-0.5}						Mn _{0.2-0.5}						-0.37
Zn _{0.2-0.5}						Zn _{0.2-0.5}		0.41				0.31

Significant values ($p \leq 0.05$).

The results obtained for the 2011 dataset shows that, into the heavy soil zone, Brix and pol did not get any significant correlation with the soil chemical attributes, furthermore, fibre carried out the highest correlations throughout the analysis, having positive coefficients of correlation ranging from 0.34 ($SB_{0.2-0.5}$) until 0.77 ($P_{0-0.2}$), with just -0.49 ($Cu_{0.2-0.5}$) as negative correlation and non-significant coefficients for MO, K, H+Al, B and Fe at first layer and pH, K, P, Ca, Mg, H+Al, CEC, V, Fe and Mn at second layer. For the light soil zone, fibre carried out the majority of the significant correlations comparing with Brix and pol. The positive correlations with fibre ranged from 0.31 ($Zn_{0.2-0.5}$) until 0.60 ($B_{0.2-0.5}$), and the negative correlations were from -0.35 ($Ca_{0.2-0.5}$) to -0.52 ($Mg_{0.2-0.5}$).

The results for 2008-2009 do not differ from results obtained by Johnson & Richard Jr. (2005) which checked a moderate negative correlations between pol and P ($r = -0.31$) and SOM ($r = -0.34$), nevertheless, those results did not follow a pattern for the next year crop maybe because of the different sampling period in relation to sugar cane maturity. According to Mutton & Mutton (2005), the increase of SOM may stimulate the stalks growth, decreasing the accumulation of sugar and resulting on negative correlations between SOM and pol.

The sugar cane parameters from the first ratoon cycle were determined on December 2009, representing the top of the maturity cycle. The moderate negative correlations between Brix and pol with Ca and Mg obtained for the Clay Zone (2008-2009) are supported by the fact of those elements act in the cellular division of the plant, which is important for plant and root development, whereas some results of other authors have shown that plants with well-developed root systems are more productive (FARONI & TRIVELIN, 2006; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007; VITTI et al. 2007), helping the growth development, hence increasing fibre contents and decreasing sugar concentration. This is also supported when is checked the next crop cycle results, whereas the second ratoon is a plant with more than 15 months of growing, the highest positive correlations were driven by the fibre contents; this may be explained if we consider that the plants on this crop cycle passed through from the maturity stage to the growing stage without hydro stress needed for sugar concentration (Figura 2), increasing the fibre content.

According to Oliveira et al. (2011) soils with high moisture are more favourable for Ca absorption by the sugar cane plant, which may explain the differences of coefficients of

correlations between the two soils zones delimited in this study – clay particles are more aggregate than sand, which increase the micro pores that holds water.

Phosphorus is probably the most difficult nutrient to manage in Brazilian soils, even though it is not the nutrient most extracted by the crop (FRANCO et al., 2008; FRANCO et al., 2010) because it is strongly retained in the soil colloidal matrix, particularly by iron and aluminium oxides in acid soils and precipitates, such as calcium phosphate, in alkaline soils (CANTARELLA & ROSSETTO, 2010). Beauclair (1991) observed the influence of P applied to planting furrows, which promoted yield increases in the first two harvests (cane plant and first ratoon). In this study P applied at planting furrows showed to be negative related with sugar concentrations at heavy soil zone for first cycle, presenting a high positive coefficient of correlation with fibre at second ratoon. P promotes yield increases as supported by many authors, which is associated to fibre, and consequently decreasing the sugar concentration.

The variables SB, CEC and V at first layer presented moderate/high coefficients of correlations with the quality parameters. Since they are calculated based on K, Ca, Mg and H+Al, hence they are redundant variables into the dataset; this may be enough reason for those moderate/high coefficients of correlation obtained by them, since the elements used to calculate those variables got significant coefficients of correlations. Magalhães & Cerri (2008) evaluated the correlation among physical and chemical attributes of the soil with the sugar cane yield, obtaining correlations in general low to moderate as well.

Spatial analysis

Since all the sugar cane quality parameters obtained sufficiently symmetrical distribution, with exception of fibre (2008) that was not analyzed, the geostatistics analyses (Table 3) was conducted aiming to visualize some temporal pattern of the parameters in study.

Table 3 - Variograms parameters

		Model	C	Co	(C+Co)	Range m	SDI %
2008	Sand _{0-0.2}	Spherical	2640.0	0.0000	2640.0	418.4	0.0
	Clay _{0-0.2}	Spherical	1722.7	0.0000	1722.7	450.2	0.0
	Brix	Exponential	0.2322	0.0923	0.3245	70.1	28.4
	pol	Exponential	0.1579	0.1240	0.2819	49.9	43.9
	fibre	-	-	-	-	-	-
2009	Brix	Gaussian	0.0429	0.2234	0.2663	113.8	83.8
	pol	Gaussian	0.0418	0.2043	0.2461	300.0	83.0
	fibre	Gaussian	0.0439	0.0954	0.1393	47.7	68.5
2011	Brix	Exponential	0.2240	0.2317	0.4557	55.3	50.8
	pol	Exponential	0.2867	0.2778	0.5645	72.1	49.2
	fibre	Exponential	0.7787	0.0221	0.8008	111.3	2.7

where: C= Partial Sill; Co = Nugget; (Co+C) = Sill; SDI = [Co/(Co+C)].100.

It is possible to observe that the Brix and pol (2009) in study presented a SDI considered to be low according to Cambardella et al. (1994), high for sand, clay and fibre (2011) and moderate for the others. The east area of the experimental plot (Figure 9) presented low values for Brix and pol in 2008 and 2011; nevertheless both were sampled in different period of the year (December 2008 and June 2011) as previously discussed. The quality parameters from 2009 presented a variogram with partial sill quite small giving a flattish aspect for it; hence the kriging process results in thematic maps smoothed, which may not present the reality of the spatial variability, suggesting that some refined points might help on the detection of the variogram range in smaller distances than 30 m.

Brix and pol data for 2008 and 2009 was used aiming to detect some stability pattern by means of *k*-means clustering analysis as well, getting zones non different statistically. More than the test for the significance of differences between cluster means proposed by Cuppit & Whelan (2001) being not recommended for this kind of dataset (BRAMLEY, 2005), the kriged data used for the cluster analysis reproduced a smoothed distribution of the 2009 data with relatively large nugget variance, being not reliable. On the Brix and pol maps from 2011, it is clear the overlap of the smallest range with the area reached by the fire. This incident, together with the flattish variogram from 2009 may obscure some spatial stability of the quality parameters throughout the experiment, recommending the use of some refined points in the grid sampling as it was done in 2011. Furthermore, it is important to emphasize that the sugar cane quality may not be random within a sugar cane block area and this study support

similar view as Bramley (2005), that sugar cane sampling for quality assessment would be improved if carried out with some knowledge of the spatial structure of the variation, recommending longer studies on this subject.

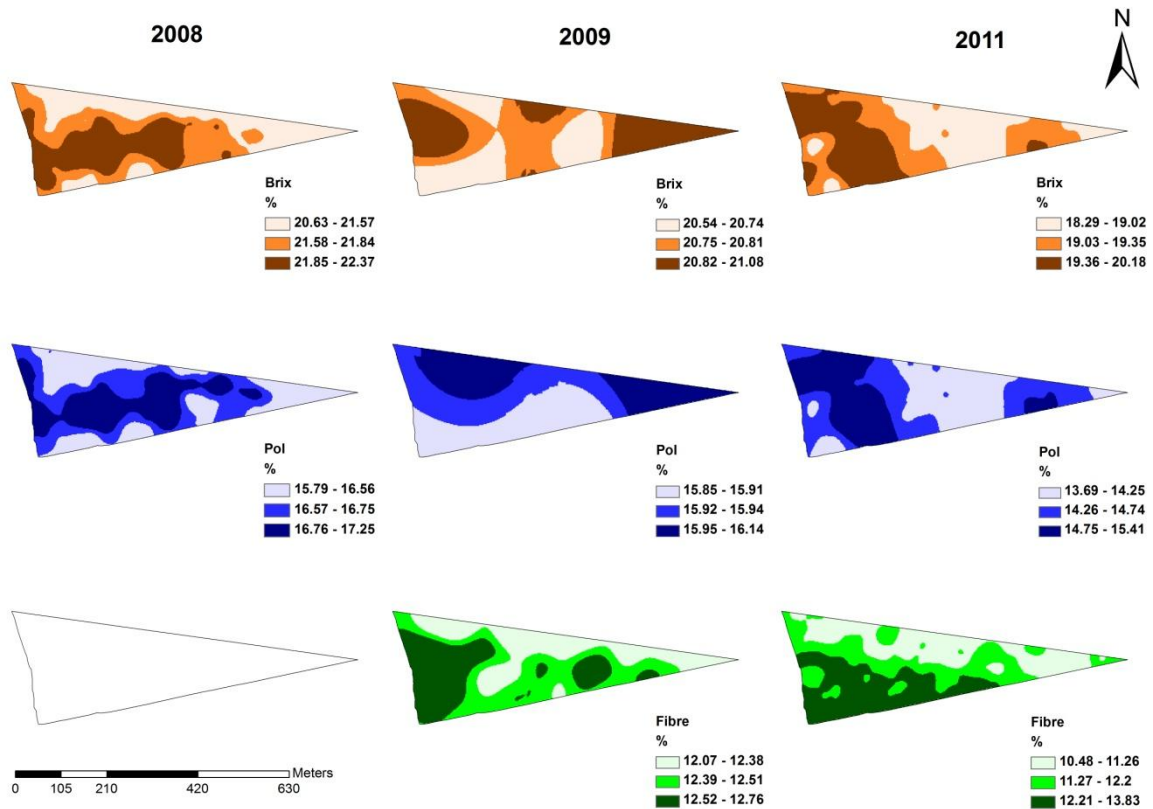


Figure 9 - Surface maps.

5.5. Conclusions

Different correlations between chemical soils attributes and sugar cane parameters were obtained for the soils zones, being possible to indentify the soil attribute who promote the fibre increase and the sugar content decrease. The temporal stability patterns of sugar cane quality parameters were not clearly defined, suggesting further studies on this subject.

6. MODELING QUALITY PARAMETERS OF SUGAR CANE BASED ON SOIL ATTRIBUTES AND LEAF NITROGEN

6.1. Abstract

The area of the land in sugar cane production in Brazil has increased substantially in the last few years, especially because of the high demand for ethanol. It is estimated that the actual area, which is approximately 8 million ha, will increase to as much as 15 million ha in the next 10 years. In addition to the enlargement of boundaries and the installation of new industrial units, sugar cane expansion demands the better use of the production areas and improvement of both the yield and quality, together with a reduction of the production costs. Thus, models that can describe the behaviour of the quality parameters of sugar cane can be important to understanding the effects of the soil and plant attributes on those sugar cane parameters. The objective of this work was to fit mathematical models to the sugar cane Brix, pol and fibre using the physical chemical soil attributes and leaf nitrogen as predictors. This work was carried out in an area of 10 ha located in Araras/SP, Brazil, since November of 2008 until July 2011, as the first (plant cane), second (1st ratoon) and third (2nd ratoon) cycles of the crop. The chemical soil attributes analysed were the macro and micronutrients, and the soil physical attribute was the soil texture. The variables used in the models were chosen using principal component analysis (PCA), and the fit of the models was made as the mean of multiple regressions. We compared the results using kriging to map the Brix, pol and fibre with the true and estimated values. The Brix, pol and fibre models presented a R^2 of 0.17, 0.06 and 0.18 for the 1st ratoon and 0.23, 0.19 and 0.52 for the 2nd ratoon of the crop, respectively. These results allowed us to estimate 46% for the Brix and 82% for the pol, with estimation errors smaller than $\pm 0.25\%$ and 51% for fibre with estimation errors smaller than $\pm 0.50\%$ for the 1st ratoon, and 41%, 25% and 27% for Brix, pol and fibre, respectively, with estimation errors smaller than $\pm 1.0\%$ for the 2nd ratoon. The PCA approach allowed to identify the SOM, P and K as the soil attributes who carried the higher variance of the dataset along the years studied.

Key-words: Principal component analysis, multiple regression, precision agriculture.

6.2. Introduction

Brazil is the largest sugar cane producer worldwide. According to the Brazilian National Food Supply Company – CONAB (2011), in the 2010/2011 season, 8 million ha of land was used to produce sugar cane; the Brazilian sugar cane production in the 2010/11 season was 624 million tons. Of this total, 288.7 million tons was used for the production of sugar, and 336.2 million tons was used for the production of ethanol. These numbers represent a 8.4% increase in sugar cane production compared with the previous season (CONAB, 2011). Currently, sugar cane production is increasing to meet the global bioethanol demand. Although there are nearly 90 million hectares available for agricultural expansion in Brazil (LEITE et al. 2009), sugar cane production must take place not only in new sugar cane fields but mainly with the goal of improving the sugar cane yield (approximately $81 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), which, in Brazilian sugar cane fields, has the genetic potential of $381 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (WACLAWOVSKY et al. 2010). As commercial yield statistics are averages of all of the genotypes across all of the environments and production systems, they give no indication of the yields that might be achieved if identifiable yield-limiting constraints were ameliorated (WACLAWOVSKY et al. 2010). Precision agriculture (PA) can help identify the limiting factors contributing to the increase in the sugar cane yield and the quality of the raw material, the management of the necessary inputs in a more precise way, the use of a variable rate of fertiliser application, the determination of management zones based on the yield potential and the evaluation of the environmental impacts of the sugar cane production.

The increase of sugar cane production can be related to the improvement of the sugar cane biomass and ethanol produced per area, but it can also be obtained by the enhancement of the sugar cane quality attributes. The quality of the raw material is defined as the group of characteristics that the product should present to assist in the demands of the industry during processing. The parameters used to express sugar cane quality are the juice Brix, purity, fibre, juice pol, cane pol, reducing sugars (RS), and total recoverable sugars (TRS). The occurrence of restraining factors for the development of sugar cane can result in the damage to its quality, with direct and indirect impacts on the industrial processing of the biomass (MUTTON, 2008). Kunert (2000) defines this restraining factor as stress, characterised as the result of crop development in conditions below the ideal, including climatic conditions (period of drought), nutrient limitations and biological competition.

Among the factors related to the crop yield are the chemical attributes of the soil, which, in addition to having spatial variability, can vary over time for a given location (BERNOUX, 1998a, b). Due to the environment and human actions, these variations can exhibit a greater intensity in some properties than in others (BRAGATO & PRIMAVERA, 1998; BURKE et al., 1999; SLOT et al., 2001). The variability of soil properties has been investigated by several authors and has been attributed to several factors, such as the characteristics of the parental material (soil genesis) and those soil-formation factors that do not act over time but according a specific pattern. Johnson & Richard Jr. (2005) analysed the correlation of the soil chemical attributes (P, K, Ca, Mg, soil pH, soil OM, soil estimated N release [ENR], soil cation exchange capacity [CEC], soil buffer pH, Ca/Mg and S) with the yield and sugar cane quality parameters over a span of three years. A high degree of variability and spatial correlation was observed in both the soil properties and sugar yield and quality, suggesting that the PA approach is justified. The authors found that correlations between the soil properties and sugar cane yield did occur but that they were marginal and, thus, further studies should include assessments of the micronutrients. Magalhães & Cerri (2008) evaluated the correlation between the sugar cane yield and certain physical-chemical soil attributes, including the organic matter, cone index and CEC. It was observed that the correlations were generally weak (< 0.5), thus, the authors concluded that a simple correlation between the soil attributes and sugar cane yield was insufficient to explain the spatial variability of the crop, suggesting that other characteristics beyond the soil attributes should be analysed.

The use of yield models and the identification of the degree of importance of several soil attributes for each crop season can supply information for fertilisation and management practices under different environmental conditions. This identification can also contribute to studies that are becoming important in the identification of the yield potential for each environment (BOOTE et al., 1996). Kumar & Verma (1997) applied multiple regression analyses between the leaf nutrients of eleven genotypes of sugar cane determined at the maximum growth stage of the crop, and they also examined the sugar cane yield and juice quality parameters. They observed that the quantities of N, P, K, Zn and Cu explained 93% of the variation and that the leaf quantities of N, P, K and Cu explained 95% of the variation in the % sucrose and % commercial sugar content, respectively. Furthermore, these authors claimed that, under the conditions of the experiment, the leaf nutrient analysis could be used

as a prediction factor of the sugar and cane yield. Landell et al. (2003) evaluated the effects of the subsurface chemical soil attributes in the south central region of Brazil on the sugar cane yield of clones and variety RB72454. Correlation and multiple regression analyses were performed with the selected variables based on the R^2 via a stepwise procedure. The clone yield model for the 3rd harvest, as a function of the base saturation and phosphorus content, presented 31% of the variation in the sugar cane yield ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$) explained by these two attributes. For variety RB72454, 47% of that variation was explained by the sum of the bases and the contents of calcium and organic matter.

Under Brazilian conditions, the use of correlation models between the biomass productivity and sugar content may help in the rationalisation of the inputs and increase productivity. Research should be conducted with this focus of study because, even though Brazil is the world's largest producer of sugar cane, such techniques are unusual in the Brazilian agricultural sector. Thus, the objectives of this study were to analyse the correlation between the soil physical and chemical attributes and leaf nitrogen (N) with the sugar cane quality parameters, Brix, pol and fibre, through a multivariate analysis (principal component analysis, PC) and to present a mathematical model to explain the variation.

6.3. Material and Methods

The experiment was conducted in a commercial sugar cane field (10 ha) belonging to São João Mill, located in Araras, São Paulo State, Brazil, during three consecutive cycles: November 2008 (plant cane), December 2009-March 2010 (first ratoon – standover cane) and July 2011 (second ratoon). The area is located 166 km north of São Paulo city in the southeast region of Brazil at 22° 23' 38" S and 47° 18' 04" W. The field is 657 m above sea level and has a slope of 1.2%. The sugar cane variety planted in 2007 was SP80-3280 and was mechanically green-harvested during all of the cropping seasons. Currently, this variety represents approximately 4% of the sugar cane grown in Brazilian fields.

The area was divided into a regular 30-m grid ($n=117$) by means of the Pathfinder Office software (Trimble® Navigation Limited Sunnyvale, CA). The location points were made using a GPS GeoExplorer™ 3 (Trimble® Navigation Limited, Sunnyvale, CA) device. The samples of the plants were collected at each point to determine the sugar cane quality parameters just prior to the harvest. For this purpose, 10 plants were collected randomly in 2-

m lengths of the same row. For all of the plants, the leaf +3 was collected for the nitrogen determination (N) by the Kjeldahl method. The Brix was determined using a refractometer, pol was determined using a polarimeter and fibre was determined based on the bagasse (CONSECANA, 2006).

Immediately after harvesting, soil samples were collected (0 – 0.2 m and 0.2 – 0.5 m) at each grid point to determine the soil's physical and chemical attributes. The chemical attributes analysed were the soil organic matter (SOM), soil pH, P, K, Ca, Mg, H+Al, sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), base saturation (V), B, Cu, Fe, Mn, Zn (RAIJ et al., 1987) and the physical attributes of the clay and sand content (EMBRAPA, 1979). With exception of soil's physical attributes that were done just on the first year, all of the operations performed at the end of the cane crop were undertaken in the second and third crop cycle (first and second ratoon). It was created a refined grid points for the 2011 sampling data, adding more 13 points randomly on the original grid, spaced 10 m from the closest point, totalling 130 grid points for the last year of the experiment.

The end of the year is a rainy season around the region of the experiment, because of that the first ratoon was not able to be harvested on December 2009, becoming a standover cane that was harvested on March 2010. So on this case, the plant samples of the first ratoon were collected on December 2009, following the grow cycle of the variety which represents the top of its maturity. In the middle of August 2010, because of the rigorous dry season the area suffered a partial accidental burn; the sub-area reached by the fire was around 1/3 of the total area (Figure 10), reaching 44 points of the sampling grid – which were exclude from the PCA and modelling process avoiding external influence.

