**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Estudo com sensores para a mensuração de falhas nas fileiras de
cana-de-açúcar (*Saccharum SSP.*)**

Diego Soriano Cavalcante

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Máquinas
Agrícolas

**Piracicaba
2011**

Diego Soriano Cavalcante
Engenheiro Agrícola

**Estudo com sensores para a mensuração de falhas nas fileiras de cana-de-açúcar
(*Saccharum SSP.*)**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em
Ciências. Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Piracicaba
2011

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Cavalcante, Diego Soriano

Estudo com sensores para a mensuração de falhas nas fileiras de cana-de-açúcar (*Saccharum SSP.*) / Diego Soriano Cavalcante. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - - Piracicaba, 2011.
74 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Agricultura de precisão 2. Cana-de-açúcar 3. Falhas 4. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 633.61
C376e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais Jorge Cavalcante e Claudina Soriano pelo amor e exemplo de vida;
A minha vó Dina pelo carinho e apoio;
Aos meus amigos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus pelos ensinamentos e oportunidades, aos meus pais Jorge e Claudina por sempre me ensinarem a ser honesto e respeitador em todos os momentos.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, por meio do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Professor Livre Docente José Paulo Molin, pela orientação e oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa de estudo concedida.

Ao grupo São Martinho que contribuíram para realização deste trabalho e ao Técnico Reinado pela amizade e ajuda.

Aos amigos de república Dr. Inocência Junior, Jerônimo, Rodolfo, Dr. Bruno Fernandes, Marlon, Antonny e Leandro pela amizade, consideração e ajuda nos momentos mais difíceis e em todas as fases deste trabalho. Sem o apoio de vocês tudo seria mais difícil.

Aos colegas de pós-graduação Neisvaldo Barbosa, Felipe de Araújo, Lucas (Firula), Hudson, Gilda e aos estagiários e ex-estagiários do Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão - GMAP pelos bons momentos, troca de conhecimentos e convivência durante o mestrado.

A Equipe do Setor de Máquinas Agrícolas – USP/ESALQ Áureo, Juarez, Afonso, Francisco (Chicão), José Geraldo, Agnaldo e Renner, pela amizade, apoio técnico e operacional.

Aos professores do departamento pela troca de experiências.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Cana-de-açúcar.....	19
2.2 Plantio e falhas em cana-de-açúcar	20
2.3 Agricultura de precisão e sensoriamento	23
2.4 Sensores dedicados	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Sensor de presença	31
3.3 Sensor ótico ativo	34
3.4 Ensaios em lavouras	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Ensaio de validação do sensor de presença	41
4.2 Ensaios de campo iniciais com os dois sensores.....	48
4.2.1 Ensaio de campo para validação	55
3 CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS.....	69

RESUMO

Estudo com sensores para a mensuração de falhas nas fileiras de cana-de-açúcar (*Saccharum SSP.*)

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e apresenta um mercado em franca expansão. Em razão do potencial produtivo e da lucratividade da cultura da cana-de-açúcar, o interesse pelas técnicas de manejo localizado e a procura por novas tecnologias estão aumentando. Sendo assim esse projeto visa estudar opções de sensores para a mensuração e georreferenciamento de falhas, explorando a aplicabilidade de sensores óticos ativos e sensores de presença disponíveis no mercado, na estimativa da ocorrência de falhas nas fileiras de cana-de-açúcar. Foi desenvolvido um sistema para a detecção de ausência de plantas e para a sua validação foram realizados ensaios sob condições controladas para definir o grau de incerteza do método. Também foi estudado o uso de um sensor ótico ativo que mede refletância de alvos em dois comprimentos de ondas, na região do visível (VIS) a 590 nm (âmbar) e no infravermelho próximo (IVP) a 880 nm. Foram realizados ensaios em campo para verificar a funcionalidade destes instalados em um trator. Para a validação foram coletados dados em duas áreas localizada na região de Iracemápolis, SP, durante a operação de “quebra lombo”. Estabeleceram-se valores de espaçamentos entre plantas de cana considerados como falha para o sensor de presença. Para o sensor ótico ativo foram realizadas calibrações *in loco* para definir valores de refletância que representam ausência de plantas. Nas áreas utilizadas foram alocadas parcelas virtuais onde foram amostradas manualmente as falhas, e posteriormente os valores de falhas foram comparados com aqueles estimados pelos sensores a partir do isolamento dessas parcelas. As observações indicam o que sensor de presença permitiu obter valores de falhas comparáveis àqueles obtidos com a leitura manual. Os resultados obtidos com o sensor ótico ativo foram comparáveis com aqueles mensurados manualmente em apenas uma das duas áreas experimentais. O sensor de presença permitiu a coleta de dados com elevada densidade, resultando em mapeamento da ocorrência de falhas grande detalhamento. Os dois métodos permitem o georreferenciamento das mensurações, oferecendo ao usuário a informação sobre as ocorrências e as suas localizações.

Palavras-chave: Falhas; Cana-de-açúcar (*Saccharum SSP.*); Agricultura de precisão

ABSTRACT

Study with sensors for measuring gaps in the rows of sugar cane (*Saccharum ssp.*)

Brazil is the world's largest producer of sugarcane and has a booming market. Because of the productive potentiality and profitability of sugarcane the interest in site specific management techniques and demand for new technologies are increasing. Therefore this project aims to study options of sensors for measurement and georeferencing of failures, exploring the applicability of active optical sensors and presence sensors available, to estimate the occurrence of missing plants in sugarcane rows. It was developed a system for detecting the absence of plants and the validation tests were conducted under controlled conditions to define the uncertainty of the method. It was also studied the use of an active optical sensor that measures reflectance targets at two wavelengths in the visible region (VIS) at 590 nm (amber) and near infrared (NIR) at 880 nm. It was conducted field tests to verify the functionality of the sensors installed on a tractor. Data from two fields located in the region of Iracemópolis Brazil were collected for the validation, during the operation of finishing/covering the furrows. Values were established for spacing between sugarcane plants considered as failure for the presence sensor. For the active optical sensor calibrations were performed *in loco* to define reflectance values that represent the absence of plants. Virtual plots were allocated in the experimental areas where failures were measured by hand following the procedure used by producers, and subsequently the values were compared with those estimated by the sensors isolating the plot areas. The observations indicate that the presence sensor allowed to obtain values comparable to those obtained with manual reading. The results obtained with the active optical sensor were comparable with those measured manually in only one of two experimental areas. The presence sensor allowed the data collection at a high density, resulting in mapping the occurrence of failures with great detail. Both methods enable georeferencing of measurements, providing the user with information about the failure occurrences and their locations.

Keywords: Failures; Sugar Cane (*Saccharum SSP.*); Precision agriculture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sensor que mede a presença de obstáculos utilizados no trabalho.....	32
Figura 2 – Sensor ótico ativo utilizado, que calcula os índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI)	34
Figura 3 – Sensor ótico ativo montado no trator.....	35
Figura 4 – Trator instrumentado para leituras em fileiras de cana-de-açúcar e portando o sensor ótico ativo na frente e o sensor de presença entre os pneus do rodado dianteiro	37
Figura 5 – Arranjo dos obstáculos de madeira dispostos em fileiras para simular plantas de cana-de-açúcar	41
Figura 6 – Distâncias e frequência de ausência de plantas mensuradas pelo sensor de presença, nas seis fileiras de cana-de-açúcar	46
Figura 7 – Frequência de distribuição dos índices de refletância VIS, IVP, RVI e NDVI mensuradas pelo sensor ótico ativo em uma lavoura de 4,9 ha.....	49
Figura 8 – Pontos de ocorrência de falhas gerados em uma lavoura de cana-de-açúcar plantada de 90 a 100 dias pelo sistema sensor de presença (a), com o sensor de NDVI (b) e as parcelas amostrais alocadas (c)	50
Figura 9 – Pontos de início da ocorrência de falhas e sua classificação expressa como percentual local de falhas detectadas em uma lavoura de cana-de-açúcar plantada de 90 a 100 dias pelo sistema sensor de presença (a) e com o sensor de ótico (b).....	54
Figura 10 – Frequência de ausência de obstáculos (plantas) em intervalos pré-determinados mensuradas pelo sensor de presença, nas áreas 1 e 2.....	55
Figura 11 – Distribuição de frequência de falhas consideradas a partir de 0,5 m mensuradas pelo sensor de presença, nas áreas 1 e 2	56
Figura 12 – Distribuições de frequências dos índices de refletância VIS, IVP, RVI e NDVI mensurados pelo sensor ótico ativo para as áreas 1 e 2	59

Figura 13 – Área 1 (a) e área 2 (b), e as parcelas amostrais alocadas.....	60
Figura 14 – Pontos de início de ocorrência de falhas e sua classificação expressa como percentual local de falhas detectados na área 1 pelos sistemas sensor de presença (a) e sensor de ótico ativo (b)	64
Figura 15 – Pontos de início de ocorrência de falhas e sua classificação expressa como percentual local de falhas detectados na área 2 pelos sistemas sensor de presença (a) e sensor de ótico ativo (b)	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatística descritiva das leituras de distâncias entre estacas, do ensaio de validação do sensor de presença.....	43
Tabela 2 – Análise de variância da exatidão na leitura do sensor de presença testada com três espessuras de estacas (m), seis distâncias entre estacas (m) e três velocidades de deslocamento (m s^{-1}).....	45
Tabela 3 – Estatística descritiva das falhas mensuradas por fileira no ensaio inicial em campo	47
Tabela 4 – Estimativa do percentual de falhas por fileira, obtidos com levantamento manual e com sensor de presença.....	47
Tabela 5 - Estatística descritiva dos dados obtidos com o sensor ótico ativo.....	48
Tabela 6 – Porcentagem de falhas identificadas pelos três métodos (leitura manual, sensor de presença e sensor ótico) nas parcelas demarcadas em campo.....	52
Tabela 7 – Análise de variância dos métodos da pesquisa (levantamento manual, sensor de presença e sensor ótico) na mensuração de falhas em fileiras de cana-de-açúcar	53
Tabela 8 - Estatística descritiva dos dados obtidos com o sensor ótico ativo no procedimento de caracterização dos alvos ao longo de 2 minutos de coleta.....	57
Tabela 9 – Porcentagem de falhas identificadas pelos três métodos (leitura manual, sensor de presença e sensor ótico) nas parcelas demarcadas em campo, avaliadas na área 1	61
Tabela 10 – Porcentagem de falhas identificadas pelos três métodos (leitura manual, sensor de presença e sensor ótico) nas parcelas demarcadas em campo, avaliadas na área 2	62

Tabela 11 –Análise de variância dos métodos da pesquisa (levantamento manual, sensor de presença e sensor ótico) na mensuração de falhas em fileiras de cana-de-açúcar, nas áreas 1 e 2	63
---	----

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Desde os primeiros relatos no país, de 1522, quando era produzida unicamente para produção de açúcar, a cana-de-açúcar vem concentrando riqueza e é um dos produtos mais importantes da história do país. A área de cana-de-açúcar colhida e destinada à atividade sucroalcooleira está estimada em 8.033,6 mil hectares, sendo São Paulo o maior produtor, com 54,23% (4.357,01 mil hectares). A estimativa do total de cana que será processada na safra 2010/11 é de 624.991 mil toneladas, com incremento de 3,40 % em relação à safra 2009/10, o que indica seu crescimento e importância (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2010).

Assim como em qualquer atividade econômica, a produção de cana-de-açúcar demanda a aplicação de processos mais eficientes para melhoria da produtividade e da qualidade, juntamente com a redução dos custos de produção, para a atuação em mercados cada vez mais competitivos.

