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

**Utilização de sensores de dossel para adubação nitrogenada no
algodoeiro**

Natanael de Santana Vilanova Junior

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

**Piracicaba
2016**

Natanael de Santana Vilanova Junior
Engenheiro Agrônomo

**Utilização de sensores de dossel para adubação nitrogenada no
algodoeiro**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2016

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

Vilanova Junior, Natanael de Santana

Utilização de sensores de dossel para adubação nitrogenada no algodoeiro / Natanael de Santana Vilanova Junior. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.

89 p. : il.

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

1. Sensor óptico ativo 2. Sonar 3. Agricultura de precisão 4. Nitrogênio 5. *Gossypium hirsutum* I. Título

CDD 633.51
V696u

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

DEDICATÓRIA

Dedico a meus pais,
Natanael e Luciene, e a minha esposa,
Lenise, pelo apoio incondicional e por
serem exemplos de amor e perseverança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram de uma forma ou de outra para a realização deste trabalho, em especial:

A Deus, pela vida, pelas oportunidades e por me guiar durante todo este tempo.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, por me conceder esta oportunidade tão valiosa.

À Capes, pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de mestrado.

Ao Professor José Paulo Molin, pela orientação, amizade, paciência e pelos votos de confiança na execução deste trabalho.

À minha família da Bahia, que, mesmo distante, apoiou-me, e deu condições de realizar meus sonhos. Aos meus pais, Natanael e Luciene Vilanova, pelo amor e educação, por me ensinarem os verdadeiros valores da vida e me encorajarem nos momentos difíceis.

À minha esposa, Lenise Vilela Vilanova, pelo carinho, atenção e dedicação, em não desistir de mim e encorajar-me nos momentos cruciais. Você é o melhor exemplo de luta, perseverança, dignidade e bondade de minha vida.

À minha família do Mato Grosso, que me incentivou a concluir mais essa etapa. Ao meu sogro, José Reis e a minha sogra, Alini Moraes, pelo apoio e conselhos.

Aos colegas do Laboratório de Agricultura de Precisão - LAP, por me permitirem desfrutar de suas companhias nas rodas de mate ou nos churrascos inesperados, pelas brincadeiras e pela ajuda sempre tão bem vindas. Agradecimentos especiais ao Rodrigo Trevisan, meu parceiro de projeto de pesquisa e amigo e ao Mateus Eitelwein pela amizade e ajuda crucial.

A todos os parceiros do Projeto (YARA, STARA), pelo apoio e por nunca medirem esforços para a realização deste trabalho.

Aos produtores, por concederem áreas, por auxiliarem na condução das culturas e na execução dos experimentos e pelo interesse em pesquisar e evoluir nos conhecimentos científicos e técnicos que regem seus trabalhos.

Muito Obrigado!

“Os que confiam no Senhor serão como o monte de Sião, que não se abala, mas permanece para sempre.”

Salmos 125:1

SÚMARIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE ANEXOS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Agricultura de precisão.....	27
2.2 Variabilidade dos atributos do solo.....	29
2.3 Aplicação de fertilizantes em taxas variadas.....	31
2.4 Adubação nitrogenada no algodoeiro.....	33
2.5 Sensoriamento remoto na agricultura	37
2.5.1 Sensores ópticos de reflectância.....	41
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	45
3.1 Descrição geral	45
3.2 Descrição dos locais	45
3.2.1 Chapadão do Céu - GO.....	45
3.2.2 Campo Verde – MT	46
3.3 Descrição dos equipamentos	46
3.3.1 Sensor ativo de dossel	46
3.3.2 Clorofilômetro	47
3.3.3 Sensor ultrassônico (sonar).....	48
3.4 Descrição das avaliações.....	49
3.4.1 Relação entre as leituras do sensor ativo de dossel e os parâmetros de planta	49
3.4.2 Relação entre as leituras do clorofilômetro e os parâmetros de planta.....	52
3.4.3 Relação entre as leituras do sonar e os parâmetros de planta	52
3.4.4 Estratégia de adubação nitrogenada baseada nas leituras do N- Sensor™	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57

