

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

**CORRELAÇÃO ESPACIAL ENTRE OS ATRIBUTOS DO SOLO
E O ÍNDICE ESPECTRAL DE VEGETAÇÃO NA CULTURA DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

Fabricio Valentim Zanzarini
Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
2012

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

**CORRELAÇÃO ESPACIAL ENTRE OS ATRIBUTOS DO SOLO E
O ÍNDICE ESPECTRAL DE VEGETAÇÃO NA CULTURA DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

Fabricio Valentim Zanzarini

Orientadora: Profa. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL – SP
Agosto – 2012

Z34c Zanzarini, Fabricio Valentim
Correlação espacial entre os atributos do solo e o índice
espectral de vegetação na cultura de cana-de-açúcar / Fabricio
Valentim Zanzarini. -- Jaboticabal, 2012
ix, 52 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012
Orientadora: Teresa Cristina Tarlé Pissarra
Banca examinadora: José Marques Junior, Renato Farias do
Valle Junior
Bibliografia

1. NDVI. 2. Variabilidade espacial. 3. Geoestatística. 4.
Sensoriamento Remoto. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.412:528.8

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



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE JABOTICABAL
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: CORRELAÇÃO ESPACIAL ENTRE OS ATRIBUTOS DO SOLO E O ÍNDICE ESPECTRAL DE VEGETAÇÃO NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: FABRICIO VALENTIM ZANZARINI

ORIENTADORA: Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO) , pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. RENATO FARIAS DO VALLE JUNIOR
Instituto Federal do Triângulo Mineiro / Uberaba/MG

Data da realização: 22 de agosto de 2012.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

FABRICIO VALENTIM ZANZARINI – nascido em Embaúba-SP no dia 22 de julho de 1980, graduou-se como Engenheiro Agrônomo em fevereiro de 2010 pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista – Unesp câmpus de Jaboticabal. Foi bolsista de Iniciação Científica pelo programa PIBIC/CNPq entre agosto de 2007 a agosto de 2009. Em março de 2010, ingressou no curso de Mestrado no programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Ciência do Solo, pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista – Unesp câmpus de Jaboticabal, sendo bolsista do Programa CAPES e FAPESP.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.”

Chico Xavier

*Aos meus pais Sebastião e Maura
a quem devo tudo que sou*

*As minhas irmãs Rose e Ana
pelo apoio e carinho*

““Nenhum vento sopra a favor de quem
não sabe para onde ir”

(Sêneca)

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Profa. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra, pela oportunidade para a realização de mais este passo em minha vida profissional, pela dedicação e amizade e a sua filha Maria;

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV, Unesp-câmpus de Jaboticabal, a todos os servidores da seção de pós-graduação, em especial ao coordenador do programa de pós graduação em Agronomia (Ciência do Solo) Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani;

Aos professores que constituíram a banca de qualificação e defesa de dissertação Prof. Dr. Maurício José Borges, Prof. Dr. José Marques Junior e Prof. Dr. Renato Farias do Valle Junior pelas orientações e correções preciosas ao meu trabalho e pela amizade concedida;

Aos professores Dr. José Marques Junior, Dr. José Frederico Centurion e Dr. Itamar Andrioli pela disponibilização do Laboratório do Departamento de Solos e Adubos – FCAV, bem como aos demais funcionários do departamento;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural Ronaldo José de Barros, Izilda Maria de Carvalho Máximo e Davi Aparecido Trevizolli por estarem sempre disponíveis para ajudar;

Ao Grupo Virgolino de Oliveira-Usina Catanduva, pela concessão da área experimental, em especial aos Engenheiros Agrônomos João Carlos Rocha Abdo e Fernando Tiballi de Mello pelo apoio;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa na primeira etapa e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de SP (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudos na segunda etapa e auxílio financeiro;

Aos amigos e companheiros de pós graduação, Fabiana Camargo Reis, Michele Silva, Flávia Mazzer Rodrigues e Elton da Silva Bicalho, pelo convívio e apoio por todo este tempo, em especial a Flávia Janaina Carvalho Brandão e Daniel de Bortoli Teixeira, pela grande ajuda na condução do experimento e nas estatísticas, sem os quais este trabalho não seria possível e ao amigo Osvaldo Pereira, pelo auxílio na área de SIG.

MUITO OBRIGADO!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	viii
SUMMARY.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Importância econômica da cana-de-açúcar no Brasil.....	3
2.2 Cana-de açúcar.....	3
2.3 Ecofisiologia da cana-de-açúcar.....	4
2.4 Exigências edáficas para cana-de-açúcar.....	5
2.5 Variabilidade dos atributos do solo.....	6
2.6 Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI).....	8
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
5 CONCLUSÕES.....	44
6 REFERÊNCIAS.....	45

CORRELAÇÃO ESPACIAL ENTRE OS ATRIBUTOS DO SOLO E O ÍNDICE ESPECTRAL DE VEGETAÇÃO NA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – As tecnologias de agricultura de precisão como o uso da variabilidade espacial dos atributos do solo vêm sendo muito estudadas para a cultura de cana-de-acúcar. Dentre estas tecnologias destaca-se recentemente o uso de índices de vegetação, derivados de produtos de sensoriamento remoto, como poderosas ferramentas indicadoras do desenvolvimento da vegetação. Sendo assim, objetivou-se analisar a correlação dos atributos do solo com o índice espectral de vegetação (NDVI), gerado por meio de imagens de satélite, em área com produção de cana-de-açúcar. Foram estudados a partir de uma malha georreferenciada os atributos do solo e gerados os semivariogramas e mapas de variabilidade espacial. Para esses mesmos locais, calculou-se o NDVI possibilitando, além do mapeamento deste índice, a avaliação da correlação espacial entre este e as demais propriedades em estudo. Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial, com exceção da macro e microporosidade do solo. O índice de vegetação (NDVI) da cana-de-açúcar apresentou correlação espacial alta com a altitude e as correlações que melhor explicaram a distribuição espacial do NDVI da cana-de-açúcar ocorreram com a densidade do solo, o teor de fósforo, o pH, a acidez potencial e a saturação por bases. O índice de vegetação (NDVI) apresentou boa aplicação para observar a variabilidade espacial de alguns atributos do solo, mostrando-se uma ferramenta para delimitação de áreas homogêneas de manejo.

Palavras-chave: NDVI, variabilidade espacial, geoestatística, sensoriamento remoto

SPATIAL CORRELATION BETWEEN THE SOIL ATTRIBUTES AND THE SPECTRAL VEGETATION INDEX IN THE CULTURE OF SUGAR CANE

SUMMARY – The precision agriculture technologies such as the use of the spatial variability of the soil attributes have been widely studied for sugar cane production system. Among these technologies have recently highlighted the use of spectral vegetation indexes, from remote sensing products, as a powerful tool indicating the development of vegetation. Therefore, the main objective was to analyze the correlation of soil attributes and the spectral vegetation index (NDVI), generated through satellite images, in an area with production of sugar cane. From a georeferenced grid, the soil attributes and it has been generated the semivariogram and spatial variability maps. For these same sites, the NDVI was calculated allowing, more than the index mapping, the assessment of spatial correlation between the NDVI and other soil properties studied. All attributes were spatially dependent, with the exception of macro and microporosity. The vegetation index (NDVI) of sugar cane showed high spatial correlation to altitude, and the correlations that better explain the spatial distribution of NDVI of the sugar cane occurred with the bulk density, phosphorus content, pH, potential acidity and bases saturation. The vegetation index (NDVI) showed good application to observe the spatial variability of some soil attributes, being a tool for delineating the homogeneous areas for better management.

Keywords: NDVI, spatial variability, geostatistics, remote sensing

1 INTRODUÇÃO

A crescente expansão da cultura da cana-de-açúcar no Brasil destaca a importância e relevância deste cultivo no cenário econômico nacional e também como grande potencial energético, destacando-se como fonte alternativa de energia limpa e renovável, por meio de seus subprodutos, tais como fibras e bagaço.

No estabelecimento de práticas de manejo adequadas na condução do sistema produtivo da cultura de cana-de-açúcar é necessário compreender a distribuição espacial dos atributos físicos e químicos dos solos, visando não somente à otimização da produtividade agrícola, mas também a minimização de possíveis danos ambientais.

A análise espacial dos atributos do solo pode indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção das culturas, como também para aumentar a possibilidade de estimar respostas das culturas sob determinadas práticas de manejo.

Este conjunto de ferramentas, conduz uma das principais vertentes da chamada Agricultura de Precisão, que utiliza a informação georreferenciada na área de produção baseada na variabilidade do solo e clima e tem por objetivo a redução dos custos de produção e logicamente o aumento da produtividade, com esta tecnologia acoplada a ferramentas de sensoriamento remoto, pode ser realizada a análise da vegetação e a detecção de mudanças no solo, com o intuito de avaliar os recursos naturais e monitorar a cobertura vegetal.

O aprimoramento do conhecimento da interação da resposta eletromagnética da vegetação tem ocorrido pela realização de estudos no tema referido por Comportamento Espectral da Vegetação, utilizado para representar as características de reflectância da resposta eletromagnética pela planta. Este estudo baseia-se no conhecimento de como a vegetação processa a radiação eletromagnética, técnica esta realizada por meio do sensoriamento remoto (PONZONI, 2001) e pode utilizada na forma de índices espectrais de vegetação.

O índice de vegetação mais difundido é o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), o qual pode ser analisado por meio da interpretação de imagens de

sensores remotos e, em particular, por valores obtidos em diferentes datas, que permitem avaliar a variação da área verde num certo período de tempo.

Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho foi analisar a correlação espacial entre os atributos do solo e o índice espectral de vegetação (NDVI) da cultura de cana-de-açúcar, no intuito de verificar a possibilidade de utilização de técnicas de sensoriamento remoto na compreensão não só do comportamento espectral da cultura, mas também, para verificar se há correlação entre os atributos do solo e os índices de vegetação foliar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância econômica da cana-de-açúcar no Brasil

A crescente expansão da cultura da cana-de-açúcar no Brasil destaca a importância e relevância deste cultivo no cenário nacional. A área colhida em 2011 ultrapassou os 9,6 milhões de hectares e a estimativa para 2012 é de 11 milhões de hectares. A produção brasileira subiu de 88,92 milhões para 686,29 milhões de toneladas no período de 1975 à 2009, e a produção estimada para 2012 é de 800,12 milhões de toneladas, com produtividade média passando de 46,8 para 70,6 toneladas por hectare no período de 1975 à 2009 (IBGE, 2012). Com aproximadamente 8 a 9 milhões de hectares plantados e uma safra anual de cerca de 700 milhões de toneladas, o país é o maior produtor mundial da cultura. Foram produzidos na safra de 2011/2012, 31,3 milhões de toneladas de açúcar e 20,5 bilhões de litros de etanol (UNICA, 2012).

2.2 Cana-de açúcar

A cana-de-açúcar é uma poácea, pertencente ao gênero *Saccharum*, com origem provável no Sudeste da Ásia. O gênero *Saccharum* é representado por espécies como a *S. officinarum*, *S. spontaneum* e *S. robustum*. Entretanto, as variedades cultivadas são quase todas híbridas entre duas ou mais espécies. Como a maioria das gramíneas, a cana-de-açúcar cresce na forma de touceiras, constituídas por uma parte aérea que engloba os colmos, as folhas e as flores e outra, subterrânea, composta por raízes e rizomas (SZMRECSÁNYI, 1978).

2.3 Ecofisiologia da cana-de-açúcar

O ciclo da cana plantada pela primeira vez, isto é, cuja origem resulta da brotação de mudas plantadas e que posteriormente sofrerá o 1º corte, recebe o nome de *ciclo da cana planta* (SZMRECSÁNYI, 1978). Nas condições de clima predominante nas regiões Centro-Oeste e Centro-Sul brasileiras, podem-se efetuar o plantio em duas épocas distintas. Numa primeira época, relativa aos meses de setembro, outubro e novembro, que corresponde ao início da estação chuvosa e quente, a cana-de-açúcar apresenta seu ciclo vegetativo com duração média de 12 meses, sendo denominada *cana-planta-de-ano* (CASAGRANDE, 1991 e SZMRECSÁNYI, 1978).

A *cana-de-ano* possui um máximo desenvolvimento de novembro a abril, diminuindo após esse mês devido às condições climáticas adversas, com possibilidade de colheita dependendo da variedade, a partir do mês de julho (CASAGRANDE, 1991).

Numa segunda época, relativa aos meses de janeiro, fevereiro e março, correspondente ao meio da estação chuvosa e quente em direção ao outono, a cana-de-açúcar apresenta seu ciclo vegetativo com duração variável de 14 a 21 meses, conforme a data de plantio e a época de maturação da variedade utilizada. É denominado ciclo da *cana-planta-de ano e meio*, uma vez que este tipo de cana passa em repouso fisiológico durante a primeira estação de inverno (no mesmo ano de plantio), sendo cortada durante a segunda estação de inverno, aproximadamente um ano e meio após o plantio, (CASAGRANDE, 1991 e SZMRECSÁNYI, 1978).

De maio a setembro, a *cana-de-ano e meio* possui uma taxa de crescimento restrita, nula ou negativa em função das condições climáticas (ALFONSI et al., 1987). Havendo boas condições de precipitação, a fase de maior desenvolvimento da cultura se processa de outubro a abril, com pico máximo de crescimento de dezembro a abril (CASAGRANDE, 1991).

Após o corte da *cana-planta*, restam no campo as socas ou soqueiras de cana-de-açúcar. Os colmos industrializáveis da cana-planta sofrem corte o mais basal possível, isto é, bem próximo à superfície do solo, de forma que restam suas bases ou

tocos, que permanecem ligados ao sistema radicular bem desenvolvido, formado pela cana-planta (BACCHI, 1985).

Esse sistema radicular mantém a sua atividade durante 90 a 120 dias após o corte, possibilitando a absorção de água e nutrientes que são dirigidos às gemas basais dos tocos da soqueira (BACCHI, 1985). De acordo com CÂMARA & OLIVEIRA (1993), em torno de 20 a 30 dias após o corte, observa-se profusa brotação das soqueiras, as quais posteriormente apresentam as fases seguintes do ciclo fenológico, ou seja, perfilhamento, acúmulo inicial de sacarose e maturação. O ciclo das soqueiras ou ciclo da cana-soca dura 12 meses em média.

Considerando que a cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo C4, a alta eficiência fotossintética está condicionada a ocorrência de alta intensidade luminosa. De acordo com CAMARGO (1969), em plena luz do sol, os colmos são mais grossos, porém mais curtos, as folhas mais largas e mais verdes e o perfilhamento é mais intenso. Em condições de luminosidade deficiente, os colmos tornam-se mais finos e longos e as folhas estreitas e amareladas.