Considerando a capacidade produtiva e a rentabilidade das lavouras de cana-de-açúcar, o setor sucroalcooleiro demonstra interesse pelas técnicas de manejo localizado com consequente acréscimo na demanda por novas tecnologias. A detecção de falhas nas lavouras é uma dessas demandas específicas e relacionada tanto à qualidade do plantio quanto à manutenção da ocupação ótima das lavouras com a cultura. As técnicas hoje utilizadas são relativamente simples e manuais e consistem em medir as falhas por amostragem somando-se as distâncias de falhas e dividindo pela distância total das fileiras amostradas. Essa tarefa, além de demandar significativa mão-de-obra, é de baixa representatividade espacial e poderia ser mais bem executada com recursos já disponíveis e ainda não devidamente explorados.

O tema associado a falhas tem sido trabalhado, em especial em culturas perenes como laranja e eucalipto com a utilização de imagens de alta resolução, que podem fornecer tais informações da lavoura, uma vez que as falhas são claramente percebidas.

O plantio mecanizado da cana-de-açúcar é um tema atual e contempla vários aspectos limitantes do setor, como custos, disponibilidade de mão-de-obra e melhoria da qualidade de implantação das lavouras. No entanto, as avaliações recentes têm indicado

que o plantio mecanizado causa maiores danos às gemas e consequentemente aumentando a porcentagem de falhas de plantio, o que reflete na redução da produtividade das lavouras, demandando uma maior densidade de gemas por metro no plantio.

Algumas técnicas associadas à agricultura de precisão podem agregar informações necessárias para monitorar e quantificar as falhas encontradas na lavoura, como também auxiliar na tomada de decisão para a sua correção. Mapas gerados com informações georreferenciadas identificam e alertam para os locais onde o manejo deve ser direcionado. Para isso basta que sejam desenvolvidas formas de obtenção desse dado de forma espacializada.

O trabalho de Frasson et al. (2007) mostrou resultados satisfatórios em relação à correlação de falhas de plantio e valores de índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) gerados por um sensor ótico ativo, verificando-se assim a possibilidade de utilizar esse tipo de equipamento para diagnosticar a qualidade do plantio. Sensores óticos exploram as propriedades óticas das folhas, propriedades essas caracterizadas pela refletância, transmitância e absorbância, que correspondem a uma fração da radiação incidente que é respectivamente refletida, transmitida e absorvida pelas folhas.

Por outro lado, assume-se que existem outras formas não invasivas e de concepção suficientemente simples para a mensuração de falhas na condição de lavoura de cana-de-açúcar em estágios iniciais de crescimento, tanto em áreas de plantio inicial como em lavouras já colhidas. Como exemplo, as tecnologias de sensores de presença são largamente difundidas e com aplicações das mais diversas.

A ocorrência de falhas nem sempre é aleatória nas lavouras e pode apresentar arranjo de distribuição espacial, justificando-se, portanto, a coleta de dados georreferenciados para o correto entendimento da sua distribuição. Sendo assim esse projeto visa estudar opções de sensores para a mensuração de falhas e seu georreferenciamento, explorando a aplicabilidade de sensores óticos ativos e sensores de presença/fotodiodos disponíveis no mercado, na estimativa da ocorrência de falhas nas fileiras de cana-de-açúcar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar

Os primeiros relatos da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) no Brasil datam de 1522 quando foi trazida da ilha da Madeira, por Martin Afonso de Souza, destinada à produção do açúcar, durante o período colonial. No entanto, a partir de 1970, com o incentivo do governo, a agroindústria canavieira concentrou seus esforços na utilização da cana-de-açúcar para a produção de etanol, o qual é utilizado como fonte de energia renovável. Este incentivo permitiu ao Brasil ser um país modelo no cenário internacional quanto à utilização do etanol como biocombustível (BASTOS, 1987).

A área de cana-de-açúcar colhida destinada à atividade sucroalcooleira está estimada em 8.033,6 mil hectares. Em relação à área total, o Estado de São Paulo representa 54,23% (4.357,01 mil hectares), seguido por Minas Gerais com 8,1% (649,94 mil hectares), Paraná com 7,25% (582,32 mil hectares), Goiás com 7,46% (599,31 mil hectares), Alagoas com 5,46% (438,57 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 4,93% (396,16 mil hectares) e Pernambuco com 4,32% (346,82 mil hectares). Nos demais estados produtores as áreas são menores, mas, com bons índices de produtividade (CONAB, 2010).

Além da produção de açúcar e etanol combustível, os subprodutos da cana (bagaço, vinhaça, palha e torta de filtro) são de grande importância socioeconômica na geração de energia, ração animal, aglomerados, fertilizantes entre outros. Em função de todos esses aspectos, fatores que aumentem a produtividade ou diminuam o custo de produção da cana-de-açúcar são relevantes (BLANCH et al., 2008).

A cana-de-açúcar é uma planta que se desenvolve em forma de touceiras. A parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescências e frutos. A parte subterrânea é constituída por raízes fasciculadas, sendo que cerca de 85% se encontram nos primeiros 0,50 m de profundidade, e por rizomas, que são responsáveis pelo perfilho da touceira. As novas touceiras de soca ou da ressoca se originam dos rizomas que rebrotarão após a colheita (SEGATO et al., 2006).

A cana-de-açúcar é uma gramínea semi-perene com um ciclo econômico de 5 a 6 anos, portanto estabelecer novos plantios com qualidade é indispensável. O ciclo

evolutivo da cultura (cana-planta) pode ser de 12 (cana de ano) e 18 meses (cana de ano e meio). Após o primeiro corte o ciclo passa a ser de 12 meses (ALFONSI et al., 1987), que a partir do corte passa a ser denominada de cana-soca.

Atualmente, vem sendo adotada também a chamada cana de inverno, plantada de maio a setembro, que pode ser adotada com segurança quando há a possibilidade de irrigação (VITTI; MAZZA, 2002).

No Brasil, assim como em outros países produtores de cana-de-açúcar, novas variedades têm sido continuamente desenvolvidas e testadas com os objetivos de aumentar a produtividade, obter maior resistência às pragas e doenças e melhor adaptação às variações de clima, tipos de solos e técnicas de plantio, manejo e colheita (GALVÃO; FORMAGGIO; TISOT, 2005).

2.2 Plantio e falhas em cana-de-açúcar

O plantio de cana-de-açúcar é uma atividade singular por ser uma cultura semi-perene, que fica instalada por um tempo superior a um ciclo agrícola tradicional. Portanto, a fase produtiva da exploração, entre um plantio e outro, tem duração de 5 a 6 anos, em média. É inegável a importância da realização de um plantio de boa qualidade, pois esse refletirá nos resultados de produtividade por todo o ciclo da cultura.

Segundo Vitti e Mazza (2002) o planejamento do plantio até a colheita é muito importante para a otimização da exploração econômica, norteador a escolha de uma série de técnicas a serem adotadas, como insumos, máquinas e implementos, serviços, tipos de variedades e sua distribuição nos solos e épocas de plantio.

Coleti e Stupiello (2006) abordam as principais atividades que envolvem as operações de plantio da cana-de-açúcar, como espaçamento entre fileiras, profundidade de sulco de plantio, época de plantio, quantidade de mudas necessárias e os cuidados necessários que envolvem estas operações. Os autores salientam a importância das operações para implantação da cultura, que exigem um bom planejamento e muito conhecimento técnico, pois as tomadas de decisões no plantio irão influenciar todo o ciclo da cana-de-açúcar.

Da mesma forma, Janini, Ripoli e Cebin (2008) observaram que cana-de-açúcar em plantio mecanizado apresentou um início de brotação mais tardio, o número médio

de perfilhos por metro linear de sulco foi menor e apresentou menor número de gemas viáveis. Verificaram, porém, que o custo operacional efetivo do plantio mecanizado foi inferior quando comparado ao sistema semi-mecanizado. No que diz respeito ao percentual de falhas do tratamento mecanizado, esse foi três vezes maior que no tratamento semi-mecanizado.

Tecnicamente, o plantio mais recomendado é o de cana de ano e meio, pois apresenta menores riscos de adversidades climáticas, principalmente de meio de seu ciclo, quando pioram as condições de umidade do solo, prejudicando o seu desenvolvimento (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2010). Os autores salientam também que, com o plantio da cana-de-açúcar nos meses de janeiro a março, pode-se aproveitar o terreno com outras culturas como soja e amendoim.

Para Coleti e Stupiello (2006) o efeito da estiagem associada com a baixa umidade do solo nos meses de abril a setembro, afeta sensivelmente a massa obtida do plantio até o final do verão, acarretando em menores produtividades.

Uma das formas da planta superar as adversidades climáticas é desenvolver um sistema radicular com distribuição ao longo de todo perfil do solo. Porém, para ocorrer este desenvolvimento deve-se levar em consideração fatores genéticos e ambientais. A umidade do solo e os outros atributos como porosidade, aeração e resistência à penetração, estão interligados quanto à influência sobre o crescimento radicular. Pouco adianta o alto teor de água no solo ser satisfatório se houver baixa aeração e alta resistência à penetração (VASCONCELOS; GARCIA, 2005).

A produtividade da cana-de-açúcar é regulada por diversos fatores de produção, dentre os quais se destacam: planta (variedade), solo (propriedades químicas, físicas e biológicas), clima (temperatura, umidade, insolação), práticas culturais (controle de erosão, erradicação de plantas invasoras, descompactação do solo), controle de pragas e doenças, colheita (maturação e corte), entre outros. Para Carlin, Silva e Perecin. (2004) uma das características de maior importância para se ter uma boa produtividade, ou bom estado de mudas, está relacionada às práticas de plantio; conseqüentemente, no plantio mecanizado essas práticas estão intimamente ligadas às máquinas utilizadas, sobretudo a plantadora.

Segundo Galvani et al. (1997) o espaçamento entre sulcos de plantio é de 1,40 m com uma profundidade média de 0,25 m e a largura de acordo com o ângulo de 45°, proporcionado pela abertura do sulcador. Em canaviais colhidos mecanicamente o espaçamento de 1,50 m tem apresentado melhores vantagens operacionais, evitando danos das fileiras de cana causados pelo tráfego de máquinas. A densidade de plantio é em torno de 12 gemas por metro linear de sulco, sendo estes rebolos cobertos em seguida com uma camada de terra levemente compactada. Os autores salientam que a produtividade nos espaçamentos menores é maior, pelo fato de haver um maior índice de área foliar e conseqüentemente um maior acréscimo na taxa líquida de fotossintetizados em função da maior absorção da radiação solar.

Segundo Braunack, Arvidsson e Hakansson, (2006) que conduziram uma avaliação do efeito da posição do tráfego na colheita de cana-de-açúcar, foi observada redução da compactação e aumento da produtividade da cultura em áreas com controle de tráfego.

Roque et al. (2010) em pesquisa de tráfego das máquinas agrícolas em cana-de-açúcar, afirmam que o tráfego aumenta a densidade e diminui o diâmetro médio ponderado e a macroporosidade do solo na linha de rodado em relação à linha de plantio, o que causa a degradação cumulativa da qualidade física do solo, ao longo dos anos de cultivo.

Acompanhar o desenvolvimento da cultura é um procedimento imprescindível para a tomada de decisões. Ajustes em tratos culturais, irrigação e mesmo replantios podem ser executados pela detecção de falhas nos talhões da cultura ou diferenças no desenvolvimento. Imagens de alta resolução podem fornecer tais dados e auxiliar o acompanhamento do desenvolvimento de uma lavoura, uma vez que as falhas e as diferenças de padrões são claramente percebidas (JORGE; TRINDADE JUNIOR, 2002).

Stolf (1986) propôs um método de avaliação de falhas de plantio de cana-de-açúcar que consiste em computar a somatória da distância de falhas acima de 0,5 m, num determinado trecho da fileira, considerando, portanto, como falhas, espaços vazios entre plantas de cana-de-açúcar a partir de 0,5 m.