4.1 Relação entre as leituras do sensor ativo de dosse e os parâmetros de planta.....	57
4.2 Relação entre as leituras do clorofilômetro e os parâmetros de planta	64
4.3 Relação entre as leituras do sonar e os parâmetros de planta	64
4.4 Avaliação das estratégias de adubação nitrogenada baseada nas leituras do sensor óptico ativo.....	68
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS	79
ANEXOS.....	87

RESUMO

Utilização de sensores de dossel para adubação nitrogenada no algodoeiro

A maioria dos solos tropicais e subtropicais apresenta disponibilidade insuficiente de nitrogênio (N) para atender a demanda da cultura do algodão visando à obtenção de elevados rendimentos. O N nas plantas pode ser avaliado através da utilização de sensores de espectrometria óptica ativa, nos quais se destaca o equipamento comercial utilizado neste trabalho (N-SensorTM ALS), capaz de determinar a dose de N a ser aplicada em cobertura em tempo real. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho de um sensor óptico ativo, sonares e clorofilômetro para prever parâmetros de planta e testar estratégias de adubação nitrogenada baseada nas leituras do sensor óptico para aumento da produtividade do algodoeiro em sistemas de cultivo adensado e convencional. Os experimentos foram realizados durante três anos sendo: a) em Chapadão do Céu, GO nas safras 2012/13 e 2013/14; b) e em Campo Verde, MT na safra 2014/15. Os parâmetros de planta avaliados foram: altura, massa seca, massa fresca e nitrogênio acumulado na biomassa. Estes parâmetros foram analisados nas áreas correspondentes à adubação em taxa fixa e correlacionados com o índice de vegetação gerado pelos sensores. Os resultados demonstraram que o sensor ativo de dossel utilizado é altamente eficiente em estimar altura de planta, massa fresca, massa seca e nitrogênio acumulado na cultura do algodoeiro. A utilização de clorofilômetro para monitorar o teor de N foliar no algodoeiro não demonstrou ser uma técnica eficiente. O uso de sensor ultrassônico (sonar) para estimar parâmetros de altura de planta, massa seca, massa fresca e nitrogênio acumulado na planta do algodoeiro é uma estratégia promissora que, embora não tenha a mesma eficiência de sensores de dossel, demonstrou bons resultados na detecção da variabilidade nas lavouras. As diferentes estratégias de adubação nitrogenada no algodoeiro orientadas pelo sensor ativo de dossel não resultaram em efeitos claros na produtividade. A produtividade de cada tratamento mostrou-se mais dependente da localização das repetições dentro da área do que da estratégia de adubação adotada.

Palavras-chave: Sensor óptico ativo; Sonar; Agricultura de precisão; Nitrogênio; *Gossypium hirsutum*

ABSTRACT

Use canopy sensors for nitrogen fertilization in cotton

Most tropical and subtropical soils has insufficient availability of nitrogen (N) to meet the demand of the cotton crop in order to obtain high yields. The N plants may be evaluated using active optical spectroscopy sensors as the one used in this investigation (N-Sensor™ ALS). The equipment is capable of determining in real time the amount of N to be applied spread in the field. The aim of this study was to evaluate the performance of an active optical sensor, sonar and chlorophyll sensor to predict plant parameters and test nitrogen fertilization strategies based on the optical sensor readings in order to increase cotton yield in narrow and conventional farming systems. The experiments were conducted in three years: a) in Chapadão do Céu - GO 2012/13 and 2013/14; b) in Campo Verde, MT - 2014/15. The evaluated parameters were plant height, dry weight, fresh and accumulated nitrogen in the biomass. These parameters were analyzed in the areas corresponding to fertilization in fixed rate and correlated with the vegetation index generated by the sensors. The results showed that the active sensor used is highly efficient in estimating plant height, fresh weight, dry weight and accumulated nitrogen on cotton crop. The use of chlorophyll sensor to monitor the leaf nitrogen content in cotton was not effective. The use of ultrasonic sensor (sonar) to estimate plant height parameters, dry pasta, fresh pasta and accumulated nitrogen on cotton plant is a promising strategy. Although it has not the same efficiency as canopy sensors, it showed good results in the detection of variability in crops. The different nitrogen fertilization strategies in cotton-driven asset canopy sensor resulted in no clear effects on productivity. The productivity of each treatment was more dependent on the location of the repetitions within the area than the adopted fertilization strategy.