2.4 Exigências edáficas para cana-de-açúcar

A cana se desenvolve melhor em solos de boa fertilidade, profundos, argilosos, com boa capacidade de retenção de água, mas sem encharcamento e com pH de 6,0 a 6,5. Encontram-se cultivos de cana-de-açúcar em solos com pH variando desde 4 até 8,5, apresentando, no entanto, diminuição na produtividade quando caminha para valores extremos (LUCCHESI, 2001). Os solos ácidos são mais prejudiciais à cana que os alcalinos (HUMBERT, 1974). Entretanto, na prática, devido às diferentes variedades, a cana-de-açúcar se mostra uma cultura bastante adaptável, sendo cultivada em solos de fertilidade e textura bastante distintas, desde arenosas até muito argilosas.

Em geral, os solos arenosos são limitados por apresentarem baixa capacidade de armazenamento de água e grande perda de nutrientes por lixiviação, além de favorecerem o desenvolvimento de diversas pragas de solo, entre elas, os nematóides.

Os solos muito argilosos são propensos a uma drenagem mais lenta, ocasionando uma menor aeração na zona das raízes. O crescimento adequado da cana se observa em solos com quantidade de oxigênio suficiente para sua respiração (HUMBERT, 1974). A boa aeração do solo, também, é uma condição necessária para haver um máximo de absorção de nutrientes pelas raízes. Os solos argilosos são mais propensos à ocorrência de adensamentos e compactação devido às propriedades físicas de seus componentes. O desenvolvimento da cultura é consideravelmente mais lento em solos compactados, ocasionando deformações nas raízes diminuindo a superfície de contato para a absorção de nutrientes e água (HUMBERT, 1974).

Estudos realizados por QUEIROZ-VOLTAN et al. (1998) em áreas com predominância de latossolos vermelhos cultivadas com cana-de-açúcar, relatam que não foram encontradas densidades do solo superiores a $1,23 \text{ g.cm}^{-3}$. Nesses níveis de densidade não foram observadas alterações histológicas significativas nas raízes. Ficou constatado, apenas, que existe uma tendência das raízes desenvolvidas em solos mais compactados apresentarem a relação CO/CV (espessura do córtex/espessura do cilindro vascular) mais elevada.

As condições edáficas, ou seja, as características e propriedades físicas e químicas do solo influenciam de maneira significativa a profundidade do sistema radicular (FAUCONNIER & BASSEREAU, 1975).

Apesar de ser uma planta rústica, a viabilidade econômica da cultura da cana-de-açúcar diminui à medida que as características do solo tornam-se menos favoráveis, como ambientes sujeitos a inundações, ou altamente erodíveis, ou declivosos, ou pedregosos e os solos de fertilidade muito baixa (ROLIM, 1995).

2.5 Variabilidade dos atributos do solo

Entender como a distribuição espacial dos atributos físicos e químicos dos solos funciona é importante para o estabelecimento de práticas de manejo adequadas, não

somente à otimização da produtividade agrícola, mas também para a minimização de possíveis danos ambientais (McBRATNEY & PRINGLE, 1999).

Verificar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo com o uso da geoestatística, utilizando-se a técnica da krigagem, revela ser uma importante ferramenta na compreensão da dinâmica dos solos, podendo ser fundamental no auxílio à tomada de decisões que visem maior longevidade e melhor gestão dos recursos. A análise da variabilidade do solo, por meio da geoestatística, pode indicar alternativas de manejo, não só para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção das culturas (TRANGMAR et al., 1985), como também para aumentar a possibilidade de estimar respostas das culturas sob determinadas práticas de manejo.

A variabilidade espacial dos solos não tem sido devidamente tomada em consideração nos processos produtivos da agricultura. Um maior conhecimento da variabilidade espacial da produtividade e das propriedades físicas e químicas do solo, bem como o estudo desta variabilidade com o passar dos anos (variabilidade temporal), vem somar com o conhecimento já existente sobre o assunto, o qual, ao ser devidamente disponibilizado aos produtores que adotam a técnica de Agricultura de Precisão, pode viabilizar uma agricultura moderna, economicamente competitiva e ecologicamente correta (MERCANTE et al., 2003), o estudo dessa variabilidade é feito através da geoestatística.

As análises geoestatísticas baseiam-se na teoria das variáveis regionalizadas, em que medidas mais próximas tendem a serem mais parecidas do que valores observados em locais mais distantes (VIEIRA, 2000). Tais técnicas, fornecem métodos para quantificar esta autocorrelação espacial e incorporá-la na estimação de valores em locais não observados (JOHNSEN et al., 1996). Este conjunto de ferramentas, denominado de geoestatística, conduzem uma das principais vertentes da chamada Agricultura de Precisão

Com o auxílio da geoestatística, a estrutura de dependência espacial dos atributos físicos e químicos do solo vem sendo intensamente estudada e modelada, permitindo a sua visualização espacial. Usualmente, o interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de semivariograma e seus

parâmetros, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados, sobretudo de atributos que sofrem influência do manejo, caso da matéria orgânica e densidade do solo.

O interesse pode concentrar-se em um ou mais pontos específicos da área ou na obtenção de uma malha de pontos interpolados, de modo a permitir a visualização do comportamento da variável na região, o que é obtido empregando-se a interpolação por krigagem. Segundo VIEIRA (2000) este interpolador pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não serem tendenciosos e conter mínima variância.

2.6 Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI)

Uma das tecnologias que contribuem para o avanço dos conhecimentos de como a vegetação processa a radiação eletromagnética é o sensoriamento remoto. Essa tecnologia não somente propiciou o mapeamento da vegetação de extensas áreas da superfície terrestre, como também o monitoramento, a fiscalização e o controle da exploração na escala de observação planetária, e indiretamente viabilizou diversos estudos da fisiologia vegetal em laboratório (PONZONI, 2001).

O sensoriamento remoto é uma ferramenta bastante utilizada na Agricultura de Precisão e entre suas finalidades estão à interpretação automática, o monitoramento contínuo de grandes áreas agrícolas e ou ambientais, além do menor custo e menor tempo para as estimativas e previsões.

A análise da vegetação e a detecção de mudanças são realizadas com o intuito de avaliar os recursos naturais e monitorar a cobertura vegetal, o aprimoramento do conhecimento da interação da resposta eletromagnética da vegetação têm ocorrido pela realização de estudos no tema referido por *Comportamento Espectral da Vegetação*, utilizado para representar as características de reflectância da resposta eletromagnética pelas folhas, plantas individuais e conjunto de plantas (dossel).

Para caracterizar o comportamento espectral da vegetação, é preciso conhecer o processo de interação resposta eletromagnética em termos de três fenômenos físicos: reflectância, transmitância e absorvância. Contudo, a maioria dos casos que envolvem o uso do sensoriamento remoto em estudos da vegetação inclui a reflectância como o fenômeno mais analisado (PONZONI, 2001).

O comportamento espectral de uma folha é função de sua composição, morfologia e estrutura interna (NOVO, 1989 e PONZONI, 2001). Na região do visível a clorofila das folhas responde pela maior parte da reflectância espectral. Os valores percentuais desses pigmentos existentes nas folhas podem variar bastante de espécie para espécie. A energia incidente é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência e também fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos por meio da fotossíntese (PONZONI, 2001).

No estudo da resposta espectral de folhas verdes, constatou-se que no intervalo de comprimentos de onda na faixa do visível a reflectância é baixa, da ordem de 10%, com um suave aumento da resposta na região do verde (MOREIRA, 2000 e NOVO, 1989). Na faixa do visível, a queda da reflectância está associada à absorção pelos pigmentos foliares, principalmente pela clorofila. Na região do azul, a absorção ocorre nas proximidades do comprimento de onda de 445 nm e está associada à presença dos pigmentos xantofila, carotenos e clorofilas α e β . Na região do vermelho (V) apenas a clorofila atua, absorvendo energia em torno de 645 nm (NOVO, 1989).

Na região do infravermelho médio a reflectância da vegetação é dominada pelo conteúdo de água das folhas (NOVO, 1989, PONZONI, 2001). Nessa região do espectro, encontram-se dois máximos de absorção pela água em 1400 nm e em 1950 nm. A esta região correspondem também às bandas de absorção atmosféricas, por isso os sensores desenvolvidos têm suas faixas espectrais deslocadas para regiões sujeitas à atenuação atmosférica (NOVO, 1989).

Índices espectrais de vegetação, ou simplesmente, índices de vegetação têm sido largamente utilizados para monitorar a cobertura vegetal da Terra em escalas global e/ou local (MIURA et al., 2001). Tais índices são combinações de dados espectrais de duas ou mais bandas, selecionadas com o objetivo de sintetizar e

melhorar a relação desses dados com os parâmetros biofísicos da vegetação (MOREIRA, 2000). Para minimizar a variabilidade causada por fatores externos, a reflectância espectral tem sido transformada e combinada em vários índices de vegetação (PONZONI, 2001). Tal tarefa pode ser feita por meio da interpretação de imagens de sensores remotos e, em particular, pelo Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) que, obtido em diferentes datas, permitem avaliar a variação da área verde num certo período de tempo.

Imagens muito utilizadas para se calcular o NDVI são as do satélite Landsat 5, equipado com sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*), por apresentarem bandas que cobrem as principais feições da curva espectral dos vegetais, com cenas suficientemente abrangentes (32.400 km^2 - 180 por 180 km), por serem viáveis do ponto de vista econômico para utilização em larga escala e por possuírem qualidade radiométrica reconhecida. As imagens do satélite Landsat 5 possuem resolução espacial de 30m para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 cobrindo as faixas do visível ao infravermelho médio.

As principais características das imagens Landsat/ETM+ são: a) resolução temporal de 16 dias; b) resolução radiométrica de 8 bits, ou 256 níveis de cinza; c) resolução espectral: três bandas cobrindo a região do espectro visível, uma banda cobrindo o infravermelho próximo (IVP), duas bandas cobrindo o infravermelho de ondas curtas (IVOC), todas com 30 metros de resolução espacial, uma banda termal com dois ganhos, alto e baixo, com 60 metros de resolução espacial, e mais uma banda pancromática com 15 metros de resolução espacial. A órbita do satélite é polar, descendente e sol-síncrona.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, inicialmente referido por *Band Ratio Parameter* (BRP) e hoje denominado NDVI, foi proposto por ROUSE et al. (1974). Os valores obtidos do NDVI estão contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e +1. Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é sua rápida saturação, que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento. Ou seja, o índice estabiliza em um patamar, apresentando um mesmo valor, mesmo com o aumento da densidade do dossel (MOREIRA, 2000).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A área do estudo localiza-se no Município de Itajobi-SP, cujas coordenadas centrais são 49°05'29" W Gr. e 21°21'26" S. O clima da região é o tropical chuvoso, tipo Aw, segundo a classificação climática de Köeppen, caracterizado por inverno seco e verão quente e úmido. A área é de aproximadamente 32 hectares cultivados com cana-de-açúcar, sendo distribuídos em 4 subáreas (talhões) de tamanhos e formas distintas (Figura 1a).

De acordo com a caracterização pedológica pré-existente os solos são de textura predominantemente arenosa em sua maioria da representado por Latossolos Vermelho-Amarelos (EMBRAPA, 2006). A topografia do local é suavemente ondulada a ondulada na maior parte da área, sendo que a declividade média fica em torno de 5%. Já nas partes baixas e nos encaixes da drenagem os valores da declividade podem chegar até 13%.

A área de estudo é composta por 4 talhões com cultivo de cana em 4^o corte, totalizando 31,76 hectares (ha) (Figura 1a). A variedade de cana-de-açúcar cultivada na área é a SP83-2847 sendo esta de colheita tardia (colheita de julho à outubro). A cultura foi implantada após preparo convencional do solo, onde foram feitas todas as correções e adubações rotineiras. O plantio ocorreu no dia 13 de março de 2006, por se tratar de uma variedade de 18 meses (cana de ano e meio), a primeira colheita foi no dia 20 de outubro de 2007, sendo o segundo corte em 20/11/2008, o terceiro em 31/10/2009 e o quarto em 10/10/2010. O ultimo corte ocorreu entre 19 e 24/08/2011. O processo de colheita da cana foi manual com queima da palhada.

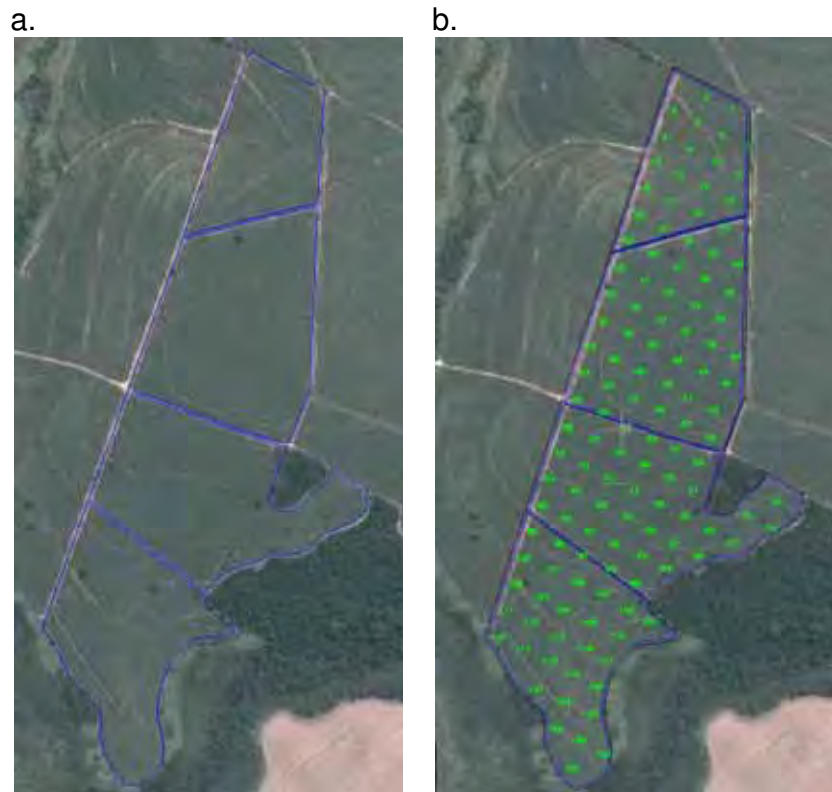


Figura 1. Imagem da área de estudo: a. delimitação dos talhões estudados b. grid com indicação dos pontos amostrais

Nos meses de novembro e dezembro de 2010, a área foi demarcada e estaqueada com auxílio de um teodolito eletrônico (Figura 2), em forma de grade regular de 50x50 m gerando 124 pontos de coleta de solo (Figura 1b).