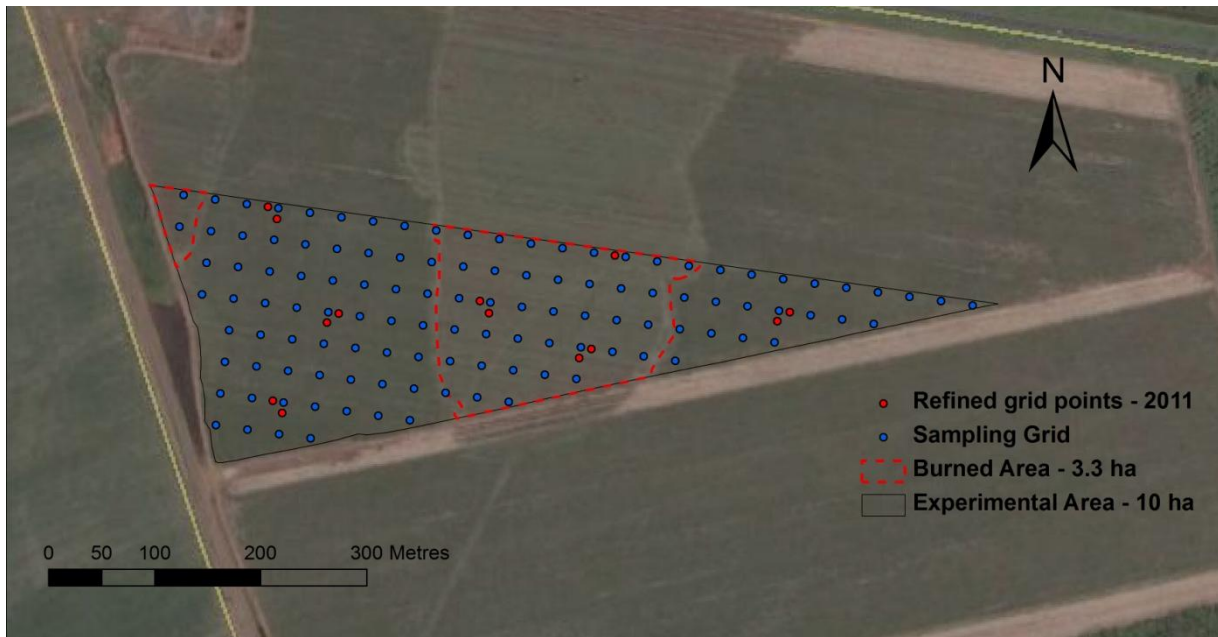


Figure 10 – Experimental Layout - Grid sampling, refined grid points and burned area.

Conventional descriptive statistical analyses of the samples were performed as a first approach for the evaluation of the parameters throughout the experiment. Skewness and kurtosis indices, together with Kolmogorov-Smirnov statistics, were calculated to test the normality of the data distribution. Additionally, box-plots were generated for each variable, and an analysis of spatial distribution was performed using three-dimensional surface plots to identify the outliers and artefacts. The outliers detected were treated using the mean of the four nearest neighbours from the outlier, adapted from Jolliffe (1986). This methodology was used as an alternative to reject the detected outliers from each variable, as the Principal Component Analysis (PCA) procedure requires a full matrix of data without any missing values.

The relationships among the soil parameters (chemical and physical) and the N were analysed by Pearson's correlation coefficients and PCA. The PCA allowed the identification of the components responsible for the total variation of the data and the variable groups that explained these variations and cannot be obtained by Pearson correlations (BURAK et al., 2010).

The principal components (PCs) selection was made according to the Mardia et al. (1989) criterion, which considers that the cumulative percentage value from the Eigenvalues matrix must explain at least 90% of the total variance of the dataset. The variables related to the unselected PCs that carry the highest Eigenvector of each component were removed. This procedure was executed individually along the dataset of the three crop cycles, selecting the

main variables of each cycle. The selected variables of each crop cycle were compared and it was chosen the variables that were replicated at least twice throughout the selections, creating a group of remaining variables. This step was called as First PCA. Afterwards, the PCA procedure was performed again (Second PCA) using just the remaining variables, rerunning the method with the 2008 and 2010 dataset. Hence the representative function of each component was generated using the correlation, Eigenvalue and Eigenvector matrices. These new PCs from 2008 and 2010 dataset were used as predictor variables for the response quality attributes of the next years' crop, i.e., the PCs from 2008 (plant cane) were used to create quality models for 2009 (first ratoon) and the PCs from 2010 dataset were used to create quality models for 2011 (second ratoon). The quality models were fitted by means of multiple regressions, using the standard least squares method to predict the Brix, pol and fibre.

The digital soil mapping (DSMa) and the digital soil modelling (DSMo) for the Brix and pol were interpolated into a 2-m grid by global point kriging using Vesper 1.6 (The University of Sydney, Sydney, Au). For each variogram Space Dependence Index (SDI), the ratio of nugget variance and sill, expressed as a percentage, was calculated (Cambardella et al., 1994). The estimation error (E.E.) for the Brix, pol and fibre, expressed as percentage, was calculated and mapping using the Spatial Analyst extension in ArcGIS 9.3 (ESRI, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA).

6.4. Results and Discussion

Exploratory statistical analysis

Based on the descriptive analyses of the soil physical and chemical attributes, leaf nitrogen and sugar cane quality parameters (Table 4), at the first year, all parameters with the exception of P, SB and CEC at first layer and P and SB at second layer along the 117 sampled points presented a distribution where means and medians were similar, revealing distributions that were only slightly asymmetrical. A similar case repeated for the following years, with exception of Fe and SB at first layer of the second year, P at both layers for the second and third year. Phosphorus shows throughout the literature to have such difficulty about the study of its variability, mainly because it has low mobility especially in clay soils, becoming usual to have samples defiled by residual particles of fertilizers.

The skewness and/or kurtosis coefficients presented values negative and near zero with exception of P, K, Ca, Mg, SB, CEC, Cu and Zn at first layer and P, K, Ca, Cu, Fe Mn

and Zn at second layer which presented high values of skewness and/or kurtosis in 2008 data. The 2011 data showed similar behaviour including N and $SOM_{0-0.2}$ and removing Cu and Fe at 0.2-0.5 m that presented lower values of skewness and kurtosis. The majority of the variables from 2010 dataset showed values higher than 2 for skewness and/or kurtosis. Johnson & Richard Jr. (2005) detected significant positive skew with the mean greater than the median, for the majority of these properties, with K, Mg, CEC, and S not significantly skewed.

All distributions were considered as non-normal for the Kolmogorov-Smirnov statistic at 5% of significance with exception of N in 2008, Brix in 2011 dataset, pol for the three years dataset, fibre from 2010 dataset, Sand and Clay at both layers, V at both layers in the first two years, $Fe_{0-0.2}$ in 2008 and 2011 dataset as well as $Mn_{0-0.2}$ and $SB_{0.2-0.5}$ in 2011. The coefficients of variation showed that only Brix, pol, fibre, N and pH (both layers) along the three years and sand (both layers) had low variation ($CV \leq 12\%$), in agreement with the Warrick & Nielsen (1980) criteria.

Table 4 - Descriptive analysis for physical and chemical soil attributes and sugar cane quality parameters

	2008 (n = 117)						2009-2010 (n = 117)						2011 (n = 130)					
	med	mean	CV	sk	k	p-value	med	mean	CV	sk	k	p-value	med	mean	CV	sk	k	p-value
Brix	-	-	-	-	-	-	20.8	20.7	2.6	-0.36	0.31	0.02	19.2	19.1	4.1	-0.28	0.76	>0.15
pol	-	-	-	-	-	-	15.9	15.9	3.3	-0.59	0.41	>0.15	14.5	14.4	5.8	-0.59	1.17	>0.15
fibre	-	-	-	-	-	-	12.4	12.4	3.6	2.07	12.68	>0.15	11.5	11.7	7.2	0.93	1.14	<0.01
N	11.3	11.2	7.24	-0.01	1.16	>0.15	9.6	9.66	12.2	4.00	30.56	<0.01	10.8	10.8	1.94	1.41	7.55	<0.01
Sand_{0-0.2}	678.0	677.7	6.1	0.03	-0.30	>0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clay_{0-0.2}	235.5	232.5	14.0	-0.06	-0.10	>0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOM_{0-0.2}	20.0	19.6	12.1	-0.20	-0.10	<0.01	18.0	18.7	11.6	0.51	2.51	<0.01	12.0	11.9	17.7	2.22	9.58	<0.01
pH_{0-0.2}	5.5	5.5	7.3	0.60	-0.04	<0.01	5.3	5.3	6.5	0.41	-0.29	<0.01	5.5	5.5	5.2	0.07	-0.70	<0.01
P_{0-0.2}	51.0	65.2	103.6	5.40	34.60	<0.01	45.0	60.4	92.2	5.22	37.88	<0.01	34.0	42.3	125.9	9.08	93.30	<0.01
K_{0-0.2}	1.0	1.1	31.8	1.50	3.30	<0.01	0.9	0.9	34.7	2.23	8.10	<0.01	0.7	0.7	38.0	1.88	6.91	<0.01
Ca_{0-0.2}	37.0	39.4	40.4	2.40	9.40	<0.01	32.0	34.6	35.3	2.60	13.21	<0.01	27.0	27.6	26.0	2.00	6.20	<0.01
Mg_{0-0.2}	12.0	13.4	45.7	2.30	8.70	<0.01	10.0	10.6	38.6	2.22	8.25	<0.01	10.0	10.2	30.2	1.46	3.68	<0.01
H+Al_{0-0.2}	16.0	17.3	26.0	0.40	0.10	<0.01	22.0	21.4	23.6	0.27	-0.52	<0.01	24.0	23.5	19.7	0.32	-0.26	<0.01
SB_{0-0.2}	50.9	54.1	39.8	2.13	6.55	<0.01	43.6	46.2	33.8	2.66	13.39	<0.01	37.3	38.6	24.9	1.95	6.30	<0.01
CEC_{0-0.2}	68.1	71.4	26.1	2.40	8.60	<0.01	66.0	67.8	19.7	3.13	19.27	<0.01	61.2	62.1	14.1	1.94	6.27	<0.01
V_{0-0.2}	74.0	73.5	13.6	-0.13	-0.59	>0.15	67.0	66.9	14.5	0.17	-0.50	>0.15	61.0	61.6	13.3	0.09	-0.21	>0.01
B_{0-0.2}	0.1	0.1	24.2	0.06	0.50	<0.01	0.1	0.1	14.3	0.35	-0.26	<0.01	0.5	0.6	31.2	0.53	0.24	<0.03
Cu_{0-0.2}	0.9	0.9	29.0	2.50	11.70	<0.01	1.1	1.2	103.1	9.59	98.61	<0.01	1.4	1.4	27.7	1.76	7.92	<0.01
Fe_{0-0.2}	34.0	34.4	33.4	0.80	1.60	>0.05	55.0	61.5	95.0	9.41	96.69	<0.01	50.0	48.1	34.6	-0.04	-0.23	>0.05
Mn_{0-0.2}	2.9	2.9	34.0	0.60	0.03	<0.03	4.8	5.5	85.7	8.61	85.41	<0.01	4.8	4.7	25.4	0.44	1.24	>0.15
Zn_{0-0.2}	0.4	0.4	43.4	3.70	21.20	<0.01	0.4	0.5	75.8	4.67	27.90	<0.01	0.6	0.6	47.0	5.21	40.47	<0.01
Sand_{0.2-0.5}	652.0	649.8	6.2	-0.03	-0.18	>0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clay_{0.2-0.5}	253.5	253.9	12.2	0.16	-0.18	>0.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOM_{0.2-0.5}	14.0	13.8	11.3	0.95	2.88	<0.01	12.0	12.6	11.9	0.68	-0.12	<0.01	8.0	8.5	25.7	4.06	25.98	<0.01
pH_{0.2-0.5}	5.30	5.3	6.8	0.01	-0.35	<0.01	5.2	5.2	7.0	0.09	-0.36	0.02	5.4	5.4	6.5	0.04	-0.86	<0.01
P_{0.2-0.5}	20.0	29.1	96.0	3.12	12.92	<0.01	20.0	25.7	77.8	3.34	18.19	<0.01	19.5	24.5	127.0	9.66	103.16	<0.01
K_{0.2-0.5}	0.60	0.6	40.7	1.71	3.38	<0.01	0.4	0.4	46.9	0.68	0.78	<0.01	0.4	0.4	38.2	1.76	4.45	<0.01
Ca_{0.2-0.5}	23.0	24.5	32.9	1.41	3.67	<0.01	20.0	21.2	34.6	1.65	7.04	<0.01	21.0	21.4	26.8	0.95	1.87	<0.01
Mg_{0.2-0.5}	9.00	9.9	34.9	0.81	0.54	<0.01	8.0	8.4	35.9	1.59	6.48	<0.01	9.0	9.1	30.6	0.40	-0.23	<0.01
H+Al_{0.2-0.5}	18.0	17.5	24.4	0.60	0.72	<0.01	20.0	19.9	20.9	0.33	-0.16	<0.01	22.0	22.7	21.1	0.71	0.64	<0.01
SB_{0.2-0.5}	33.2	35.1	31.7	1.04	1.63	<0.01	29.1	30.0	33.4	1.69	7.77	<0.05	30.7	31.1	26.0	0.68	1.20	>0.15
CEC_{0.2-0.5}	51.4	52.7	16.7	1.11	2.21	<0.01	49.0	50.1	15.8	2.13	10.36	<0.01	53.5	53.7	12.5	0.74	1.03	<0.05
V_{0.2-0.5}	65.0	65.3	16.6	-0.08	-0.53	>0.15	60.0	58.7	19.0	-0.16	-0.19	>0.15	58.0	57.2	17.3	-0.36	-0.32	<0.01
B_{0.2-0.5}	0.1	0.1	24.1	-0.19	-0.45	<0.01	0.1	0.1	17.7	-0.66	3.08	<0.01	0.4	0.4	34.6	0.58	-0.15	<0.03
Cu_{0.2-0.5}	0.6	0.6	34.0	2.78	14.19	<0.01	0.6	0.6	29.6	1.15	2.79	<0.01	0.8	0.9	34.5	1.00	1.14	<0.01
Fe_{0.2-0.5}	22.0	22.2	38.4	2.51	13.45	<0.01	30.0	31.6	31.7	1.83	7.08	<0.01	27.0	29.0	30.5	0.94	0.76	<0.01
Mn_{0.2-0.5}	1.0	1.5	243.1	9.31	92.59	<0.01	1.6	1.8	53.7	2.05	7.29	<0.01	1.8	1.9	44.4	2.42	9.84	<0.01
Zn_{0.2-0.5}	0.2	0.2	47.4	2.46	8.41	<0.01	0.2	0.2	68.5	1.18	1.77	<0.01	0.5	0.5	39.2	4.07	20.75	<0.01

where: med – median; CV – coefficient of variation; sk – skewness; k – kurtosis; p-value for normality test. N in (g.kg⁻¹); Brix, pol and V in (%); sand and clay in (g.kg⁻¹); SOM in (g.dm⁻³); P, B, Cu, Fe, Mn, Zn in (mg.dm⁻³); K, Ca, Mg, H+Al, SB and CEC in (mmolc.dm⁻³).

The box-plot and the analysis of spatial distribution proved that the mainly cause of those high values of skewness, kurtosis and CV, as well as the non normality of those distributions were the outliers detected by means of these analysis, being available to adopt the mean of the neighbours for those outliers, cleaning the data and working on with these cleaned data throughout the rest of the analysis.

Modelling process

Before taking the variables into the PCA procedure, it were removed the soil attributes that were calculated (SB, CEC and V at both layers). Those attributes called as redundant variables were removed avoiding multicollinearity on the process. The First PCA done along the three datasets showed that, from the 29 original variables, 13 were necessary to explain 90% of the dataset variance from 2008 and 2010 data and 14 for the 2011 data, creating a group of 12 remaining variables (Table 5) that were used for the Second PCA process, individually for each year. The sample points reached by the fire were removed of the 2011 analysis avoiding external influences on the data. In the 2008 dataset (Table 6), the first component explains 26.2% of the 90% of the dataset variance. The three most important variables inside this PC are the SOM at first layer and the Cu at both of the layers, together contributing almost 50% of the 26.2%. The following PC carried 15.5% of the 2008 dataset variance, with the K in both layers and P at 0-0.2 m, responsible almost 60% of the 15.5% (Table 6). For 2010, the first PC is responsible for more than 30% of the 90% of the variance explained by the 12 PCs. For PC1, the three most important variables are the SOM at both of the depths and Cu at 0 – 0.2 m, thus, contributing almost 50% of the 30%. Nevertheless, the second PC of this dataset analysis was responsible for 14% of the variance, with the K in both of the layers and the P at 0 - 0.2 m as the most important variables, being responsible for almost 64% of the 14% (Table 7).

Table 5 – Selected variables from the First PCA

2008	2010	2011 - Burned Out	Remaining Variables
N**	N**	N**	N**
Sand _{0-0.2} **	Sand _{0-0.2} **	Sand _{0-0.2} **	Sand _{0-0.2} **
Clay _{0.2-0.5}	SOM _{0-0.2} **	SOM _{0-0.2} **	SOM _{0-0.2} **
SOM _{0-0.2} **	P _{0-0.2} *	P _{0-0.2} *	P _{0-0.2} *
K _{0-0.2} **	K _{0-0.2} **	K _{0-0.2} **	K _{0-0.2} **
Cu _{0-0.2} *	Mg _{0-0.2}	Ca _{0-0.2}	Cu _{0-0.2} *
Mn _{0-0.2} *	B _{0-0.2}	Cu _{0-0.2} *	Mn _{0-0.2} *
SOM _{0.2-0.5} **	SOM _{0.2-0.5} **	Fe _{0-0.2}	SOM _{0.2-0.5} **
K _{0.2-0.5} *	P _{0.2-0.5}	Mn _{0-0.2} *	K _{0.2-0.5} *
Ca _{0.2-0.5}	K _{0.2-0.5} *	Zn _{0-0.2}	B _{0.2-0.5} *
Cu _{0.2-0.5} *	B _{0.2-0.5} *	SOM _{0.2-0.5} **	Cu _{0.2-0.5} *
Mn _{0.2-0.5}	Cu _{0.2-0.5} *	B _{0.2-0.5} *	Zn _{0.2-0.5} **
Zn _{0.2-0.5} **	Zn _{0.2-0.5} **	Fe _{0.2-0.5}	
		Zn _{0.2-0.5} **	

* Variables replicated twice along the three crop cycles

** Variables replicated in all the three crop cycles

Table 6 - Eigenvalues and eigenvectors of each principal component for 2008 data analysis – Second PCA used for 2009 sugar cane quality parameters modelling.

	Principal Components											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Eigenvalues	3.14	1.86	1.47	1.12	0.98	0.90	0.57	0.55	0.44	0.40	0.33	0.23
% Variance	26.2	15.5	12.3	9.3	8.2	7.5	4.8	4.6	3.7	3.3	2.8	1.9
Cumulative %	26.2	41.7	53.9	63.2	71.4	78.9	83.7	88.3	92.0	95.3	98.1	100.0
Variables	Eigenvectors											
N	-0.084	-0.207	0.016	-0.029	0.903	-0.290	-0.010	-0.089	-0.142	0.034	0.143	-0.020
Sand_{0-0.2}	-0.210	0.012	0.607	0.282	0.142	0.171	0.373	0.107	0.225	0.168	-0.342	0.334
SOM_{0-0.2}	0.390	0.132	-0.105	-0.432	0.103	-0.132	0.300	0.232	-0.126	-0.438	-0.391	0.316
P_{0-0.2}	0.107	0.458	0.415	-0.367	0.063	-0.109	0.125	0.228	0.278	0.048	0.345	-0.436
K_{0-0.2}	0.208	0.404	-0.300	0.038	0.262	0.452	-0.050	0.203	-0.210	0.540	-0.212	-0.068
Cu_{0-0.2}	0.385	-0.288	0.160	-0.196	0.044	0.293	-0.344	0.161	0.219	0.117	0.403	0.498
Mn_{0-0.2}	0.347	-0.120	0.335	-0.062	-0.024	0.361	0.261	-0.550	-0.443	-0.071	0.098	-0.190
SOM_{0.2-0.5}	0.373	0.003	-0.321	0.130	-0.019	-0.259	0.446	-0.369	0.476	0.308	0.096	0.090
K_{0.2-0.5}	0.130	0.466	-0.057	0.500	0.213	0.207	-0.161	-0.144	0.188	-0.554	0.163	0.093
B_{0.2-0.5}	0.278	-0.363	-0.062	0.439	-0.022	0.030	0.321	0.585	-0.119	-0.112	0.191	-0.291
Cu_{0.2-0.5}	0.419	-0.193	0.212	0.106	0.059	-0.132	-0.456	-0.067	0.269	0.004	-0.540	-0.366
Zn_{0.2-0.5}	0.254	0.288	0.255	0.289	-0.172	-0.555	-0.172	0.038	-0.446	0.228	0.104	0.271

Table 7 - Eigenvalues and eigenvectors of each principal component for 2010 data analysis – Second PCA used for 2011 sugar cane quality parameters modelling.