Stolf, Iaia e Lee (1986) correlacionaram esse índice de falhas com o rendimento agrícola em cana planta, constatando que a diminuição da produtividade com o aumento

da percentagem de falhas é linear até valores em torno de 55% de falhas, intervalo esse que engloba a variabilidade natural de áreas comerciais. Constataram que para um aumento de 10% de falhas há uma queda de 3,2% no rendimento agrícola, demonstrando a sensibilidade do parâmetro.

Da mesma forma, Stolf, Iaia e Lee (1991) correlacionaram produtividade agrícola com o índice de falhas em soqueiras de cana-de-açúcar, concluindo que as falhas em soqueiras assumem uma importância menor quando comparadas com cana-planta. Contudo as perdas assumem a mesma grandeza das da cana-planta, o que permitiu propor a mesma curva de calibração que relaciona o índice de falha com a produtividade relativa, já estimada em cana-planta.

2.3 Agricultura de precisão e sensoriamento

Agricultura de precisão pode ser definida como um sistema de gerenciamento que leva em consideração a variabilidade espacial que existe dentro de uma área de produção, independente de seu tamanho e trata de maneira localizada essa variabilidade. Há uma evidência bem comprovada que tanto a qualidade, quanto a produtividade, são espacialmente variáveis no campo e sistemas vêm sendo desenvolvidos para explorar esta variação e aumentar o rendimento das culturas (STAFFORD, 2005).

No contexto da agricultura de precisão, Molin (1997) define sensoriamento como uma técnica que consiste em medir com a devida precisão as quantidades que definem a variabilidade e que normalmente dizem respeito à cultura e ao solo. Técnicas de sensoriamento remoto se baseiam em obter informações de um objeto sem que haja o contato físico entre o instrumento de medida e o objeto (CAMPBELL; MADDEN, 1990).

Estudos que utilizam dados de sensoriamento remoto para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas podem ser vistos em Fontana et al. (2001), Berka, Rudorff e Shimabukuro (2003), e Rizzi e Rudorff (2007), dentre outros. Estes estudos tiveram por base o emprego da variável índice de vegetação, extraída de imagens de sensoriamento remoto, cuja informação está relacionada com o vigor vegetativo das culturas e, por conseguinte, à produtividade agrícola.

Durante as duas últimas décadas o desenvolvimento na capacidade de aquisição de dados terrestres, aéreos e de satélite, processamento e interpretação, tem tornado possível utilizar as tecnologias do sensoriamento remoto em conjunto com os sistemas de agricultura de precisão (McNAIRN et al., 2001). Medidas indiretas e não destrutivas da cultura são uma alternativa para tomadas de decisão sobre o manejo (MOGES et al., 2004).

O sensoriamento remoto é definido como uma técnica de aquisição e de aplicação das informações sobre um objeto sem nenhum contato físico com ele. A informação é adquirida pela detecção e medição das mudanças que o objeto impõe ao campo ao seu redor, e este sinal pode incluir um campo eletromagnético emitido e/ou refletido, ondas acústicas refletidas e/ou perturbadas pelo objeto ou as perturbações do campo de gravidade ou potencial magnético com a presença do objeto. Geralmente a aquisição de informações é baseada na captação dos sinais eletromagnéticos que cobrem o espectro inteiro das ondas eletromagnéticas desde a onda longa de rádio, passando pelas microondas, infravermelho termal, médio e próximo, visível, ultravioleta, raios X, até os raios gama (LIU, 2007).

A mensuração da refletância espectral, por exemplo, é a abordagem sem contato e não destrutiva mais promissora para a determinação de deficiência de nitrogênio nas culturas (TUMBO; WAGNER; HEINEMANN, 2002). Com esse propósito, as técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para avaliar as condições das culturas em relação ao nitrogênio, sendo que propriedades espectrais, refletância e transmitância das folhas são afetadas pela deficiência de nitrogênio (BLACKMER et al., 1996).

Associado a esse fato, percebe-se um aumento no interesse em agricultura de precisão e desenvolvimento de sistemas inteligentes para manejar os recursos agrícolas. Essas abordagens relativamente novas objetivam aumentar a produtividade, aperfeiçoar a rentabilidade e proteger o ambiente (HABOUDANE et al., 2002).

No estudo da resposta espectral de folhas verdes, MOREIRA et al. (2001) mencionam que no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 700 nm, correspondente à faixa do visível, a refletância é baixa, da ordem de 10%, com um suave aumento da resposta na região do verde (550 nm). Na faixa do infravermelho

próximo (700 a 1300 nm) ocorre outro aumento na refletância para valores próximos a 50%. Daí em diante, até 2500 nm (infravermelho médio - IVM), há um gradual decréscimo, aparecendo algumas feições de absorção pelo conteúdo de água.

Inicialmente, Jordan (1969) propôs a razão entre as medidas espectrais dos comprimentos de onda de 800 e 675 nm para a determinação do índice de área foliar (IAF) em florestas. Essa relação entre comprimentos de onda do infravermelho próximo e do vermelho ficou conhecida como índice de vegetação da razão simples (RVI – *Ratio Vegetation Index*). O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) surgiu em seguida, com o trabalho de Rouse et al. (1973), que encontraram uma relação entre medidas espectrais de duas bandas, que melhor resolvia o problema das interferências do solo na resposta da vegetação e também reduzia as influências da atmosfera e das variações sazonais do ângulo do Sol. No entanto, a influência do solo, da atmosfera e da geometria de iluminação e visada não foram adequadamente eliminadas, tendo surgido diversas variações para o NDVI, na tentativa de obter um índice menos sensível a tais influências.

Posteriormente, Rouse et al. (1973) propôs o NDVI, calculado a partir da normalização de bandas do vermelho e infravermelho próximo, conforme a equação (1), onde os valores de NDVI estão contidos em uma mesma escala de valores adimensionais, entre -1 e 1.

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (1)$$

Em que:

ρ_{IVP} = refletância no infravermelho próximo;

ρ_V = refletância no vermelho.

A normalização é produzida pela combinação da forte absorção pela clorofila na região do vermelho e a forte refletância no infravermelho próximo, devido à dispersão no mesofilo da folha e a ausência de absorção pelos pigmentos (WOOLLEY, 1971).

Os índices de vegetação são provavelmente a maneira mais simples e eficiente de se realçar o sinal “verde” ao mesmo tempo em que minimizam as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato sobre o dossel vegetal (JACKSON; HUETE, 1991).

Segundo Moreira (2005) no estudo da resposta espectral de folhas verdes, a baixa refletância no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 700 nm (faixa do visível - VIS) 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, clorofilas α e β e na região do vermelho (V) apenas a clorofila atua, absorvendo energia em torno de 645 nm. Na faixa do infravermelho próximo (IVP), de 700 a 1300 nm, ocorre outro aumento na refletância devido à estrutura interna da folha (tamanho e formato das células, e à quantidade de espaços intercelulares).

Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é a 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 valores constantes, mesmo com o aumento da densidade do dossel (GALVÃO; VITORELLO; PIZARRO, 2000).

Wright et al. (2004), analisando fotografias aéreas e imagens de satélite, encontraram menor correlação com as variáveis da cultura do trigo do que com sensores terrestres. Também destacaram o fato de não ser possível obter sempre as imagens de satélite com a qualidade desejada devido às condições climáticas, como a presença de nuvens.

Dentre os produtos gerados a partir dos dados coletados por este sensor, o NDVI tem apresentado ampla aplicação em estudos ambientais (RUDORFF et al., 2007) apresenta boa relação com o índice de área foliar (JACKSON; HUETE, 1991), assim sendo espera-se que áreas com maior porcentagem de falha apresentem menores valores de NDVI devido à interferência do solo.

As contribuições do solo na resposta espectral da vegetação variam com a quantidade exposta, com as suas propriedades intrínsecas e com as condições da superfície. Na determinação dos índices de vegetação, a influência do solo é significativa em situações de cobertura parcial pela vegetação, especialmente onde possam ocorrer

variações espaciais ou temporais da superfície do solo. Essa influência ocorre tanto em relação ao brilho do dossel, associado à amplitude da radiância refletida, quanto ao perfil da curva espectral, associado às características mineralógicas, orgânicas e de absorção de água (HUETE, 1989).

Sistemas de visão artificial foram utilizados para seleção de produtos agrícolas (PARK; CHEN, 1996), identificação de plantas (GUYER et al., 1986; JIA; KRUTZ, 1992; PÉREZ et al., 2000) e avaliação das condições da cultura (BACCI et al., 1998). No entanto, poucos têm sido os trabalhos publicados onde se utiliza processamento de imagens digitais para levantamento de falhas de plantio em culturas.

Conforme apontado por Fontana, Berlato e Bergamaschi (1998), as mudanças estruturais da vegetação no decorrer da estação de crescimento resultam em uma diferenciação da sua refletância, o que permite empregá-la para o monitoramento da vegetação, bem como distinguir diferentes tipos de vegetação e detectar possíveis problemas de crescimento.

Trabalhos de Frasson et al. (2007) mostraram resultados satisfatórios de correlação de falhas de plantio e valores de NDVI gerados por um sensor ótico ativo, indicando a possibilidade de utilizar esse tipo de equipamento para diagnosticar a qualidade do plantio de cana-de-açúcar.

Solari et al. (2008) descrevem um estudo sobre o uso de sensores ativos de refletância em plantações de milho, comparando sensores comerciais e concluem que os sensores podem ser usados para prever a disponibilidade de nitrogênio (N) para a cultura. Esses mesmos sensores óticos têm sido estudados em trabalhos que avaliam o seu uso no auxílio à identificação de deficiências de nitrogênio em trigo (POVH et al., 2008), algodão (MOTOMIYA; MOLIN; CHIAVEGATO, 2009), tendo como base o NDVI.

2.4 Sensores dedicados

Há uma quantidade crescente de tipos de sensores utilizados na agricultura para os mais diversos fins. Alguns deles se destacam como os sensores óticos que são utilizados para relacionar refletância foliar com índices vegetativos das culturas, tais como área foliar, cobertura vegetal, biomassa, tipo de cultura, estado nutricional e

rendimento (HATFIELD et al. 2008). Uma derivação recente são os sensores óticos ativos terrestres (SOAT). Estes sensores são denominados “ativos”, pois possuem fonte própria de luz, podendo trabalhar dia e noite, captando a radiação refletida pelo alvo (POVH, 2007). A refletância das culturas mensurada por estes equipamentos pode ser definida, segundo Schroder et al. (2000), como a intensidade da radiação refletida pela vegetação, partindo-se do princípio que a radiação emitida é conhecida.

Plattner e Hummel (1995) desenvolveram um sistema utilizando sensores fotoelétricos, onde a interrupção do fecho de luz do sensor pela planta de milho registra a presença da planta e a não interrupção do fecho de luz do sensor significa a ausência de plantas (falhas), com isso é possível detectar o espaçamento entre as plantas de milho e as falhas. Com objetivo semelhante Birrell e Sudduth (1995) propuseram um sensor que mede a população de plantas de milho. O sensor foi instalado em uma colhedora de milho e tem um potenciômetro rotativo que desativa quando entra em contato com cada planta.

Sensores de ultrassom têm a função de detectar ou medir a posição de determinado objeto através da emissão de pulsos de ultra-som. Aziz, Steward e Birrel (2004) desenvolveram um sistema com sensores ultra-sônicos onde o crescimento das plantas foi estimado com base no número de folhas detectadas.