Keywords: Active optical sensor; Sonar; Precision agriculture; Nitrogen; *Gossypium hirsutum*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema mostrando o ciclo de crescimento do algodoeiro. Fonte: ROSOLEM, 2001.	34
Figura 2 - Massa seca da parte aérea de plantas de algodão, em dias após emergência no sistema de plantio direto. Fonte: CAMACHO, 2013.....	35
Figura 3 – Demonstração da localização do o sensor ativo de dossel no maquinário e a simulação da faixa de leitura do sensor	47
Figura 4 - Sensor ultrassônico Polaroid 6500 (A), padrão de propagação da onda emitida pelo sensor (B) e posição de instalação do sensor na máquina (C).....	49
Figura 5 – Esquema de leituras com o sensor e amostragem das plantas	50
Figura 6 - Ponto de instalação dos sensores no veículo (setas), à esquerda e vista geral da cultura aos 38 e 51 DAE no algodão convencional (superior), e aos 33 e 51 DAE no algodão adensado (inferior)	51
Figura 7 - Representação esquemática do comportamento do algoritmo de adubação nitrogenada em função da leitura do sensor	53
Figura 8 - Veículo autopropelido para adubação a lanço	54
Figura 9 – Sensor do fluxo de massa. Fonte: DEERE, 2016.....	56
Figura 10 - Comportamento do N-Sensor TM ALS na estimativa de massa fresca em todas as datas de leitura nos anos 1 e 2, respectivamente.....	60
Figura 11 - Comportamento do N-Sensor TM ALS na estimativa de massa seca em todas as datas de leitura nos anos 1 e 2, respectivamente.....	61
Figura 12 - Comportamento do N-Sensor TM ALS na estimativa de N acumulado em todas as datas de leitura nos anos 1 e 2, respectivamente.....	62
Figura 13 - Comportamento do N-Sensor TM ALS na estimativa de altura em todas as datas de leitura nos anos 1 e 2, respectivamente.	63
Figura 14 – Desempenho do clorofilômetro em prever nitrogênio foliar nos dois sistemas de cultivo.	64
Figura 16 - Desempenho do Sonar em prever o acúmulo de massa fresca e seca, nitrogênio acumulado e altura do algodoeiro em todas as datas de leitura do ano 2 67	
Figura 17 - Delineamento e disposição dos tratamentos no talhão 13 (Chapadão do Céu-GO) de sistema de cultivo convencional (0,80 m) com o mapa de produtividade final como camada de fundo (safra 2013/14)	68

Figura 20 - Produtividade de algodão tratamentos no talhão âncora 1 (Chapadão do Céu - GO, safra 2013/14) de sistema de cultivo adensado (0,45 m)	70
Figura 22 – Histograma da densidade de pontos amostrais de condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) no interior das faixas de cada tratamento no sistema de cultivo adensado (esquerda) e convencional (direita).....	72
Figura 24 - Histogramas do índice de vegetação nos diferentes tratamentos das faixas experimentais no sistema de cultivo convencional	74
Figura 25 - Produtividade dos diferentes tratamentos das faixas experimentais do talhão 12 – adensado (esquerda) e do talhão 116 - convencional (direita) na safra 2014/15.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento dos tratamentos utilizados para a aplicação nas faixas	54
Tabela 2 - Coeficiente de correlação entre o índice de vegetação S1 e os parâmetros da cultura do algodoeiro cultivados em diferentes arranjos espaciais em Chapadão do Céu – GO	57
Tabela 3 – Análise estatística dos tratamentos x condutividade elétrica do solo na condição de sistema convencional.....	72
Tabela 4 - Análise estatística dos tratamentos x condutividade elétrica do solo na condição de sistema adensado	72
Tabela 5 – Médias de produtividade e teste Tukey ($p < 0,05$) na condição de algodão adensado.....	74