	Principal Components											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Eigenvalues	3.68	1.68	1.24	1.07	0.98	0.80	0.76	0.49	0.41	0.38	0.27	0.23
% Variance	30.7	14.0	10.4	8.9	8.2	6.6	6.3	4.1	3.4	3.2	2.3	1.9
Cumulative %	30.7	44.7	55.0	64.0	72.2	78.8	85.1	89.2	92.6	95.8	98.1	100.0
Variables	Eigenvectors											
N	0.149	-0.189	0.264	-0.613	0.112	0.527	0.382	0.171	-0.031	-0.136	-0.083	0.071
Sand_{0-0.2}	-0.351	0.104	-0.309	0.160	0.074	0.086	0.545	0.078	0.458	0.212	0.114	0.403
SOM_{0-0.2}	0.387	-0.050	-0.085	-0.017	0.157	-0.249	-0.187	0.731	0.414	-0.071	-0.087	0.019
P_{0-0.2}	0.204	0.347	-0.586	-0.127	-0.037	-0.047	0.323	0.086	-0.275	-0.304	0.268	-0.351
K_{0-0.2}	0.067	0.459	0.385	-0.108	0.531	-0.251	0.014	-0.260	0.182	-0.291	0.275	0.133
Cu_{0-0.2}	0.384	-0.234	-0.111	0.116	0.237	-0.277	0.205	-0.049	-0.509	0.105	-0.093	0.561
Mn_{0-0.2}	0.377	0.085	-0.244	-0.262	0.234	0.036	-0.061	-0.376	0.247	0.615	-0.171	-0.228
SOM_{0.2-0.5}	0.407	-0.007	0.113	0.192	-0.252	0.347	-0.143	0.004	0.058	0.182	0.718	0.168
K_{0.2-0.5}	0.060	0.555	0.345	0.318	0.018	0.175	0.207	0.331	-0.281	0.359	-0.242	-0.137
B_{0.2-0.5}	0.230	-0.184	0.350	0.025	-0.420	-0.470	0.523	-0.128	0.198	0.031	0.026	-0.249
Cu_{0.2-0.5}	0.169	-0.340	-0.006	0.580	0.419	0.309	0.177	-0.135	0.121	-0.252	-0.087	-0.336
Zn_{0.2-0.5}	0.345	0.317	-0.093	0.115	-0.383	0.208	-0.058	-0.259	0.229	-0.373	-0.452	0.320

Similar results were obtained between the both years studied, getting as the more important variables into the datasets the SOM, P, K and Cu concentrations. Dias et al. (1999) evaluated six field trials with six varieties of sugar cane distributed in the northeast region of São Paulo state, Brazil, using multiple regression analysis and found that the Ca, pH and SOM variables in the 0.3 – 1.5 m layer had the highest correlation with the crop yield. In plants, Ca acts in the cellular division, which is crucial for new root formation, and several authors have shown that plants with well-developed root systems are more productive (FARONI & TRIVELIN, 2006; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007; VITTI et al. 2007), accumulate more nutrients in their biomass (FRANCO et al. 2007) and are less susceptible to water deficit (DIAS et al. 1999; BATTIE LACLAU & LACLAU, 2009). This positive effect occurs when the levels of soil acidity (pH, H+Al and aluminium saturation) are at levels suitable for root development in crops. Ca was not selected for the models, whereas SOM and K were, confirming results obtained by Aquino et al. (1993), who indicated that K stimulate among others characteristics the storage of sugar and starch, being its deficit responsible for less accumulation of sucrose (CASTRO, 2000).

Timm et al. (2003) presented results showing that the soil clay content has an effective contribution to the number of stalks of sugar cane per meter of row. Using multiple regression analysis, the authors found that more than 38% of the variance was explained by such analyses using the P, Ca, Mg, clay content and aggregate stability. Cerri & Magalhães (2011) also verified a moderate linear correlation between the yield and the C, N, SOM, H+Al and clay content. On this study, soil clay content was not selected as important variable, but soil sand content was. Sand content had a negative contribution on the PCs with moderate value of eigenvector (Table 6 and Table 7), which may be explained by the soil water percolation, unfavourable for the roots water absorption.

Phosphorus is probably the most difficult nutrient to manage in Brazilian soils, even though it is not the nutrient most extracted by the crop (FRANCO et al., 2008; FRANCO et al., 2010) because it is strongly retained in the soil colloidal matrix, particularly by iron and aluminium oxides in acid soils and precipitates, such as calcium phosphate, in alkaline soils (CANTARELLA & ROSSETTO, 2010). Several studies conducted in Brazil have shown the response of crops to P fertilisation, including Beauclair (1991), who observed the influence of P applied to planting furrows, which promoted yield increases in the first two harvests (cane

plant and first ratoon). In this study P was applied at planting furrows, which it makes sense the element has been selected on the two datasets performed, being important on the variance of the datasets.

The results obtained in a previous analysis by means of a simple correlation among the chemical soil attributes (both depths) showed that the SOM was high correlated with micro nutrients and, in a investigation about the planting historical, it was noticed that was applied 30 ton ha⁻¹ of filter cake on planting furrows, which is responsible about the SOM and the micro nutrients supplies (VITTI et al., 2007b). This may be enough reason for the selection of micronutrients and SOM using the PCA procedure. The predictive models for the Brix, pol and fibre were generated for the first and second ratoon by the multiple regression procedure using the Standard Least Squares method (Table 8). The descriptive analysis for the measured, estimated and residual values of the response variables (Table 9) showed that, with exception of fibre model from the second ratoon, despite the low values of R² it was possible to observe that the residual values were small for all of the models, thus, indicating the good performance of the models. Johann et al. (2002) used a similar methodology to generate a yield model for soybean crops and also obtained fractional residual values for the estimations. The Brix – 2nd ratoon model together with Fibre (both crop cycles) models were statistically significant at 5% of significance, while Brix – 1st ratoon was slightly non-significant at 5% as well.

Table 8 - Predictive models for Brix, pol and fibre

Predictor	Brix – 1 st ratoon	Brix – 2 nd ratoon	pol – 1 st ratoon	pol – 2 nd ratoon	fibre – 1 st ratoon	fibre – 2 nd ratoon
interceptor	20.799	19.372	15.942	14.715	12.425	11.731
PC1	-0.053	0.031	-0.017	-0.018	-0.022	0.176
PC2	0.009	-0.036	-0.024	-0.045	0.010	0.074
PC3	-0.012	0.042	0.023	0.072	-0.041	-0.009
PC4	0.126	-0.071	0.066	-0.028	-0.012	-0.246
PC5	0.034	-0.156	0.001	-0.157	0.116	-0.343
PC6	0.082	-0.271	0.072	-0.251	-0.046	-0.242
PC7	-0.030	-0.195	-0.038	-0.186	0.085	0.046
PC8	-0.024	-0.075	-0.041	-0.014	-0.007	-0.171
PC9	-0.016	0.227	-0.038	0.241	-0.012	-0.021
PC10	0.051	0.053	0.007	-0.013	0.008	0.165
PC11	-0.065	-0.042	-0.010	-0.026	-0.064	0.122
PC12	0.172	0.155	0.020	0.132	0.011	0.037
R ²	0.171	0.239	0.065	0.192	0.189	0.520
RMSE	0.488	0.684	0.487	0.723	0.344	0.622
p-value	0.059	0.046	0.834	0.162	0.028	0.000

Table 9 – Descriptive analysis for the cleaned measured, estimated and residuals data for Brix, pol and Fibre – 1st and 2nd ratoon.

%	N	min.	med	max.	mean	SD	CV	sk	k	p-value
1st Ratoon										
Brix_{measured}	117	19.50	20.80	22.00	20.80	0.51	2.44	-0.16	0.07	>0.05
Brix_{estimated}	117	20.17	20.82	21.25	20.80	0.21	1.01	-0.50	0.49	>0.15
Brix_{residual}	117	-1.26	-0.03	1.10	0.00	0.46	-	-0.13	-0.15	>0.15
pol_{measured}	117	14.75	15.92	16.92	15.94	0.48	2.99	-0.20	-0.36	>0.15
pol_{estimated}	117	15.65	15.94	16.29	15.94	0.12	0.76	-0.08	0.03	>0.15
pol_{residual}	117	-1.27	-0.02	0.96	0.00	0.46	-	-0.23	0.01	>0.15
fibre_{measured}	117	11.51	12.44	13.19	12.43	0.36	2.92	-0.14	-0.70	>0.15
fibre_{estimated}	117	12.06	12.42	12.84	12.43	0.16	1.27	0.05	-0.47	>0.15
fibre_{residual}	117	-0.83	-0.01	0.79	0.00	0.33	-	-0.06	-0.39	>0.15
2nd Ratoon										
Brix_{measured}	130	17.40	19.20	20.60	19.20	0.70	3.66	-0.05	-0.44	>0.15
Brix_{estimated}	130	18.50	19.37	20.78	19.37	0.37	1.93	0.44	0.80	>0.05
Brix_{residual}	86	-1.70	0.07	1.24	0.00	0.63	-	-0.56	0.21	>0.15
pol_{measured}	130	12.43	14.53	16.35	14.48	0.76	5.23	-0.07	-0.33	>0.15
pol_{estimated}	130	13.92	14.72	16.08	14.72	0.36	2.42	0.47	1.24	>0.05
pol_{residual}	86	-1.68	0.05	1.56	0.00	0.67	-	-0.43	0.13	>0.10
fibre_{measured}	130	10.27	11.50	13.93	11.69	0.78	6.67	0.52	-0.20	<0.01
fibre_{estimated}	130	10.57	11.73	13.22	11.73	0.59	4.99	0.52	-0.27	<0.01
fibre_{residual}	86	-1.58	0.05	1.29	0.00	0.58	-	-0.10	-0.15	>0.15

where: min – minimum; med; median; max – maximum; SD – standard deviation; CV – coefficient of variation; sk – skewness; k – kurtosis; p-value for normality test.

All the distributions showed to be normal based on Kolmogorov-Smirnov at 5% of significance with exception of fibre measured and estimated. The residues from the 2nd ratoon with a different number of observation is justify by the fact that, since the model created did not use the grid points reached by the fire, there were not measured points to get residues. Landell et al. (2003) used multiple regression analysis by the stepwise procedure to select soil subsurface chemical variables during three crop seasons and noted that a better model was obtained with the sum of the bases, Ca and SOM, which explained 47% of the yield variation of sugar cane (variety RB72-454).

In general, the SOM presents a good correlation with the sugar yield (LANDELL et al. 2003; JOHNSON & RICHARD JR., 2005; CERRI & MAGALHÃES, 2011), sucrose, Brix and pol (JOHNSON & RICHARD JR., 2005). However, according to the PCA, the SOM presented a high contribution for the two years in the PC1, for the 0 - 0.2 m layer in the first year and the both layers for the second year, ranging its contribution between 15% to 30% on the first and second year studied – confirming that SOM may be important for sugar concentrations as well as yield.

Spatial analysis

The parameters of the variograms for each attribute measured and estimated for both years (Table 10) that provided better adjustments were chosen based on the Root Mean Square Error and Akaike criteria.

Table 10 - Semivariograms obtained for Brix, pol and fibre using measured and estimated values

		Model	C	Co	(C+Co)	A (m)	SDI (%)
1 st ratoon	Brix _{measured}	Gaussian	0.0429	0.2234	0.2663	113.8	83.8
	Brix _{estimated}	Exponential	0.0292	0.0288	0.0580	227.9	49.6
	pol _{measured}	Gaussian	0.0418	0.2043	0.2461	300.0	83.1
	pol _{estimated}	Exponential	0.0095	0.0089	0.0184	156.3	48.3
	fibre _{measured}	Gaussian	0.0439	0.0954	0.1393	47.7	68.4
	fibre _{estimated}	Exponential	0.0213	0.0089	0.0302	82.1	29.4
2 nd ratoon	Brix _{measured}	Exponential	0.2240	0.2317	0.4557	55.3	50.8
	Brix _{estimated}	Gaussian	0.0215	0.1148	0.1363	48.4	84.2
	pol _{measured}	Exponential	0.2867	0.2778	0.5645	72.1	49.2
	pol _{estimated}	Gaussian	0.0231	0.1251	0.1752	186.4	32.7
	fibre _{measured}	Exponential	0.7787	0.0221	0.8008	111.3	2.7
	fibre _{estimated}	Exponential	0.4772	0.0001	0.4773	95.7	0.2

where: C= Partial Sill; Co = Nugget; (Co+C) = Sill; A = Range; SDI = $[Co/(Co+C)].100$

The Brix estimated and measured for 1st ratoon presented an SDI that was considered moderate (26 to 75%) and low (76 to 100%) (Table 10), respectively; for 2nd ratoon, they had moderate spatial dependence, according to Cambardella et al. (1994). The estimated and measured pol showed a low/moderate degree of spatial dependence for the 1st ratoon and a moderate spatial dependence for the 2nd ratoon; fibre, both estimated and measured got moderate degree of spatial dependence for the 1st ratoon and high degree for the 2nd ratoon. In general, the refined grid created for the 2nd ratoon sampling was responsible for variograms more robust, with the spatial structure more described getting better SDIs comparing with the year before. Johnson & Richard Jr. (2005) obtained ranges for the Brix and pol that varied between 31.2 m and 124.3 m over three years, whereas, in the present study, these values ranged from 49 m to 300 m. This result shows that, inside the same area and working with the same variables, the spatial structure can change over time, therefore, it is not possible to recommend an optimum number of samples to describe the spatial dependence of some variables, but it is recommend to create a percentage of refined points located closer than the distance between points of the regular grid, in order to satisfy the requirement of minimising

the ratio of the smallest:largest separation distance (BRAMLEY & WHITE, 1991; BRAMLEY, 2005).

In the E.E. maps, the white zones represent an error of estimation with a tolerance interval of $\pm 0.25\%$ and $\pm 0.5\%$ for the first ratoon and $\pm 1.0\%$ for the second ratoon. These tolerance intervals were chosen based on the range of the errors of estimation, which it was different for each map/crop cycle (Figure 11), aiming a better visualization of each situation.

The areas in the established error tolerance interval of $\pm 0.25\%$ represented 46% and 82% of the study area for Brix and pol, respectively, and 51% for fibre ($\pm 0.5\%$) – first ratoon; and 41, 25 and 27% for the second ratoon maps (Brix, pol and fibre), with a higher tolerance interval of $\pm 1.0\%$ (Table 11). Along the two crop cycles studied, the area of underestimated values for the Brix, pol and fibre ranged from 9 to 35%, reaching -9% at maximum percentage of error, and the area of overestimated values ranged from 9 to 54%, reaching 16% at maximum percentage of error.

Even getting higher value of R^2 , fibre model for the second ratoon obtained higher values of percentage error, this situation may be explained based on the cross validation graphic, which showed the points (measured versus estimated) more scattered than the others, who showed estimations more addicted by the base values used for the model creation and p-values non-significant. On the other hand, Brix and pol – 2nd ratoon models showed a R^2 not so high as fibre model (2nd ratoon) with significant and non-significant p-values respectively, represented the burned area (Figure 11) with overestimated estimations, whereas it would expect higher values if it was not burned.

The soil and plant attributes represent only a portion of the factors that affect sugar cane quality, and it is known that climate changes, management choices and genotypes may contribute to the variability of the quality. Hence, generating models describing the quality with a small range of error may provide precision agriculture tools for the Brazilian conditions of sugar cane cultivation, focusing on those variables that may be controlled and corrected. Considering the results obtained by the PCA approach, all the 12 variables contribute with some part to describe the sugar cane quality, but SOM showed to be an important soil attribute to be focused, together with P and K, as confirmed by other authors on the discussion and observed throughout the experiment. Other relevant aspect is that, the filter cake applied on

planting furrows may provide SOM and micro nutrients for at least until the second ratoon, as far as the study was carried out, revealing the benefit of this operation.

Table 11 - Sub-levels area percentages of the estimation error (E.E.) maps

Tolerance	Area % - 1st Ratoon				Tolerance	Area % - 2nd Ratoon		
	Brix	pol	Tolerance	fibre		Brix	pol	fibre
< -0.25	22.8	9.0	< -0.5	25.3	< -1.0	13.0	20.3	35.2
-0.25 – 0.25	46.1	82.0	-0.5 – 0.5	51.7	-1.0 – 1.0	41.1	25.1	27.3
> 0.25	31.1	9.0	> 0.5	23.0	> 1.0	45.9	54.6	37.5

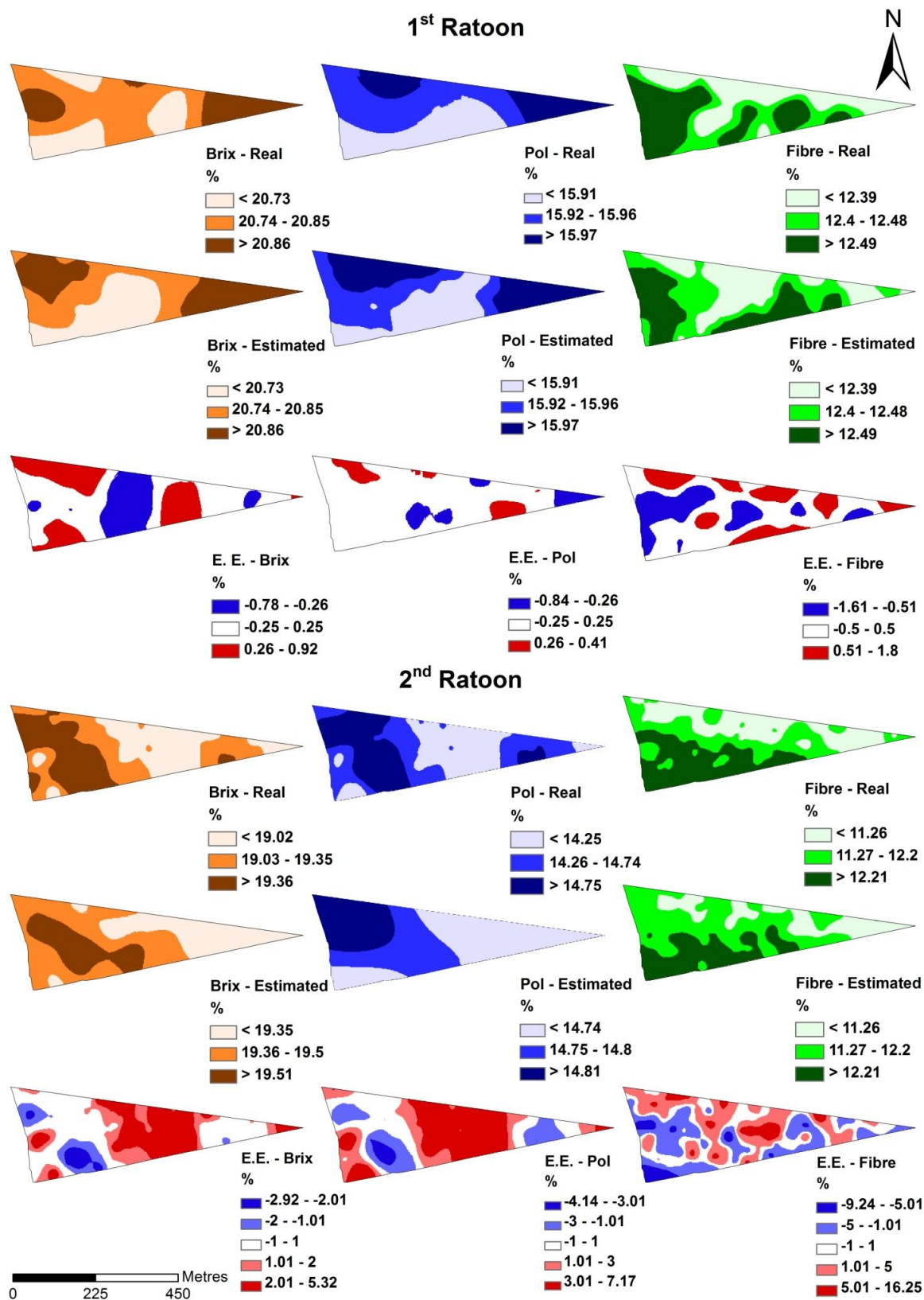


Figure 11 - Spatial variation of Brix, pol and fibre in the study area.

6.5. Conclusions

PCA procedures using a sugar cane field dataset for two crop cycles allowed the selection of the most important attribute variables (SOM, P and K), which driven the 12 variables used to explain the variance of the sugar cane quality parameters, Brix, pol and fibre. Based on the PCs and multiple regression analyses, it was also possible to present a model to estimate the Brix, pol and fibre with low residual values. The estimate models presented low/moderate values of R^2 and they described the spatial structure of the Brix, pol and fibre along the study area, while obtaining small percentages of estimation error.