O ponto foi marcado por uma estaca e foi georreferenciado com o uso de um receptor do sistema de posicionamento global - GPS de navegação. Os receptores GPS coletam dados enviados pelos satélites, transformando-os em coordenadas, distâncias, tempo, deslocamento e velocidade, através de processamento em tempo real ou pós-processados. Os dados coletados foram pós-processados no programa GPSurvey e cadastrados no Programa Topograph para a coleta das coordenadas de cada ponto amostrado assim como do valor da altitude.

Ao redor de cada estaca foram coletadas com trado irlandês, 5 amostras distanciadas cerca de 2 metros cada, estas foram colocadas em um balde e

homogeneizadas para formar uma amostra representativa do ponto (Figura 3), sendo em seguida transferidas para saquinhos de plástico com a devida identificação. As profundidades amostradas foram 0 à 0,10 m (p1) e 0,20 à 0,30 m (p2) em cada ponto, sendo estas profundidades escolhidas para se verificar se existem diferenças entre a camada superficial, que é a mais afetada nos tratos culturais e uma camada mais profunda. Estas amostras foram levadas ao laboratório onde foram secas ao ar e peneiradas (2 mm), a fração menor que 2 mm foi acondicionada em caixinhas e logo após utilizadas para as análises físicas e químicas.



Figura 2. Estaqueamento da área de estudo.



Figura 3. Coleta de solo nas 2 profundidades.

Foram feitas as análises químicas de pH em CaCl_2 , Ca^{+2} , Mg^{+2} , H+Al e matéria orgânica (MO) no laboratório de solos do Departamento de Solos e Adubos da FCAV/Unesp Jaboticabal, conforme a metodologia de RAIJ & QUAGGIO (1989). Com esses dados foram calculados os valores de soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (T) e saturação por bases (V%).

A composição granulométrica foi determinada para as mesmas amostras por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação lenta por 16 h. O conteúdo de argila foi obtido pelo método da pipeta de acordo com a metodologia de GEE & BAUDER (1986). Determinou-se assim as porcentagens de argila, silte e areia, sendo esta fracionada em areia grossa ($> 0,21 \text{ mm}$) e fina ($< 0,21 \text{ mm}$).

Em cada ponto amostral foram coletadas também, amostras indeformadas com cilindro de alumínio de $53,16 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ($0,03 \text{ m}$ de altura e $0,048 \text{ m}$ de diâmetro), sendo 2 amostras em cada ponto, na profundidade 0 à $0,10 \text{ m}$ (Figura 4). Os cilindros foram acondicionados em bandejas de isopor e levados ao laboratório.

Essas amostras coletadas com cilindros, foram saturadas e pesadas, logo após, submetidas à tensão de $0,01 \text{ MPa}$ em câmaras de Richards (KLUTE, 1986) e pesadas ao atingirem o equilíbrio. Na seqüência, as amostras foram secas em estufa a 105° C durante 24 horas e pesadas para determinação da densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986), da porosidade total segundo DANIELSON & SUTHERLAND (1986), da microporosidade na tensão de $0,01 \text{ MPa}$ (KLUTE, 1986) e da macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.



Figura 4. coleta de amostras indeformadas nos cilindros.

Para o cálculo do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) foram utilizadas imagens orbitais feitas pelo satélite Landsat 5 através do sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*), pertencentes à órbita/ponto 221/75, referente a passagem do dia 24/07/2011 que corresponde ao período de crescimento vegetativo da cultura da cana na área estudada. De posse das imagens Landsat 5, efetuou-se o georeferenciamento visual das mesmas com relação ao polígono da região de estudo e então recortou-se somente as áreas que representam os talhões de cana-de-açúcar estudados.

Em seguida o índice foi calculado pela diferença entre as bandas do Infra Vermelho Próximo (IVP, 800 nm -1100 nm – Banda 4) e do Vermelho (V, 600 nm - 700 nm – Banda 3), normalizada pela soma das mesmas bandas de acordo com a equação (1). O índice foi proposto visando eliminar diferenças sazonais do ângulo do Sol e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica observados para dados multitemporais.

$$NDVI = \frac{(IVP-V)}{(IVP+V)} \quad (1)$$

Sendo:

NDVI, valor do índice de vegetação da diferença normalizada;

IVP, valor da reflectância na faixa do infravermelho próximo (800 nm-1100 nm);

V, valor da reflectância na faixa do vermelho (600 nm-700 nm).

A partir dos valores de NDVI gerados para cada pixel da imagem, foi selecionado o pixel mais próximo dos pontos de coleta de solo e este valor de NDVI adotado como o representativo daquela região.

O processamento digital das imagens e o cálculo do NDVI foram realizados utilizando o programa ArcGIS (Versão 9.3).

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, calculando-se a média, o erro padrão da média, o desvio-padrão, o máximo, o mínimo e o coeficiente de variação. Na análise estatística dos dados, foi utilizado o programa Minitab (2000).

Para caracterização do padrão da variabilidade espacial, foi empregada a análise geoestatística (VIEIRA, 2000). Foram construídos semivariogramas com base no cálculo da semivariância $\hat{\gamma}(h)$, por meio da seguinte equação:

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

em que:

$\hat{\gamma}(h)$, é a semivariância estimada a partir dos dados experimentais;

Z, são os valores medidos nos pontos x_i e $x_i + h$; e

N(h), é o número de pares de valores medidos separados por uma distância h.

Os modelos foram ajustados por meio do programa GS+ (Robertson, 1998) e, em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, foi utilizada a técnica de validação cruzada. Observada a dependência espacial entre as amostras, definida pelo semivariograma, é possível estimar valores em que a variável não foi medida, fazendo uso da krigagem, segundo VIEIRA et al. (2002).

No sentido de averiguar a correlação espacial entre os atributos em estudo e o NDVI, foram construídos semivariogramas cruzados, que podem assumir valores tanto positivos, indicando que o aumento em um dos atributos é acompanhado pelo aumento do outro, como negativos, indicando que, quando ocorre o aumento de um dos atributos, ocorre o decréscimo do outro, segundo BHATTI et al. (1991). A confecção dos mapas de krigagem foi feita utilizando-se o programa Surfer (1999).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A classe analisada de NDVI na imagem de satélite da área de cana-de-açúcar apresenta uma amplitude de valores entre 0,21 a 0,49, com média de 0,40 e desvio-padrão de 0,05 (Tabela 1). Estes valores são considerados médios e representam áreas com menor porte vegetativo (WEIR & HERRING, 2012). RAMME (2008) analisando diferentes variedades de cana-de-açúcar, observou que as diferenças entre solos, estágios de corte e variedades influenciam na forma de curva do perfil temporal do NDVI, sendo mais visualmente perceptível na medida em que estas diferenças são combinadas. MOTOMIYA (2007) concluiu que o comportamento do NDVI em resposta à variação do IAF (Índice de área foliar) foi quadrático em todos os períodos observados em seu estudo e que o sensor utilizado mostrou-se uma ferramenta potencial para detecção de deficiência de nitrogênio na cultura do algodoeiro nas condições apresentadas.

A Tabela 1 ilustra os resultados da análise estatística descritiva dos dados de altitude, porosidade e granulometria do solo. A altitude média foi de 455,27 m com um coeficiente de variação baixo (2,22). A média de macroporos foi de 19,26%, com variação de 10,40 a 29,70% na profundidade estudada. Para o microporos a média foi de 15,65% com os valores variando de 8,23 a 25,48%. O valor médio de densidade do solo foi de 1,50 g cm⁻³, com variação de 1,31 a 1,73 g cm⁻³.

De acordo com os dados apresentado na Tabela 1, na profundidade de 0-0,10 m (p1) a fração argila no solo variou entre 5,95 e 24,85%, com média de 16,18%. e para a profundidade de 0,20-0,30 m (p2) a fração argila variou entre 9,90 e 26,40%, com média de 18,60%. No teste de médias houve diferença significativa entre a profundidade p1 e p2.

Os teores de silte tiveram uma amplitude de valores maiores, como pode ser notado no coeficiente de variação, apresentaram porcentagens entre 0,75 e 10,95% na profundidade p1 e 0,80 e 12,70% na profundidade p2. A média dos teores de silte no solo nas profundidades p1 e p2 não apresentaram diferenças significativas (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva para o NDVI, altitude e os atributos físicos do solo nas diferentes profundidades: p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

Prof.	Média	Erro Padrão	Desvio Padrão	CV	Mínimo	Máximo	
NDVI							
	0,40	0,00	0,05	13,04	0,21	0,49	
Altitude (m)							
	455,27	0,92	10,12	2,22	428,63	477,66	
Macroporosidade (%)							
p1	19,26	0,39	4,25	22,08	10,40	29,70	
Microporosidade (%)							
p1	15,65	0,31	3,39	21,63	8,23	25,48	
Densidade (g cm⁻³)							
p1	1,50	0,01	0,10	6,46	1,31	1,73	
% Argila							
p1	16,18	b	0,30	3,26	20,13	5,95	24,85
p2	18,60	a	0,31	3,42	18,40	9,90	26,40
% Silte							
p1	3,86	b	0,19	2,13	55,08	0,75	10,95
p2	4,38	b	0,17	1,86	42,38	0,80	12,70
%AG							
p1	18,55	a	0,32	3,52	18,99	11,10	31,10
p2	17,84	a	0,31	3,42	19,19	10,30	26,00
%AF							
p1	61,41	a	0,45	4,96	8,07	48,60	72,60
p2	59,17	b	0,41	4,51	7,62	48,80	69,00

Para o atributo areia grossa (AG) no solo na profundidade p1 os valores variaram entre 11,10 e 31,10%, com média de 18,55% e para areia fina (AF) na mesma profundidade os valores variaram de 48,60 a 72,60%, com média de 61,41%. Para a profundidade p2, os teores de areia grossa variaram de 10,30 a 26%, para areia fina de 48,80 a 69%, com médias de 17,84 e 59,17% respectivamente. As medias para os teores de areia grossa não tiveram diferenças significativas entre as profundidades, já para os teores de areia fina houve diferença de médias entre as profundidades p1 e p2 (Tabela 1).

Segundo os resultados das análises estatísticas descritivas apresentados na Tabela 2, é possível notar um alto grau de variação de alguns atributos químicos do solo mostrados por meio do coeficiente de variação (CV). Os atributos químicos que

apresentaram maior variação foram pela ordem: fósforo (172,58 para p2), magnésio (na faixa de 40% nas duas profundidades) e cálcio (na faixa de 35% nas duas profundidades). Já os atributos químicos do solo que apresentaram menor variação foram pela ordem: pH, CTC e matéria orgânica (MO).

Para fósforo (resina) os teores no solo na profundidade p1 variaram de 3,0 a 11,0 mg/dm³, com média de 4,65 mg/dm³. Já para a profundidade p2 a média foi de 6,16 mg/dm³ com os valores variando de 2,00 a 88,00 mg/dm³ apresentando um alto coeficiente de variação nessa profundidade. As médias dos valores de fósforo não tiveram diferenças significativas entre as profundidades amostradas (Tabela 2).

Os teores de M.O. no solo variaram de 4,0 a 13 g/cm³ na profundidade p1, com média de 8,43 g/cm³ e para a profundidade p2 a média foi de 8,12 g/cm³ com valores variando de 6,0 a 12,00 g/cm³ (Tabela 2).

A acidez média do solo para a profundidade p1, medida pelo pH em CaCl₂, apresentou valor de 4,96, e o valor de pH para a profundidade p2 foi de 4,38 classificando a acidez média como alta de acordo com os limites de interpretação para camada arável do solo, propostos por RAIJ et al. (1996). A cana se desenvolve melhor em solos com pH entre 6 a 6,5. Entretanto, segundo diversos autores é bastante tolerável à acidez.

Os teores de potássio (K) no solo variaram de 0,7 a 3,0 mmol/dm³ na profundidade p1, com média de 1,49 mmol/dm³. Já para a profundidade p2, média foi de 0,99 mmol/dm³ com os valores variando de 0,30 a 2,00 mmol/dm³ (Tabela 2).

Segundo os limites de interpretação dos teores de potássio e do fósforo em solos para culturas anuais proposto por RAIJ et al. (1996), os teores médios desses macronutrientes encontrados Tabela 2, podem ser assim classificados: potássio (K) = baixo (0,8-1,5 mmol/dm³); fósforo (P) = baixo (7-15 mg/dm³).

Tabela 2. Estatística descritiva para os atributos químicos e de fertilidade do solo nas diferentes profundidades: p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

Prof.	Média		Erro Padrão	Desvio Padrão	CV	Mínimo	Máximo
P (mg/dm³)							
p1	4,65	a	0,12	1,31	28,20	3,00	11,00
p2	6,16	a	0,96	10,62	172,58	2,00	88,00
M.O. (g/cm³)							
p1	8,43	ab	0,13	1,42	16,85	4,00	13,00
p2	8,12	b	0,13	1,39	17,08	6,00	12,00
pH (CaCl₂)							
p1	4,96	a	0,03	0,36	7,20	4,10	5,80
p2	4,38	b	0,03	0,32	7,21	3,90	5,40
K (mmol/dm³)							
p1	1,49	a	0,05	0,52	35,16	0,70	3,00
p2	0,99	b	0,03	0,32	31,89	0,30	2,00
Ca (mmol/dm³)							
p1	14,00	a	0,40	4,36	31,13	4,00	30,00
p2	8,44	b	0,29	3,22	38,16	3,00	19,00
Mg (mmol/dm³)							
p1	9,23	a	0,34	3,72	40,30	2,00	27,00
p2	5,83	b	0,24	2,68	45,94	2,00	16,00
H+AL (mmol/dm³)							
p1	23,34	b	0,64	7,10	30,43	11,00	42,00
p2	33,68	a	0,72	7,92	23,51	18,00	58,00
CTC (mmol/dm³)							
p1	48,05	a	0,77	8,51	17,71	23,00	79,00
p2	48,95	a	0,71	7,82	15,98	37,70	80,70
V %							
p1	51,18	a	1,12	12,41	24,24	21,00	84,00
p2	31,30	b	1,00	11,01	35,18	11,49	64,22

Os teores de cálcio (Ca) no solo variaram de 4,0 a 30,0 mmol/dm³ na profundidade p1, com média de 14,00 mmol/dm³ (Tabela 2). Já para a profundidade p2 a média foi de 8,44 mmol/dm³ com a variação de 3,00 a 19,00 mmol/dm³. Os teores de magnésio (Mg) no solo variaram de 2,0 a 27,0 mmol/dm³ na profundidade p1, com média de 9,23 mmol/dm³ (Tabela 2). Já para a profundidade p2, os teores variaram de 2 a 16,0 mmol/dm³, com média de 5,83 mmol/dm³.