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.....	85
Anexo B.....	86

1 INTRODUÇÃO

A área utilizada para produção de algodão (*Gossypium hirsutum* var. latifolium Hutch) no Brasil atualmente corresponde a um quarto da área cultivada com a cultura no final da década de 1970; contudo, nesse período a produção nacional de algodão em caroço dobrou e a produtividade é agora dez vezes maior (HOOGERHEIDE et al., 2013). O Brasil é o quinto maior produtor de fibra de algodão do mundo, atrás da China, Índia, Estados Unidos e Paquistão (FAO, 2012).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2015), o algodão foi cultivado na safra 2014/15 em 1.017,1 mil hectares, representando um decréscimo de 9,3 % em relação à safra anterior, em função da instabilidade de mercado para o setor. A respeito da produtividade, o algodão em caroço alcançou uma média nacional de 3.829 kg ha⁻¹ na presente safra. Embora essa média seja razoável, muitos produtores têm apostado no aprimoramento de técnicas para aumentar a produtividade da cultura. Porém, para que maiores resultados produtivos sejam alcançados se torna necessário o uso contínuo de fertilizantes, pois os solos nacionais não possuem naturalmente os nutrientes disponíveis para este nível de demanda, visto que as variedades cultivadas atualmente foram melhoradas geneticamente e possuem alto potencial produtivo quando adequadamente nutridas.

O nitrogênio (N) é o nutriente mais importante oriundo do solo na nutrição de plantas, vital para o crescimento e produção da cultura do algodão, existindo em abundância no solo, porém somente 1 a 2% do nitrogênio do solo está disponível às plantas. É o chamado nitrogênio inorgânico, absorvido pelas plantas, principalmente na forma de nitratos; o restante está complexado com a matéria orgânica do solo - MOS, não estando imediatamente disponível, pois é liberado lentamente com a mineralização da MOS.

O elemento nitrogênio está diretamente envolvido na constituição do composto orgânico denominado clorofila, pois este possui em seu núcleo quatro átomos de nitrogênio circundando um átomo de magnésio. O composto de clorofila, que dá a cor verde à planta, é responsável pelo processo de fotossíntese, onde através da quebra das moléculas de água e gás carbônico são gerados compostos carbônicos essenciais às plantas (REUSCH 1997).

Em geral, o nitrogênio é considerado fator limitante para a produtividade do algodoeiro, tanto em áreas irrigadas como no cultivo de sequeiro. Em doses

adequadas estimula o crescimento e o florescimento, regulariza o ciclo da planta, aumenta a produtividade e melhora o comprimento e a resistência da fibra (BELTRÃO, 1999). Entretanto, aplicações excessivas podem reduzir a produção e a qualidade da fibra (HUTMACHER et al., 2004).

A adubação nitrogenada é um componente importante tanto no custo de produção quanto na qualidade e produtividade de algodão. O excesso de adubação nitrogenada faz com que seja aumentado o tamanho dos frutos na parte superior da planta, com um aparente aumento na produtividade. No entanto, ao mesmo tempo em que os frutos da parte superior da planta são aumentados, o excesso do nutriente faz com que o tamanho dos frutos da parte de baixo e da parte mediana da planta seja diminuído, sem efeito significativo na produção (BOQUET et al., 1994). O excesso de nitrogênio estimula o crescimento vegetativo com prolongamento do ciclo do algodoeiro, o que nem sempre é desejável, principalmente em regiões onde podem ocorrer chuvas durante a colheita ou ataques tardios de pragas e/ou doenças.

A recomendação geral empregada é baseada na expectativa de produtividade e na disponibilidade do nutriente no solo, que podem variar grandemente em função de diferentes condições. O N é um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pelo algodoeiro que, considerando condições climáticas, cultivar, produtividade, condições de manejo do solo e doses de fertilizantes, pode-se utilizar diferentes doses de nitrogênio para atender a demanda da cultura (CARVALHO et al., 2007). Esta recomendação pouco específica demonstra a necessidade de pesquisa e soluções para melhor manejar o uso de nitrogênio na cultura.

A deficiência de nitrogênio causa mudanças previsíveis no desenvolvimento e composição das folhas das plantas e, indiretamente, mudanças na distribuição espectral de radiação refletida pelas folhas de plantas deficientes (TARPLEY et al., 2000). Portanto, métodos que avaliam a distribuição espectral de radiação refletida pelas plantas são um bom indicador para estimar doses de N a serem aplicadas nas culturas (SCHÄCHTL et al., 2005).