7. USO DE ATRIBUTOS DO SOLO PARA MODELAGEM DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR

7.1. Resumo

A área de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil tem crescido substancialmente nos últimos anos, especialmente para subsidiar a demanda global de bioetanol. Tal crescimento em produção deve tomar lugar não somente de novos campos de cultivo da cana-de-açúcar, mas principalmente tendo o objetivo de melhorar a qualidade da matéria-prima como a concentração de açúcar (pol). Sendo assim, modelos capazes de descrever o comportamento dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar podem ser importantes no entendimento dos efeitos dos atributos do solo nesses parâmetros. Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi ajustar modelos matemáticos para os parâmetros de qualidade Brix, pol e fibra utilizando atributos físicos e químicos do solo como preditores. O trabalho foi desenvolvido em uma área cultivada com cana-de-açúcar de 10 ha localizada em Araras/SP, Brasil, durante dois ciclos da cultura começando em 2008. Os atributos químicos analisados foram os macro e micro nutrientes, e os atributos físicos foi o teor de argila e areia do solo. As variáveis utilizadas no modelo foram selecionadas por meio do procedimento *Stepwise*, e os ajustes dos modelos feitos por regressões múltiplas. Os resultados foram comparados utilizando os mapas “krigados” utilizando valores reais de Brix, pol e fibra e valores estimados. Os modelos apresentaram R^2 variando entre 0,36 a 0,46 durante os dois ciclos para Brix, de 0,15 a 0,47 para pol e de 0,12 a 0,80 para fibra. Esses resultados permitiram obter valores residuais entre 0,3 e 0,4 como resultados das estimações de Brix, pol e também fibra, representando o terceiro quartil dos dados estimados em todo o experimento por meio dos modelos.

Palavras-chaves: agricultura de precisão, stepwise, regressões múltiplas, variabilidade espacial.

7.2. Introdução

Esse capítulo refere-se a uma abordagem opcional no que diz respeito à seleção de variáveis para confecção de modelos, sendo então um complemento ao capítulo 06, possibilitando maior exploração do banco de dados.

Tendo como base o contexto exposto no capítulo anterior, o principal objetivo desse capítulo foi a análise da correlação entre atributos físicos e químicos do solo com os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar, Brix, pol e fibra, selecionando por meio da abordagem multivariada *Stepwise* as variáveis independentes (solo) de maior importância para confeccionar modelos de regressão múltipla, utilizando como variáveis respostas os parâmetros de qualidade.

7.3. Material e Métodos

No que diz respeito aos métodos de amostragens, metodologias de análises dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar e das concentrações de nutrientes e textura do solo, análise descritiva dos dados e tratamento dos valores discrepantes, todos esses passos foram os mesmos adotados no material e métodos dos capítulos anteriores.

Antecedendo o processo de seleção de variáveis para confecção dos modelos, foram selecionados aleatoriamente 70 pontos dentre os 130 (contando a grade refinada de 2011), utilizando então este sub-banco de dados para seleção e confecção dos modelos e, posteriormente, fazendo a aplicação do modelo confeccionado em todo o banco de dados. Para a seleção das variáveis que melhor explicam a qualidade da cana-de-açúcar, foi utilizada a metodologia *Stepwise* sentido *forward* com nível de 0,25 de significância de probabilidade para a inclusão de variáveis no modelo. As variáveis utilizadas como independentes no processo de seleção e confecção do modelo foram os atributos físicos e químicos do solo, exceto SB, CTC e V para evitar multicolinearidade no modelo, coletados após a colheita do primeiro ciclo (cana planta – novembro de 2008), sendo as variáveis dependentes os teores de Brix, pol e fibra do segundo ciclo (primeira soca – dezembro de 2009). Para a seleção das variáveis e confecção dos modelos de qualidade do terceiro ciclo (segunda soca – julho de 2011) foram utilizados como variáveis independentes os atributos do solo amostrado após a colheita do segundo ciclo (março de 2010 – cana bisada), tendo como variáveis dependentes os parâmetros de qualidade amostrados antes da colheita do terceiro ciclo (julho de 2011), excluindo os pontos atingidos pelo fogo. Após os processos de seleção das variáveis, procedeu-se à análise de regressão múltipla para a confecção dos modelos de Brix, pol e fibra do segundo e terceiro ciclo da cultura.

Os valores reais e estimados de Brix, pol e fibra foram interpolados numa grade de 2 m por meio da krigagem pontual global utilizando o programa computacional VESPER 1.6 (The University of Sydney, Sydney, Au). Para cada variograma foi calculado o índice de dependência espacial (IDE) a razão da variância do efeito pepita com o patamar, segundo Cambardella *et al.* (1994). A representação e análises das saídas do Vesper foram carregadas no programa computacional ArcGIS 9.3 (ESRI, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA) utilizando a extensão de Análise Espacial.

7.4. Resultados e Discussão

Análise estatística exploratória

Com base na análise descritiva dos atributos físicos e químicos do solo e parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar (Tabela 12), para o primeiro ano do experimento, todos os parâmetros com exceção do P, SB e CTC à primeira camada e P e SB à segunda camada apresentaram distribuição onde média e mediana são similares, revelando distribuições ligeiramente simétricas. Casos similares aconteceram para o ano seguinte, onde com exceção do Fe e SB à primeira camada para o segundo ano, P em ambas as camadas repetiram o mesmo comportamento. Fósforo mostra ao longo da literatura ser de grande dificuldade no que se refere ao estudo de sua variabilidade, principalmente devido ao fato de ter baixa mobilidade especialmente falando de solos argilosos, tornando usual obter amostras com fragmentos de fertilizantes fosfatados.

Os coeficientes de assimetria e/ou curtose obtiveram valores negativos e próximos de zero com exceção de P, K, Ca, Mg, SB, CTC, Cu e Zn à primeira camada e P, K, Ca, Cu, Fe, Mn e Zn à segunda camada os quais apresentaram altos valores de assimetria e/ou curtose dentre os dados de 2008. A grande maioria dos dados de 2010 apresentaram valores maiores que 2 para assimetria e/ou curtose. Johnson & Richard Jr. (2005) detectaram valores significativos e positivos de assimetria com médias maiores que mediana para a maioria desses atributos, com K, Mg, CTC e S apresentando coeficiente assimétrico não significativo.

Todas as distribuições foram consideradas como não normais pelo teste Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância com exceção do Brix em 2011, pol para os dois anos, fibra em 2010; areia, argila e V em ambas profundidades para os dois anos e Fe_{0-0,2} em 2008. Os

coeficientes de variação mostraram que apenas Brix, pol, fibra e pH (ambas profundidades) ao longo de todos os anos em estudo e areia (ambas profundidades) obtiveram baixa variação ($CV \leq 12\%$), de acordo com critério estabelecido por Warrick & Nielsen (1980).

Tabela 12 – Análise descritiva dos dados físicos e químicos do solo e parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar

	2008 (n = 117)						2009-2010 (n = 117)						2011 (n = 130)					
	med	média	CV	sk	k	p-valor	med	média	CV	sk	k	p-valor	med	média	CV	sk	k	p-valor
Brix	-	-	-	-	-	-	20,8	20,7	2,6	-0,36	0,31	0,02	19,2	19,1	4,1	-0,28	0,76	>0,15
pol	-	-	-	-	-	-	15,9	15,9	3,3	-0,59	0,41	>0,15	14,5	14,4	5,8	-0,59	1,17	>0,15
fibra	-	-	-	-	-	-	12,4	12,4	3,6	2,07	12,68	>0,15	11,5	11,7	7,2	0,93	1,14	<0,01
Areia_{0-0,2}	678,0	677,7	6,1	0,03	-0,30	>0,12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Argila_{0-0,2}	235,5	232,5	14,0	-0,06	-0,10	>0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MO_{0-0,2}	20,0	19,6	12,1	-0,20	-0,10	<0,01	18,0	18,7	11,6	0,51	2,51	<0,01	-	-	-	-	-	-
pH_{0-0,2}	5,5	5,5	7,3	0,60	-0,04	<0,01	5,3	5,3	6,5	0,41	-0,29	<0,01	-	-	-	-	-	-
P_{0-0,2}	51,0	65,2	103,6	5,40	34,60	<0,01	45,0	60,4	92,2	5,22	37,88	<0,01	-	-	-	-	-	-
K_{0-0,2}	1,0	1,1	31,8	1,50	3,30	<0,01	0,9	0,9	34,7	2,23	8,10	<0,01	-	-	-	-	-	-
Ca_{0-0,2}	37,0	39,4	40,4	2,40	9,40	<0,01	32,0	34,6	35,3	2,60	13,21	<0,01	-	-	-	-	-	-
Mg_{0-0,2}	12,0	13,4	45,7	2,30	8,70	<0,01	10,0	10,6	38,6	2,22	8,25	<0,01	-	-	-	-	-	-
H+Al_{0-0,2}	16,0	17,3	26,0	0,40	0,10	<0,01	22,0	21,4	23,6	0,27	-0,52	<0,01	-	-	-	-	-	-
SB_{0-0,2}	50,9	54,1	39,8	2,13	6,55	<0,01	43,6	46,2	33,8	2,66	13,39	<0,01	-	-	-	-	-	-
CTC_{0-0,2}	68,1	71,4	26,1	2,40	8,60	<0,01	66,0	67,8	19,7	3,13	19,27	<0,01	-	-	-	-	-	-
V_{0-0,2}	74,0	73,5	13,6	-0,13	-0,59	>0,15	67,0	66,9	14,5	0,17	-0,50	>0,15	-	-	-	-	-	-
B_{0-0,2}	0,1	0,1	24,2	0,06	0,50	<0,01	0,1	0,1	14,3	0,35	-0,26	<0,01	-	-	-	-	-	-
Cu_{0-0,2}	0,9	0,9	29,0	2,50	11,70	<0,01	1,1	1,2	103,1	9,59	98,61	<0,01	-	-	-	-	-	-
Fe_{0-0,2}	34,0	34,4	33,4	0,80	1,60	>0,05	55,0	61,5	95,0	9,41	96,69	<0,01	-	-	-	-	-	-
Mn_{0-0,2}	2,9	2,9	34,0	0,60	0,03	<0,03	4,8	5,5	85,7	8,61	85,41	<0,01	-	-	-	-	-	-
Zn_{0-0,2}	0,4	0,4	43,4	3,70	21,20	<0,01	0,4	0,5	75,8	4,67	27,90	<0,01	-	-	-	-	-	-
Areia_{0,2-0,5}	652,0	649,8	6,2	-0,03	-0,18	>0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Argila_{0,2-0,5}	253,5	253,9	12,2	0,16	-0,18	>0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MO_{0,2-0,5}	14,0	13,8	11,3	0,95	2,88	<0,01	12,0	12,6	11,9	0,68	-0,12	<0,01	-	-	-	-	-	-
pH_{0,2-0,5}	5,30	5,3	6,8	0,01	-0,35	<0,01	5,2	5,2	7,0	0,09	-0,36	0,02	-	-	-	-	-	-
P_{0,2-0,5}	20,0	29,1	96,0	3,12	12,92	<0,01	20,0	25,7	77,8	3,34	18,19	<0,01	-	-	-	-	-	-
K_{0,2-0,5}	0,60	0,6	40,7	1,71	3,38	<0,01	0,4	0,4	46,9	0,68	0,78	<0,01	-	-	-	-	-	-
Ca_{0,2-0,5}	23,0	24,5	32,9	1,41	3,67	<0,01	20,0	21,2	34,6	1,65	7,04	<0,01	-	-	-	-	-	-
Mg_{0,2-0,5}	9,00	9,9	34,9	0,81	0,54	<0,01	8,0	8,4	35,9	1,59	6,48	<0,01	-	-	-	-	-	-
H+Al_{0,2-0,5}	18,0	17,5	24,4	0,60	0,72	<0,01	20,0	19,9	20,9	0,33	-0,16	<0,01	-	-	-	-	-	-
SB_{0,2-0,5}	33,2	35,1	31,7	1,04	1,63	<0,01	29,1	30,0	33,4	1,69	7,77	<0,05	-	-	-	-	-	-
CTC_{0,2-0,5}	51,4	52,7	16,7	1,11	2,21	<0,01	49,0	50,1	15,8	2,13	10,36	<0,01	-	-	-	-	-	-
V_{0,2-0,5}	65,0	65,3	16,6	-0,08	-0,53	>0,15	60,0	58,7	19,0	-0,16	-0,19	>0,15	-	-	-	-	-	-
B_{0,2-0,5}	0,1	0,1	24,1	-0,19	-0,45	<0,01	0,1	0,1	17,7	-0,66	3,08	<0,01	-	-	-	-	-	-
Cu_{0,2-0,5}	0,6	0,6	34,0	2,78	14,19	<0,01	0,6	0,6	29,6	1,15	2,79	<0,01	-	-	-	-	-	-
Fe_{0,2-0,5}	22,0	22,2	38,4	2,51	13,45	<0,01	30,0	31,6	31,7	1,83	7,08	<0,01	-	-	-	-	-	-
Mn_{0,2-0,5}	1,0	1,5	243,1	9,31	92,59	<0,01	1,6	1,8	53,7	2,05	7,29	<0,01	-	-	-	-	-	-
Zn_{0,2-0,5}	0,2	0,2	47,4	2,46	8,41	<0,01	0,2	0,2	68,5	1,18	1,77	<0,01	-	-	-	-	-	-

onde: med - mediana; CV – coeficiente de variação; sk – assimetria; k – curtose; p-valor do teste de normalidade. Brix, pol, fibra, V em (%); areia, argila em (g kg⁻¹); MO – matéria orgânica em (g dm⁻³); P, B, Cu, Fe, Mn, Zn em (mg dm⁻³); K, Ca, Mg, H+Al, SB e CTC em (mmolc dm⁻³).

O gráfico “box-plot” e a análise da distribuição espacial comprovou que a principal causa dos altos valores de assimetria, curtose e CV, assim como as não normalidades das distribuições foram devido as *outliers* detectados por meio de ambas análises, tornando então viável adotar a metodologia proposta, limpando o banco de dados de tais valores discrepantes antecedendo as demais análises.

Seleção das variáveis e confecção dos modelos

Por meio da abordagem *Stepwise* sentido *forward* com nível de significância de 0,25 para as variáveis independentes entrarem no modelo; ao longo dos anos analisados, utilizando como variáveis dependentes Brix, pol e fibra, foram selecionadas de duas a 11 variáveis (Tabela 13) dentre as 28 variáveis iniciais do banco de dados, sendo todas elas estatisticamente significativas a 5% e/ou 10% de probabilidade.

Tabela 13 – Modelos para Brix, pol e fibra

1ª soca (2009)						2ª soca (2011)					
Coef.	Brix	Coef.	pol	Coef.	fibra	Coef.	Brix	Coef.	pol	Coef.	fibra
Dados de solo – 2008 - Modelo						Dados de solo – 2010 - Modelo					
12,8	Interc.	12,6	Interc.	11,9	Interc.	28,8	Interc.	16,1	Interc.	29,7	Interc.
0,006	Areia _{0-0,2} *	0,004	Areia _{0-0,2} *	0,039	MO _{0-0,2} *	-1,311	pH _{0-0,2} *	0,091	H+Al _{0-0,2} *	-0,024	Areia _{0-0,2} *
0,627	pH _{0-0,2} *	0,111	MO _{0-0,2} *	-0,122	Mn _{0-0,2} *	-0,046	H+Al _{0,2-0,5} *	-0,199	Mn _{0-0,2} *	-0,018	Argila _{0-0,2} *
-0,034	Ca _{0-0,2} *	-0,065	Mg _{0,2-0,5} *			-1,999	Cu _{0,2-0,5} *	-0,038	H+Al _{0,2-0,5} °	-0,011	Argila _{0,2-0,5} °
0,216	MO _{0,2-0,5} *	-0,029	Fe _{0,2-0,5} *			-0,334	Mn _{0,2-0,5} °	-2,646	Cu _{0,2-0,5} *	0,806	pH _{0-0,2} *
-0,022	Ca _{0,2-0,5} *					1,962	Fe _{0,2-0,5} *	1,659	Zn _{0,2-0,5} °	-0,821	K _{0-0,2} *
-0,034	Fe _{0,2-0,5} *									1,305	Cu _{0-0,2} °
										1,860	Zn _{0-0,2} *
										1,391	K _{0,2-0,5} *
										-0,040	Ca _{0,2-0,5} *
										13,73	B _{0,2-0,5} *
										-2,077	Cu _{0,2-0,5} *
R²	0,364		0,158		0,124	R²	0,465		0,478		0,804
Fcalc	0,0001*		0,0305*		0,015*	Fcalc	0,0002*		0,0001*		0,0001*
RMSE	0,395		0,430		0,335	RMSE	0,502		0,502		0,448

onde: Brix, pol e fibra estão em (%); coef. – coeficiente; Interc. – intercepto; R² – coeficiente de determinação; Fcalc – teste F de significância; RMSE – raiz quadrada do erro médio; * - estatisticamente significativo a 5% de probabilidade; ° - estatisticamente significativo a 10% de probabilidade.

Todos os modelos foram estatisticamente significativos a 5% de significância, explicando 36% e 46% da variabilidade do Brix, 15% e 47% da variabilidade do pol e 12% e 80% da variabilidade da fibra para a 1ª e 2ª soca respectivamente. As raízes quadradas do erro médio de todos os modelos variaram entre 0,3 a 0,5%, não ultrapassando de 1% de unidade das respectivas variáveis respostas. Analisando as variáveis selecionadas nos dois ciclos em

estudo, verifica-se que não houve um padrão das variáveis escolhidas. Com exceção do $\text{pH}_{0-0,2}$ e $\text{Fe}_{0,2-0,5}$ para Brix em ambos os ciclos, as demais variáveis não se repetiram de um ciclo para o outro. Tal evento pode ter sido ocasionado devido a diversos fatores e cenários diferentes, tais como a época da amostragem da planta para análise de qualidade, a qual para a primeira soca ocorreu em dezembro de 2009 - seguindo o ciclo de desenvolvimento da cultura; já para a segunda soca, a amostragem de planta ocorreu em junho de 2011 – devido a primeira soca ter se tornado cana bisada, sendo colhida em março de 2010; é possível citar também como fator determinante as diferentes condições climáticas a que foi exposto cada ciclo da cultura.

Estes resultados diferem de Braga (2011) que analisou as correlações entre atributos físicos (resistência a penetração e umidade gravimétrica) e químicos (macronutrientes) do solo com parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar variedade SP 79-1011, em seu terceiro ciclo (2ª soca). O autor obteve correlação de 0,20 com Brix e saturação por Alumínio e 0,18 para fibra com Al e saturação por Alumínio, baseado em dados de solo e planta coletados simultaneamente. Esses fatos podem ser a razão das divergências nos resultados entre os estudos.

No que se refere as variáveis selecionadas, todas possuem suas particularidades no desenvolvimento da planta e geração de açúcar ao longo do ciclo da cultura. Como discutido nos capítulos anteriores, o pH e H^+Al por exemplo, que foram variáveis pertinentes nos modelos, em níveis satisfatórios são favoráveis para o desenvolvimento das raízes, ocasionando efeito positivo na absorção de nutrientes pela planta, consequentemente contribuindo na produtividade (FARONI & TRIVELIN, 2006; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007; VITTI *et al.* 2007) e concentração de açúcares. Assim, pode-se inferir que em cada cenário haverá diferentes variáveis pertinentes que podem explicar eventos como a qualidade da cana-de-açúcar e ainda, embora os resultados apresentem modelos estatisticamente significativos, ao levar em consideração os grupos de variáveis selecionados em cada modelo de qualidade e os sinais dos coeficientes correspondentes dessas variáveis, não é possível explicar agronomicamente tais relações, podendo então tais variáveis e coeficientes ser puramente ajustes matemáticos.

Johnson & Richard Jr. (2005) analisando as correlações entre atributos do solo e parâmetros de qualidade constataram que as maiores correlações (negativas) foram para MO com Brix e pol, divergindo dos resultados deste trabalho que apresentem coeficientes

positivos para MO em alguns modelos e em outros esta variável não foi selecionada. Ainda, os mesmos autores sugeriram estudos futuros incluindo micronutrientes a fim de investigar suas ações na qualidade da cana-de-açúcar. No presente trabalho observou-se que a participação dos micronutrientes e/ou MO nos modelos deu-se devido a averiguação em pré-análise da alta correlação entre os mesmos, possivelmente advinda da aplicação de torta de filtro no plantio. Resultados obtidos por Kumar & Verma (1997) e Landell *et al.* (2003) diferem no que diz respeito as variáveis estudadas, uma vez que os primeiros autores utilizaram como variáveis independentes os nutrientes foliares para explicar a qualidade e o segundo autor selecionou por *stepwise* as variáveis de solo que melhor explicavam a produtividade, não a qualidade como o presente estudo. Todas essas divergências em resultados podem advir em decorrência de diferentes cenários em que a planta se desenvolveu incluindo diferentes variedades e variáveis estudadas.