Segundo os limites de interpretação de teores de Ca e Mg em solos, proposto por RAIJ et al. (1996), os resultados dos teores médios desses macronutrientes (Tabela 2) podem ser assim classificados: cálcio = alto ($> 7 \text{ mmol/dm}^3$); magnésio (Mg) = alto ($> 8 \text{ mmol/dm}^3$) para a profundidade p1 e médio ($5-8 \text{ mmol/dm}^3$) para as profundidades p2.

De acordo com o teste Tukey para médias houve diferenças significativas para as médias de pH, K, Ca, Mg e H+Al nas diferentes profundidades.

A saturação por bases (V) variou entre 21,0 e 84,0% na profundidade p1 e de 11,49 a 64,22% na profundidade p2, caracterizando solos distróficos e eutróficos. O valor médio da saturação por bases na profundidade p1 foi de 51,18%, e na profundidade p2 a média para saturação por bases foi de 31,30%. Segundo a classificação de RAIJ (1996) a média de saturação por bases na profundidade p1 foi considerada média, e para a profundidade p2 baixa. O teste de médias para saturação por bases mostrou diferenças significativas para as profundidades estudadas. A baixa saturação por bases em profundidade restringe o desenvolvimento radicular e, em consequência, o volume de solo explorado pelas raízes (DEMATTÊ, 2004). Entretanto, na área do estudo, a saturação teve seus máximos $>50\%$ em todas as profundidades. Em função disso e, em se tratando de solo naturalmente pobre com uma cana-soca já no seu 5º. corte, os níveis da saturação por bases observados, aparentemente, não se constituíram em séria restrição ao desenvolvimento da cultura.

Os resultados da análise geoestatística para as variáveis isoladas estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, e os semivariogramas e mapas de interpolação de dados estão apresentados nas Figuras 5 a 14. Os modelos ajustados aos semivariogramas experimentais das variáveis em questão foram utilizados para obter estimativas nos locais não amostrados no processo de interpolação denominado krigagem.

A maioria dos atributos apresentou dependência espacial, ajustando-se ao modelo esférico (Tabela 3 e 4, Figuras 5 a 7), e com coeficiente de determinação (R^2) na maioria dos casos alto. A exceção ocorreu para a altitude que foi melhor ajustável no modelo Gaussiano e para a macro e microporosidade ocorreu o efeito pepita puro

(Tabela 3). O atributo NDVI obteve o maior coeficiente de determinação (99%). O índice de determinação (R^2) indica quanto da variação total é comum aos elementos que constituem os pares analisados, quanto mais próximo de 1,0 melhor se explica o fenômeno decorrente da combinação das duas variáveis estudadas.

McBRATNEY & WEBSTER (1986) estudaram modelos de ajuste do semivariograma para as propriedades do solo e relataram que o modelo esférico é um dos mais encontrados. Este modelo é o mais ajustável para variáveis relacionadas às Ciências do Solo e é característico de variáveis que apresentam mudanças abruptas no espaço.

Tabela 3. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas ajustados aos dados do índice de vegetação, da altitude e atributos físicos do solo estudados.

Atributo	Prof.	Modelo	C_0	C_0+C_1	a (m)	C_0/C_0+C_1	R^2
NDVI		Esf.	3,6E-04	2,3E-03	335,41	0,16	0,99
Altitude		Gaus.	4,08	159,13	712,40	0,03	0,98
Macro	p1	EPP	17,47	17,47	---	1,00	---
Micro	p1	EPP	6,85	6,85	---	1,00	---
Ds	p1	Esf.	6,3E-03	8,7E-03	245,65	0,73	0,81
Argila	p1	Esf.	3,60	11,36	418,79	0,32	0,85
	p2	Esf.	4,71	17,86	412,42	0,26	1,00
Silte	p1	Esf.	0,53	3,19	649,26	0,16	0,96
	p2	Esf.	1,29	7,22	299,00	0,18	0,94
AG	p1	Esf.	4,31	13,50	363,00	0,32	0,91
	p2	Esf.	1,96	12,70	395,00	0,15	0,98
AF	p1	Esf.	2,07	31,81	504,82	0,07	0,93
	p2	Esf.	3,58	29,46	546,00	0,12	0,95

C_0 : efeito pepita; C_1 : patamar; a: alcance; R^2 : coeficiente de determinação

Os atributos macro e microporosidade apresentaram efeito pepita puro (EPP), isto é, semivariograma sem estrutura definida (Tabela 3). Esta é uma indicação de que não há dependência espacial para distâncias maiores, que a menor distância de amostragem, distribuindo-se de forma aleatória no espaço, portanto, não foi possível ajustar um modelo teórico aos semivariogramas experimentais desses atributos. Segundo CAMBARDELLA et al. (1994), o EPP é importante porque indica distribuição

casual, e que pode ser devido a erros de medidas ou microvariação não-detectada. Neste caso, pode ser aplicada a estatística clássica, que leva em conta apenas a média dos valores do espaço amostral no momento da tomada decisões.

Para analisar o grau de dependência espacial das variáveis, utilizou se a classificação de CAMBARDELLA et al. (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita (C_0/C_0+C_1) \leq 25% do patamar, de dependência espacial moderada, quando o efeito pepita está entre 25 e 75%, e de dependência fraca, quando o efeito pepita é $>$ 75%. Sendo assim o NDVI, a altitude e os atributos areia grossa na profundidades p2, silte e areia fina nas 2 profundidades estudadas apresentaram grau de dependência espacial forte e os demais grau de dependência espacial moderado (Tabela 3).

Os maiores alcances foram atingidos pela altitude (712,40m) e pelos atributos do solo argila (418,70m) e silte (649,26m) na profundidade p1, e areia fina nas profundidades p1 (504,82m) e p2 (546,00m) (Tabela 3 e Figura 5 e 6). GREGO & VIEIRA (2005) dizem que esse fato pode estar associado ao preparo do solo convencional, onde os equipamentos de preparo, arado e grade movimentam demasiadamente a camada superior afetando sua estrutura original, tornando pontos entre si mais semelhantes do que os mais distantes.

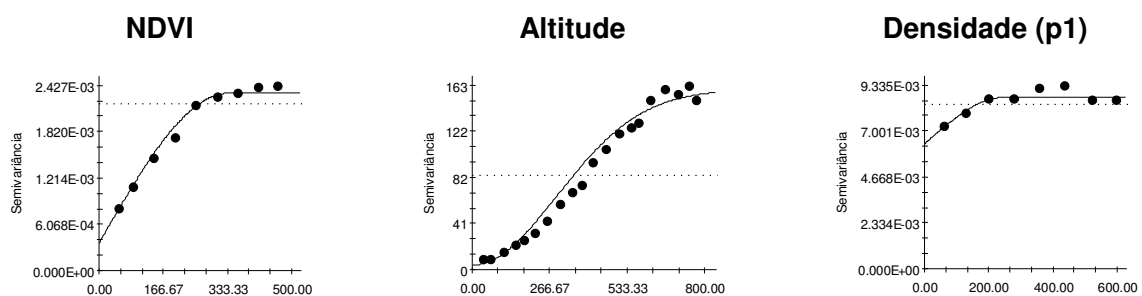


Figura 5. Semivariogramas ajustados para o NDVI a altitude, e a densidade na profundidade p1 (0-0,10m).

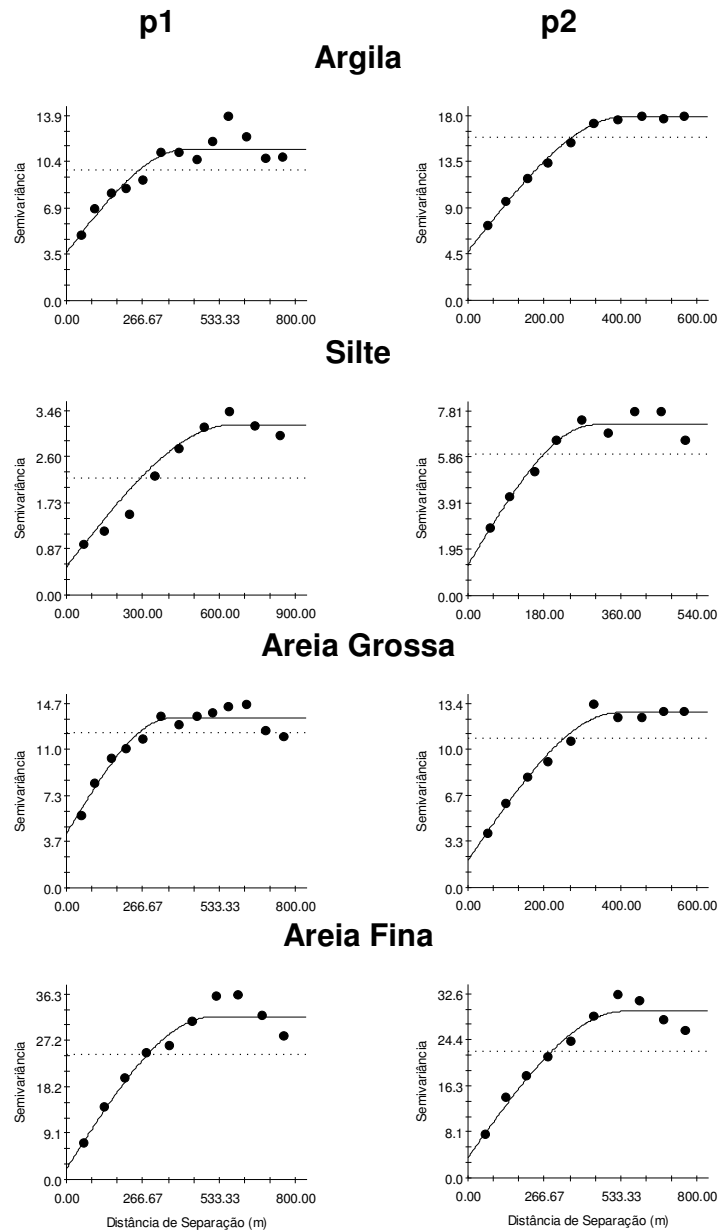


Figura 6. Semivariogramas dos atributos físicos do solo nas diferentes profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

O alcance representa a distância em que os pontos estão correlacionados entre si, portanto o alcance fornece um maior detalhamento das áreas em estudo, possibilitando em futuras amostragens usar o alcance de dependência espacial para o

planejamento do número de coletas de amostras. As variáveis macro e microporosidade apresentaram EPP, portanto, o alcance é menor que o menor espaçamento entre as amostras (50 m).

Todos os atributos químicos e de fertilidade do solo analisados apresentaram dependência espacial nas duas profundidades (Tabela 4, Figura 7) e todos foram ajustados ao modelo esférico, com coeficiente de determinação do modelo (R^2) altos. Os dados referentes aos teores de P, M.O., K, Ca, Mg na duas profundidades e valores de pH, H + Al, CTC e V% na profundidade p1, ajustaram-se ao modelo esférico com os menores valores de R^2 , sendo estes sempre menores que 90%.

Tabela 4. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas ajustados aos dados dos atributos químicos e de fertilidade do solo estudados.

Atributo	Prof.	Modelo	C_0	C_0+C_1	a (m)	C_0/C_0+C_1	R^2
P	p1	Esf.	3,4E-03	1,0E-02	108,62	0,32	0,54
	p2	Esf.	0,04	0,06	209,02	0,72	0,65
MO	p1	Esf.	0,04	0,07	151,75	0,65	0,68
	p2	Esf.	0,77	1,03	289,48	0,75	0,77
pH	p1	Esf.	0,07	0,13	226,00	0,50	0,88
	p2	Esf.	0,06	0,12	308,60	0,50	0,98
K	p1	Esf.	2,3E-03	6,0E-03	92,60	0,38	0,62
	p2	Esf.	0,06	0,08	193,26	0,73	0,79
Ca	p1	Esf.	13,71	17,92	179,43	0,76	0,71
	p2	Esf.	9,92	14,23	139,09	0,70	0,58
Mg	p1	Esf.	0,03	0,05	191,44	0,73	0,76
	p2	Esf.	5,31	6,93	168,59	0,77	0,79
H+Al	p1	Esf.	13,52	23,58	119,58	0,57	0,73
	p2	Esf.	16,12	37,31	336,27	0,43	0,91
CTC	p1	Esf.	11,47	21,95	138,44	0,52	0,61
	p2	Esf.	16,40	37,76	344,52	0,43	0,95
V%	p1	Esf.	83,11	151,80	186,50	0,55	0,76
	p2	Esf.	85,74	157,90	248,95	0,54	0,95

C_0 : efeito pepita; C_1 : patamar; a: alcance; R^2 : coeficiente de determinação

Os atributos químicos e de fertilidade do solo apresentaram diferentes alcances de dependência espacial, e na camada superficial, que é representada pela profundidade p1 foram encontrados para a maioria dos atributos os menores alcances,

quando comparados aos das profundidades p2 (Tabela 4), o que também pode ser atribuído ao preparo do solo, visto ser essa camada a menos estável quando comparada a outra. Os teores de K, P e MO apresentaram os menores alcances, 92,60, 108,62 e 151,75 m, respectivamente. A menor continuidade espacial dos teores de K e MO também foi verificada por CORÁ et al. (2004) que relataram que os menores alcances para K podem ser explicados pela aplicação não uniforme de vinhaça, efetuada na área por meio de irrigação por aspersão utilizando sistema autopropelido com canhão hidráulico, cuja uniformidade de aplicação de água é bastante baixa. Segundo TRANGMAR et al. (1985), o alcance define o raio máximo para o qual amostras vizinhas são usadas para interpolação por técnicas de krigagem. Assim, baixos valores de alcance podem influir na qualidade das estimativas, uma vez que poucos pontos são usados para realização da interpolação.

Os alcances de dependência espacial para os atributos químicos e de fertilidade do solo na profundidade p2 foram altos, chegando a 344,52 m para CTC, 310 e 336,27m para H+Al, 308,60m para pH e 248,95m para V%. Como o estudo foi realizado em área sob Latossolos, os quais apresentam como característica intrínseca a homogeneidade dos atributos do solo ao longo do perfil, já se esperava valores próximos aos encontrados de alcance da dependência espacial dos atributos do solo na camada mais profunda, tanto pelo fato de os Latossolos se apresentarem homogêneos ao longo do perfil, como pelo fato de que a camada mais profunda está menos sujeita aos efeitos do manejo do solo realizado na superfície, mantendo, dessa maneira, suas características originais de homogeneidade.