Sui et al. (1989) desenvolveram um sistema de medidas baseado em microcomputador usando sensores de ultrassom para fornecer estimativas precisas e consistentes de volume de planta, largura máxima, largura média das fileiras de plantas e altura para plantas de algodão e soja. De forma semelhante, Sudduth et al. (1998) comparam medidas de largura de corte de uma colhedora de grãos com ultrassom e com GPS e concluíram que sensores ultrassônicos são mais baratos e podem fornecer medidas diretas de largura sem todo o processamento de dados que o método do GPS exige.

Kataoka et al. (2002) mostram que o sensor de ultrassom tem bom desempenho para medidas de altura de plantas de milho e de soja comparado com o sensor de distância baseado em laser. Já, Regunathan e Lee (2005) usam sensor de ultrassom em conjunto com câmera colorida para identificar e determinar o tamanho de frutas cítricas. O sensor foi usado para determinar a distância entre a fruta e a câmera. O erro na

estimação do tamanho das frutas pode ser causado por imprecisões nas medidas do ultrassom. Zaman e Salyani (2004) estudaram o uso de sensores ultrassônicos para quantificar e mapear volume de árvores de citrus.

Segundo Luo e Kay (1989), a integração ou fusão de múltiplos sensores traz vantagens potenciais na redundância, complementaridade, economia de tempo e de custo da informação. Informações redundantes fornecidas por um grupo de sensores ou um único sensor ao longo do tempo reduzem a incerteza global, aumentando a precisão com que os elementos são percebidos pelo sistema, e podem servir para aumentar a confiabilidade no caso de erro ou falha de sensor. Informações complementares de múltiplos sensores permitem que sejam percebidos elementos no ambiente que seriam impossíveis de se perceber usando apenas a informação de cada sensor operando em separado.

A economia de tempo no processo é obtida com o uso dos vários sensores fornecendo informações com uma velocidade maior do que apenas um sensor forneceria. Luo, Yih e Su (2002) afirmam que existe uma diferença conceitual entre integração de sensores e fusão de sensores. A integração de sensores é um conceito mais abrangente ligado ao nível de arquitetura de sistema e controle, relacionado com a ligação física de um grupo de sensores com dados sendo modelados para participar dessa integração. Já a fusão de sensores está mais ligada a questões matemáticas e estatísticas para combinações da informação dos sensores.

Fusão de dados lida com teorias, algoritmos e ferramentas utilizadas para processar múltiplas fontes de dados, gerando um dado de saída que é de alguma forma, melhor quando comparado com os dados de entrada individualmente (NAKAMURA, 2007). Alguns exemplos simples são encontrados para aplicações agrícolas, como o de Scotford e Miller (2004, 2005) que utilizaram um sensor de refletância em conjunto com sensor de altura (distância) para determinar densidade e índice de área foliar em milho e concluíram sobre a validade da união dos dois sensores.

Martí et al. (2006) desenvolveram um projeto corporativo com a participação de diversas instituições e universidades da Espanha, com a finalidade de desenvolver um sistema de controle de pulverizador para aplicação de pesticidas em pomares. Utilizaram

sensores detectando a presença árvores para controlar em tempo real o fluxo do produto lançado, baseado na detecção da presença de árvores.

Os dados estimados com o auxílio de sensores em campo são facilmente georreferenciados. Zaman, Schumann e Hostler (2005) usaram um sistema com sensores, integrado com GPS para fazer medidas do volume das árvores e para assim gerar um mapa de prescrição para aplicação variada de fertilizante nitrogenado e Zaman, Schumann e Hostler (2006) utilizaram esse sistema para estimar a produtividade das plantas associando-as aos volumes.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram conduzidos utilizando-se dois princípios distintos de detecção de falhas, visando a sua mensuração associada a operações agrícolas, em fileiras de cana-de-açúcar, utilizando um sensor ótico ativo terrestre e um sensor de presença.

3.1 Sensor de presença

O princípio de funcionamento para a aplicação proposta é de obtenção da resposta ao corte de luz do sensor pelos obstáculos (vegetação de cana-de-açúcar). Foi utilizado um sensor de presença do modelo BA2M-DDT (Autonics, Yangsan, Si, Korea) (Figura 1), com fonte de luz (LED infravermelho), sensibilidade de captação de dados de até 2 m de distância, com ajuste de sensibilidade. Sua frequência de coleta é de 4,0 Hz, com tempo de resposta de aproximadamente 1 ms.

Para a sua utilização foi necessário o desenvolvimento de um programa que consiste em calcular a não detecção de obstáculos pelo sensor num intervalo definido de ausência de obstáculos. Esse intervalo de não interrupção do sinal do sensor é mensurado por um encoder de 240 pulsos (Hohner, absoluto analógico, Artur Nogueira, SP) acoplado na roda dianteira do trator em que o mesmo é montado, calculando assim o deslocamento do veículo.

A linguagem de programação foi CRbasic, exclusiva do coletor de dados CR1000 (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA), utilizado para integrar dados do sensor, encoder e receptor de GPS AG 132 (Trimble, Sunnyvale, California, EUA).

Figura 1 – Sensor que mede a presença de obstáculos utilizados no trabalho

Fonte: Autor (2011)

Os dados brutos coletados pelo sensor em testes e campo, no formato texto foram abertos em planilhas eletrônicas para a aplicação do filtro, para remoção de erros. No preparo dos dados, as coordenadas geodésicas foram convertidas de geográficas para métricas pela projeção UTM 1983. Com base nessas coordenadas, calculou-se a distância entre os pontos de coleta, através do Teorema de Pitágoras. Desta forma os dados georreferenciados foram analisados e convertidos para falhas, expressas em percentual a partir da equação 2.

$$F = \frac{f}{DF} 100 \quad (2)$$

Em que:

F (%) = ocorrência de falhas;

f = tamanho da falha (m);

DF = distância entre uma falha e outra (m).

3.2 Ensaios de validação

Para os testes com o sensor de presença foi desenvolvido inicialmente um ensaio sob condições controladas para a sua calibração inicial e obtenção de parâmetros que definam o grau de incerteza das mensurações. O sensor de presença foi instalado na região do rodado dianteiro de um trator, por meio de um suporte provisório, permitindo sua passagem perpendicular aos obstáculos fixados ao solo.

O ensaio foi delineado com obstáculos fixos, com estacas de madeira, na posição vertical, com variações de espessuras das estacas de 0,05, 0,10 e 0,20 m, simulando colmos de cana-de-açúcar. Foram simuladas distâncias entre estacas de 0,10; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,0 m e três velocidades de deslocamento (1,3, 1,8 e 3,0 m s⁻¹), com seis repetições correspondentes a passadas sucessivas do sensor lateralmente às estacas.

Os dados foram analisados por meio de análise de variância com teste de médias para avaliar a influência da velocidade de percurso e largura dos obstáculos como função dos espaços para se obter dados que demonstrem a diferença entre os espaços vazios e aqueles mensurados pelo sistema.

Para a gestão e possíveis intervenções nas falhas diagnosticadas, é necessário o seu georreferenciamento. Para tanto, na sequência foi integrado ao sistema um receptor de GPS e assim os dados foram georreferenciados para o correto entendimento da sua distribuição em campo. Assim, um segundo ensaio foi realizado em campo, com seis fileiras de cana-de-açúcar em torno de 90 dias após o plantio, com espaçamento de 1,5 m entre fileiras.

Primeiramente foi realizado o levantamento manual de falhas em todas as fileiras, seguindo o método proposto por Stolf (1986), que se baseia na divisão entre a soma total da distância de falhas na fileira e a distância total da fileira, obtendo um percentual de falhas por fileira.

Em seguida as seis fileiras de cana-de-açúcar foram escaneadas com o sensor de presença, instalado por meio de um suporte provisório, na região do rodado dianteiro de um trator. Os resultados obtidos tanto pelo levantamento manual, quanto

pelo sensor de presença foram assim comparados a partir de um critério de espaço considerado como falha, antes da limpeza dos dados para eliminação de erros.

3.3 Sensor ótico ativo

Utilizou-se o sensor ótico ativo Crop Circle (Holland Scientific, Inc. Lincoln, NE, USA) (Figura 2), que trabalha com dois comprimentos de onda, na região do visível (VIS) a 590 nm (âmbar) e no infravermelho próximo (IVP) a 880 nm, e tem capacidade de coletar até dez dados por segundo; capta refletância dos alvos, calcula automaticamente e grava o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), além de gravar também os seus componentes (VIS e IVP) e com estes calculou-se o (RVI).

Figura 2 – Sensor ótico ativo utilizado, que calcula os índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI)

Fonte: Autor (2010)

Os dados básicos de saída (VIS, IVP, RVI e NDVI) foram considerados para uma análise inicial e escolha do índice que seria o melhor indicador de falhas. As falhas foram definidas a partir de valores limite dos índices de refletância, estabelecidos em estudo de alvos específicos. Foram realizadas leituras com o sensor por dois

minutos sobre solo e em presença de plantas de cana-de-açúcar para caracterizar os alvos. A partir dessa análise foi estabelecido o valor de corte dos índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI) a partir dos valores mensurados.

Na etapa de coleta de dados em campo o sensor foi conectado a um receptor de GPS AG 132 (Trimble, Sunnyvale, CA, EUA). Montado na parte dianteira de um trator (Figura 3), de forma a ficar sobre uma fileira de cana-de-açúcar e posicionado de acordo com as recomendações do fabricante, em média, a 1,0 m de distância do alvo.

Figura 3 – Sensor ótico ativo montado no trator

Fonte: Autor (2010)

Os dados foram coletados na frequência de 1,0 Hz e armazenados no próprio coletor de dados que acompanha o equipamento (que contém uma bateria e uma placa que faz a interface do sensor com conectores externos). Posteriormente os dados coletados foram analisados comparativamente com os valores limites dos índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI). No preparo dos dados, as coordenadas geográficas foram convertidas em métricas pela projeção UTM 1983. Com base nessas

coordenadas, calculou-se a distância entre os pontos, através do Teorema de Pitágoras. Assim identificaram-se as ocorrências de falhas e calcularam-se as respectivas distâncias entre pontos de ocorrência (equação 3).

$$F = \frac{\sum DF}{DT} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

F (%) = ocorrência de falhas;

$\sum DF$ = somatório das distâncias contínuas entre pontos com valores dos índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI) considerados como característicos de ausência de plantas

DT = distância entre um trecho de falhas e o início de outro.

As distâncias que compreenderam valores abaixo do limite dos índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI) para vegetação foram definidas como intervalos correspondentes a falhas e aquelas com valores acima desse limite foram consideradas como trechos de fileiras com a presença de plantas. Assim foram calculados os percentuais de falhas já vinculados às suas respectivas coordenadas.

3.4 Ensaios em lavouras

Na sequência foram conduzidos ensaios em campo para as leituras em fileiras de cana-de-açúcar já integrando os dois sensores (ótico ativo e sensor de presença). Para tanto ambos foram instalados num trator. As leituras das fileiras foram simultâneas, com o sensor ótico ativo, em média, a 1,0 m de distância do alvo. Já para o sensor de presença foram realizadas leituras por meio da sua passagem perpendicular às fileiras de cana-de-açúcar.

Para a instrumentação do trator (Figura 4) com o sensor de presença foi desenvolvido um suporte que também serviu como proteção para o sensor. Na instalação do medidor de deslocamento da roda motriz foram desenvolvidos suportes fixados no centro dos aros, presos pelos próprios parafusos das rodas do trator. Na

extremidade destes suportes foi fixado o encoder, que forneceu as leituras de pulsos, a partir da rotação do rodado do trator.

Figura 4 – Trator instrumentado para leituras em fileiras de cana-de-açúcar e portando o sensor ótico ativo na frente e o sensor de presença entre os pneus do rodado dianteiro

Fonte: Autor (2010)

Para acondicionar o coletor de dados foi adaptada uma caixa plástica para evitar o seu contato direto com o ambiente, protegendo-o contra poeira, calor, vibrações e umidade, decorrentes do trabalho de campo.