Comparando a estatística descritiva entre os valores reais e estimados (Tabela 14), é possível verificar que ambos apresentam valores em que média e mediana diferem menos que 1%, com coeficientes de variação considerados baixos ($CV \leq 12$) segundo critérios de Warrick & Nielsen (1980), apresentando ainda, com exceção pol_{est} e $fibra_{real}$, uma distribuição normal segundo teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância, com baixos coeficientes de assimetria e curtose.

Tabela 14 - Estatística Descritiva para valores reais, estimados e resíduos

1ª soca	min	Q1	med	Q3	max	m	DP	CV	sk	K	p-valor
Brix _{real}	19,5	20,5	20,8	21,2	22,0	20,8	0,5	2,4	-0,16	0,07	>0,05
Brix _{est}	19,4	20,6	20,8	21,0	22,0	20,8	0,4	1,8	-0,39	1,94	>0,15
Brix _{res}	-1,6	-0,3	0,0	0,3	1,3	0,0	0,5	-	-0,14	0,29	>0,15
pol _{real}	14,8	15,6	15,9	16,3	16,9	15,9	0,5	3,0	-0,2	-0,36	>0,15
pol _{est}	15,3	15,8	15,9	16,0	16,5	15,9	0,2	1,2	-0,36	0,84	>0,15
pol _{res}	-1,3	-0,3	0,1	0,3	1,1	0,0	0,5	-	-0,27	-0,14	>0,15
fibra _{real}	11,5	12,2	12,4	12,7	13,2	12,4	0,4	2,9	-0,14	-0,7	>0,15
fibra _{est}	12,0	12,3	12,4	12,5	12,7	12,4	0,1	1,0	-0,39	0,25	>0,15
fibra _{res}	-1,0	-0,2	0,0	0,3	0,8	0,0	0,4	-	-0,18	-0,39	>0,15
2ª soca											
Brix _{real}	17,4	18,7	19,2	19,7	20,6	19,2	0,7	3,7	-0,05	-0,44	>0,15
Brix _{est}	18,0	19,0	19,4	19,6	20,6	19,4	0,5	2,7	0,26	-0,06	>0,15
Brix _{res}	-2,6	-0,4	0,1	0,4	1,3	0,0	0,7	-	-1,14	1,88	>0,05
pol _{real}	12,4	13,9	14,5	15,0	16,4	14,5	0,8	5,2	-0,07	-0,33	>0,15
pol _{est}	13,4	14,4	14,7	15,1	16,4	14,8	0,6	3,8	0,55	0,44	<0,01
pol _{res}	-2,5	-0,4	0,0	0,4	1,7	0,0	0,8	-	-0,95	1,52	>0,01
fibra _{real}	10,3	11,1	11,5	12,3	13,9	11,7	0,8	6,7	0,52	-0,20	<0,01
fibra _{est}	10,0	11,2	11,5	12,2	13,9	11,6	0,7	6,4	0,51	0,13	>0,05
fibra _{res}	-1,5	-0,3	0,0	0,4	2,5	0,0	0,6	-	0,87	2,67	>0,10

onde: Brix_{res}, pol_{res} e Fibra_{res} – resíduo em %; min – mínimo; Q – quartil; med - mediana; max – máximo; m – média; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; sk – coeficiente de assimetria; K – coeficiente de curtose; p-valor do teste de normalidade.

Os resíduos de predição apresentaram médias e medianas próximas de zero, com coeficiente de variação praticamente nulo. É possível ainda verificar que todos os resíduos gerados pelos modelos nos dois ciclos, o valor que representa o terceiro quartil (0,3% e 0,4%) e os desvios padrões são valores considerados baixos, refletindo uma acurasse nas predições feitas pelo modelo, mas sendo válido salientar que a amplitude dos parâmetros de qualidade, tanto do brix, pol ou fibra, não alcançaram valores maiores que quatro durante os anos em estudo, não demonstrando muita variabilidade ao longo do experimento.

Análise Espacial

Os parâmetros dos semivariogramas para os atributos mensurados e estimados de ambos os ciclos (Tabela 15) que obtiveram melhores ajustes foram escolhidos com base na Raíz Quadrada do Erro Médio e índice Akaike.

Tabela 15 – Semivariogramas obtidos para Brix, pol e fibra utilizando os valores mensurados e estimados

		Model	C	Co	(C+Co)	A (m)	IDE (%)
1ª soca	Brix _{mensurado}	Gaussiano	0,0429	0,2234	0,2663	113,8	83,8
	Brix _{estimado}	Exponencial	0,1043	0,0600	0,1643	123,7	36,5
	pol _{mensurado}	Gaussiano	0,0418	0,2043	0,2461	300,0	83,1
	pol _{estimado}	Exponencial	0,0221	0,0171	0,0392	39,6	43,6
	fibra _{mensurado}	Gaussiano	0,0439	0,0954	0,1393	47,7	68,4
	fibra _{estimado}	Exponencial	0,0048	0,0114	0,0162	65,3	70,3
2ª soca	Brix _{mensurado}	Exponencial	0,2240	0,2317	0,4557	55,3	50,8
	Brix _{estimado}	Gaussiano	0,1604	0,1000	0,2604	37,4	38,4
	pol _{mensurado}	Exponencial	0,2867	0,2778	0,5645	72,1	49,2
	pol _{estimado}	Gaussiano	0,1793	0,1594	0,3387	30,0	47,0
	fibra _{mensurado}	Exponencial	0,7787	0,0221	0,8008	111,3	2,7
	fibra _{estimado}	Gaussiano	0,3722	0,2618	0,6340	112,5	41,3

onde: C = patamar parcial; Co = efeito pepita; (Co+C) = patamar; A = alcance; IDE = $[Co/(Co+C)] \cdot 100$

Os mapas de Brix mensurado e estimado pelo modelo para a 1ª soca apresentaram IDE considerados baixo (76 a 100%) e moderado (26 a 75%) (Tabela 15), respectivamente, sendo o mesmo caso para os mapas de pol desse ciclo, já fibra, tanto mensurado quanto estimado obtiveram moderados IDE; para a 2ª soca, com exceção da fibra mensurada, todo o restante obtiveram moderados índices de dependência espacial, já fibra estimada para a 2ª soca foi a única variável que obteve alto IDE.

No geral, a grade de refinamento criada para a amostragem da 2ª soca foi responsável por semivariogramas mais robustos, descrevendo melhor a estrutura espacial das variáveis obtendo assim melhores índices de dependência espacial comparando com o ciclo anterior. Johnson & Richard Jr. (2005) obtiveram alcances para Brix e pol variando entre 31,2 e 124,3 m ao longo dos três anos, sendo que no presente estudo, os alcances referentes à essas variáveis variaram de 39 a 300 m. Esses resultados mostram que dentro da mesma área e trabalhando com as mesmas variáveis, a estrutura espacial pode mudar ao longo do tempo, não sendo possível recomendar um número ótimo de amostras que descreva a dependência espacial de certas variáveis. Contudo, é possível recomendar a criação de uma grade de refinamento, ou seja, a locação de uma determinada porcentagem de pontos posicionados em distâncias menores do que a distância entre pontos da grade regular, no intuito de satisfazer a exigência de minimizar a razão entre menor e maior distância entre pontos (BRAMLEY & WHITE, 1991; BRAMLEY, 2005).

Nos mapas de erros de estimação (E.E.), as zonas brancas representam um erro de estimação com intervalo de tolerância de $\pm 0,5\%$ para a 1ª soca e $\pm 1,0\%$ para a 2ª soca. Esses intervalos de tolerância foram escolhidos com base na variação dos erros de estimação, a qual foram diferentes em ambos os ciclos (Figura 12), objetivando assim uma melhor visualização de cada situação.

A sub-região referente ao intervalo de tolerância de $\pm 0,5\%$ da 1ª soca representa 42, 71 e 35% do total da área experimental para Brix, pol e fibra respectivamente (Tabela 16). Já na 2ª soca a sub-região compreendida no intervalo de tolerância ($\pm 1,0\%$) foi de 51, 31 e 22% para as mesmas variáveis. Ao longo dos dois ciclos estudados, as sub-regiões de valores subestimados para Brix, pol e fibra variaram de 9 a 43% da área total, atingindo no máximo - 10% de erro de estimação; para as sub-regiões superestimadas os valores variaram de 12 a 57%, atingindo até 11% de erro de estimação. Pode-se observar que os mapas E.E. da 2ª soca obtiveram no geral maiores áreas de valores superestimados e também maiores % de erros (superestimados), essa área superestimada coincide com a área atingida pela queima (Figure 10), a qual foi retirada para gerar o modelo mas foi utilizada para efetuar estimativas, servindo como validação para os modelos. Nesta mesma região, conforme esperado, não observamos uma variação do teor de fibra, pois a cana mesmo na área atingida pelo fogo atingiu valores similares ao restante da área, em função do alto índice pluviométrico durante o primeiro semestre de 2011 e pela extensão do ciclo para 15 meses (Figura 2).

Mesmo com alto valor de R^2 , o modelo de fibra para 2ª soca obteve maiores porcentagem de erros de estimação. Esta situação pode ser explicada com base nos gráficos de validação cruzada, o qual mostrou os pontos (mensurados x estimados) mais dispersos do que para os demais modelos os quais mostraram resultados mais viciados pelos valores base de criação dos modelos. Por outro lado, os modelos de Brix e pol da 2ª soca obtiveram R^2 não tão altos como o modelo de fibra (2ª soca), mas representaram adequadamente a área atingida pelo fogo (Figure 10) com superestimativas, onde de fato eram esperados maiores valores em caso da não ocorrência de fogo.

Os atributos do solo representam apenas uma parte dos fatores que afetam a qualidade da cana-de-açúcar, sendo fato que mudanças climáticas, escolhas de manejo e genótipos podem contribuir para a variabilidade da qualidade. No entanto, a geração de modelos que descrevam a qualidade da matéria-prima com baixas variações de erro, podem prover

informações explicativas de como esses parâmetros de qualidade dessa específica variedade nesse específico cenário reagiram a tais concentrações de atributos do solo em determinadas situações.

Tabela 16 – Porcentagens das sub-áreas dos mapas de erros de estimação (E.E.)

Tolerância	Área % - 1ª Soca			Tolerância	Área % - 2ª Soca		
	Brix	pol	fibra		Brix	pol	fibra
< -0,5	20,5	16,3	41,4	< -1,0	9,2	11,4	43,8
-0,5 – 0,5	44,2	71,6	35,1	-1,0 – 1,0	51,2	31,5	22,3
> 0,5	35,3	12,1	23,5	> 1,0	39,6	57,1	33,9

Considerando os resultados obtidos e comparando-os com os resultados do capítulo 06, que aborda a análise de componentes principais para seleção de variáveis, observa-se que MO foi uma das principais variáveis nos modelos do capítulo 06, mostrando-se importante também nessa abordagem, onde foi selecionada tanto na primeira como na segunda profundidade para descrever os três parâmetros de qualidade em estudo. Sua ausência nos modelos da 2ª soca se justifica devido a alta correlação de MO com os micronutrientes constatada em pré análise, sendo substituída por elementos como Cu, Mn, B, Fe e Zn nos modelos. Além de P e K, considerados importantes na análise do capítulo 06, pH e H+Al aparecem nesta análise, sendo que em níveis satisfatórios estes elementos favorecem a absorção de nutrientes e desenvolvimento radicular, como discutido anteriormente. Pode ser dito que ambas as abordagens estatísticas se complementam no que diz respeito à investigação, uma vez que a análise de componentes principais nos possibilita a seleção das variáveis responsáveis pela variância dos dados, indiferente de qual for a variável resposta que se pretende estudar, e já a abordagem *stepwise* indica quais as variáveis mais pertinentes para a explicação de específica variável resposta em estudo, desconsiderando a variância dos dados.

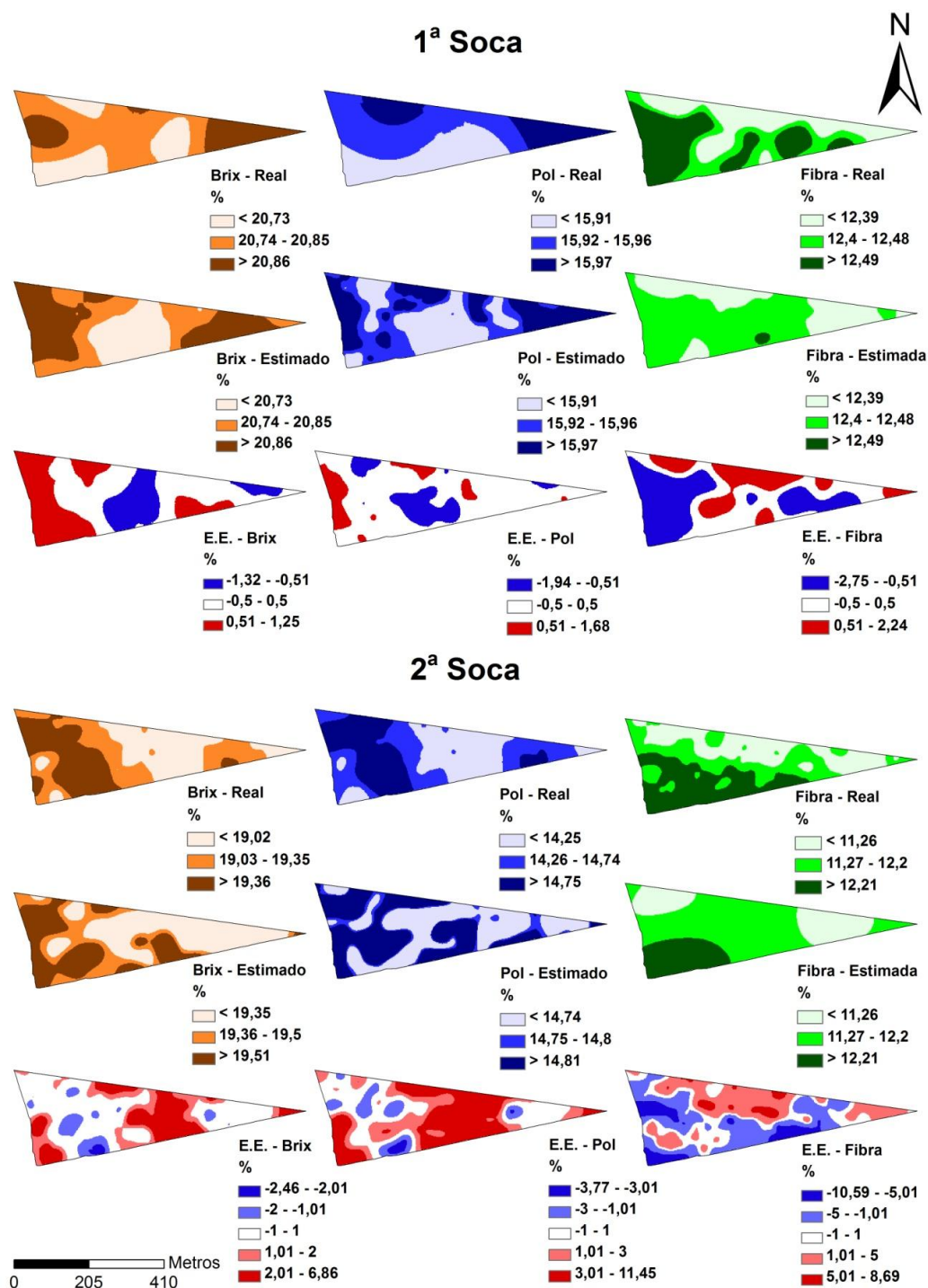


Figura 12 – Mapas temáticos de Brix, pol e fibra da área experimental.

7.5. Conclusão

O uso da técnica *Stepwise* para seleção de variáveis explicativas dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar ao longo de dois ciclos permitiu a determinação das variáveis pertinentes à qualidade, sendo MO, pH e H+AL, as mais relevantes na determinação das concentrações de Brix, pol e fibra. Com base na análise de regressão múltipla, foi também possível apresentar modelos para a estimação dos valores de Brix, pol e fibra com baixos valores residuais. Os modelos de estimação apresentaram desde baixo até altos coeficientes de determinação, sendo aptos a descrever com baixas porcentagens de erros a estrutura espacial das variáveis em estudo ao longo do experimento.

8. ANÁLISE DOS DADOS DE PRODUTIVIDADE

O monitor de produtividade SIMPROCANA[®] - fabricado pela ENALTA soluções tecnológicas, foi utilizado em todas as colheitas. O programa computacional embarcado no sistema possibilita dentre várias configurações para monitoramento da produtividade, a escolha da frequência de aquisição dos dados e da calibração do monitor. A calibração é feita com base na massa registrada pelo sistema e a massa real colhida em um determinado tempo, gerando um erro sistemático (erro bias) de calibração, o qual deve ser ajustado através de um fator de correção que pode ser alterado a qualquer momento no decorrer da colheita.

Para as safras de 2008 e 2010 foi utilizada uma frequência de aquisição de dados de 15 segundos e um fator médio de correção de pesagem igual a 0,55 (2008) e 0,83 (2010) – os fatores de correção foram criados com base no peso registrado pelo sistema após carregar por completo um conjunto de transbordo. Sendo assim, a cada 15 segundos foram registradas as informações de peso instantâneo de cana-de-açúcar lançado para o transbordo, sendo esse extrapolado para Mg ha^{-1} (área = espaçamento entre linhas x distância percorrida) com suas respectivas coordenadas geográficas.

A colheita para a safra 2008 iniciou-se da região sul para norte. Após a colheita, pode-se observar que o início da área não foi registrada pelo monitor, ocasionando perda do registro de dados de produtividade de 26 pontos na grade amostral. Observou-se também que a partir da 6ª linha da grade amostral (sentido Sul-Norte) até a 8ª linha, houve um grande acréscimo nos valores registrados para produtividade. Após a colheita foi constatado que isto ocorreu devido à queima do módulo das células de carga da balança, (Figura 13) que é responsável por registrar num dado intervalo de tempo o peso de colmos, antes de serem lançados no transbordo.



Figura 13 – a) Monitor de produtividade para cana-de-açúcar (SIMPROCANA[®], ENALTA Ltda, São Carlos, SP); b) detalhes da balança e do Módulo das células de carga da balança.

Este fato ocasionou a perda dos registros, atingindo mais 63 pontos da grade amostral, resultando então em um total de apenas 28 pontos amostrais que de fato poderiam ser utilizados para serem confrontados com os demais atributos levantados em campo, não contemplando o número mínimo necessário para aplicação dos métodos multivariados e posterior modelagem (Figura 14).

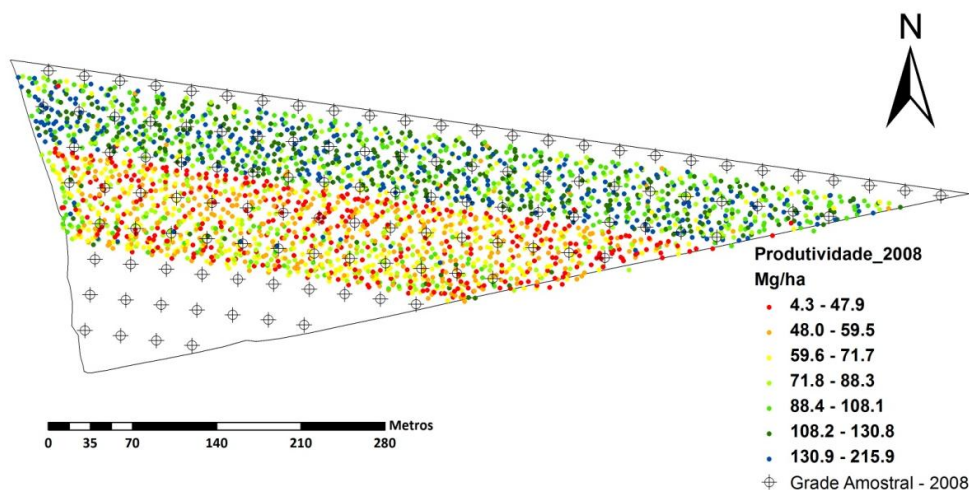


Figura 14 – Dados brutos de produtividade – 2008.