Como pode ser observado na Tabela 4, segundo a classificação de CAMBARDELLA et al.(1994), todos os atributos químicos e de fertilidade do solo apresentaram grau de dependência espacial moderado (C_0/C_0+C_1 entre 25 e 75%) nas duas profundidades estudadas, exceto o atributo Ca na profundidade p1, que apresentou grau de dependência fraco ($C_0/C_0+C_1 > 75\%$). Segundo CAMBARDELLA et al. (1994), os atributos que apresentaram forte dependência espacial são mais influenciados por propriedades intrínsecas do solo, como textura e mineralogia, enquanto os que apresentaram fraca dependência são mais influenciados por fatores

externos, tais como: aplicações de fertilizante, preparo e cultivo do solo, ou seja, pelo manejo do solo.

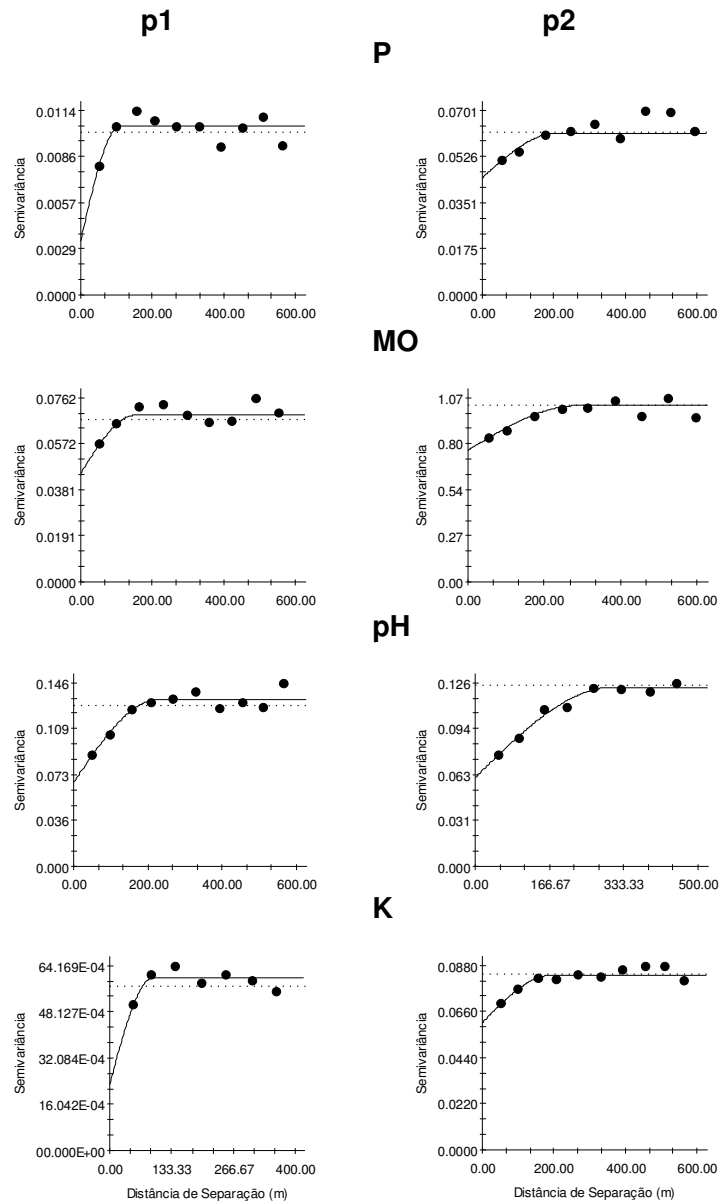


Figura 7a. Semivariogramas dos atributos químicos e de fertilidade do solo nas profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

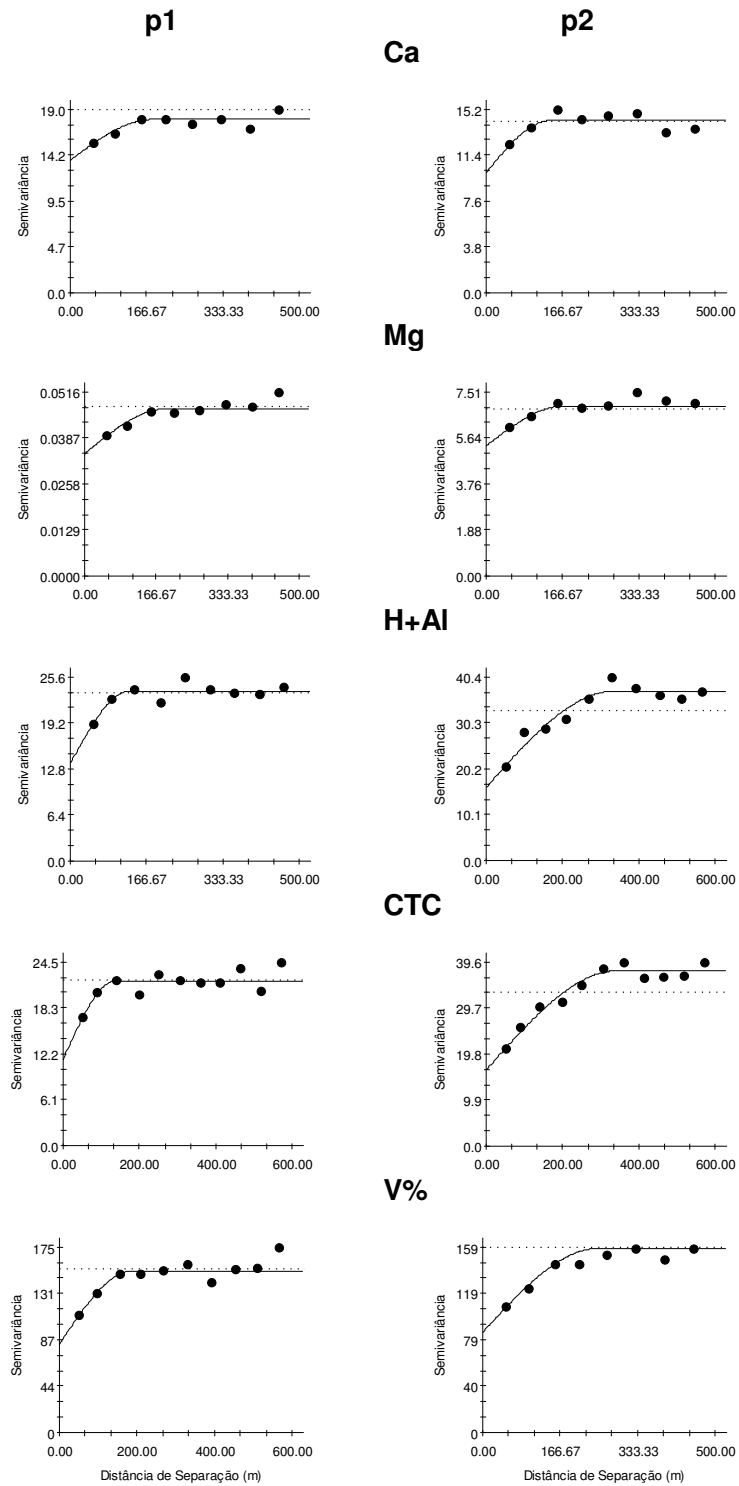


Figura 7b. Semivariogramas dos atributos químicos e de fertilidade do solo nas profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

Os parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores em locais não amostrados por meio da krigagem. A magnitude do efeito pepita é importante na krigagem, pois, quanto maior for a diferença do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa, ou maior a confiança que se pode ter na estimativa (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Com os valores estimados por krigagem, foram gerados mapas de distribuição espacial dos atributos analisados (Figuras 8 a 15), e os valores observados foram divididos classes para todos os atributos. Observou-se um arranjo de distribuição espacial dos atributos estruturados de acordo com o relevo, a maioria dos mapas mostra uma distribuição semelhante a do mapa de altitude (Figura 8).

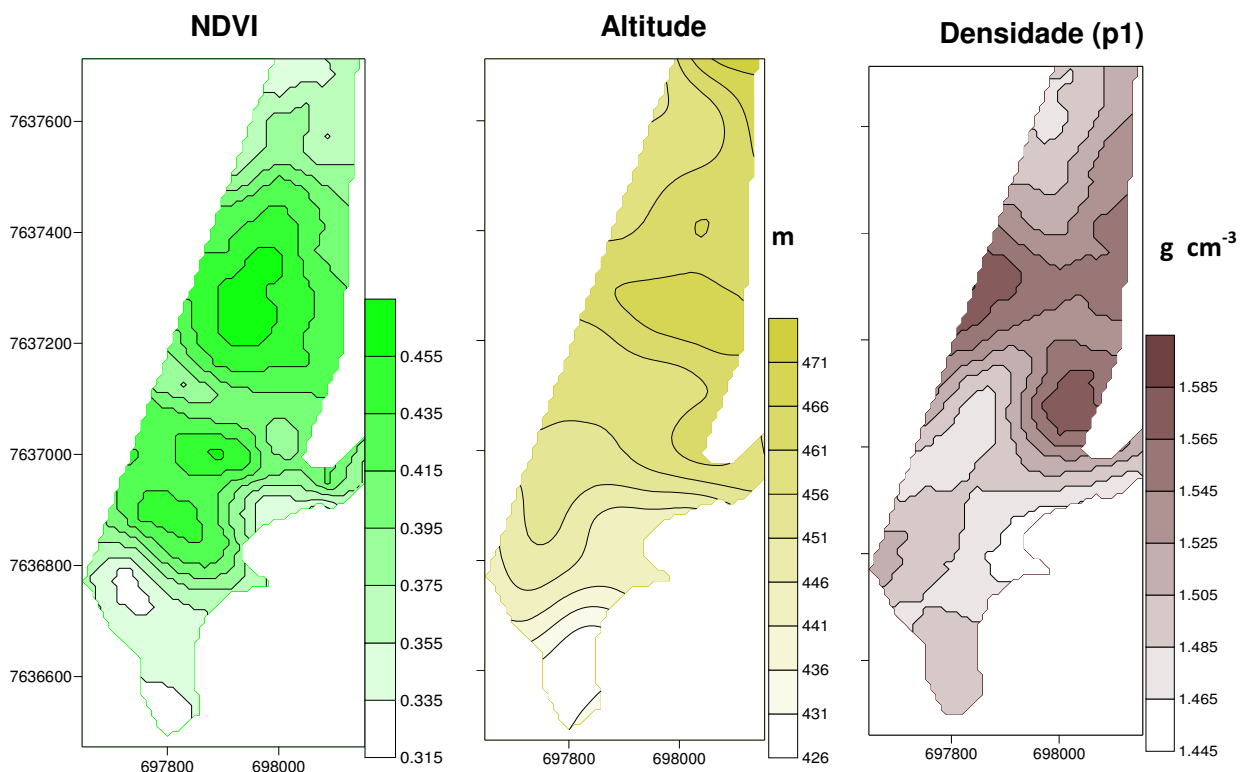


Figura 8. Mapas de distribuição espacial do NDVI, altitude e da densidade do solo na profundidade p1 (0-0,10m).

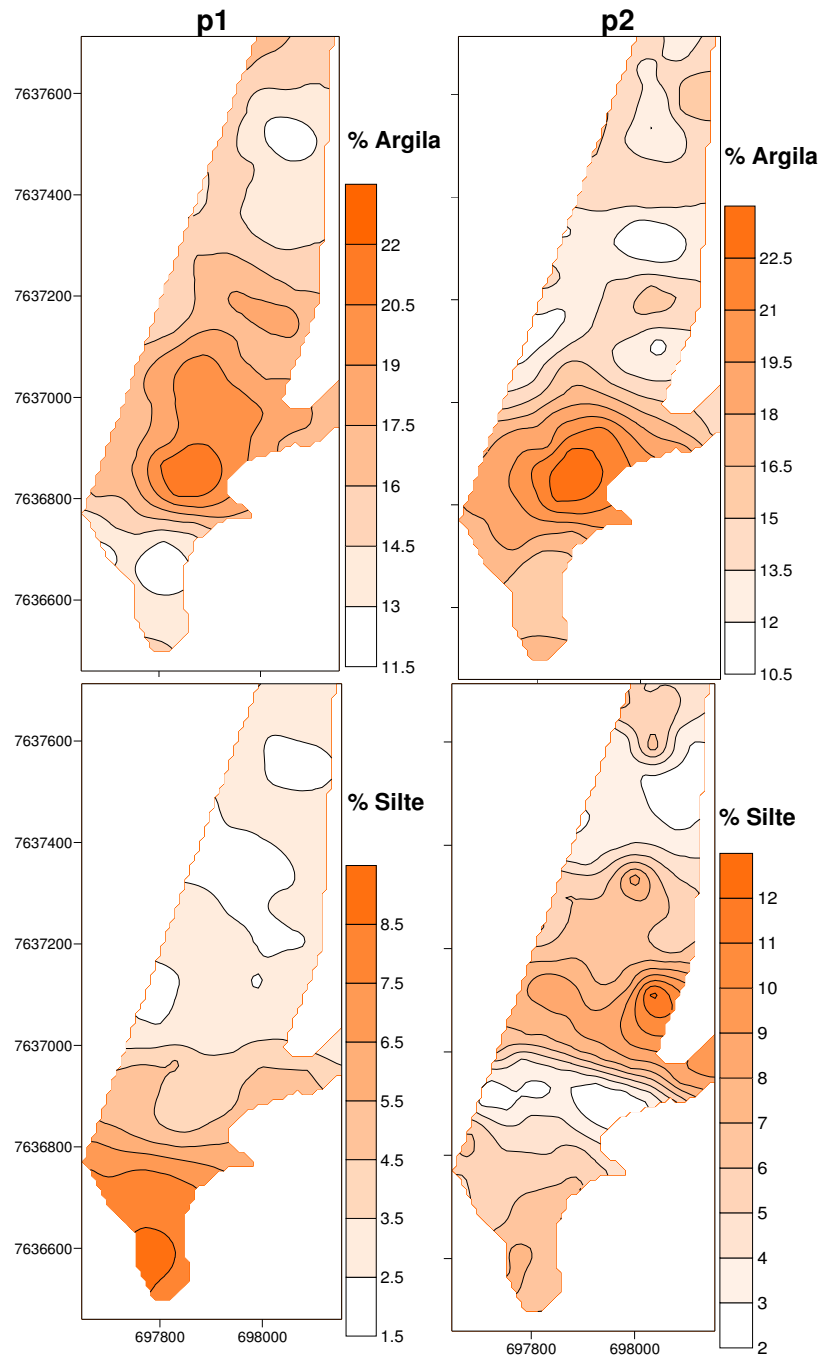


Figura 9. Mapas de distribuição espacial da % de argila e % silte nas profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