Os dados foram coletados simultaneamente, com os dois sensores instalados no trator, na operação de “quebra-lombo”, com velocidade média de $1,66 \text{ m s}^{-1}$, usual para essa operação.

Na primeira etapa de coleta de dados no ensaio de campo as leituras foram realizadas com os sensores nas fileiras de cana-de-açúcar em campo foram de forma alternada. Para o levantamento manual de falhas utilizou-se a média das quatro fileiras amostradas, sendo que os sensores somente mediram 50% da amostra.

Os experimentos foram conduzidos em áreas da Usina Iracema, Iracemápolis, SP. Nessa etapa foram contempladas condições reais de campo, em fileiras de cana-de-açúcar, com a idade entre 90 e 120 dias (cana planta), com espaçamento de 1,5 m

entre fileiras. As leituras foram realizadas concomitantemente com a operação de “quebra lombo” (nivelamento entre fileiras), visando testar a sua exequibilidade para possível aproveitamento, sem demandar uma operação específica.

Procedeu-se o contorno dos talhões, determinação da grade amostral (parcelas virtuais) com densidade amostral de quatro amostras por hectare, e navegação aos pontos utilizando um PDA (Pocket PC Ipaq 3600, Palo Alto, California, EUA), equipado com o software Farm Site Mate (FarmWorks Software, Hamilton, Indiana, EUA), para navegação em campo, conectado a um receptor de GPS AG 132 (Trimble, Sunnyvale, California, EUA).

Alocadas as parcelas virtuais, foi realizado um levantamento manual em cada parcela, composta de quatro fileiras de cana, com 6 m de comprimento. Seguiu-se o método proposto por Stolf (1986) que consiste em contar e computar a somatória do comprimento de falha acima de 0,5 m em cada fileira utilizando uma trena, tendo um índice em porcentagem de falhas.

Os dados do sensor de presença foram analisados pela distribuição de frequência de intervalos sem obstáculos, presumivelmente plantas. A estimativa de falhas por meio das leituras do sensor de presença foi realizada em fileiras alternadas de cana-de-açúcar, pois os sensores estavam embarcados em trator que executava a operação de “quebra lombo”, e assim coletavam dados da fileira de cana que ficava sob o trator.

Os dados obtidos com o sensor ótico ativo foram submetidos à análise estatística descritiva para todos os índices de refletância: VIS, IVP, RVI e NDVI e analisou-se as frequências de ocorrência desses índices visando escolher um como o melhor indicador de ausência de vegetação.

Os valores de falhas já calculados em cada parcela e obtidos a partir dos três métodos foram extraídos utilizando um Sistema de Informação Geográfica (SSToolBox®, SST Software, Stillwater, OK, EUA). Para tanto foram delimitadas graficamente as parcelas e recortados os pontos internos referentes a cada sensor. Os dados foram submetidos à análise de variância, para analisar a diferença entre os métodos utilizados na mensuração de falhas e as médias do percentual de falhas

avaliadas em cada parcela foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Com a obtenção das falhas com cada sistema de mensuração, foram obtidos os mapas de pontos georreferenciados do início destas.

Após a consolidação do procedimento de coleta e análise dos dados integrados entre os dois tipos de sensores e sua confrontação com os dados de mensuração manual de falhas foram realizadas coletas de dados de forma semelhante em mais duas áreas de cana planta da Usina Iracema (Iracemapolis, SP), visando à comparação e a possível validação dos métodos de mensuração de falhas. Para tanto foram utilizadas duas lavouras, uma com 5,9 ha (área 01) e com 24 parcelas virtuais alocadas e outra com 6,4 ha (área 02) e 26 parcelas virtuais alocadas, da mesma forma que na primeira etapa.

Nessa etapa realizou-se uma calibração prévia para adequar o sensor ótico ativo às condições da lavoura. Para tanto foram realizadas leituras por dois minutos sobre solo e em presença de plantas de cana-de-açúcar. A partir dessas leituras foi possível analisar e estabelecer valores representativos dos alvos de solo e plantas por meio dos índices de refletância obtidos pelo sensor ótico ativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de validação do sensor de presença

Na (Figura 5) observa-se o arranjo do ensaio experimental sob condições controladas para a calibração inicial do método com sensor de presença. Este ensaio foi realizado na USP/ESALQ, nas dependências do Departamento de Engenharia de Biossistemas.

Figura 5 – Arranjo dos obstáculos de madeira dispostos em fileiras para simular plantas de cana-de-açúcar

Fonte: Autor (2010)

Em testes preliminares realizados em laboratório foi constatado que o sistema sensor de presença tem uma frequência de coleta de dados de até quatro leituras por segundo e a distância mínima de mensuração de distâncias entre estacas foi a partir de 5 pulsos, correspondente, nesse caso, a 0,07 m. Entretanto, um acréscimo de pulsos pode vir a ocorrer na coleta de dados em campo, em função do sensor de deslocamento utilizado, sensível à patinação que pode ocorrer na roda dianteira onde o encoder está instalado.

Na Tabela 1 é apresentada a estatística descritiva das distâncias entre estacas mensuradas e na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise de variância da exatidão das leituras do sensor de presença em função de três espessuras de estacas (0,05, 0,10 e 0,20 m), seis distâncias entre estacas (0,10; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00 m) e três velocidades de deslocamento (1,3, 1,8 e 3,0 m s⁻¹).

Os resultados apresentaram baixo coeficiente de variação (1,1%), indicando boa acurácia experimental. Os fatores espessuras de estacas (E), distâncias entre estacas (D) e velocidades de deslocamento (V) influenciaram na acurácia da leitura do sensor de presença, visto que demonstraram efeitos significativos pelo teste F ($p < 0,01$). Ainda na Tabela 2 observam-se efeitos significativos para a maioria das interações possíveis entre os três fatores, exceto para interação E x V, a qual foi não significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Assim, pode-se inferir que as leituras do sensor de presença apresentaram comportamentos semelhantes independentemente das velocidades de deslocamento e das espessuras das estacas.

A significância da interação E x D mostra a ocorrência de um comportamento diferencial na acurácia da leitura das espessuras de estacas nas diferentes distâncias entre estacas, ou seja, a espessura de 0,05 m pode ter proporcionado a maior acurácia de leitura na distância de 0,10 m entre estacas, no entanto, não apresentaram a maior exatidão de leitura sob outras distâncias. Isso é válido para a interação D x V que também foi significativa pelo teste F ($p < 0,05$), indicando que as velocidades de deslocamento não apresentaram a mesma acurácia de leitura nas diferentes distâncias entre estacas. Já a significância da interação tripla (E x D x V) indicou que a distância entre estacas apresentou um comportamento diferenciado na leitura do sensor de presença sob diferentes espessuras de estacas e velocidades de deslocamento.

Tabela 1 – Estatística descritiva das leituras de distâncias entre estacas, do ensaio de validação do sensor de presença

(continua)

Vel. (m.s ⁻¹)	Distâncias entre estacas (m)					
	Observada					
	Real	Média das leituras	Desvio Padrão	CV	Mínimo	Máximo
	Estacas 0,05 (m)					
1,22	0,10	0,08	0,01	8,21	0,07	0,09
	0,20	0,18	0,01	3,75	0,17	0,19
	0,40	0,38	0,01	1,81	0,37	0,39
	0,60	0,58	0,01	1,90	0,57	0,60
	0,80	0,78	0,01	1,25	0,76	0,80
	1,00	0,98	0,01	0,85	0,96	0,99
1,76	0,10	0,07	0,01	10,91	0,06	0,09
	0,20	0,17	0,01	5,08	0,16	0,19
	0,40	0,38	0,01	1,84	0,37	0,39
	0,60	0,57	0,01	1,79	0,54	0,59
	0,80	0,78	0,01	1,90	0,76	0,82
	1,00	0,98	0,02	1,85	0,95	1,00
2,78	0,10	0,07	0,01	11,88	0,06	0,09
	0,20	0,17	0,01	5,69	0,16	0,19
	0,40	0,38	0,01	2,86	0,36	0,39
	0,60	0,56	0,01	1,76	0,54	0,57
	0,80	0,77	0,01	1,85	0,75	0,80
	1,00	0,97	0,02	2,23	0,92	1,00
	Estacas 0,10 (m)					
1,29	0,10	0,08	0,01	9,20	0,07	0,09
	0,20	0,18	0,01	4,05	0,17	0,19
	0,40	0,38	0,01	3,22	0,36	0,40
	0,60	0,59	0,01	1,65	0,57	0,62
	0,80	0,78	0,01	1,69	0,76	0,80
	1,00	0,97	0,02	1,71	0,95	1,00

Tabela 1 – Estatística descritiva das leituras de distâncias entre estacas, do ensaio de validação do sensor de presença

(conclusão)

Vel. (m.s ⁻¹)	Distâncias entre estacas (m)					
	Observada					
	Real	Média	Desvio Padrão	CV	Mínimo	Máximo
Estacas 0,10 (m)						
1,87	0,10	0,07	0,00	6,86	0,06	0,09
	0,20	0,17	0,01	6,39	0,16	0,19
	0,40	0,37	0,01	2,28	0,36	0,39
	0,60	0,59	0,01	2,36	0,56	0,60
	0,80	0,78	0,01	1,23	0,76	0,79
	1,00	0,97	0,01	1,34	0,95	0,99
2,97	0,10	0,07	0,01	16,80	0,06	0,09
	0,20	0,17	0,01	6,01	0,16	0,19
	0,40	0,37	0,01	3,07	0,34	0,39
	0,60	0,59	0,01	1,73	0,57	0,60
	0,80	0,77	0,01	1,34	0,76	0,79
	1,00	0,97	0,01	1,14	0,95	0,99
Estacas 0,20 (m)						
1,31	0,10	0,08	0,01	11,31	0,07	0,10
	0,20	0,18	0,01	4,11	0,17	0,19
	0,40	0,38	0,01	2,79	0,36	0,39
	0,60	0,58	0,01	1,41	0,57	0,60
	0,80	0,79	0,01	1,39	0,77	0,80
	1,00	0,98	0,01	1,52	0,96	1,00
1,89	0,10	0,07	0,01	10,50	0,06	0,09
	0,20	0,18	0,01	5,53	0,17	0,20
	0,40	0,37	0,01	1,87	0,36	0,39
	0,60	0,58	0,01	1,52	0,56	0,59
	0,80	0,79	0,02	2,00	0,76	0,82
	1,00	0,98	0,01	1,51	0,96	1,02
3,04	0,10	0,07	0,01	9,64	0,06	0,09
	0,20	0,17	0,01	5,88	0,16	0,19
	0,40	0,37	0,01	2,92	0,36	0,39
	0,60	0,57	0,01	2,26	0,54	0,60
	0,80	0,78	0,01	1,82	0,76	0,80
	1,00	0,97	0,02	1,82	0,95	1,00

Tabela 2 – Análise de variância da exatidão na leitura do sensor de presença testada com três espessuras de estacas (m), seis distâncias entre estacas (m) e três velocidades de deslocamento (m s^{-1})

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Quadrados Médios
		Exatidão (m)
Repetições	5	0,000028
Estacas (E)	2	0,00019**
Distâncias entre Estacas (D)	5	6,6185**
Velocidade (V)	2	0,0025**
E x D	10	0,00043**
E x V	4	0,000053
D x V	10	0,000060*
E x D x V	20	0,000055**
Resíduo	265	0,000028
Média Geral		0,49
CV (%)		1,1

** Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

As distâncias entre estacas mensuradas (Tabela 1) apresentaram tendências de valores menores em relação aos valores de distâncias reais entre estacas, oscilando de 0,01 m a 0,03 m, provavelmente devido à influência do tempo de resposta do sistema para realizar as leituras de distâncias entre estacas. No entanto esses valores de diferença não são considerados expressivos para o objetivo para o qual o sistema está sendo proposto. Os erros nas leituras de espaços sem obstáculos (presumivelmente plantas), se considerado o espaçamento mínimo para falhas de 0,5 m, representam desvios da ordem de 2 % a 6%.