Na colheita do segundo ciclo (2009/2010 - cana bisada), realizada em março de 2010, os dados do monitor de produtividade foram submetidos a um pré-tratamento segundo protocolo proposto por Bramley & Williams (2001), com o intuito de retirar possíveis “ruídos” advindos dos sensores e valores discrepantes de produtividade. O pré-tratamento foi feito com base na normalização dos dados para média 0 e desvio padrão 1, removendo a produtividade normalizada fora do intervalo de ± 3 da distribuição normal dos dados. Após o pré-tratamento, os dados, foram interpolados utilizando grade regular de 2 m por meio da krigagem em blocos com variograma local utilizando o programa computacional VESPER 1.6 (The University of Sydney, Sydney, Au) (Figura 15). O programa VESPER calcula as estimativas de produtividade e desvios padrões das previsões, indicando a qualidade das interpolações executadas ao longo de toda a área. Os arquivos de saída do VESPER foram transferidos ao programa computacional ArcGIS 9.3 (ESRI, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA) utilizando a extensão Spatial Analyst Tools do ArcGIS 9.3 para maiores análises.

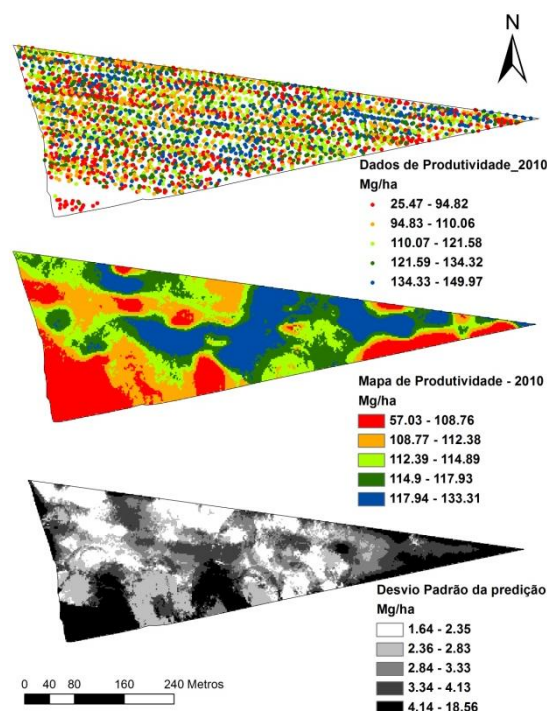


Figura 15 – Dados de produtividade e mapas resultantes da interpolação - 2010.

Os dados de produtividade apresentados na Figura 15 correspondem a dados já pré-tratados pela metodologia proposta. Pode-se observar no mapa dos dados registrados pelo sistema, que os mesmos apresentaram falha no início do talhão (sentido Sul-Norte), mostrando instabilidade por parte do sistema no início da colheita. Para o mapa temático de produtividade (MP) e o mapa dos desvios padrões das predições (MDesvPad), onde suas legendas foram divididas em quartis possibilitando uma melhor visualização entre faixas de transições, pode-se observar que existe uma maior ocorrência de variabilidade espacial entre 108 e 133 Mg ha^{-1} , faixa essa considerada de baixa variabilidade comparando-se com a primeira (57 a 108 Mg ha^{-1}). Já para o MDesvPad é possível observar que a faixa de maiores desvios, indicando baixa qualidade nas estimativas pelo método de interpolação, apresentou continuidade ao longo da área, correspondente com a primeira faixa do MP, apresentada por um grande intervalo, levantando suspeitas quanto a confiabilidade dos dados obtidos pelo monitor de produtividade.

Com base nos dois anos de experiência no uso do monitor de produtividade, para a colheita do terceiro ciclo efetuada em julho de 2011, decidiu-se utilizar um receptor DGPS com sinal de correção em tempo real para georreferenciamento dos pontos registrados pelo

sistema, reduzir a frequência de aquisição dos dados para 5 segundos e utilizar o fator de correção pós-processado. Para cada carregamento foi registrado o peso acumulado pelo sistema de monitoramento e o peso real da carga (fornecido pela balança da usina), com o intuito de gerar fatores de correção para cada carga, utilizado no processamento dos dados.

Os dados de produtividade foram submetidos ao mesmo protocolo de pré-tratamento e posterior interpolação executado no ano anterior, após a aplicação dos fatores de correção gerados durante a colheita (Tabela 17). A utilização do receptor DGPS no sistema de colheita permitiu visualizar os dados registrados em cada linha de plantio, melhorando a confiabilidade no pré-tratamento dos dados, possibilitando executar uma análise da distribuição espacial dos valores discrepantes antecedendo a decisão por sua exclusão. Os fatores de correção pós processados (Tabela 17) variaram desde 0,61 a 2,79 ao longo da colheita, confirmando a suspeita com relação a confiabilidade dos dados obtidos em 2010. Isto indica que o monitor de produtividade SIMPROCANA precisa de ajustes constantes do erro de bias.

Tabela 17 – Pesos registrados pelo sistema de monitoramento de produtividade e pela balança da usina

Dias	Carga	Peso SIMPRO (kg)	Peso Balança (kg)	Real/Estimado (Fator de Correção do erro de bias)
28/06/2011	1	66.310	58.470	0,882
	2	75.778	58.910	0,777
	3	89.500	54.980	0,614
29/06/2011	4	18.489	51.580	2,790
	5	27.557	56.330	2,044
	6	32.242	56.090	1,740
	7	46.188	53.700	1,163
	8	61.952	58.110	0,938
	9	61.429	53.360	0,869
	10	64.692	55.830	0,863
	11	61.650	53.790	0,873
	12	59.952	45.690	0,762
30/06/2011	13	30.219	55.020	1,821
	14	26.636	50.930	1,912
	15	42.582	56.930	1,337
	16	52.755	57.510	1,090
	17	49.312	55.780	1,131
	18	53.592	48.890	0,912
	19	61.901	55.020	0,889
	20	70.492	54.060	0,767
	21	54.222	41.860	0,772

Com base na análise descritiva dos dados (Tabela 18) de produtividade antes e após a execução do pré-tratamento de limpeza, é possível verificar que os dados de produtividade limpos apresentaram distribuição não normal de acordo com p-valor do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, contudo com coeficientes de assimetria e curtose baixos (<1,0) comparando-se com os mesmos coeficientes dos dados de produtividade crus.

Tabela 18 – Estatística Descritiva para os dados de produtividade pós processados, antes (cru) e depois (limpo) pré-tratamento de limpeza

	n	min	Q1	med	Q3	max	m	DP	CV	sk	K	p-valor
Prod _{cru}	10766	0,2	55,8	83,1	113,8	535,5	89,6	47,7	53,2	1,05	3,16	<0,01
Prod _{limpo}	10476	5,1	55,8	82,1	116,1	199,9	87,0	41,4	47,6	0,35	-0,50	<0,01

onde: Prod_{cru} – dados de produtividades pós processados crus em Mg ha⁻¹; Prod_{limpo} – dados de produtividade pós processados limpos em Mg ha⁻¹; min – mínimo; Q – quartil; med - mediana; max – máximo; m – média; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; sk – coeficiente de assimetria; K – coeficiente de curtose; p-valor do teste de normalidade.

A Figura 16 apresenta o mapa interpolado de produtividade sobreposto com a imagem da área obtida no banco de dados do Google Maps (<http://g.co/maps/wwyjs>). Pode-se observar nesta figura a faixa atingida pela queima ocorrida em meados de 2010, sendo coincidente com a região de menor produtividade. Nesta análise da produtividade observa-se uma variabilidade espacial com intervalos coerentes e desvios padrões de predição não tendenciosos (Figura 16) permitindo uma melhor avaliação dos resultados.

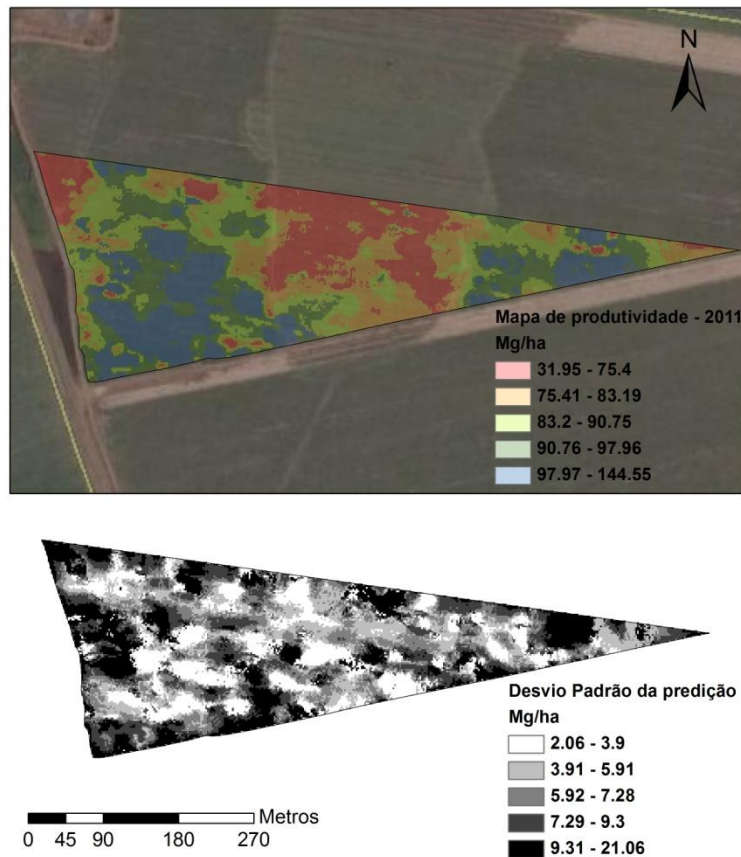


Figura 16 – Mapa de produtividade – 2011.

8.1. Seleção de variáveis e análise de regressão múltipla

Para viabilizar as análises investigativas que explicam a produtividade, foram excluídos do banco de dados os pontos atingidos pela queima (Figura 17), totalizando 78 pontos na análise, evitando assim qualquer influência causada pelo evento. Como os dados de produtividade do monitor de colheita, não fornecem valores de produtividade para os pontos exatos da grade amostral, procedeu-se após a confecção do mapa gerado pela “krigagem” (raster), a extração dos valores correspondentes de produtividade para cada ponto da grade

amostral, utilizados como variável resposta (dependente) na análise de seleção e de regressão múltipla.



Figura 17 – Grade amostral não atingida pela queima.

Para a seleção das variáveis que melhor explicam a produtividade, foi utilizado a metodologia *stepwise* sentido *forward*, com o nível de 0,25 de significância de probabilidade para a inclusão de variáveis no modelo. Estas variáveis foram selecionadas dentre os atributos físicos e químicos do solo de 0-0,2 e 0,2-0,5 m, sendo elas variáveis independentes e produtividade como variável dependente. Após a seleção das variáveis procedeu-se à análise de regressão múltipla para confecção do modelo (Tabela 19). As variáveis selecionadas para confecção do modelo foram teor de Areia, Argila, pH, P, H+Al, B, Zn à 0-0,2 m e Areia, K, B, Fe e Zn à 0,2-0,5 m.

$$\text{Prod (Mg.ha}^{-1}\text{)} = 88,2 + 0,11 \text{ areia}_{0-0,2} - 0,12 \text{ argila}_{0-0,2} - 0,16 \text{ areia}_{0,2-0,5} + 7,55 \text{ pH}_{0-0,2} + 0,11 \text{ P}_{0-0,2} + 0,95 \text{ H+Al}_{0-0,2} + 167,15 \text{ B}_{0-0,2} - 15,74 \text{ Zn}_{0-0,2} - 11,79 \text{ K}_{0,2-0,5} - 137,17 \text{ B}_{0,2-0,5} - 0,17 \text{ Fe}_{0,2-0,5} + 30,69 \text{ Zn}_{0,2-0,5}$$

Tabela 19 – Análise de variância do modelo de regressão (ANOVA)

	GL	SQ	SMQ	F calculado	R ²	RMSE
Modelo	12	2574,14	214,51	3,7973	0,41	7,51
Erro	65	3671,82	56,48	p-valor		
C. Total	77	6245,97		0,0002*		

Onde: GL – grau de liberdade; SQ – Soma dos quadrados; SMQ – Soma dos quadrados médios; R² – coeficiente de determinação; RMSE – Raiz quadrada do erro médio.

O modelo estatisticamente significativo à 5% de significância, explica cerca de 40% da variabilidade da produtividade, com raiz quadrada do erro médio de 7,5 Mg ha⁻¹. Comparando a estatística descritiva entre os valores reais e estimados (Tabela 20), é possível verificar que ambos apresentam valores em que média e mediana diferem menos que 1%, com coeficientes de variação considerados baixos ($CV \leq 0,12$) segundo critérios de Warrick & Nielsen (1980), apresentando ainda uma distribuição normal segundo teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov à 5% de significância, com baixos coeficientes de assimetria e curtose.

Tabela 20 – Estatística Descritiva para valores reais, estimados e resíduos

	min	Q1	med	Q3	max	m	DP	CV	sk	K	p-valor
Prod _{real}	74,8	86,3	91,4	98,3	116,5	92,3	9,3	10,0	0,26	-0,25	>0,15
Prod _{est}	71,6	88,2	91,0	95,7	108,4	91,8	6,0	6,6	0,27	0,75	>0,05
Prod _{res}	-16,5	-4,2	-0,5	3,2	25,2	0,00	6,9	0,00	0,49	1,67	>0,15

onde: Prod_{res} – resíduo em Mg ha⁻¹; min – mínimo; Q – quartil; med - mediana; max – máximo; m – média; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; sk – coeficiente de assimetria; K – coeficiente de curtose; p-valor do teste de normalidade.

Os resíduos de predição apresentaram média e mediana próximas de zero, com coeficiente de variação praticamente nulo. A magnitude da variável produtividade (Mg ha⁻¹) deve ser levado em consideração, contudo, é possível verificar que o valor que representa o terceiro quartil (3,2 Mg ha⁻¹) e o desvio padrão (6,9 Mg ha⁻¹), são valores considerados baixos, refletindo uma acurasse nas predições feitas pelo modelo.

Timm *et al.* (2003) apresentaram resultados em que argila teve uma contribuição efetiva para o número de colmos de cana-de-açúcar por metro na linha de plantio. Utilizando análise de regressão múltipla, os autores verificaram que 38% da variância foi explicada por P, Ca, Mg, argila e estabilidade de agregados. Cerri & Magalhães (2011) também encontraram correlação linear moderada entre produtividade e C, N, matéria orgânica, H+Al e argila. No presente estudo, Areia na primeira camada contribui positivamente para o modelo enquanto Argila contribui negativamente. Ambos se completam, uma vez que a areia proporciona maior número de macroporos na primeira camada, facilitando assim a percolação hídrica, disponibilizando água ao sistema radicular. Já a contribuição negativa do teor de areia na segunda camada corroboram os resultados obtidos por Landell *et al.* (2003), o qual obteve correlação negativa de teor de areia da subsuperfície do solo com a produtividade da cana-de-açúcar no terceiro corte.

Dias *et al.* (1999) avaliaram seis variedades de cana de açúcar em locais diferentes na região nordeste do estado de São Paulo, utilizando análise de regressão múltipla e *stepwise* para seleção das variáveis de solo que explicassem o rendimento da cultura. Verificaram que Ca, pH e Matéria Orgânica a 0,3-1,5 m tiveram a maior correlação com a produtividade, obtendo coeficiente de determinação de 0,82 para o modelo de regressão. Em plantas, Ca atua na divisão celular, a qual é crucial para a formação do sistema radicular, e diversos autores mostram que plantas com sistemas radiculares bem desenvolvidos são mais produtivas (FARONI & TRIVELIN, 2006; VITTI *et al.* 2007; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007), acumulam mais nutrientes na biomassa (FRANCO *et al.* 2007) sendo menos susceptíveis à déficit hídrico (DIAS *et al.* 1999; LACLAU & LACLAU, 2009). Este efeito positivo pode ocorrer quando os níveis de acidez do solo (pH, H+Al e saturação por alumínio) estão adequados para o desenvolvimento radicular da cultura. Landell *et al.* (2003) notaram que pH foi bem correlacionado com produtividade durante 3 ciclos, levantando a hipótese de que tal fato foi devido ao baixo intervalo de variação do pH, permitindo correlações significativas com a produtividade. A baixa variação do pH ao longo da área experimental é comprovada pela estatística descritiva (Table 1). Tais resultados confirmam os de Beauclair (1991), o qual reportou que pH entre 0-0,25 m teve boa correlação com produtividade até o terceiro ciclo.

Beauclair (1991) observou a influência do P aplicado em sulcos no plantio, a qual promoveu incremento na produção nas duas primeiras colheitas (cana-planta e primeira soca). Já os presentes resultados mostraram que P aplicado nos sulcos do plantio pode influenciar e ser útil na explicação da produtividade do terceiro ciclo também. Como discutido nos capítulos anteriores, fósforo é provavelmente o nutriente de maior dificuldade de manejo em solos Brasileiros, mesmo não sendo um dos nutrientes mais extraídos pela cultura (FRANCO, 2008; FRANCO *et al.*, 2008) devido ao fato de ser fortemente retido por óxidos de Fe e Al e, em condições alcalinas, precipita como fosfatos de cálcio (CANTARELLA & ROSSETTO, 2010).

Segundo Cantarella & Rossetto (2010) o K é o nutriente extraído em maiores quantidades pela cultura da cana-de-açúcar e, portanto, altas respostas à adubação potássica são esperadas, especialmente em solos deficientes nesse nutriente. Nos resultados encontrados, K contribuindo negativamente pode ser devido aos baixos teores médios do elemento no solo

na segunda camada no início do ciclo, ou simplesmente por ajustes matemáticos decorridos da seleção das variáveis e regressão múltipla.

Em geral, a matéria orgânica (MO) correlaciona-se bem com produtividade de cana-de-açúcar (LANDELL *et al.* 2003; JOHNSON & RICHARD JR., 2005; SOUZA *et al.* 2008; SOUZA *et al.* 2010; CERRI & MAGALHÃES, 2011). Em contraste com esses autores, a MO nessa análise pode não ter sido selecionada em detrimento as altas correlações averiguadas entre micronutrientes e MO em pré-análises, correlações essas que são atribuídas devido à aplicação de torta de filtro no plantio e que, segundo Vitti *et al.* (2007), tal resíduo orgânico pode ser fonte de micronutrientes para a cultura, sendo assim, justifica-se B, Fe e Zn terem sido selecionados para o modelo.

É possível ser considerado que, a metodologia adotada para a seleção dos atributos do solo que podem explicar a variabilidade da produtividade de cana-de-açúcar, conseguiu explicar o evento com baixo erro residual, sendo o modelo constituinte por variáveis muitas vezes não explicáveis agronomicamente e por outro lado outras variáveis podendo ser consideradas coerentes comparando com outros trabalhos científicos, sendo tal evento decorrido de simples ajustes matemáticos. Ainda, levando em consideração que os aspectos climatológicos no presente trabalho podem não ter sido fonte de grandes influências na variabilidade da produtividade, uma vez que a área experimental era relativamente pequena com declividade baixa e alta densidade amostral; o modelo de regressão gerado, com coeficiente de determinação de 0,41 pode ser considerado bom por determinar a relação solo-produção, sem levar em consideração fatores climáticos (BEAUCLAIR, 1994).

9. CONCLUSÕES GERAIS

Com base nas conclusões obtidas individualmente em cada capítulo (artigo) que compõem essa tese e respondendo a hipótese inicialmente levantada chegamos as seguintes conclusões:

- A partir das zonas criadas com base em atributos físicos do solo, foram obtidos diferentes coeficientes de correlações entre atributos químicos do solo e parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar individualmente para cada zona;
- Os padrões de estabilidade temporal dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar não foram claramente definidos, sugerindo que estudos mais prolongados abrangendo mais ciclos da cultura sejam feitos para tal investigação;
- A abordagem de análise de componentes principais para a seleção das variáveis mais importantes que descrevem a qualidade da cana-de-açúcar definida pelos parâmetros Brix, pol e fibra permitiu a seleção de 12 variáveis principais remanescentes sendo as variáveis de maior importância a MO, P e K. Com base nas componentes principais e análise de regressão múltipla, foi possível apresentar modelos que estimassem os teores dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar com baixos valores residuais. Os modelos apresentaram baixos/moderados valores de R^2 e descreveram a estrutura espacial do Brix, pol e fibra ao longo da área experimental, obtendo assim baixas porcentagens de erros de estimação;
- O uso da abordagem *Stepwise* para seleção de variáveis explicativas dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar ao longo de dois ciclos permitiu a determinação das variáveis pertinentes à qualidade, sendo MO, pH e H+AL, as mais relevantes na determinação das concentrações de Brix, pol e fibra. Com base na análise de regressão múltipla, foi também possível apresentar modelos para a estimação dos valores de Brix, pol e fibra com baixos valores residuais. Os modelos de estimação apresentaram desde baixo até altos coeficientes de determinação, sendo aptos a descrever com baixas porcentagens de erros a estrutura espacial das variáveis em estudo ao longo do experimento.
- O modelo para explicação da produtividade demonstrou baixo erro residual e devido ao fato de não abarcar aspectos climatológicos, pôde ser considerado de bom desempenho.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, A. B.; AQUINO, B. F.; HERNANDEZ, F. F. F.; HOLANDA, F. J. M.; FREIRE, J. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; COSTA, R. I.; UCHÔA, S. C. P.; FERNANDES, V. L. B. **Recomendações de adubação e calagem para o estado do Ceará**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 1993. 248p.