O monitoramento da disponibilidade de nitrogênio em uma cultura é um pré-requisito para a aplicação de fertilizante com precisão temporal e, segundo Read et al. (2003), as mudanças no estado nutricional do algodoeiro podem ser

determinadas diretamente em laboratório, por análise química de amostras de tecido, ou indiretamente no campo, medindo a reflectância foliar em estreitos comprimentos de onda; em parte, isto ocorre porque a reflectância na região visível do espectro eletromagnético (300-700 nm) varia em função da concentração de clorofila na folha, a qual está relacionada com o nitrogênio foliar.

No entanto, a ordem na agricultura é a racionalização de insumos e custos, e os conceitos de Agricultura de Precisão (AP) estão mais presentes a cada dia. Uma das técnicas de AP é a aplicação em taxa variável de nutrientes, porém, para que se possa executá-la é necessária a coleta de dados georreferenciados com uso de um sistema que identifique exatamente um ponto e um valor para uma variável; neste caso o nitrogênio.

Este procedimento pode ser feito por meio da coleta de amostras georreferenciadas de solo e planta, análise em laboratório, interpolação dos dados obtidos das análises através de algum Sistema de Informação Geográfica - SIG, com a geração de um mapa de aplicação. Porém este sistema é muito trabalhoso e caro, devido às análises de laboratório e exige muito conhecimento para ser executado. Além disso, se torna demorado devido ao tempo exigido pelo laboratório para processar as amostras, sendo que quando os resultados estão prontos, as condições de campo já se alteraram devido à dinâmica do próprio nitrogênio e do crescimento vegetal, não gerando mais confiabilidade aos resultados. Desta forma, esta técnica de coleta e amostragem não se torna viável em nível de campo em se tratando de medição de nitrogênio nas áreas de algodão.

Em vista desta problemática, atualmente vem se trabalhando com a técnica de sensoriamento remoto através do uso de sensores para substituir as análises de laboratório e criar o mapa de aplicação de nitrogênio em curto espaço de tempo ou em tempo real. Nesse caso, não é necessária a geração de mapas de aplicação para futura intervenção, que é realizada no mesmo instante e com a mesma máquina onde o sensor está instalado. É necessário apenas coletar o dado diretamente na lavoura para medir a extração de nitrogênio pela cultura, transformar esta medição em um valor a ser aplicado de fertilizante nitrogenado e aplicá-lo, tudo ao mesmo tempo.

Nos últimos anos têm surgido alguns sensores ópticos terrestres de reflectância para uso na agricultura, com o objetivo principal de detectar deficiências de N e recomendar doses de N. Ou seja, o teor de clorofila na planta é um dos fortes

indicativos de deficiência ou suficiência de N no solo (SCHEPERS, 2005), pois integra os atributos de solo como pH, matéria orgânica, taxa de mineralização de nitrogênio, umidade entre outros.

Os sensores ópticos ativos pioneiros são os clorofilômetros manuais que determinam com rapidez o conteúdo de clorofila nas folhas e permitem estimar o estado nutricional de uma cultura para aplicações eficientes de fertilizantes nitrogenados. Como a maior parte do N foliar está contida nas moléculas de clorofila, há uma estreita relação entre N foliar e conteúdo de clorofila. Vários estudos ilustram altas correlações entre leituras de clorofilômetros manuais e concentrações de N foliar em algodoeiro (NEVES et al., 2005).

Diferentemente o N-SensorTM ALS o sensor base deste estudo, é um sensor embarcado, e foi desenvolvido na Alemanha na metade da década de 1990. Foi inicialmente comercializado no ano de 1999 em sua primeira versão, o N-SensorTM FieldScan, de funcionamento por receptores passivos de faixas do espectro eletromagnético de luz, necessitando da presença de luz ambiente para funcionar. No ano de 2005 foi lançado o sucessor desse pioneiro, o N-SensorTM ALS (Active Light Source), que possui sua própria fonte de luz, podendo assim trabalhar 24 horas por dia sem a necessidade de luz ambiente.

Como o sensor está sendo usado com sucesso em culturas de inverno e em milho, principalmente na Europa, a hipótese proposta é que o desempenho semelhante venha a ser observado na cultura do algodão. É de grande interesse encontrar uma forma mais eficiente de uso do fertilizante nitrogenado na cultura do algodão, visando aumentar produtividade, baixar custos, e se adequar a futuras legislações ambientais que possam ser restritivas ao uso inadequado de fertilizantes químicos.