Na primeira avaliação de campo utilizou-se de uma pequena lavoura com fileiras de cana-de-açúcar em torno de 90 dias após o plantio, com espaçamento de 1,5 m entre fileiras. A cultura apresentava, nas seis fileiras, altura média de 0,4 m. Na Figura 6 são apresentadas as frequências de ausência

de obstáculos (plantas) em intervalos pré-determinados mensurados pelo sensor de presença, nas seis fileiras de cana-de-açúcar, considerando-se intervalos a partir de 0,5 m de ausência de plantas. Observou-se que a partir dessa técnica é possível se obter não só uma totalização de falhas, mas a frequência de ocorrência dessas falhas e de sua extensão na fileira. Nota-se que há uma variação maior da ocorrência de falhas no intervalo de 1,0 e 1,5 m, de comprimento, nas fileiras 1,2 e 6. Já nas fileiras 3, 4 e 5 a maior frequência de ocorrência de falhas foi observada no intervalo entre 0,5 a 1,0 m.

Figura 6 – Distâncias e frequência de ausência de plantas mensuradas pelo sensor de presença, nas seis fileiras de cana-de-açúcar

Na Tabela 3 é apresentada a síntese da estatística descritiva das falhas mensuradas com o sistema sensor de presença nas seis fileiras de cana-de-açúcar.

Tabela 3 – Estatística descritiva das falhas mensuradas por fileira no ensaio inicial em campo

Número da fileira	Falhas (m)			
	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Máximo
1	1,1	0,5	49,4	2,4
2	1,0	0,7	72,6	2,9
3	0,7	0,3	38,3	1,1
4	0,6	0,2	34,3	1,2
5	0,5	0,1	23,8	1,0
6	1,2	0,7	63,2	2,9

Na Tabela 4 são apresentados os valores das falhas totais obtidas com o levantamento manual e aquelas obtidas pelo sistema sensor de presença. Observa-se que os valores acumulados de falhas obtidos a partir das leituras do sistema sensor de presença aproximaram-se aos valores mensurados com o levantamento manual de falhas.

Tabela 4 – Estimativa do percentual de falhas por fileira, obtidos com levantamento manual e com sensor de presença

Número da fileira	Falhas (%)	
	Levantamento manual	Sensor de presença
1	41,3	41,7
2	46,3	52,0
3	23,8	22,7
4	31,3	27,0
5	26,2	22,5
6	46,3	57,0

Com os resultados obtidos nesta etapa comprovou-se que o sistema com sensor de presença poderia ser experimentado em lavouras e sob condições normais de campo, assim foi dada sequência à avaliação em lavouras comerciais.

4.2 Ensaios de campo iniciais com os dois sensores

Procedeu-se um primeiro ensaio sob condições de campo em uma lavoura de 4,9 ha, localizada no município de Rio Claro, SP, em agosto de 2010, em torno de 100 dias após o plantio, com espaçamento de 1,5 m entre fileiras.

Foram utilizados os dois sistemas sensores, de presença e ótico ativo. Os índices de refletância mensurados pelo sensor ótico ativo (VIS, IVP, RVI e NDVI), inicialmente foram utilizados para uma análise estatística descritiva sintetizada na Tabela 5.

Tabela 5 - Estatística descritiva dos dados obtidos com o sensor ótico ativo

	Média	Des. Padrão	CV%	Mínimo	Máximo
NDVI	0,438	0,077	17,66	0,153	0,732
IVP	0,165	0,027	16,33	0,085	0,332
VIS	0,063	0,007	10,50	0,035	0,206
RVI	0,392	0,077	19,621	0,155	0,735

Os valores do coeficiente de variação (CV) mostraram diferenças entre os índices de refletância estimados pelo sensor ótico ativo. Os baixos valores dos desvios padrão apresentados pelas leituras do sensor ótico, para todos os índices, indicou comportamento semelhante dos valores estimados, embora os valores absolutos sejam diferentes. Esse fato é de certa forma esperado, uma vez que são relacionados à presença ou ausência de biomassa refletindo a luz incidente.

As distribuições de frequência dos valores de índices de refletância estão apresentadas nos gráficos da Figura 7. O comportamento dos índices estimados pelo

sensor ótico ativo foram, de certa forma distintos; já o comportamento do NDVI foi semelhante ao observado por Frasson et al. (2007), ao concluir que o desenvolvimento vegetativo das plantas pode causar interferência no comportamento do NDVI obtido com o sensor ótico ativo.

Figura 7 – Frequência de distribuição dos índices de refletância VIS, IVP, RVI e NDVI mensuradas pelo sensor ótico ativo em uma lavoura de 4,9 ha

A partir da análise estatística e observação no comportamento comparativo da frequência dos valores de VIS, IVP, RVI e NDVI, definiu-se por utilizar os valores de NDVI para representar as falhas nas parcelas, mas não estariam descartados os demais índice, especialmente o RVI, que é composto pelos mesmos índices simples (VIS e IVP).

Inicialmente estabeleceram-se valores de NDVI menores ou iguais a 0,350 que representaria a ausência de vegetação para o sensor ótico ativo, com base em valores mensurados em solo e plantas de cana-de-açúcar.

Calcularam-se as distâncias com ausência de vegetação a partir dos dados do sensor ótico e das ausências de obstáculos a partir dos dados do sensor de presença, representados como pontos de ocorrências de falhas (Figura 8), além das parcelas demarcadas em campo. Os pontos georreferenciados se apresentam com relativo alinhamento, pois são vinculados às fileiras de cana-de-açúcar.

Figura 8 – Pontos de ocorrência de falhas gerados em uma lavoura de cana-de-açúcar plantada de 90 a 100 dias pelo sistema sensor de presença (a), com o sensor de NDVI (b) e as parcelas amostrais alocadas (c)

A partir das leituras e mensurações de falhas, com os três métodos dentro de cada parcela obteve-se as falhas apresentadas na Tabela 6. O valor médio das falhas totalizadas em cada parcela, obtido pelo sensor de presença diferiu estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade daqueles obtidos pelo sensor ótico, porém ambos não diferiram daqueles obtidos pela leitura manual. Observa-se a tendência das magnitudes de falhas mensuradas serem semelhantes entre os métodos. No entanto, na parcela 8, por exemplo, o valor obtido pelo sensor de presença foi 17,8 % superior

ao valor obtido com o levantamento manual. Da mesma forma, o sensor ótico ativo apresentou valores superiores a 15% em algumas parcelas se comparados aos obtidos com o levantamento manual.

Tabela 6 – Porcentagem de falhas identificadas pelos três métodos (leitura manual, sensor de presença e sensor ótico) nas parcelas demarcadas em campo

Parcelas	Falhas por parcela (%)		
	Manual	Sensor de presença	Sensor ótico
1	25,1	26,7	19,9
2	28,2	32,6	33,0
3	24,4	30,5	29,7
4	28,0	30,7	41,1
5	32,9	27,5	49,1
6	27,6	27,3	22,3
7	18,0	22,7	20,9
8	31,6	49,4	48,1
9	24,4	20,4	20,4
10	32,2	38,0	25,9
11	21,7	23,1	14,4
12	19,6	27,4	16,5
13	30,6	41,8	19,7
14	20,1	30,8	23,1
15	22,7	34,8	16,0
16	33,3	37,0	11,2
17	29,5	31,2	15,4
18	16,9	19,0	19,9
19	11,8	8,7	19,7
20	32,6	37,8	30,0
¹ Média	25,6 AB	29,9 A	24,8 B
Mínimo	11,8	8,7	11,2
Máximo	33,3	49,4	49,1
Desvio Padrão	6,1	8,9	10,7
CV (%)	24,0	29,9	43,3

¹Letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Tabela 7 são apresentados os quadrados médios, as respectivas significâncias pelo teste F e coeficientes de variação experimental das análises de falhas (%) nos tratamentos com o levantamento manual, sensor de presença e sensor ótico.

Tabela 7 – Análise de variância dos métodos da pesquisa (levantamento manual, sensor de presença e sensor ótico) na mensuração de falhas em fileiras de cana-de-açúcar

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Quadrados Médios
		(% Falhas)
Parcelas	19	145,8**
Tratamentos	2	149,1*
Resíduo	38	43,6
CV do experimento (%)		24,6

** Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Os quadrados médios dos tratamentos foram significativos a 5% de probabilidade, mostrando diferenças entre eles na mensuração da porcentagem de falhas; já para as parcelas o efeito foi altamente significativo (1%), indicando maior diferença nas leituras entre parcelas, caracterizando variabilidade na ocorrência de falhas ao longo da lavoura.

As metodologias utilizadas na pesquisa para a mensuração de falhas (manual, sensor ótico e sensor de presença) utilizam critérios um tanto distintos e, portanto comparáveis apenas até determinado nível de resolução. O sensor de NDVI tem resultados dependentes da folhagem das plantas, visto que sua mensuração é panorâmica. Já o sensor de presença mede a interrupção de luz causada por supostas plantas na perpendicular ao seu deslocamento e a aproximadamente 0,3 m de altura a partir do solo. O método usual mede essas falhas a partir da identificação visual do executor, porém com sérias limitações de intensidade de mensuração e do seu georreferenciamento. Nessa etapa o valor mínimo de distância com ausência de plantas

mensurado pelo sensor de presença foi de 0,57 m, devido à configuração do programa de coleta dos dados.

Na Figura 9 são apresentados os pontos considerados como falhas no talhão experimental, para os dois sensores, de presença (a) e ótico (b). Desta forma pode-se visualizar a localização do ponto de início da ocorrência de falhas detectadas pelos sistemas sensores e a classificação destas como percentuais locais de falhas diferenciados por cores.

Figura 9 – Pontos de início da ocorrência de falhas e sua classificação expressa como percentual local de falhas detectadas em uma lavoura de cana-de-açúcar plantada de 90 a 100 dias pelo sistema sensor de presença (a) e com o sensor de ótico (b)

Observa-se em ambos a maior ocorrência de pontos de 0-25 e 25-50 % de falhas. Os dados referentes ao sensor de presença (Figura 9 a) demonstram a sua maior densidade de pontos se comparado com aqueles obtidos com o sensor ótico, indicando que o sistema sensor de presença tem a evidente capacidade de coleta de

dados com maior resolução em relação ao sensor ótico ativo. No entanto a utilidade e as peculiaridades dessas diferenças como informação aos gestores ainda carecem de investigação.

4.2.1 Ensaio de campo para validação

Os dados obtidos pelo sensor de presença apresentavam valores de distâncias nulas entre ponto que foram removidos e os valores foram analisados em duas áreas. No gráfico da Figura 10 é apresentada a distribuição de frequência de intervalos com ausência de plantas detectada pelo sensor em função de intervalos pré-determinados de 0,1 m até 1,0 m e depois em intervalos de 0,5 m.

Figura 10 – Frequência de ausência de obstáculos (plantas) em intervalos pré-determinados mensuradas pelo sensor de presença, nas áreas 1 e 2

Verifica-se um comportamento semelhante no que se refere ao intervalo de ausência de obstáculos para as duas áreas avaliadas, sendo a maior frequência observada nos intervalos de 0,1 a 0,2 m. A partir desse intervalo observa-se um decréscimo contínuo na ocorrência de ausência de obstáculos até o intervalo 0,8 a 0,9 m, com leve acréscimo na frequência no intervalo de 0,9 a 1,0 m. A partir de 2,0 m de intervalo observa-se pequena incidência de ausência de obstáculos em ambas as áreas.