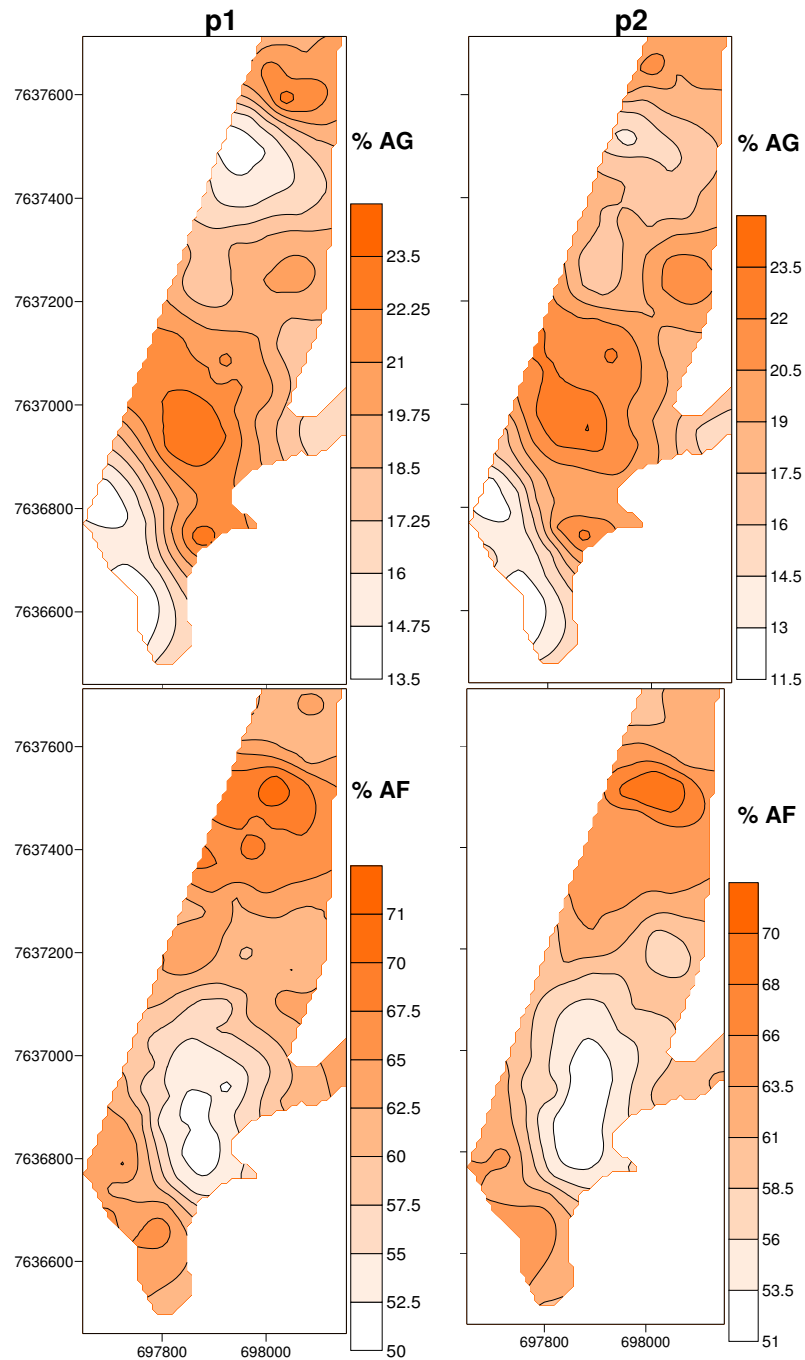


Figura 10. Mapas de distribuição espacial da % de areia grossa (AG) e % de areia fina (AF) nas profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

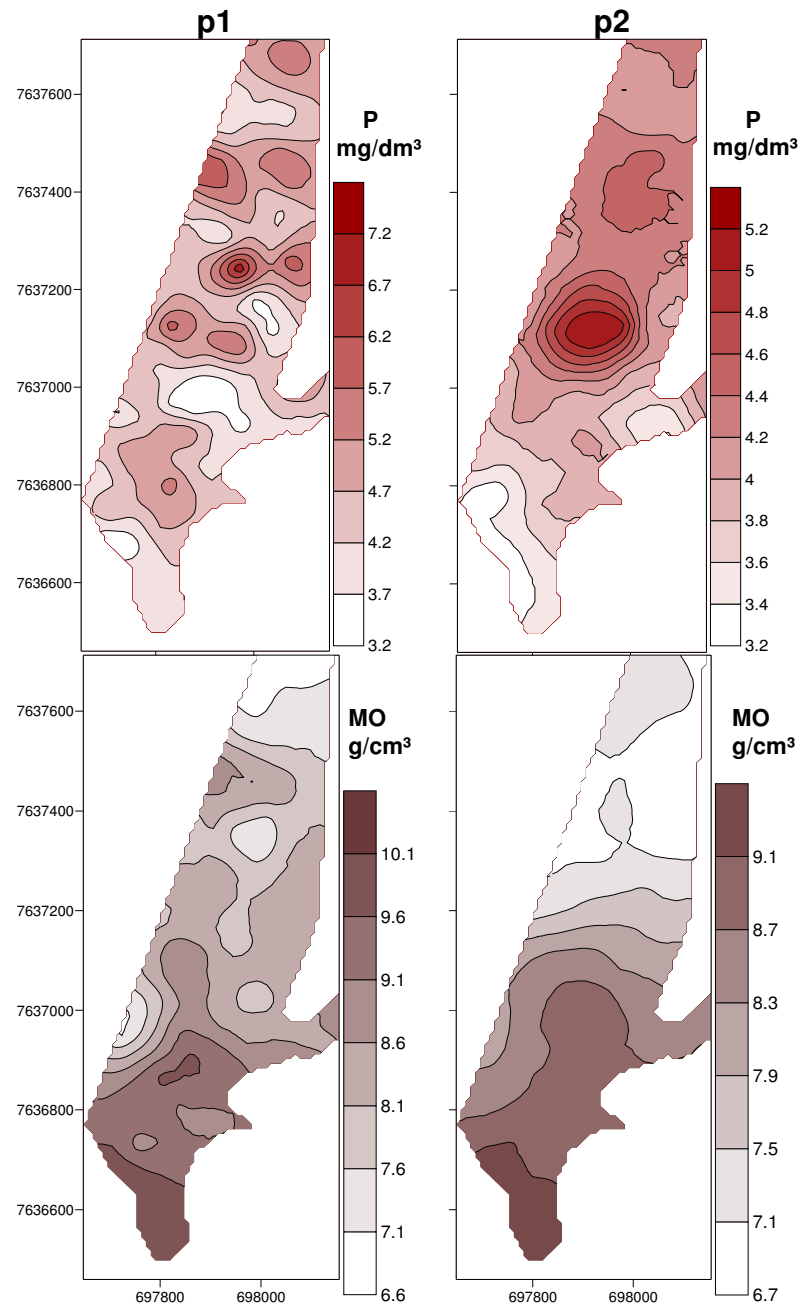


Figura 11. Mapas de distribuição espacial de fósforo (P) e matéria orgânica (MO) nas profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

Nota-se comparando os mapas de distribuição espacial do NDVI (Figura 8) e do fósforo na profundidade p2 (Figura 11), que nos locais com maior concentração de fósforo ocorreu também os maiores índices de vegetação, o que já indica uma correlação.

Na Figura 12 é apresentado os mapas de distribuição para o potássio (K) onde se verifica que os maiores níveis desse elemento estão nas áreas mais baixas do terreno, fato esse que explica os altos índices de CTC (Figura 15) nessas mesmas áreas.

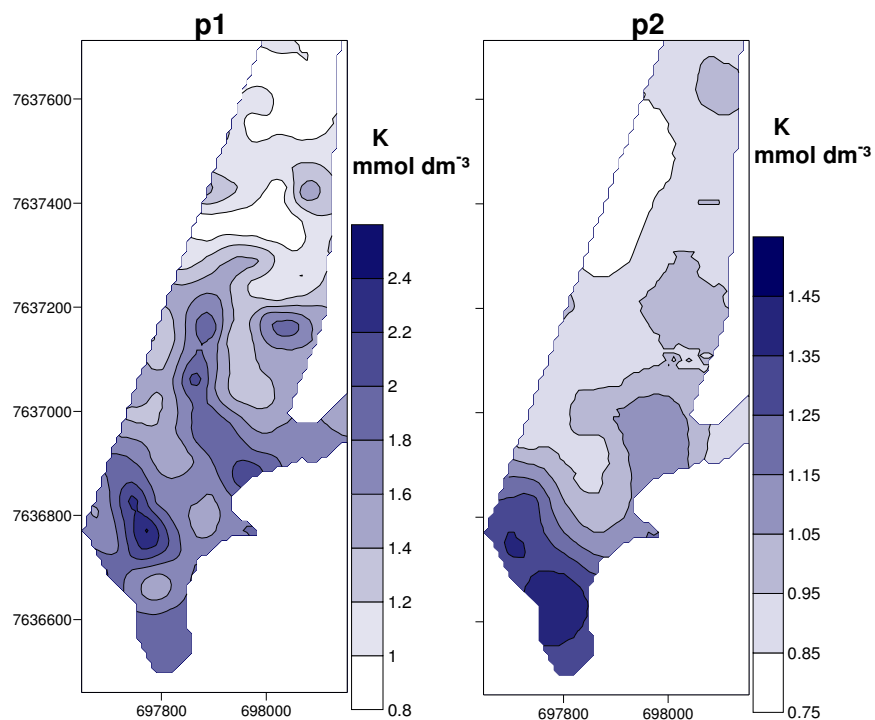


Figura 12. Mapas de distribuição espacial de potássio (K) nas profundidades p1 (0-0,10m), e p2 (0,20-0,30m).

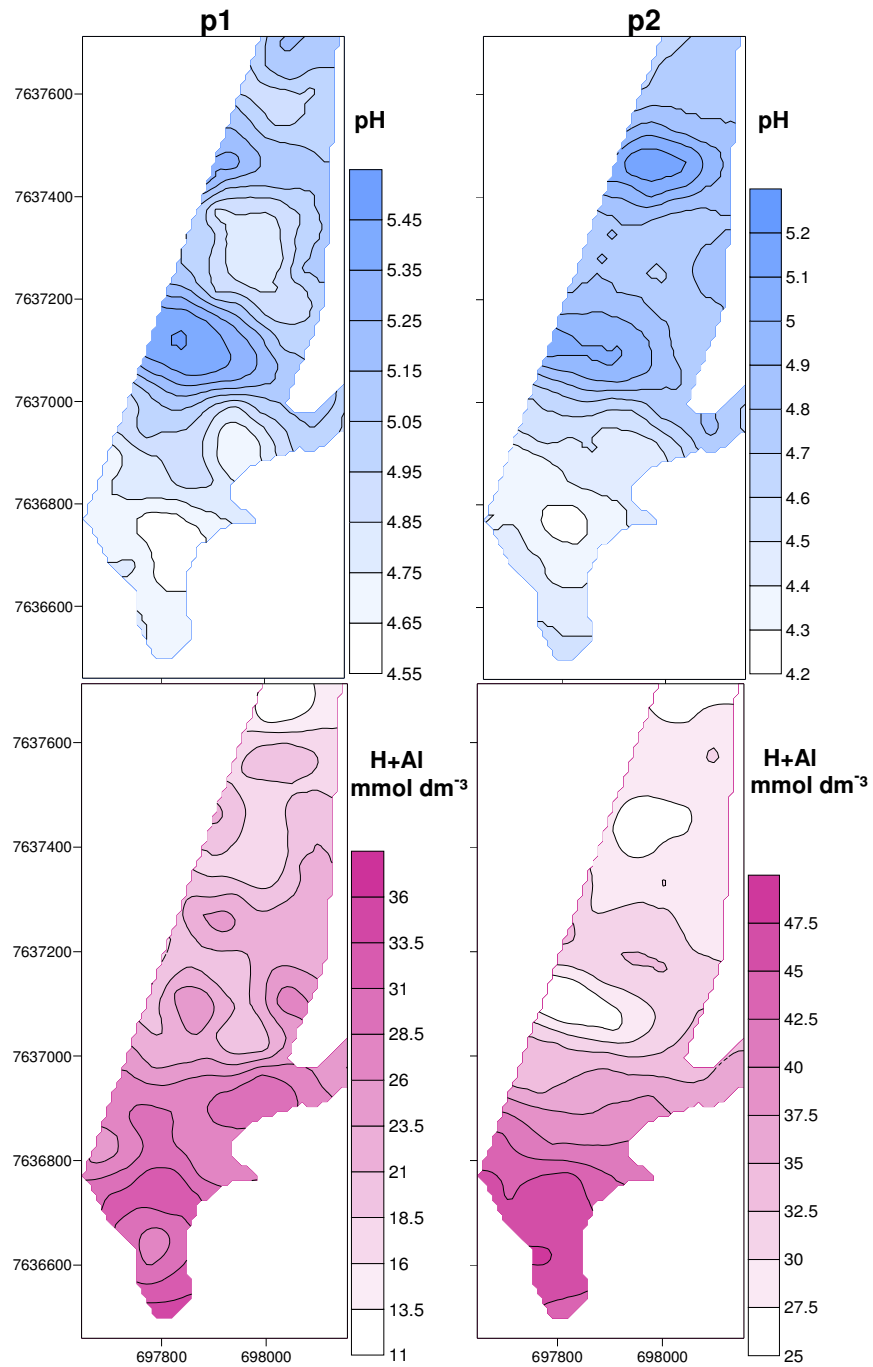


Figura 13. Mapas de distribuição espacial de pH e H+Al nas profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