Além da abordagem do uso dos sensores de reflectância na redistribuição de nitrogênio e estimação de parâmetros na cultura do algodão, têm-se também a avaliação da altura da planta para modelar os parâmetros no cultivo de algodão. Kerby et al. (1990) consideram a altura da planta como um importante fator de decisão para a aplicação de reguladores de crescimento de plantas. Munier et al. (1993) mostraram que a altura está relacionada com o vigor da planta, e também consideram esta como um bom indicador para o uso de reguladores de crescimento na cultura. A altura das plantas de algodão também se correlacionou com muitos índices vegetativos ($R^2 > 0,65$), como NDVI, RVI e DVI (LEON et al., 2003).

Shiratsuchi et al. (2005), usando as leituras dos sensores ultrassônicos, foram capazes de demonstrar que é possível a criação de mapas que expressam a variabilidade da altura da planta em lavouras de algodão. Sui e Thomasson (2006) mostraram que o sensor de reflectância vegetal combinado com o sensor ultrassônico foram eficientes para determinar o estado nutricional de N em algodão.

Assim, tendo em vista a melhoria na distribuição espacial e temporal dos fertilizantes nitrogenados para atender a demanda nutricional do algodão será utilizado neste trabalho o N-SensorTM ALS. O objetivo geral estabelecido foi avaliar se este é funcional na cultura do algodão através da investigação da variação espacial da nutrição nitrogenada existente em talhões comerciais, assim como esta se comporta durante o desenvolvimento da cultura e como essa variação pode ser detectada da melhor forma pelo sensor.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a relação entre as leituras do o sensor ativo de dossel e os parâmetros de planta;
- Avaliar a relação entre as leituras do clorofilômetro e os parâmetros de planta;
- Avaliar a relação entre as leituras de um sensor ultrassônico (sonar) e os parâmetros de planta;
- Testar e avaliar estratégias de adubação nitrogenada baseadas nas leituras do sensor ativo de dossel.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura de precisão

Antes mesmo da revolução industrial e do processo de mecanização da atividade agrícola, os agricultores já se mostravam capazes de reconhecer a variabilidade espacial de certas características físico-químicas e biológicas das áreas cultivadas. A própria divisão dessas áreas em talhões reflete essa capacidade de discernimento. Até então, o uso de trabalho braçal e/ou tração animal permitia aos agricultores tratar áreas com menor ou maior fertilidade ou com infestação de pragas, doenças e plantas daninhas de forma diferenciada (FRAISSE, 1998).

Os fundamentos da agricultura de precisão moderna surgiram com a apresentação da Circular 346 por Linsley e Bauer (1929) na Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois (USA) onde os autores concluíram que: os requisitos de aplicação variavam bastante para um mesmo talhão em sua necessidade de calcário; e a necessidade de que fossem feitos testes sistemáticos e detalhados no campo, de forma que o calcário pudesse ser aplicado de acordo com a sua necessidade. Essa ideia permaneceu no esquecimento por muitos anos, até o momento em que a disponibilidade de microcomputadores, sensores e sistemas de posicionamento via satélite se tornaram disponíveis a custos acessíveis.

Surgiu desse modo, o conceito de Agricultura de Precisão (AP), o qual vem sendo definido de diferentes maneiras por diversos autores. Schueller (1992) definiu a Agricultura de Precisão como um método de administração cuidadosa e detalhada do solo e da cultura para adequar as diferentes condições encontradas em cada ponto da lavoura, tendo em vista a desuniformidade intrínseca dos solos. Para Goering e Hans (1993) a AP tem como meta final aplicar sementes, fertilizantes, e outros insumos variavelmente em cada talhão, nas taxas adequadas à produtividade do solo em cada ponto do talhão.

Segundo Searcy (1995) a Agricultura de Precisão é a tecnologia que possibilita modular a aplicação dos insumos agrícolas numa base pontual em resposta a necessidades altamente localizadas das plantas. De acordo com Blackmore e Larscheid (1997) os conceitos da Agricultura de Precisão estão relacionados à variabilidade da produtividade e dos atributos do solo e das plantas.