Optou-se por manter o limite inferior para definir espaços com ausência de obstáculos representando falhas em 0,5 m (Stolf, 1986). Deste modo foram removidos os espaços vazios inferiores a 0,5 m e obteve-se a população de espaços com ausência de obstáculos considerados como falhas. Assim a distribuição de frequência representada na Figura 11 inclui apenas os espaços falhos que indicam a ausência de plantas.

a)

b)

Figura 11 – Distribuição de frequência de falhas consideradas a partir de 0,5 m mensuradas pelo sensor de presença, nas áreas 1 e 2

Observa-se, para ambas as áreas, que o pico na frequência de falhas ocorreu no intervalo de 0,5 a 1,0 m e com redução gradativa a partir de então. A área 1 apresentou maior concentração de falhas nesse intervalo, com frequência de 63 %, enquanto na área 2 essa frequência foi de 51% do total das falhas mensuradas.

Os índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI) estimados e obtidos com o sensor ótico ativo por dois minutos sobre solo e em presença de planta de cana-de-açúcar, foram utilizados para a análise e definição dos valores representativos dos alvos de solo e plantas (Tabela 8). Entretanto, as duas leituras foram distintas para cada condição de solo, indicando a necessidade de uma calibração dos sensores ativos nas áreas onde serão utilizados.

Tabela 8 - Estatística descritiva dos dados obtidos com o sensor ótico ativo no procedimento de caracterização dos alvos ao longo de 2 minutos de coleta

	Média	Des. Padrão	CV %	Mínimo	Máximo
Área 1 - Solo					
NDVI	0,147	0,006	3,88	0,136	0,167
IVP	0,177	0,009	4,88	0,162	0,194
VIS	0,132	0,007	5,24	0,120	0,145
RVI	0,741	0,009	1,19	0,713	0,761
Área 1 - Plantas de cana-de-açúcar					
NDVI	0,590	0,021	3,59	0,547	0,624
IVP	0,361	0,049	13,56	0,277	0,446
VIS	0,092	0,008	8,62	0,078	0,108
RVI	0,256	0,017	6,51	0,230	0,293
Área 2 - Solo					
NDVI	0,150	0,007	4,45	0,144	0,212
IVP	0,414	0,011	2,64	0,402	0,509
VIS	0,306	0,005	1,73	0,293	0,330
RVI	0,738	0,010	1,33	0,648	0,746
Área 2 - Plantas de cana-de-açúcar					
NDVI	0,609	0,007	1,11	0,594	0,622
IVP	0,727	0,121	16,70	0,502	0,993
VIS	0,176	0,030	16,81	0,121	0,250
RVI	0,243	0,005	2,18	0,232	0,254

A influência das diferenças causadas pelo estado de crescimento das plantas e as condições do solo, para ambas as área, refletem nos valores dos índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI) e podem ser observadas quando se analisa o comportamento das médias dos valores de NDVI em planta de cana-de-açúcar, sendo

0,590 na área 1 e 0,609 na área 2. Já as médias obtidas tendo o solo como alvo foram semelhantes, 0,147 na área 1 e 0,150 na área 2.

Os valores do CV dos indicadores tiveram comportamentos semelhantes entre as duas áreas, porém o IVP apresentou valores maiores em alvo de plantas de cana-de-açúcar. A partir dessa análise foi possível uma melhor caracterização dos alvos estudados (solo e plantas), e deste modo definiram-se valores dos índices de refletância representativos de falhas de plantio. Utilizou-se o valor de NDVI como filtro, para área 1, menor ou igual a 0,380 e para a área 2, valor de NDVI menor ou igual a 0,400.

As distribuições de frequência dos valores dos índices de refletância (VIS, IVP, RVI e NDVI) estimados pelo sensor ótico ativo estão apresentadas nos gráficos da Figura 12 para as duas áreas. O comportamento dos valores mensurados nas duas áreas foi distinto indicando que particularidades do estado da lavoura interferem nos valores estimados pelo sensor. Frasson et al. (2007) ao estudar comportamento temporal do NDVI mensurado com sensor ótico ativo, também verificaram diferenças nas leituras do índice devido às particularidades do estado da lavoura (diferentes variedades e épocas de avaliação).

Os índices de refletância foram maiores para a área 2, que apresentou os maiores valores de leituras para os quatros índices mesurados separadamente (Figura 12). Esse acréscimo nas mensurações provavelmente ocorreu devido à maior quantidade de massa verde, o que provocou o aumento dos valores estimados com o sensor ótico ativo. Esse fato é por demais conhecido e foi relatado, por exemplo, por Hatfield et al. (2008) ao estudar a aplicação do sensoriamento remoto espectral e refletância para analisar medidas agronômicas, mostrando que as diferentes quantidades de massa verde proporcionam índices refletância desiguais.

Figura 12 – Distribuições de frequências dos índices de refletância VIS, IVP, RVI e NDVI mensurados pelo sensor ótico ativo para as áreas 1 e 2

Na Figura 13 são apresentadas as localizações das parcelas demarcadas em campo nas áreas experimentais 1 e 2.

Figura 13 – Área 1 (a) e área 2 (b), e as parcelas amostrais alocadas

A partir das leituras e mensurações de falhas com os três métodos dentro de cada parcela obteve-se os valores de falhas para a área 1 (Tabela 9) e para a área 2 (Tabela 10).

Tabela 9 – Porcentagem de falhas identificadas pelos três métodos (leitura manual, sensor de presença e sensor ótico) nas parcelas demarcadas em campo, avaliadas na área 1

Parcelas	Falhas identificadas nas parcelas (%)		
	Manual	Sensor de presença	Sensor ótico
1	31,4	32,2	0,0
2	18,8	17,3	0,0
3	29,3	28,0	9,5
4	21,1	19,7	11,8
5	25,0	22,0	24,0
6	26,2	25,6	24,5
7	21,5	18,5	37,6
8	11,0	13,0	34,9
9	15,3	16,9	61,8
10	34,8	34,5	25,3
11	16,4	15,5	5,2
12	19,0	24,8	24,3
13	52,1	55,0	61,3
14	15,1	14,0	0,0
15	38,1	24,8	25,5
16	28,8	32,4	76,9
17	24,0	19,4	24,5
18	29,6	19,7	0,0
19	46,1	35,4	22,7
20	28,7	23,4	57,3
21	24,9	22,50	25,9
22	36,0	24,5	0,0
23	17,1	15,7	0,0
24	30,0	21,2	0,0
¹ Média	26,7 A	24,0 A	23,0 A
Mínimo	11,0	13,0	0,0
Máximo	52,1	55,0	76,9
Desvio Padrão	9,9	9,3	22,6
CV (%)	37,2	38,8	98,2

¹Letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 10 – Porcentagem de falhas identificadas pelos três métodos (leitura manual, sensor de presença e sensor ótico) nas parcelas demarcadas em campo, avaliadas na área 2

Parcelas	Falhas identificadas nas parcelas (%)		
	Manual	Sensor de presença	Sensor ótico
1	18,0	16,8	7,5
2	33,0	29,8	22,0
3	31,1	24,6	24,9
4	31,8	25,0	10,5
5	46,3	45,8	12,3
6	53,7	38,1	33,5
7	43,9	47,5	12,3
8	36,3	29,1	22,3
9	39,0	33,0	36,8
10	33,2	33,5	32,8
11	41,8	37,4	12,3
12	32,7	28,0	19,3
13	20,5	20,1	0,0
14	21,0	23,8	12,0
15	22,0	19,3	21,0
16	44,3	34,7	35,1
17	35,1	26,6	59,5
18	37,6	33,8	35,5
19	15,0	10,2	0,0
20	29,6	27,6	0,0
21	32,2	25,3	33,9
22	26,0	18,5	23,3
23	28,1	26,9	0,0
24	23,0	15,7	10,8
25	15,6	11,3	0,0
26	52,0	44,9	0,0
¹ Média	32,4 A	28,0 A	18,4 B
Mínimo	15,0	10,2	0,0
Máximo	53,7	47,5	59,5
Desvio Padrão	10,6	9,9	15,2
CV (%)	32,7	35,5	82,9

¹Letras iguais não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Tabela 11 são apresentados os quadrados médios, as respectivas significâncias pelo teste F e coeficientes de variação experimental das análises de falhas (%) nos tratamentos com o levantamento manual, sensor de presença e sensor ótico para ambas as áreas.

Tabela 11 – Análise de variância dos métodos da pesquisa (levantamento manual, sensor de presença e sensor ótico) na mensuração de falhas em fileiras de cana-de-açúcar, nas áreas 1 e 2

Área 1		
Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Quadrados Médios (% Falhas)
Parcelas	23	362,0*
Tratamentos	2	85,1 ^{ns}
Resíduo	46	165,7
CV (%)	52,4	
Área 2		
Parcelas	25	274,8**
Tratamentos	2	1339,8**
Resíduo	50	84,1
CV (%)	34,9	

** Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{ns} Não significativo pelo teste F a 5%.

As análises estatísticas mostraram que, com base nos valores obtidos pelas amostras dentro das parcelas, os três métodos de mensuração de falhas estudados (método manual, sensor de presença e sensor ótico ativo) podem substituir um ao outro, para na área 01. Já na área 02 as análises mostraram que os dados obtidos com o sensor ótico ativo não corresponderam aos demais métodos. A razão provavelmente está na menor densidade de pontos considerados como falhas, obtidos

por este. O GPS utilizado foi o fator limitante, sendo possível a utilização de um receptor com maior frequência, o que não foi testado por não estar este disponível.

As comparações realizadas nas parcelas em ambas as áreas, entre o sensor de presença e o levantamento manual, que por sua vez, é a maneira atualmente utilizada nas usinas na estimativa do percentual de falhas não diferiram estatisticamente. O sensor de presença mensura diretamente os espaços vazios entre plantas, considerados como falhas. Já para o sensor ótico, a interferência das plantas influencia na estimativa de falhas, pois o esse sensor faz a mensuração com fecho de luz incidente vertical, com interferência de folhas dispersas.

A partir das leituras e mensurações de falhas com o sensor de presença e sensor ótico ativo, obteve-se a localização do início e a classificação do percentual local de falhas, distribuídas nos mapas referentes às áreas 1 (Figura 14) e 2 (Figura 15).

Figura 14 – Pontos de início de ocorrência de falhas e sua classificação expressa como percentual local de falhas detectados na área 1 pelos sistemas sensor de presença (a) e sensor de ótico ativo (b)

Figura 15 – Pontos de início de ocorrência de falhas e sua classificação expressa como percentual local de falhas detectados na área 2 pelos sistemas sensor de presença (a) e sensor de ótico ativo (b)

Para ambos os sensores utilizados os dados foram facilmente georreferenciados com o uso de um receptor de GPS integrado aos coletores de dados. Com isso foi possível a mensuração das falhas e a sua localização nas áreas com densidade de coleta, neste caso, de 50% da área, o que pode ser elevado para área total ao se utilizar um conjunto sensor para cada fileira de plantas. Os dois métodos se mostraram eficientes na determinação de falhas, indicando que podem vir a substituir o método manual hoje usual nas usinas, apresentando maior economia de tempo e mão de obra. No entanto a diferença na densidade e resolução da informação referente à ocorrência de falhas ainda carecem de investigação do ponto de vista gerencial.