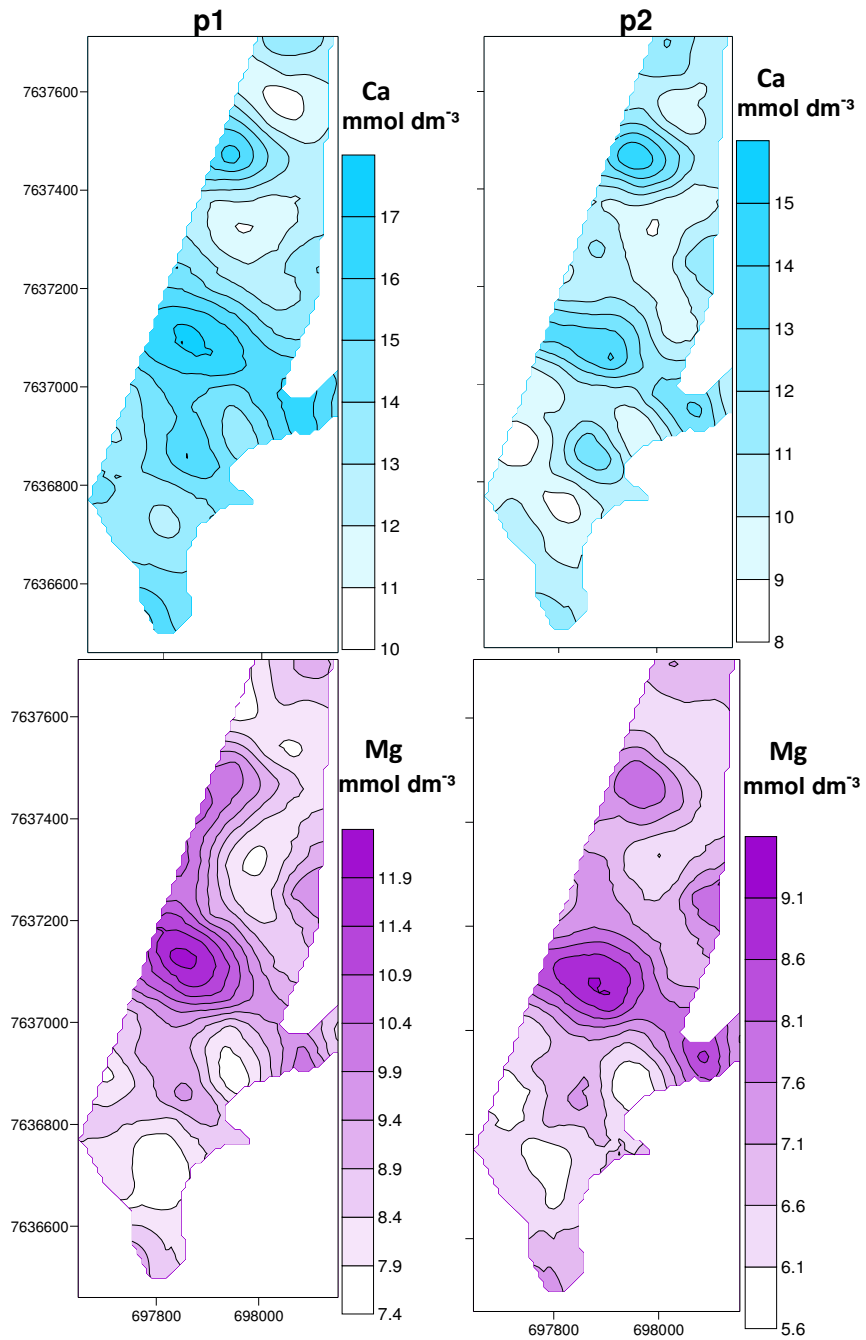


Figura 14. Mapas de distribuição espacial de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

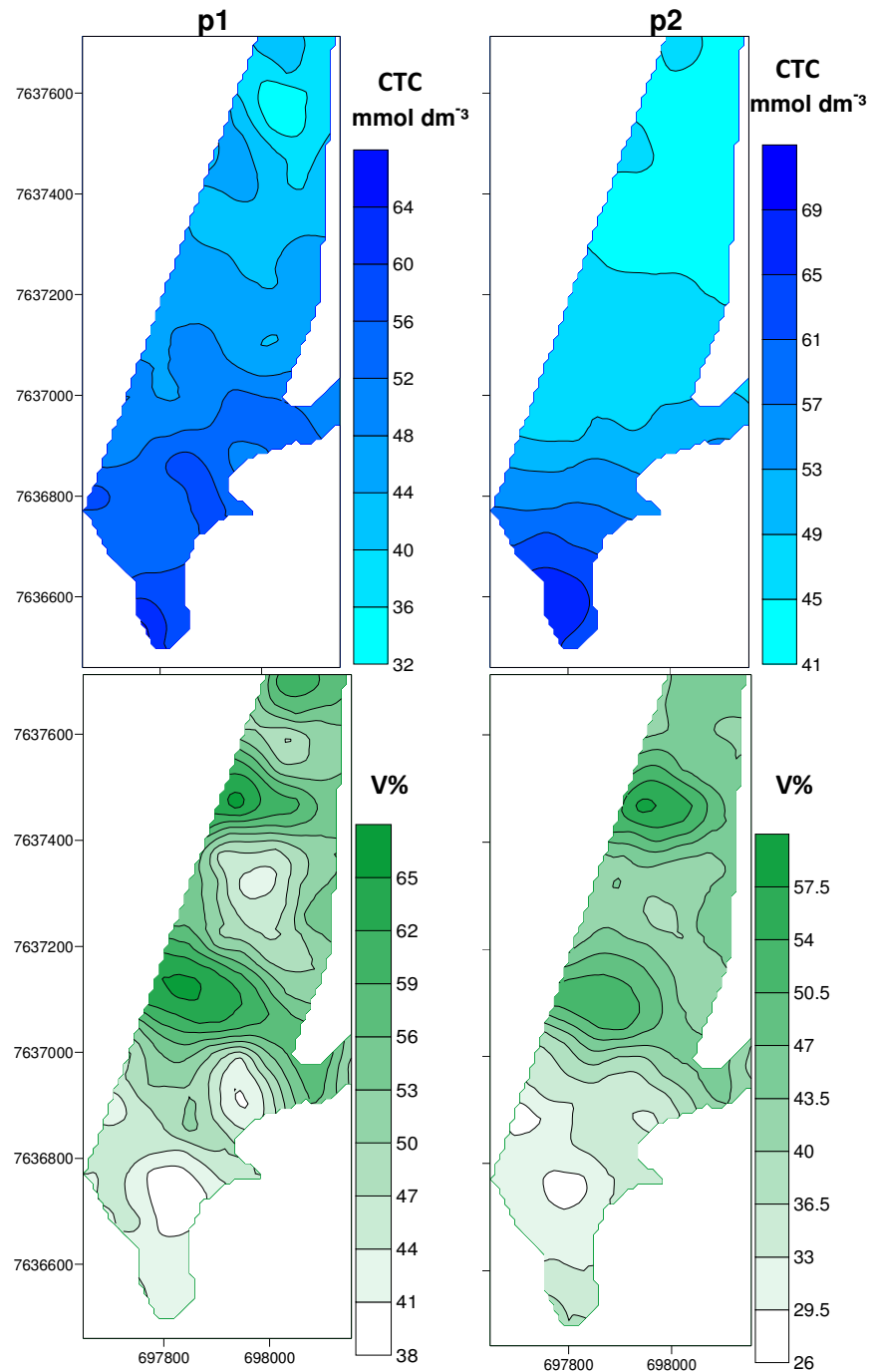


Figura 15. Mapas de distribuição espacial de CTC e V% nas profundidades p1 (0-0,10m) e p2 (0,20-0,30m).

Na Tabela 5 são apresentados os índices de correlação linear dos atributos do solo e da altitude com o NDVI da cultura de cana-de-açúcar da área de estudo. Com exceção da altitude e da % de silte na profundidade p1, todos os atributos apresentaram um baixo índice de correlação linear com o índice de vegetação.

Os coeficientes de correlação linear simples (Tabela 5) entre os atributos do solo e o índice de vegetação (NDVI) demonstraram uma correlação positiva para alguns atributos e negativas para outros, algumas com índices consideráveis e outras com índices muito baixos. Sendo assim, para correlacionar o NDVI aos atributos do solo justifica a análise da dependência espacial para melhor entendimento do padrão de ocorrência desses atributos no espaço.

Tabela 5. Coeficientes de correlação linear entre o índice de vegetação da cana-de-açúcar (NDVI) com a altitude e os atributos do solo nas profundidades p1 (0-0,10m), p2 (0,10-0,20m) e p3 (0,20-0,30m).

Atributo	p1	p2
altitude	0,58	-
macro	0,01	-
micro	-0,13	-
Ds	0,06	-
Argila	0,27	-0,01
Silte	-0,52	-0,23
AG	0,19	0,30
AF	-0,09	-0,13
P	0,11	0,15
MO	-0,22	-0,23
PH	0,18	0,05
K	-0,19	-0,30
Ca	-0,08	-0,12
Mg	0,04	-0,10
H+AL	-0,24	-0,32
T	-0,24	-0,42
V%	0,10	0,05

Para avaliação da correlação espacial dos atributos estudados com o NDVI foram estimados semivariogramas experimentais cruzados dos atributos que apresentaram dependência espacial.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados da análise geoestatística da altitude e dos atributos físicos do solo em correlação com o NDVI. Com exceção da densidade

do solo e a % de areia fina na profundidade p2, todos os outros atributos apresentaram índices de determinação maiores que 0,81.

Analisando a relação $C_0/(C_0+C_1)$ em porcentagem todos os atributos apresentaram grau de dependência espacial forte [$C_0/(C_0+C_1) < 25\%$], segundo a classificação proposta por CAMBARDELLA et al. (1994) (Tabela 6). A exceção ocorreu para a % de silte nas profundidades p2 e p3 que apresentaram efeito pepita puro mostrando que não há dependência espacial correlacionada para essas duas variáveis nessas profundidades.

Tabela 6. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas cruzados ajustados aos dados dos atributos físicos do solo e altitude em correlação com índice de vegetação da cana-de-açúcar.

Atributo	Prof.	Modelo	C_0	C_0+C_1	a (m)	C_0/C_0+C_1	R^2
Altitude		Gaus.	1,0E-3	0,38	591,85	2,7E-3	0,98
Ds	p1	Gaus.	1,0E-06	1,0E-03	488,44	0,00	0,65
Argila	p1	Esf.	1,6E-03	4,2E-02	186,34	0,04	0,92
	p2	Gaus.	-1,0E-07	-8,6E-02	563,80	0,00	0,83
Silte	p1	Esf.	-1,0E-04	-5,5E-02	694,52	0,00	0,91
	p2	EPP	5,7E-03	5,7E-03	----	1,00	----
AG	p1	Esf.	1,0E-06	2,1E-02	267,55	0,00	0,96
	p2	Gaus.	1,0E-07	8,4E-02	600,15	0,00	0,81
AF	p1	Esf.	-1,0E-04	-4,4E-02	206,57	0,00	0,96
	p2	Esf.	-1,0E-04	-2,9E-02	177,42	0,00	0,90

C_0 : efeito pepita; C_1 : patamar; a: alcance; R^2 : coeficiente de determinação

O maior coeficiente de determinação ocorreu quando se correlacionou a altitude e o NDVI, mostrando que o relevo está diretamente ligado ao índice de vegetação. Souza et. al (2008) citam que vários estudos vêm demonstrado que o relevo tem sido um atributo que define a distribuição de atributos químicos do solo ao longo da paisagem e tem apresentado altas correlações com a produtividade de culturas e atributos do solo. O mesmo autor cita ainda que várias pesquisas (Almeida et al., 1997; Souza et al., 2003; Souza et al., 2004).têm mostrado que os processos que determinam a variabilidade dos atributos do solo são influenciados por fluxos tanto verticais como horizontais, superficiais ou subsuperficiais; os mesmos são condicionados,

fundamentalmente, pela posição dos solos na paisagem ou no declive, mesmo que o relevo seja de pequena expressão.

Isto pode ser notado nessa área de estudo, visto que foi encontrada uma região onde o NDVI apresentou valores maiores, sendo esta a região mais homogênea no sentido da altitude e que também apresentou maior homogeneidade nos atributos químicos e físicos que melhor se correlacionaram como o índice estudado, indicando desta maneira que a área pode ser subdividida em 3 sub áreas, sendo a área central representada com maior índice de vegetação, excluindo-se as áreas superiores e inferiores, onde a altitude não apresentou com muita uniformidade.

Na Figura 16 são apresentados os semivariogramas cruzados ajustados para a altitude e da densidade solo com o índice de vegetação (NDVI) da cana-de-açúcar.

Para a altitude e densidade correlacionadas com NDVI o modelo ajustado foi gaussiano, apresentando correlação positiva e com alcance chegando a 591,85m para altitude e 488,94m para densidade do solo (Figura 16). Estes dois atributos do solo foram os que apresentaram melhor correlação com o índice de vegetação estudado.



Figura 16. Semivariogramas cruzados da densidade do solo e altitude em correlação com o NDVI da cana-de-açúcar.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da análise geoestatística dos atributos químicos e de fertilidade do solo em correlação com o NDVI. A maioria dos atributos apresentaram índice de determinação alto.

Com exceção do potássio na profundidade p1 e o cálcio e magnésio na profundidade p2 que apresentaram efeito pepita puro mostrando que não há dependência espacial correlacionada com NDVI para essas variáveis nessas

profundidades, os outros atributos químicos e de fertilidade apresentaram relação $C_0/(C_0+C_1)$ em percentagem < 25% (Tabela 6), indicando grau de dependência espacial forte, segundo a classificação proposta por CAMBARDELLA et al. (1994).

Para o teor de fósforo na profundidade p2 foi verificado o maior coeficiente de determinação (Tabela 7), e um dos maiores alcances (682,43m), e um grau de dependência espacial forte. Isto é explicado pelo fato de o nutriente fósforo ser um dos mais trabalhados na cultura de cana-de-açúcar, sempre utilizado nas adubações e que apresenta resposta no sentido de produtividade, que conseqüentemente aumenta o índice de vegetação na área. Sendo assim essa alta correlação mostra que o NDVI é uma boa ferramenta para detectar áreas com deficiência de fósforo.

Tabela 7. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas cruzados ajustados aos dados dos atributos químicos e de fertilidade do solo em correlação com índice de vegetação da cana-de-açúcar.

Atributo	Prof.	Modelo	C_0	C_0+C_1	a (m)	C_0/C_0+C_1	R^2
P	p1	Gaus.	6,6E-05	1,9E-03	565,50	0,03	0,73
	p2	Gaus.	1,7E-04	6,5E-03	682,43	0,03	0,97
MO	p1	Gaus.	1,0E-07	-1,6E-03	263,27	0,00	0,49
	p2	Gaus.	-1,0E-05	-4,5E-03	478,42	0,00	0,91
pH	p1	Gaus.	1,0E-06	5,9E-03	577,17	0,00	0,81
	p2	Gaus.	1,0E-05	7,8E-03	652,43	0,00	0,85
K	p1	EPP	-9,5E-04	-9,5E-04	----	1,00	----
	p2	Gaus.	-1,0E-05	-7,2E-03	700,40	0,00	0,85
Ca	p1	Esf.	-1,0E-05	-1,7E-02	265,82	0,00	0,57
	p2	EPP	9,2E-04	9,2E-04	----	1,00	----
Mg	p1	Gaus.	1,0E-07	3,1E-03	561,49	0,00	0,83
	p2	EPP	4,3E-03	4,3E-03	----	1,00	----
H+Al	p1	Gaus.	-5,0E-03	-4,0E-02	613,26	0,12	0,65
	p2	Gaus.	-1,0E-04	-1,4E-01	696,06	0,00	0,74
CTC	p1	Gaus.	-4,0E-03	-4,6E-02	586,91	0,09	0,62
	p2	Gaus.	-1,0E-04	-1,4E-01	720,53	0,00	0,84
V%	p1	Gaus.	1,0E-04	1,6E-01	535,13	0,00	0,80
	p2	Gaus.	1,0E-04	1,8E-01	579,27	0,00	0,77

C_0 : efeito pepita; C_1 : patamar; a: alcance; R^2 : coeficiente de determinação

Para matéria orgânica (MO) o índice de determinação foi alto na profundidade p2 e baixo coeficiente na profundidade p1 (Tabela 7), além de apresentar correlação negativa nas duas profundidades onde houve correlação, indicando que no caso em estudo esse não é um atributo ideal para ser correlacionado com o NDVI.