Segundo estes autores, existem três tipos de variabilidade: espacial, temporal

e preditiva. A variabilidade espacial é observada ao longo do campo e pode ser facilmente constatada em qualquer mapa de produtividade ou fertilidade. A variabilidade temporal é observada quando se comparam mapas de produtividade de vários anos; a variabilidade preditiva é a diferença entre a previsão de algum fator e o que realmente aconteceu. Os autores relatam que, para gerenciar cada uma das variabilidades é necessário entendê-las e, sobretudo, mensurá-las.

Em uma visão mais voltada para os equipamentos, Strauss et al. (1998) afirmaram que a AP envolve sistemas automáticos, basicamente compostos por micro controladores, sensores e atuadores acoplados às máquinas agrícolas pré-existentes e interligados ao Sistema de Posicionamento Global - GPS. Para Molin (2001), Agricultura de Precisão é um elenco de tecnologias e procedimentos utilizados para que as lavouras e o sistema de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados.

Klotz et al. (2003) afirmaram que o crescimento da adoção de práticas de agricultura de precisão e o monitoramento ambiental requerem novos sistemas e técnicas de aquisição de dados visando à informação detalhada da vegetação. Neste sentido, Kuckenberg et al. (2009) relataram que medidas de refletância permitem estimativas rápidas e não invasivas do estado nutricional das plantas (referentes ao N), auxiliando a adubação de precisão.

Outro fato que tem impulsionado a utilização desse conceito é a crescente preocupação com fatores ambientais, pois, com essa técnica, as aplicações de produtos químicos são efetuadas de modo a satisfazer a necessidade de cada ponto do talhão e com isso, diminuir a probabilidade desses produtos serem lixiviados e contaminarem o ambiente (BOUMA, 1998).

Portanto, a 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.

2.2 Variabilidade dos atributos do solo

As propriedades do solo, além de variarem no espaço, podem variar no tempo. Esta variação, decorrente da ação de agentes naturais, assim como da ação antrópica, deve se manifestar com maior intensidade em algumas propriedades do que em outras (PRIMAVERA, 1998).

A variabilidade de propriedades do solo tem sido abordada por vários autores sendo atribuída a diversos fatores, tais como características do material de origem e os fatores de formação, os quais não atuam pontualmente, mas sim segundo um determinado padrão. Propriedades do solo, no entanto, podem apresentar dependência espacial em escalas que variam da ordem de poucos metros a alguns quilômetros. Além disso, é importante constatar que o solo é resultante da ação de alguns fatores que atuam em larga escala, cujo efeito é alterado por fatores que atuam em escalas menores; em diferentes níveis de superposição de efeitos, o que proporciona um caráter hierárquico para a estrutura de variação das propriedades no espaço (GONÇALVES, 1997).

Segundo Vieira (1995) a quantificação da variabilidade espacial é útil por dois motivos; o primeiro é que o conhecimento dos erros associados ao modelo permite avaliar a qualidade dos resultados, definindo se estes atendem ao esperado, e se a qualidade é superior à necessária. Neste caso, nos próximos trabalhos, pode-se adotar uma amostragem menos intensa, reduzindo custos. Por outro lado, a qualidade pode ser inferior à necessária. Neste caso, talvez seja necessário coletar mais dados, calibrar melhor o modelo, usar melhor o modelo, trabalhar em uma resolução espacial diferente ou até mesmo, escolher melhor um método de predição. O segundo motivo é que o mapeamento dos atributos em questão, para agricultura de precisão, é a base para se gerar mapas de prescrição. Tomando como referência este segundo motivo, Goering e Hans (1993) partem do princípio de que, levando-se em conta a variabilidade natural dos fatores de produção, podem-se aplicar apenas as quantidades efetivamente necessárias em cada ponto e que, portanto, as técnicas de aplicação localizada de insumos se tornam muito importantes para uma agricultura rentável.

De acordo com Molin (2001), a investigação da variabilidade espacial pode ser feita por amostragens de solo georreferenciadas ou pelo uso do sensoriamento remoto. A amostragem de solo em grade pode fornecer uma base acurada para a

geração de mapas de aplicação de fertilizantes em taxa variável, porém medidas indiretas e não destrutivas fornecidas pelo uso de sensores são uma alternativa para tomada de decisão sobre o manejo de uma determinada cultura (MOGES et al., 2004).