3 CONCLUSÕES

A utilização do sistema com sensor de presença desenvolvido para mensurar espaço vazio entre planta de cana-de-açúcar mostrou resultados satisfatórios para estimar falhas, pois os valores obtidos com essa técnica são comparáveis àqueles obtidos com a leitura manual. Os resultados de mensuração de falhas obtidos com o sensor ótico ativo foram comparáveis com as falhas mensuradas manualmente em apenas uma das duas áreas experimentais em que se buscou validar os métodos, sendo que a razão está provavelmente na menor densidade de pontos coletados se comparado com o sensor de presença. Entretanto o GPS utilizado foi o fator limitante, o que sugere a utilização de um receptor com maior frequência.

Os dois métodos permitem o georreferenciamento das mensurações, o que permite a obtenção do mapa de falhas, oferecendo ao usuário a informação sobre as ocorrências e as suas localizações, agilizando assim a coleta de dados em maior densidade do que nas leituras manuais hoje utilizadas.

REFERÊNCIAS

ALFONSI, R.R.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 42-55.

AUTONICS. Sensores e Controladores. **Sensor de presença do modelo BA2M-DDT**. Disponível em: <www.autonics.com.br>. Acesso em: 16 nov. 2010.

AZIZ, S.A.; STEWARD, B.L.; BIRREL, S.J. **Ultrasonic sensing for corn plant canopy characterization**. Ottawa: ASAE, 2004. p. 22-25. (ASAE Paper, 041120).

BACCI, L.; DE VINCENZI, M.; RAPI, B.; ARCA, B.; BENINCASA, F. Two methods for the analysis of colorimetric components applied to plant stress monitoring. **Computers and Electronics Agriculture**, Oxford, v. 19, n. 8, p. 167-186, 1998.

BASTOS, S.A. **Cana-de-açúcar, o verde mar de energia**. São Paulo: Icone, 1987. 127 p.

BERKA, L.M.S.; RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 433-440, 2003.

BIRRELL, S.; SUDDUTH, K.A. **Corn population sensor for precision farming**. St. Joseph: Editora, 1995. 12 p. (ASAE Paper, 95-1334).

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G.E.; WATER-SHEA, E.A. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 1-5, 1996.

BLANCH, M.; LEGAZ, M.E.; VICENTE, C. Xanthan production by *Xanthomonas albilineans* infecting sugarcane stalks. **Jornal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 165, n. 4, p. 366-374, 2008.

BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, n. 9, p.103-121, 2006.

CAMPBELL C.L.; MADDEN, L.V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: John Wiley, 1990. 532p.

CARLIN, S.D.; SILVA, M.A.; PERECIN, D. Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, n. 296, p. 457-466, 2004.

COLETI, J.T.; STUPIELLO, J.J.; Plantio da cana-de-açúcar. In. SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualizações em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. cap. 4, p. 237-244.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar**: Safra 2010/2011, primeiro levantamento, janeiro de 2011. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/4a7c6ac74f1a96b2d636d58f0a003879..pd>>. Acesso em: 25 jan. 2011.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Relação entre o índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 8, 1399-1405, 1998.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; LAUSCHNER, M.H.; MELO, R.W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 399-403, 2001.

FORTES, C.; DEMATTÊ, J.A.M. Discrimination of sugar cane varieties through spectral data of ETM Landsat 7. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v.27, p. 1395-1412, 2006.

FRASSON, F.R.; MOLIN, J.P.; SALVI, J.V.; POVH, F.P.; GARCIA, M.A.L. Utilização de sensor ótico ativo no diagnóstico de falhas de plantio em cana-de-açúcar. STAB : acucar, alcool e subprodutos, Piracicaba, v. 26, p. 34-37, 2007.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, n. 1/2, p. 62-68, jan. 1997.

GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I.; PIZARRO, M.A. An adequate band positioning to enhance NDVI constrasts among green vegetation, senescent biomass, and tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 21, n. 9, p. 1953-1960, 2000.

GALVÃO, L.S.; FORMAGGIO, A.R.; TISOT, D.A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, n. 4, p. 523-534, 2005.

GUYER, D.E.; MILES, G.E.; SCHREIBER, M.M.; MITCHELL, O.R.; VANDERBILT, V.C. Machine vision and image processing for plant identification. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 29, n. 6, p. 1500-1507, 1986.

HABOUDANE, D.; MILLER, J.R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P.J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 81, n. 7, p. 416-426, 2002.

- HATFIELD, J.L.; GITELSON, A.A.; SCHEPERS, J.S.; WALTHALL, C.L. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, n 8, p. s117-s131, 2008.
- HUETE, A.R. Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. In: ASRAR, G. (Ed.). **Theory and application of optical remote sensing**. New York: Wiley Interscience, 1989. p. 107-141.
- JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 185-200, Dec. 1991.
- JANINI, D.A.; RIPOLI, T.C.C.; CEBIN, G. Análise operacional e econômica do sistema de plantio mecanizado de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). STAB : açúcar, álcool e subprodutos, Piracicaba, v. 26, p. 51-57, 2008.
- JIA, J.; KRUTZ, G.W. Location of the maize plant with machine vision. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 52, n 17, p. 169-181, 1992.
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, Washington, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.
- JORGE, L.A.C.; TRINDADE JUNIOR, O. **Metodologia para utilização de aeromodelos em monitoramento aéreo**. São Carlos: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2002. (Circular Técnica, 15).
- KATAOKA, T.; OKAMOTO, H.; KANEKO, T.; HATA, S. **Performance of crop height sensing using ultra sonic sensor and laser beam sensor**. Chicago, 2002. p. 42-46. (ASAE Paper, 021184).
- LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Uniderp, 2007. 908 p.
- LUO, R.C.; KAY, M.G. Multisensor integration and fusion in intelligent systems. **IEEE Sensors Journal**, Piscataway, v. 2, n. 2, p. 66-69, apr. 1989.
- LUO, R.C.; YIH, C.C.; SU, K.L. Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions. **IEEE Sensors Journal**, Piscataway, v. 2, n. 2, p. 23-27, apr. 2002.
- MARTÍ, S.P.; POLO, J.R.; MOYA, E.G.; MONTEROLA, L.V.; AGUSTÍ, E.A. Optimizing pesticide spray application in tree crops. Portland, 2006. (**SAE Paper**, 061128).
- McNAIRN, H.; DEGUISE, J.C.; PACHECO, A.; SHANG, J.; RABE, N.; Estimation of crop cover and chlorophyll from hyperspectral remote sensing. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 23., 2001, Quebec. **Proceedings ...** Ontario: Canadian Aeronautics and Space Institute, 2001. 1 CD-ROM.

MOGES, S.M.; RAUN, W.R.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; JOHNSON, G.V.; SOLIE, J.B. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.27, n. 12, p. 1431-1441, 2004.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão. Parte I: O que é estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 2, p. 97-107, dez. 1997.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 320 p.

MOTOMIYA, A.V. de A.; MOLIN, J.P.; CHIAVEGATO, E.J. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, v. 13, n 12, p. 137-145, 2009.

NAKAMURA, E.F. ; LOUREIRO, A.A. F. ; FRERY, A.C. Information Fusion for Wireless Sensor Networks: Methods, Models, and Classifications. *ACM Computing Surveys*, New York v. 39, p. 9/1-9/55, 2007.

PARK, B.; CHEN, Y.R. Multispectral image co-occurrence matrix analysis for poultry carcasses inspection. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 4, p. 1485-1491, 1996.

PÉREZ, A.J.; LÓPEZ, F.; BENLLOCH, J.V.; CHRISTENSEN, S. Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 25, n. 8, p. 197-212, 2000.

PLATTNER, C.E.; HUMMEL, J.W. Row-crop population sensor for agricultural crops. In: **AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY CONFERENCE**, 1995, Chicago. **Abstracts...** Chicago: ASAE, 1995, p. 25.

POVH, F.P. **Utilização de sensor óptico ativo em culturas de cereais**. 2007. 86 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J.V. Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n 19, p. 1075-1083, 2008.

REGUNATHAN, M.; LEE, W.S. Citrus fruit identification and size determination using machine vision and ultrasonic sensors. 2005. Tampa, Flórida, p. 102-109. (**ASAE Paper**, 053017).

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 26, p. 73-80, 2007.

ROQUE, A.A. de O.; SOUZA, Z.M.; BARBOSA, R.S.; SOUZA, G.S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 7, p. 744-750, jul. 2010.

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, 3., 1973. Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, Goddard Space Flight Center, 1973. v.1, p. 9-317, (NASA SP-351), 1973.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 85, p.73-80, 2007.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Optimized agricultural planning of sugarcane using linear programming. **Revista Investigacion Operacional**, Heidelberg, v. 2, n. 3, p. 136-142, 2010.

SCHRÖDER, J.J.; NEETESON, J.J.; OENEMA, O.; STRUIK, P.C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production. Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 66, n. 14, p. 277-278, 2000.

SCOTFORD, I.M.; MILLER, P.C.H. Estimating tiller density and leaf area index of winter wheat using spectral reflectance and ultrasonic sensing techniques. **Biosystems Engineering**, Towcester, v. 89, n. 4, p. 395-408, 2004.

SCOTFORD, I.M.; MILLER, P.C.H. Vehicle mounted sensors for estimating tiller density and leaf area index (LAI) of winter wheat. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5.,2005, Uppsala. **Anais ...** Uppsala, 2005. p. 201-207.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção em cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livrocere, 2006. 415 p.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.B.; SCHEPERS, J.S.; GITELSON, A.A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**, Madison, v.100, n. 3, p. 571-579, Apr. 2008.

STOLF, R. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, n. 6, p. 22-36, jul./ago.1986.

STOLF, R.; IAIA, A.M.; LEE, T.S.G. Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em soqueiras de cana-de-açúcar. **Alcool e Açúcar**, São Paulo, v. 11, n. 58, p. 12-16, maio/jun.1991.

STOLF, R.; IAIA, A.M.; LEE, T.S.G. Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em cana-planta. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 104, n. 5/6, p. 44-50, 1986.

SUDDUTH, K.A.; DUMMOND, S.T.; WANG, W.W.; KRUMPELMAN, M.J.. Ultrasonic and GPS measurement of combine swath width. St. Joseph, 1998. p. 52-61. (ASAE Paper, 983096).

SUI, R.; WILKERSON, J.B.; WILHELM, L.R.; TOMPKINS, F.D. A microcomputerbased morphometer for bush-type plants. **Computer and Electronics in Agriculture**, Oxford, v. 4, n. 1, p. 43-58. 1989.

TUMBO, S.D.; WAGNER, D.G.; HEINEMANN, P.H. Hyperspectral characteristics of corn plants under different chlorophyll levels. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 45, n. 3, p. 815-823, 2002.

VASCONCELOS, A.C.M.; GARCIA, J.C.; **Cana-de-açúcar**: ambientes de produção. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Piracicaba: **POTAFÓS**, 2005. Encarte técnico. 32 p. (Informações Agronômicas, 110).

VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar**. Piracicaba: POTAFÓS, 2002. 16 p. Encarte técnico. (Informações Agronômicas, 97).

WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Journal of Plant Physiology**, Bethesda, v. 47, p. 656–662, 1971.

WRIGHT, D.L. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. **GIScience and Remote Sensing**, Columbia, v. 41, n. 4, p. 287-300, 2004.

ZAMAN, Q.U.; SALYANI, M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 20, n. 2, p. 173-178. 2004.

ZAMAN, Q.U.; SCHUMANN, A.W.; HOSTLER, H.K. Quantifying sources of error in ultrasonic measurements of citrus orchads. Florida, 2005. (ASAE Paper, 051123).

ZAMAN, Q.U.; SCHUMANN, A.W.; HOSTLER, H.K. Estimation of citrus fruit yield using ultrasonically-sensed tree size. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 22, n. 1, p. 39-44, 2006.