ALVAREZ, R.; WUTKE, A. C. P. Adubação da cana-de-açúcar. IX. Experimentos preliminares com micronutrientes. **Bragantia**, Campinas, v. 22, p. 647-650, 1963.

ALVAREZ, R.; WUTKE, A. C. P.; ARRUDA, H. V.; GODOY JR, C. Adubação da cana-de-açúcar. XV. Experimentos com micronutrientes nas regiões canavieiras do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 38, p. 19-26, 1979.

ALVAREZ, V. C. **Efeitos da aplicação de micronutrientes por via foliar na cultura da cana-de-açúcar**. 1984. 47 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal. 1984.

AZEREDO, D. F.; BOLSANELLO, J. Efeito de micronutrientes na produção e na qualidade de cana-de-açúcar no Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais (Zona da Mata – estudo preliminar). **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 93, p. 9-17, 1981.

BATTIE LACLAU P., LACLAU J. P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 114, n. 3, p. 351-360, 2009.

BEAUCLAIR, E. G. F. **Relações entre algumas propriedades químicas do solo e a produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), através de regressão linear múltipla**. 1991. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

BEAUCLAIR, E. G. F. **Produtividade da cana-de-açúcar em função de alguns macronutrientes presentes no caldo e no solo**. 1994. 98 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

BERNOUX, M. M. Y.; ARROUAYS, D.; CERRI, C. C.; BOURENNANE, H. Modeling vertical distribution of carbon in Oxisols of the western Brazilian Amazon. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, p. 941-951, 1998a.

BERNOUX, M. M. Y.; ARROUAYS, D.; CERRI, C. C.; GRAÇA, P. M. DE A.; VOLKOFF, B.; TRICHET, J. Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie brésilienne). **Études et gestion des sols**, v. 5, n. 1, p. 31- 42, 1998b.

BITTENCOURT, V. C.; CARMELLO, Q. A. C.; BEAUCLAIR, E. G. F.; JOÇO, J.; CLEMENTE, J. L. Produtividade da cana-de-açúcar e suas relações com a fertilidade dos solos e o manejo da cultura. **STAB – Açúcar, Álcool & Subprodutos**, v. 8, p. 10-14, 1990.

BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 2007. 112 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potencial uses and limitations of crop model. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 704-716, 1996.

BRAGA, J. A. **Inter-relações da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico do Noroeste Paulista**. 2011. 85f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual de São Paulo, 2011.

BRAGATO, G.; PRIMAVERA, F. Manuring and soil type influence on spatial variation of soil organic matter properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1313-1319, 1998.

BRAMLEY, R. G. V. Understanding variability in winegrape production systems – 2. Within vineyard variation in quality over several vintages. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, Australia, v. 11, p. 33-42, 2005.

BRAMLEY, R. G. V. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. **Crop & Pasture Science**, Australia, v. 60, n. 3, p. 197-217, 2009.

BRAMLEY, R. G. V.; WILLIAMS, S. K. **A protocol for the construction of yield maps from data collected using commercially available grape yield monitors**. Cooperative Research Centre for Viticulture, CRC Australia, 2001, 21 p. Disponível em <http://www.cse.csiro.au/client_serv/resources/CRCVYield_Mapping_Protocol.pdf>. Acesso em: 15 de out. 2010.

BRAMLEY, R. G. V.; WHITE, R. E. An analysis of variability in the activity of nitrifiers in a soil under pasture. II. Some problems encountered in the geostatistical analysis of biological soil properties. **Australian Journal of Soil Research**, Austrália, v. 29, p. 109–122, 1991.

BURAK, D. L.; FONTES, M. P. F.; SANTOS, N. T.; MONTEIRO, L. V. S.; MARTINS, E. D. S.; BECQUER, T. Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. **Geoderma**, Amsterdam, v. 160, n. 2, p. 131-142, 2010.

BURKE, I. C.; LAUENROTH, W. K.; RIGGLE, R.; BRANNEN, P.; MADIGAN, B.; BEARD, S. Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe: the relative importance of topography, grazing, microsite, and plant. **Ecosystems**, v. 2, n. 5, p. 422-438, 1999.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVACK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO R. F.; KNOPKA, A. E. Field-scale variability of soil proprieties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Medison, v. 58, p. 1240-1248, 1994.

CAMBRIA, S.; BONI, P. S.; STRABELLI, J. Estudos preliminares com micronutrientes – zinco. **Boletim Técnico Copersucar**, Piracicaba, v. 46, p. 12-17, 1989.

CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R. Fertilizantes para a cana-de-açúcar. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). **Bioetanol de cana-de-açúcar**. São Paulo: Editora Blucher, 2010, p. 405-422.

CASTRO, P. R. C. Aplicações da fisiologia vegetal no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISIOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: STAB, 2000, p.1-9.

CERQUEIRA LEITE, R. C. D.; LEAL, M. R. V. L.; CORTEZ, L. A. B.; GRIFFIN, W. M.; SCANDIFFIO, M. I. G. Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? **Energy**, v. 34, p. 655-661, 2009.

CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G. Correlação dos atributos físico-químicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2011. No prelo.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos tabuleiros costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 1, p. 20-25, 2008.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 2, p. 211-218, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, setembro/2009**. Brasília: Conab, 2009. 14 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, janeiro/2011**. Brasília: Conab, 2011. 18 p.

Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo – CONSECANA-SP. **Manual de Instruções**. 5 ed. Piracicaba: Consecana-SP, 2006. 112 p.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900 p.

CUPPITT, J.; WHELAN, B. M. Determining potential within field crop management zones. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE – ECPA, 3., 2001, Montpellier, France. **Proceedings...** Montpellier: Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 2001. p. 7-12.

DIAS, F. L. F.; MAZZA, J. A.; MATSIOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R. F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 627-637, 1999.

DIKER, K.; BAUSCH, W. C. Potencial of use of nitrogen reflectance index to estimate plant parameters and yield of maize. **Biosystem Engineering**. v. 84, n. 4, p. 437-447, 2003.

DINARDO-MIRANDA, L. L. **Cigarrinha-das-raízes em cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2003. 72 p.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; FERREIRA, J. M. G.; CARVALHO, P. A. M. Influência das cigarrinhas das raízes, *Mahanarva fimbriolata*, sobre a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 19, n. 2, p. 34-35, 2000.

DINARDO-MIRANDA, L. L., VASCONCELOS, A. C. M., VIEIRA, S. R., FRACASSO, J. V., GREGO, C. R. Uso da geoestatística na avaliação da distribuição espacial de *Mahanarva Fimbriolata* em cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 3, p. 449-455, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

ESPIRONELO, A. **Estudos sobre efeitos do boro na cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) cultivada em alguns solos do município de Piracicaba**. 1972. 58f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, USP Piracicaba, 1972.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 1007-1013, 2006.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 2 ed. Piracicaba: STAB, 2003. 240 p.

FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 521-526, 2007.

FRANCO, H. C. J.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FARONI, C.E.; SARTORI, R. H. et al. Acúmulo de nutrientes pela cana-planta. **STAB - Açúcar Álcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 26, n. 5, p. 41-45, 2008a.

FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OTTO, R. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 5, p. 579-590, 2010.

FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; SARTORI, R. H.; CANTARELLA, H. Acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio, durante o ciclo de cana-planta, relacionados à adubação nitrogenada de plantio. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 9., 2008b, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008b. p. 228-234.

GOERING, C. E. Recycling a concept. **Agricultural Engineering Magazine**. St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural Engineering, nov. 2003.

GOERING, C. E.; HANS, S. A. field information system for SSCM. In: INTERNATIONAL OFF-HIGHWAY & POWERPLANT CONGRESS & EXPOSITION, 1993, Milwaukee. **Proceedings...** Warrendale: SAE, 1993. SAE Technical Paper Series n. 932422.

GONÇALVES, T. D.; MUTTON, M. A.; PERECIN, D.; CAMPANHÃO, J. M.; MUTTON, M. J. R. Qualidade da matéria prima em função de diferentes níveis de danos promovidos pela cigarrinha-das-raízes. **STAB - Açúcar, Álcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, n. 2, p. 29-33, 2003.

GROENIGEN, J. W. van; SIDERIUS, W.; STEIN, A. Contrained optmisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 87, n. 3-4, p. 239-259, 1999.

HARTEMINK, A. E. Sugarcane for bioethanol: soil and environmental issues. **Advances in Agronomy**, v. 99, p. 125-182, 2008.

JOHANN, J. A.; OPAZO, M. A. U.; ROCHA, J. V.; SOUZA, E. G. Modelagem da correlação espacial entre mapas de produtividade da soja e mapas de atributos do solo por meio da análise de componentes principais. **Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 3, p. 383-390, 2002.

JOHNSON, R. M.; RICHARD JR., E. P. Sugarcane Yield, Sugar cane Quality, and Soil Variability in Louisiana. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 760-771, 2005.

JOHNSON, R. M.; RICHARD JR., E. P. Variable-rate lime application in Louisiana sugarcane production systems. **Precision Agriculture**, v. 11, p. 464-474, 2010.

JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis**. 2 ed. New York: Springer-Verlag, 2002. 519 p.

KUMAR, V., VERNA, K. S. Relationship between nutrient element content of the index leaf and cane yield and juice quality of sugarcane genotypes. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 28, p. 1021-1032, 1997.

KUNERT, K. J. Stress Physiology: Understanding the Limits for Plant Performance. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISIOLOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, Piracicaba, 2000. **Anais...** Piracicaba, 2000.

LANDELL, M.G.A.; PERECIN, D.; VASCONCELOS, A.C.M.; ROSSETTO, R.; BIDÓIA, M.A.P.; SILVA, M.A. Correlação da produtividade de variedades de cana-de-açúcar com atributos químicos do horizonte B de Latossolos roxos em Conquista, MG, Brasil. **STAB – Açúcar, Álcool & Subprodutos**, v. 18, p. 23, 1999.

LANDELL, M. G. A.; PINTO, L. R.; CRESTE, S.; CHABREGAS, S. M.; BURNQUIST, W. L. *RoadMap* tecnológico para o etanol: Componente melhoramento genético e bioetecnologia. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). **Bioetanol de cana-de-açúcar**. São Paulo: Editora Blucher, 2010, p. 405-422.

LANDELL, M. G. A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; PERECIN, D.; ROSSETO, R.; BIDOIA, M. A. P.; SILVA, M. A.; XAVIER, M.A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agrícola**, v. 60, n. 4, p. 741-745, 2003.

MAGALHÃES P. S. G.; CERRI, D. G. P. Yield Monitoring of Sugar Cane. **Biosystems Engineering**, v. 96, p. 1-6, jan. 2007.

MAGALHÃES P. S. G.; CERRI, D. G. P. Avaliação da correlação entre os atributos físicos e químicos do solo e a produtividade da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 9., 2008, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008. p 591-597.

MARDIA, K. W; KENT, J. T; BIBBY, J. M. **Multivariate analysis**. Academic press, 1989. 518 p.

MARINHO, M. L.; ALBUQUERQUE, G. A. C. Efeito do cobre e do zinco na produção de cana-de-açúcar em solos de tabuleiros de Alagoas. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 98, p. 41-50, 1981.

MARQUES JR, 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. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, p. 143-152, 2008.

MELLO BERNER, P. G.; VIEIRA, S. R.; LIMA, E.; CUNHA dos ANJOS, L. H. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 837-844, 2007.

MONTANARI, R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 69-77, 2005.

MUTTON, M. J. R. Reflexos da qualidade da matéria-prima sobre a fermentação etanólica. In: WORKSHOP PRODUÇÃO DE ETANOL: QUALIDADE DA MATÉRIA PRIMA, 14., 2008, Lorena. **Painel 2...** Lorena: Escola de Engenharia de Lorena - USP, 2008. p. 15.

MUTTON, M. J. R.; MUTTON, M. A. Identificação de Perdas de Açúcares no Setor Agrícola. **STAB – Açúcar, Alcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 23, n. 4, p. 42-46, 2005.

NG KEE KWONG, K. F.; DEVILLE, J.; CAVALOT, P. C.; RIVIERE, V. Value of cane trash in nitrogen nutrition of sugarcane. **Plant and Soil**, v. 102, p. 79-83, 1987.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 3, 2011.

OLIVEIRA, J. B. **Levantamento pedológico do Estado de São Paulo**: quadrícula de Araras. Campinas: Instituto Agrônomo, 1982. 180 p. (Boletim Técnico, 71).

- OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; PENATTI, C. P.; PICCOLLO, M. C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 2359-2362, 1999.
- ORLANDO FILHO, J.; ROSSETTO, R.; CASAGRANDE, A. A. Cana-de-açúcar. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B van; ABREU, C. A. (Eds.) **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPQ/FAPESP/POTAFOS, 2001, p. 355-373.
- PORTZ, G.; MOLIN, J. P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, online first, ago. 2011.
- PRADO H.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R.; CAMPANA, M. P.; ZIMBACK, L.; SILVA, M. A. Relation between chemical sub surface conditions of subsoils and sugarcane yield. In: WORLD SOIL SCIENCE CONGRESS, 16., Montpellier, 1998. **Proceedings...** Montpellier, 1998. 232 p.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.
- RIBEIRO, M. R.; HALSTEAD, E. H.; JONG, E. Rendimento da cana-de-açúcar e características das terras da microrregião da Mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 209-213, 1984.
- ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C.; CANTARELLA, H. Manutenção da fertilidade e recuperação dos solos na cultura da cana-de-açúcar. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). **Bioetanol de cana-de-açúcar**. São Paulo: Editora Blucher, 2010, p. 381-403.
- SANTOS, F. H. R.; CARDIM, D. Variabilidade espacial da infestação da broca na cana-de-açúcar (*Diatraea Saccharalis*). **Revista Omnia Exatas**, v. 2, p. 59-71, 2009.
- SARTORI R. H.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C.; FARONI, C. E.; OTTO, R.; VITTI, A. C. Produtividade da cana de açúcar (segundo corte), relacionada a adubação com N e S, após o primeiro corte e fertilização nitrogenada de plantio. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 9., 2008, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 2008. p 329-342.
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Variação espaço-temporal do índice de área foliar e do brix em cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 67, p.35-41, 2008.
- SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotecnologia do solo: fundamentos e perspectivas**. Brasília: MEC/ABEAS/ESAL/FAEPE, 1988. 236p.
- SLOT, M. H.; GENTHNER, M. H.; DANIELS, W. L.; GROOVER, V. A. Spatial variability in Palustrine wetlands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 527-535, 2001.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JR, 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.**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 371-337, 2007.

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. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G.; CAMPOS, M. C. C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 183-190, 2008.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR, 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. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1763-1771, 2004a..

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

TIMM, L. C.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; CASSARO, F. M.; TOMINAGA, T. T.; BACCHI, O. O. S.; DOURADO-NETO, D. Sugarcane production evaluated by the state-space approach. **Journal of Hydrology**, v. 272, n. 1-4, p. 226-237, 2003.

TORQUATO, S. A. Cana-de-açúcar para indústria: o quanto vai precisar crescer. Análise e indicadores do agronegócio. **Instituto de Economia Agrícola**, v. 1, n. 10, out. 2006.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42:, n. 2, p. 249-256, 2007a.

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A.; QUINTINO, T. A.; OTTO, R. Nutrição e adubação. In: RIPOLI, T. C. C. *et al.* (Orgs.). **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. 2 ed. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2007b, p. 106-137.

WACLAWOVSKY, A. J.; SATO, P. M.; LEMBKE, C. G.; MOORE, P. H.; SOUZA, G. M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, v. 8, p. 263-276, 2010.

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

11. APÊNDICE

11.1. Estatística descritiva dos dados coletados em 2008 – 1º ciclo

	min	Q1	med	Q3	max	média	SD	CV	sk	k	p-valor
Brix	20.1	21.3	21.6	22.0	22.7	21.6	0.6	2.6	-0.40	-0.20	>0.15
pol	15.3	16.3	16.6	17.0	17.8	16.5	0.5	3.1	-0.20	-0.20	>0.15
fibra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	9.0	10.8	11.3	11.8	14.3	11.2	0.8	7.24	-0.01	1.16	>0.15
Areia_{0-0.2}	588.0	654.0	678.0	704.5	768.0	677.7	41.4	6.1	0.03	-0.30	>0.12
Argila_{0-0.2}	160.5	211.3	235.5	252.3	310.5	232.5	32.7	14.0	-0.06	-0.10	>0.15
MO_{0-0.2}	13.0	18.0	20.0	21.0	25.0	19.6	2.4	12.1	-0.20	-0.10	<0.01
pH_{0-0.2}	4.8	5.2	5.5	5.8	6.7	5.5	0.4	7.3	0.60	-0.04	<0.01
P_{0-0.2}	13.0	35.0	51.0	74.0	538.0	65.2	67.6	103.6	5.40	34.60	<0.01
K_{0-0.2}	0.4	0.9	1.0	1.2	2.4	1.1	0.3	31.8	1.50	3.30	<0.01
Ca_{0-0.2}	20.0	29.0	37.0	45.0	125.0	39.4	16.0	40.4	2.40	9.40	<0.01
Mg_{0-0.2}	6.0	9.0	12.0	15.5	48.0	13.4	6.2	45.7	2.30	8.70	<0.01
H+Al_{0-0.2}	9.0	14.0	16.0	20.0	31.0	17.3	4.5	26.0	0.40	0.10	<0.01
SB_{0-0.2}	26.9	38.9	50.9	62.0	152.1	54.1	21.6	39.8	2.13	6.55	<0.01
CEC_{0-0.2}	46.8	60.2	68.1	77.3	162.9	71.4	18.7	26.1	2.40	8.60	<0.01
V_{0-0.2}	49.0	66.0	74.0	82.0	94.0	73.5	10.0	13.6	-0.13	-0.59	>0.15
B_{0-0.2}	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	24.2	0.06	0.50	<0.01
Cu_{0-0.2}	0.5	0.8	0.9	1.1	2.7	0.9	0.3	29.0	2.50	11.70	<0.01
Fe_{0-0.2}	14.0	27.0	34.0	41.0	79.0	34.4	11.5	33.4	0.80	1.60	>0.05
Mn_{0-0.2}	1.1	2.1	2.9	3.6	6.0	2.9	1.0	34.0	0.60	0.03	<0.03
Zn_{0-0.2}	0.2	0.3	0.4	0.5	1.7	0.4	0.2	43.4	3.70	21.20	<0.01
Areia_{0.2-0.5}	540.0	621.5	652.0	678.0	741.0	649.8	40.3	6.2	-0.03	-0.18	>0.15
Argila_{0.2-0.5}	179.0	234.3	253.5	274.5	330.0	253.9	31.2	12.2	0.16	-0.18	>0.15
MO_{0.2-0.5}	11.0	13.0	14.0	15.0	21.0	13.8	1.6	11.3	0.95	2.88	<0.01
pH_{0.2-0.5}	4.4	5.1	5.30	5.6	6.2	5.3	0.4	6.8	0.01	-0.35	<0.01
P_{0.2-0.5}	2.0	14.0	20.0	35.0	189.0	29.1	28.0	96.0	3.12	12.92	<0.01
K_{0.2-0.5}	0.3	0.5	0.60	0.7	1.7	0.6	0.3	40.7	1.71	3.38	<0.01
Ca_{0.2-0.5}	9.0	19.0	23.0	28.5	60.0	24.5	8.1	32.9	1.41	3.67	<0.01
Mg_{0.2-0.5}	4.0	8.0	9.00	12.0	21.0	9.9	3.5	34.9	0.81	0.54	<0.01
H+Al_{0.2-0.5}	9.0	15.0	18.0	20.0	31.0	17.5	4.3	24.4	0.60	0.72	<0.01
SB_{0.2-0.5}	13.6	27.5	33.2	41.5	74.8	35.1	11.1	31.7	1.04	1.63	<0.01
CEC_{0.2-0.5}	31.8	47.2	51.4	57.8	84.5	52.7	8.8	16.7	1.11	2.21	<0.01
V_{0.2-0.5}	39.0	58.0	65.0	74.5	89.0	65.3	10.9	16.6	-0.08	-0.53	>0.15
B_{0.2-0.5}	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	24.1	-0.19	-0.45	<0.01
Cu_{0.2-0.5}	0.3	0.5	0.6	0.8	2.1	0.6	0.2	34.0	2.78	14.19	<0.01
Fe_{0.2-0.5}	9.0	16.5	22.0	26.0	77.0	22.2	8.6	38.4	2.51	13.45	<0.01
Mn_{0.2-0.5}	0.3	0.8	1.0	1.4	40.2	1.5	3.8	243.1	9.31	92.59	<0.01
Zn_{0.2-0.5}	0.1	0.2	0.2	0.3	0.9	0.2	0.1	47.4	2.46	8.41	<0.01

onde: min – mínimo; Q – quartil; med – mediana; SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; sk – assimetria; k – curtose; p-valor do teste de normalidade. N em (g.kg⁻¹); Brix, pol and V em (%); areia e argila em (g.kg⁻¹); MO em (g.dm⁻³); P, B, Cu, Fe, Mn, Zn em (mg.dm⁻³); K, Ca, Mg, H+Al, SB e CEC em (mmolc.dm⁻³).