A correlação do NDVI com o pH também teve um coeficiente de determinação alto (Tabela 7), sendo de 85% nas profundidades p2. O atributo H+Al também apresentou coeficientes de determinação consideráveis, principalmente na profundidade p2, e mostraram correlação negativa (Figura 17), resultados estes coerentes, indicando quanto maior a acidez potencial menor o índice de vegetação.

Para a capacidade de troca de cátions (CTC) conforme apresentado na Tabela 7, os alcances foram altos, chegando a 720,53m na profundidade p2, com coeficiente de determinação chegando a 84% na profundidade p2, porém com uma correlação negativa com o NDVI. Já a saturação por bases (V%) além de apresentar valores consideráveis para o alcance, sendo na faixa de 500m, coeficientes de determinação de 80% na profundidade p1 e 77% nas profundidades p2 (Figura 17), com correlação positiva com o NDVI, indicando que quanto maior a saturação por bases, maior o NDVI.

Na Figura 17 são apresentados os semivariogramas para os atributos químicos e de fertilidade do solo que melhor se correlacionaram com o NDVI, sendo todos ajustados ao modelo Gaussiano.

Trabalhos relacionados à correlação destes índices de vegetação com fatores edáficos ainda são escassos (WEIR & HERRING, 2012). KARIYEVA et al. (2011) identificaram variáveis ambientais da relação solo-paisagem, como relevo, escoamento superficial das águas das chuvas, teor de nitrogênio do solo e densidade do solo. Os valores avaliados apresentaram correlação com o NDVI, demonstrando a eficácia na utilização de imagens de satélites para análise ambiental.

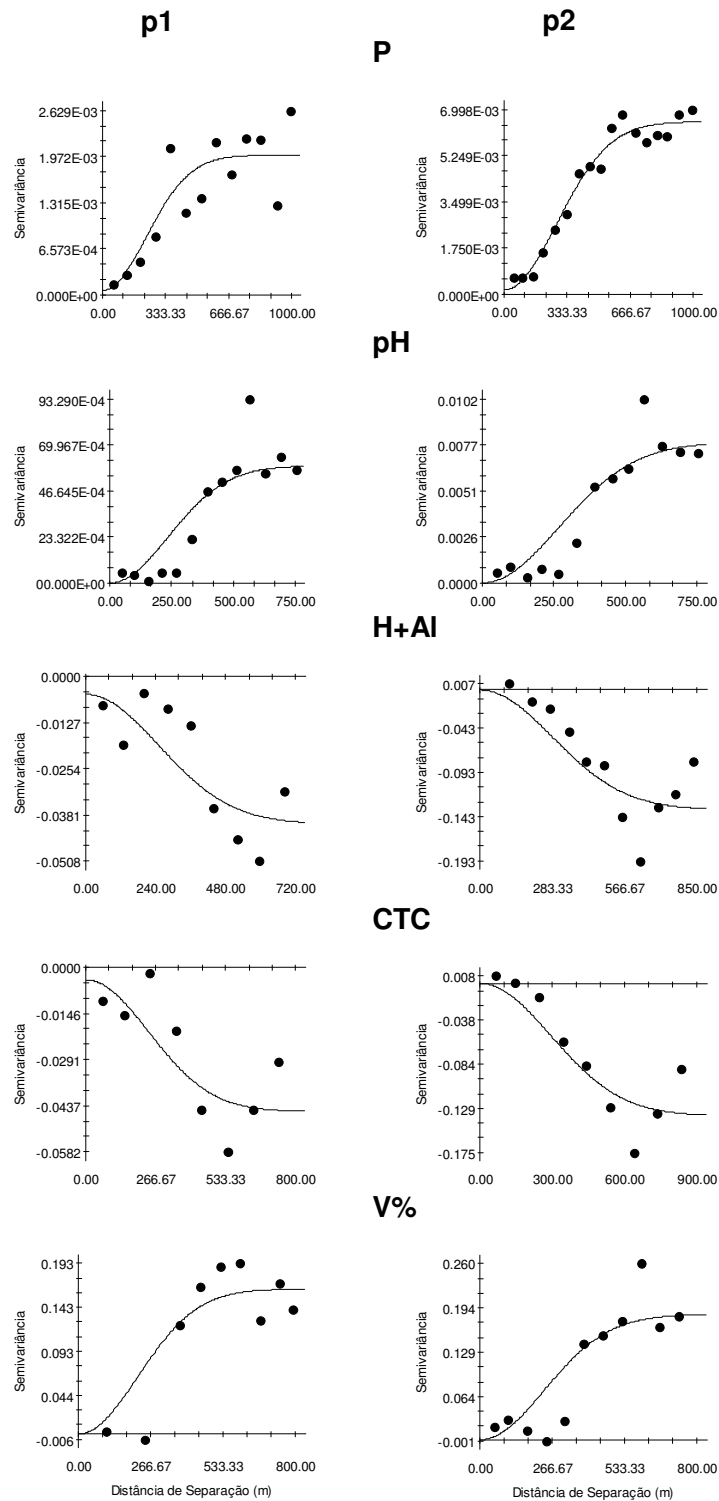


Figura 17. Semivariogramas cruzados dos atributos químicos e de fertilidade do solo em correlação com o NDVI da cana-de-açúcar nas profundidades p1 (0-0,10m), p2 (0,20-0,30m).

LOURENÇO (2005), relacionando os atributos do solo e da planta com a resposta espectral da cana-de-açúcar, concluiu que a porcentagem explicada da resposta espectral NDVI para os dois anos estudados foi satisfatória, haja vista a ausência dos demais atributos modelos, podendo a explicação ter sido maior, caso tivessem sido incluídas na análise outras variáveis relacionadas ao clima e ao solo. RANNE (2008) observou analisando diferentes variedades de cana-de-açúcar, que as diferenças entre solos, estágios de corte e variedades influenciam na forma de curva do perfil temporal do NDVI, sendo mais visualmente perceptível na medida em que estas diferenças são combinadas. MOTOMIYA (2007) concluiu que o comportamento do NDVI em resposta à variação do IAF (Índice de área foliar) foi quadrático em todos os períodos observados em seu estudo e que o sensor utilizado mostrou-se uma ferramenta potencial para detecção de deficiência de nitrogênio na cultura do algodoeiro nas condições apresentadas.

BENVENUTTI (2004), estudando a relação dos atributos edáficos com índices de vegetação na cana-de-açúcar, concluiu que o teor de argila, a umidade e a matéria orgânica foram os atributos que mais influenciaram na resposta espectral, sendo de maneira complementar a capacidade de troca de cátions e o teor de magnésio os outros atributos.

Nota-se então que o NDVI é um índice que pode ser usado na identificação e delimitação de áreas homogêneas para manejo do solo, mostrando-se como uma ferramenta a ser explorada dentro da agricultura de precisão.

5 CONCLUSÕES

Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial, com exceção da macro e microporosidade do solo.

O índice de vegetação (NDVI) da cana-de-açúcar apresentou correlação espacial alta com a altitude.

As correlações que melhor explicaram a distribuição espacial do NDVI da cana-de-açúcar ocorreram com a densidade do solo, o teor de fósforo, o pH, a acidez potencial e a saturação por bases.

O índice de vegetação NDVI apresenta boa aplicação para observar a variabilidade espacial de alguns atributos do solo, mostrando-se uma ferramenta para delimitação de áreas homogêneas de manejo.

6 REFERÊNCIAS

ALFONSI, R.R.; PEDRO, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. São Paulo: Fundação CARGILL, Cap. 1, p. 42-87, 1987.

ALMEIDA, J.A.; KLAMT, E.; KÄMPF, N. Gênese do contraste textural e da degradação do horizonte B de um Podzólico Vermelho-Amarelo da planície costeira do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.2, p.221-233, 1997.

BACCHI, O.O.S. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, 1985. 20p.

BENVENUTI, F. A. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas – Campinas-SP, 2005.

BHATTI, A.U. et al. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing Environment**, New York, v.37, n.3, p.181-191, 1991.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986b. v. 1. p. 363-375.

CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993. 242 p.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO R.F. & KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58:1501-1511, 1994.

CAMARGO, P.N. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. ESALQ/USP, Piracicaba-SP, 1969, 38p.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. FUNEP, Jaboticabal, 157p, 1991.

COHEN, W. B.; MAIERSPERGER, T. K.; GOWER S. T. & TURNER, D. P. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 4, p. 561-571, 2003.

CORÁ, J. E. et al . Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 28, n. 6, Dez. 2004. Disponível em : <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000600010&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 15 de abril de 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000600010>.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p. 443-461.

DEMATTÊ, J. L. I. Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Visão agrícola**, v. 1, p. 48-59, 2004.

DORIGO, W.A.; ZURITA-MILLA, R.; DE WIT, A.J.W.; BRAZILE, J.; SINGH, R. & SCHAEPMAN, M.E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 9, n. 2, p.165-193, 2007.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

FAUCONNIER, R. & BASSEREAU, D. **La caña de azúcar**: técnicas agrícolas y producciones tropicales. Editorial Blume, Barcelona, p. 11-85, 1975.

GEE, G. W. & BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: Klute, A. Methods of soil analysis. 2. ed. **American Society of Agronomy**, Madison, part. 1. p. 383-411, 1986.

GREGO, C.R. & VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:169-177, 2005.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>> Acesso em: 10 fev 2012.

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

JOHNSON, G.A.; MORTENSEN, D.A.; GOTWAY, C.A. Spatial and temporal analysis of weed seedling populations using geostatistics. **Weed Science**, Lawrence, v.44 p.704-710, 1996.

JOHNSON, L.F. & TROUT, T.J. Satellite NDVI Assisted Monitoring of Vegetable Crop Evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. **Remote Sens.** 2012, 4, 439-455.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part. 1, p. 635-662.

HUMBERT, R. P. **El cultivo de la caña de azúcar**. Compañía Editorial Continental, México, p. 21-65, 1974.

KARIYEVA, J. & LEEUWEN W. J. D. van Environmental drivers of NDVI- Based Vegetation Phenology in Central Asia. **Remote Sensing**, v.3, p.203-246, 2011.

LOURENÇO, L.S. **Aplicação da estatística multivariada no estudo da relação entre atributos do solo e da planta e a resposta espectral da cana-de-açúcar**. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

LUCCHESI, A.A. **Ecofisiologia de Culturas Extrativas: Cana-de-açúcar, Seringueira; Coqueiro; Dendezeiro e Oliveira**. In: CASTRO, P.R.C. e KLUGE R.A. (Coord). Cana-de-açúcar, STAB, Cosmópolis, p. 13-39, 2001.

McBRATNEY, A. B. & PRINGLE, M. J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 1, p. 219-236, 1999. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009995404447>.

McBRATNEY, A.G. & WEBSTER, A.G. Choosing functions for semi-variograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, p.617-39, 1986.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M.A.; SOUZA, E.G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1149-1159, 2003.

MINITAB Release. Making Data analysis Easier: version 13.1,2000.

MIURA, T.; HUETE, A. R.; YOSHIOKA, H.; HOLBEN, B.N. An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction. **Remote Sensing of Environment**, n.78, p. 284-298, 2001.

MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação.** 179p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

MOTOMIYA, A. M. V. de A. **Diagnósticos para o gerenciamento localizado da cultura do algodoeiro.** 76p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

NOVO, E.M. de M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. São Paulo. Edgard Blucher. 1989. 308p.

PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação.** In. Sensoriamento Remoto – Reflectância dos alvos naturais. Editora UnB, Embrapa, Brasília (DF), p. 157-199, 2001.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; PRADO, H. e MORETTI, F. C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. **Bragantia**, v.57, n.1, ISSN 0006-8705, 1998.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** 2.ed. Campinas: IAC, 1996. 285p. (Boletim técnico, 100)

RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas: IAC, 1989. 40p. (IAC. Boletim Técnico 8)

RAMME, F. L. P. **Perfis temporais NDVI e sua relação com diferentes tipos de ciclos vegetativos da cultura da cana-de-açúcar.** 2008. 103f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.

ROBERTSON, G.P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user' guide.** Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.

ROLIM, J. C. **Influência de corretivos da acidez e do gesso agrícola em propriedades químicas do solo, na nutrição e produção da cana-de-açúcar.** 114p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. & DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium, 1974, Washington. **Proceedings...** Washington: [s.n.], 1974, v.1, sec.A, p. 309-317.

SELLERS, P. J. **Vegetation-canopy spectral reflectance and biophysical processes.** In: Asrar, G. Theory and applications of optical remote sensing. Washington: John Wiley & Sons, 1989. p. 297-335.

SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J. ;MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1067-74, 2003.

SOUZA, Z. M.; CERRI; D. G. P.; MAGALHÃES; P. 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, 2º Semestre 2008.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J. ; PEREIRA, G.T.; MOREIRA, L.F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1763-1771, 2004.

SURFER, version 7.0. [s.l.]: Golden Software, 1999. Conjunto de programas. 1 CD-Rom e manuais. (informações em <http://www.goldensoftware.com>).

SZMRECSÁNYI, T., “O IAA como órgão de planejamento e controle: Atuação e redirecionamento”. In Simpósio sobre sócio-economia da Agro-indústria canavieira. STAB/Sociedade dos técnicos açucareiros do Brasil, Jaboticabal/SP, págs.18-55.1978.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K. & UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Adv. Agron.**, v. 38, p.45-94, 1985.

UNICA-União dos Plantadores de Cana-de-açúcar de São Paulo. **Estatísticas do Setor Sucroalcooleiro**. www.unica.com.br. 09/05/2012.

VERHULST, N. et al. Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. **Plant and Soil**, v.317, n.1-2, p.45-59, 2009.

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

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C. & REYNOLDS, W.D. **Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data**. In: Alvarez V., V.H.; Schaefer, C.E.G.R.; Barros, N.F.; Mello, J.W.V. & Costa, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.1-45.

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.

WEIR J. & HERING D. Measuring Vegetation (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory. 2012. Disponível em <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_3.p>. Acesso em 10 de maio de 2012.