11.2. Estatística descritiva dos dados coletados em 2009-2010 – 2º ciclo

	min	Q1	med	Q3	max	média	SD	CV	sk	k	p-valor
Brix	19.3	20.5	20.8	21.2	22.0	20.7	0.5	2.6	-0.36	0.31	0.02
pol	14.3	15.6	15.9	16.3	16.9	15.9	0.5	3.3	-0.59	0.41	>0.15
fibra	11.5	12.2	12.4	12.7	15.3	12.4	0.4	3.6	2.07	12.68	>0.15
N	7.3	9.2	9.6	10.1	18.8	9.66	1.2	12.2	4.00	30.56	<0.01
MO_{0-0.2}	12.0	17.0	18.0	20.0	28.0	18.7	2.2	11.6	0.51	2.51	<0.01
pH_{0-0.2}	4.8	5.1	5.3	5.6	6.4	5.3	0.3	6.5	0.41	-0.29	<0.01
P_{0-0.2}	14.0	33.5	45.0	74.0	512.0	60.4	55.7	92.2	5.22	37.88	<0.01
K_{0-0.2}	0.5	0.8	0.9	1.1	2.8	0.9	0.3	34.7	2.23	8.10	<0.01
Ca_{0-0.2}	16.0	28.0	32.0	38.5	112.0	34.6	12.2	35.3	2.60	13.21	<0.01
Mg_{0-0.2}	5.0	8.0	10.0	13.0	33.0	10.6	4.1	38.6	2.22	8.25	<0.01
H+Al_{0-0.2}	11.0	18.0	22.0	25.0	34.0	21.4	5.1	23.6	0.27	-0.52	<0.01
SB_{0-0.2}	23.3	36.9	43.6	51.0	145.8	46.2	15.7	33.8	2.66	13.39	<0.01
CEC_{0-0.2}	42.6	61.2	66.0	71.5	160.6	67.8	13.4	19.7	3.13	19.27	<0.01
V_{0-0.2}	47.0	60.0	67.0	73.0	91.0	66.9	9.7	14.5	0.17	-0.50	>0.15
B_{0-0.2}	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0	14.3	0.35	-0.26	<0.01
Cu_{0-0.2}	0.3	0.9	1.1	1.2	14.1	1.2	1.3	103.1	9.59	98.61	<0.01
Fe_{0-0.2}	20.0	45.0	55.0	66.5	660.0	61.5	58.5	95.0	9.41	96.69	<0.01
Mn_{0-0.2}	1.4	4.0	4.8	6.2	52.6	5.5	4.7	85.7	8.61	85.41	<0.01
Zn_{0-0.2}	0.1	0.3	0.4	0.6	3.0	0.5	0.4	75.8	4.67	27.90	<0.01
MO_{0.2-0.5}	10.0	12.0	12.0	14.0	17.0	12.6	1.5	11.9	0.68	-0.12	<0.01
pH_{0.2-0.5}	4.4	4.9	5.2	5.5	6.0	5.2	0.4	7.0	0.09	-0.36	0.02
P_{0.2-0.5}	4.0	13.0	20.0	34.0	162.0	25.7	20.1	77.8	3.34	18.19	<0.01
K_{0.2-0.5}	0.1	0.3	0.4	0.5	1.1	0.4	0.2	46.9	0.68	0.78	<0.01
Ca_{0.2-0.5}	9.0	17.0	20.0	25.0	62.0	21.2	7.3	34.6	1.65	7.04	<0.01
Mg_{0.2-0.5}	4.0	6.0	8.0	10.0	25.0	8.4	3.0	35.9	1.59	6.48	<0.01
H+Al_{0.2-0.5}	11.0	16.0	20.0	22.0	31.0	19.9	4.2	20.9	0.33	-0.16	<0.01
SB_{0.2-0.5}	14.1	24.3	29.1	35.1	87.2	30.0	10.0	33.4	1.69	7.77	<0.05
CEC_{0.2-0.5}	36.5	45.4	49.0	54.5	98.0	50.1	7.9	15.8	2.13	10.36	<0.01
V_{0.2-0.5}	32.0	52.0	60.0	66.0	89.0	58.7	11.2	19.0	-0.16	-0.19	>0.15
B_{0.2-0.5}	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	17.7	-0.66	3.08	<0.01
Cu_{0.2-0.5}	0.3	0.6	0.6	0.8	1.5	0.6	0.2	29.6	1.15	2.79	<0.01
Fe_{0.2-0.5}	16.0	25.0	30.0	37.0	87.0	31.6	10.0	31.7	1.83	7.08	<0.01
Mn_{0.2-0.5}	0.4	1.2	1.6	2.2	7.1	1.8	1.0	53.7	2.05	7.29	<0.01
Zn_{0.2-0.5}	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	0.2	0.1	68.5	1.18	1.77	<0.01

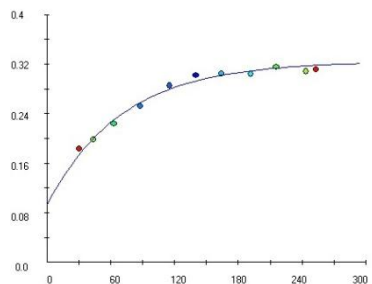
onde: min – mínimo; Q – quartil; med – mediana; SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; sk – assimetria; k – curtose; p-valor do teste de normalidade. N em (g.kg⁻¹); Brix, pol and V em (%); areia e argila em (g.kg⁻¹); MO em (g.dm⁻³); P, B, Cu, Fe, Mn, Zn em (mg.dm⁻³); K, Ca, Mg, H+Al, SB e CEC em (mmolc.dm⁻³).

11.3. Estatística descritiva dos dados coletados em 2011 – 3º ciclo

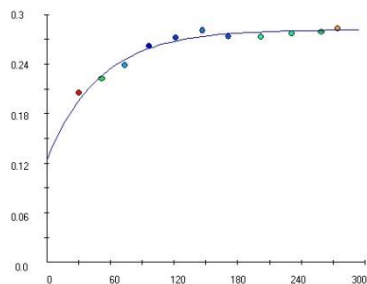
	min	Q1	med	Q3	max	média	SD	CV	sk	k	p-valor
Brix	16.4	18.7	19.2	19.7	21.4	19.1	0.8	4.1	-0.28	0.76	>0.15
pol	11.3	13.9	14.5	15.0	16.4	14.4	0.8	5.8	-0.59	1.17	>0.15
fibra	10.3	11.1	11.5	12.3	14.7	11.7	0.8	7.2	0.93	1.14	<0.01
N	7.2	10.2	10.8	11.6	18.7	10.8	1.4	1.94	1.41	7.55	<0.01
MO_{0-0.2}	7.0	11.0	12.0	13.0	24.0	11.9	2.1	17.7	2.22	9.58	<0.01
pH_{0-0.2}	4.9	5.3	5.5	5.7	6.1	5.5	0.2	5.2	0.07	-0.70	<0.01
P_{0-0.2}	15.0	26.0	34.0	43.0	599.0	42.3	53.3	125.9	9.08	93.30	<0.01
K_{0-0.2}	0.3	0.5	0.7	0.8	2.2	0.7	0.2	38.0	1.88	6.91	<0.01
Ca_{0-0.2}	15.0	23.0	27.0	30.0	61.0	27.6	7.1	26.0	2.00	6.20	<0.01
Mg_{0-0.2}	5.0	8.0	10.0	12.0	24.0	10.2	3.0	30.2	1.46	3.68	<0.01
H+Al_{0-0.2}	15.0	20.0	24.0	27.0	37.0	23.5	4.6	19.7	0.32	-0.26	<0.01
SB_{0-0.2}	21.0	32.6	37.3	42.1	87.4	38.6	9.6	24.9	1.95	6.30	<0.01
CEC_{0-0.2}	46.5	55.7	61.2	65.1	106.4	62.1	8.7	14.1	1.94	6.27	<0.01
V_{0-0.2}	41.0	56.0	61.0	68.0	82.0	61.6	8.2	13.3	0.09	-0.21	>0.01
B_{0-0.2}	0.2	0.5	0.5	0.7	1.2	0.6	0.1	31.2	0.53	0.24	<0.03
Cu_{0-0.2}	0.7	1.2	1.4	1.6	3.8	1.4	0.4	27.7	1.76	7.92	<0.01
Fe_{0-0.2}	3.0	35.8	50.0	60.0	92.0	48.1	16.6	34.6	-0.04	-0.23	>0.05
Mn_{0-0.2}	1.8	3.8	4.8	5.4	9.4	4.7	1.2	25.4	0.44	1.24	>0.15
Zn_{0-0.2}	0.3	0.5	0.6	0.7	3.3	0.6	0.3	47.0	5.21	40.47	<0.01
MO_{0.2-0.5}	5.0	7.0	8.0	9.0	25.0	8.5	2.2	25.7	4.06	25.98	<0.01
pH_{0.2-0.5}	4.7	5.1	5.4	5.7	6.2	5.4	0.3	6.5	0.04	-0.86	<0.01
P_{0.2-0.5}	8.0	15.0	19.5	27.3	358.0	24.5	31.2	127.0	9.66	103.16	<0.01
K_{0.2-0.5}	0.2	0.3	0.4	0.5	1.2	0.4	0.1	38.2	1.76	4.45	<0.01
Ca_{0.2-0.5}	9.0	17.0	21.0	24.0	42.0	21.4	5.7	26.8	0.95	1.87	<0.01
Mg_{0.2-0.5}	3.0	7.0	9.0	11.0	17.0	9.1	2.8	30.6	0.40	-0.23	<0.01
H+Al_{0.2-0.5}	14.0	19.0	22.0	26.0	38.0	22.7	4.8	21.1	0.71	0.64	<0.01
SB_{0.2-0.5}	12.4	25.1	30.7	35.7	58.4	31.1	8.1	26.0	0.68	1.20	>0.15
CEC_{0.2-0.5}	40.0	48.5	53.5	57.6	76.4	53.7	6.7	12.5	0.74	1.03	<0.05
V_{0.2-0.5}	30.0	50.8	58.0	65.0	80.0	57.2	9.9	17.3	-0.36	-0.32	<0.01
B_{0.2-0.5}	0.2	0.3	0.4	0.6	1.0	0.4	0.1	34.6	0.58	-0.15	<0.03
Cu_{0.2-0.5}	0.3	0.7	0.8	1.0	1.9	0.9	0.3	34.5	1.00	1.14	<0.01
Fe_{0.2-0.5}	13.0	22.0	27.0	34.0	56.0	29.0	8.8	30.5	0.94	0.76	<0.01
Mn_{0.2-0.5}	0.8	1.4	1.8	2.3	6.8	1.9	0.8	44.4	2.42	9.84	<0.01
Zn_{0.2-0.5}	0.3	0.4	0.5	0.5	1.8	0.5	0.2	39.2	4.07	20.75	<0.01

onde: min – mínimo; Q – quartil; med – mediana; SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; sk – assimetria; k – curtose; p-valor do teste de normalidade. N em (g.kg⁻¹); Brix, pol and V em (%); areia e argila em (g.kg⁻¹); MO em (g.dm⁻³); P, B, Cu, Fe, Mn, Zn em (mg.dm⁻³); K, Ca, Mg, H+Al, SB e CEC em (mmolc.dm⁻³).

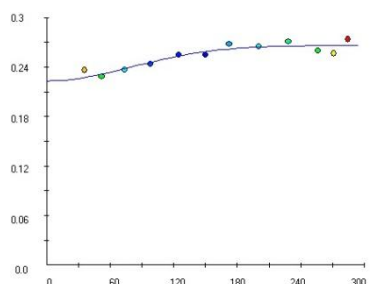
11.4. Variogramas ajustados para os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar – valores reais



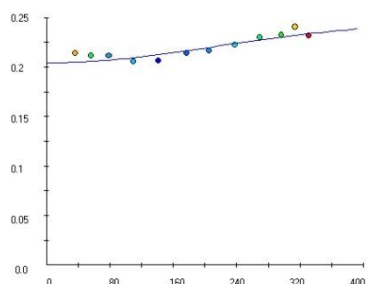
Brix – real / 2008



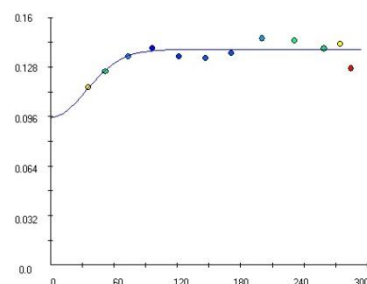
Pol – real / 2008



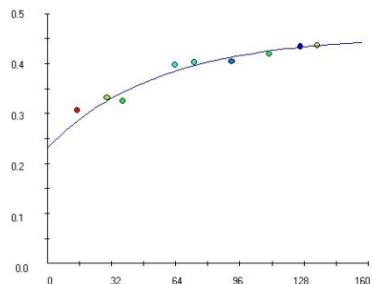
Brix – real / 2009



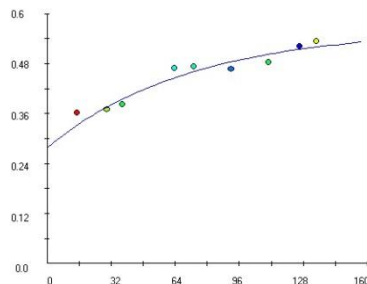
Pol – real / 2009



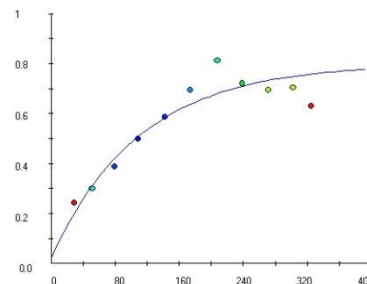
Fibra – real / 2009



Brix – real / 2011

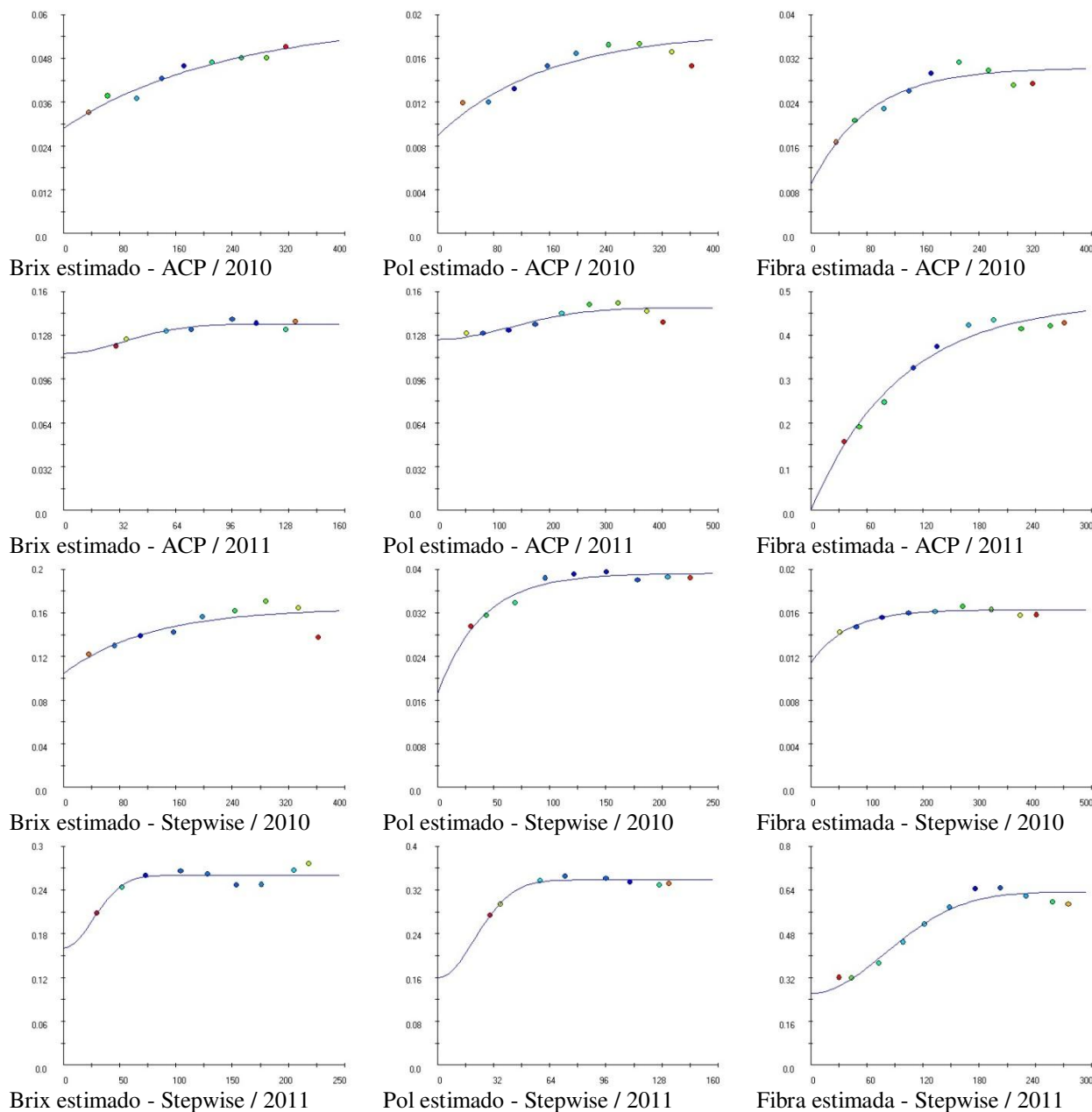


Pol – real / 2011



Fibra – real / 2011

11.5. Variogramas ajustados para os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar – valores estimados pelos modelos



11.6. Fotos - Trabalho de campo 2008



Amostragem de planta – ponto amostral



Amostragem de planta



Detalhe de incidência de cigarrinhas



Raiz afetada por cigarrinhas



Planta afetada por cigarrinha-de-raizes



Equipe de trabalho – coleta de plantas



Balança da colhedora - SIMPROCANA



Local da balança no elevador da colhedora



Balança no elevador da colhedora



Colheita



Colheita



Monitor de produtividade



Amostragem de solo

11.7. Fotos - Trabalho de campo 2009/2010



Amostragem de planta - Ponto amostral



Incidência de cigarrinhas



Amostras para análise de qualidade



Equipe de trabalho – coleta de plantas



Calibração da balança



Colheita



Área atingida por queima – Agosto/2010



Área atingida por queima – Agosto/2010



Área atingida por queima – Agosto/2010



Diferença de estágios de crescimento devido queima



Diferença de estágios de crescimento devido queima



Diferença de estágios de crescimento devido queima

11.8. Fotos - Trabalho de campo 2011



Área após chuva de granizo – Abril/2011



Área após chuva de granizo – Abril/2011



Amostragem de planta - Ponto amostral



Amostragem de planta - Ponto amostral



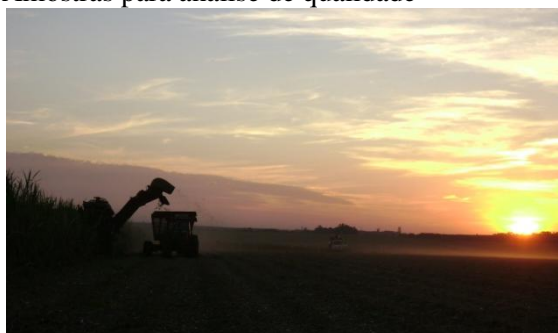
Ponto amostrado no ciclo passado



Amostras para análise de qualidade



Equipe de trabalho – coleta de plantas



Colheita