Em relação a sensores de solo, Adamchuk et al. (2004) relataram que embora exista uma grande variedade, a maioria deles envolve sensores elétricos e eletromagnéticos, que medem a resistividade, a condutividade, a capacitância ou a indutância elétrica, sendo afetados pela composição do solo. A maioria dos sensores fornece um sinal de saída, que é afetado por mais de uma característica agronômica do solo. Sensores elétricos e eletromagnéticos são instrumentos de medida baseados em circuitos elétricos e usados para determinar a habilidade de determinados meios em conduzir ou acumular a carga elétrica. Se o solo for usado como tal meio, suas características físicas e químicas podem afetar o comportamento do circuito e, assim, os parâmetros elétricos medidos (JOHNSON et al., 2005).

A variabilidade espacial da produtividade das culturas tem sido atribuída, entre outros fatores, as diferenças nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. No entanto, os métodos disponíveis para a determinação desses atributos, em geral, são caros e demandam grande quantidade de tempo e mão-de-obra. Nesse contexto, tem crescido o interesse por métodos que permitam determinar a variabilidade espacial de atributos do solo de maneira rápida e barata, de forma a proporcionar a obtenção de um grande número de medidas por unidade de área, como a condutividade elétrica do solo (CE) (CASTRO; MOLIN, 2004).

A CE é definida como sendo a habilidade que o solo tem em transmitir corrente elétrica (KITCHEN et al., 1996), sendo dependente de uma série de características e propriedades do solo, como o conteúdo de água, o teor de argila e matéria orgânica, e a concentração de íons na solução do solo (CASTRO; MOLIN, 2004).

Acock (1997) considera que as relações entre solo, planta e ambiente são melhor entendidas utilizando-se de ferramentas de modelagem. Porém, como o conhecimento do comportamento das plantas não está suficientemente dominado, esses modelos ainda não respondem a contento.

Estudos com o uso da condutividade elétrica do solo têm apontado seu potencial para a estimativa de conteúdo de argila (WILLIAMS, 1987), conteúdo de

água (KACHANOSKI et al., 1988), capacidade de troca catiônica e teores de cálcio e magnésio trocáveis (McBRIDE et al., 1990), profundidade de camada de impedimento (CLARK et al., 2000), teor de matéria orgânica (JAYNES, 1996), teor de sais da solução do solo (CAMINHA JUNIOR et al., 1998), dentre outros.

A condutividade elétrica do solo pode ser medida por contato, fazendo passar uma corrente elétrica em eletrodos isolados, ou indiretamente, com o uso de corrente induzida por um campo magnético, sem contato com o solo. Para ambos os casos existem equipamentos comerciais que foram testados e mostraram resultados semelhantes (FARAHANI, 2002). Hartsock et al. (2000) trabalharam com um sensor de condutividade elétrica por contato, disponível no mercado, e observaram variabilidade temporal nos níveis de condutividade elétrica. No entanto, as tendências se mantiveram, indicando seu uso potencial para a detecção de regiões ou unidades que podem ser tratadas diferentemente.

2.3 Aplicação de fertilizantes em taxas variadas

A variabilidade espacial de atributos químicos do solo geralmente é intrínseca a cada local e condições de solo e clima. A visão predominante de qualidade do solo, na atualidade, refere-se à natureza dinâmica dos solos, influenciada pelo uso e manejo praticado pelo homem (REICHERT et al., 2003).

O conhecimento detalhado da variabilidade química e suas relações com a produtividade pode permitir implantar a gestão em sítio específico ou em taxas variadas (COELHO, 2003), com ganhos no manejo dos insumos, redução nos custos de produção e minimização dos riscos ambientais (GARZELLA, 2006).

A condição elementar que rege a adoção da AP é a variabilidade espacial. Em sistemas de produção que visam o incremento da eficiência por meio de manejo regionalizado de insumos e práticas agrícolas, como no sistema de AP, as alternativas para se estimar e definir as causas da heterogeneidade na produtividade das culturas, em condições de campo, têm se baseado em mapas de rendimento (MOLIN, 2002) ou no conhecimento da distribuição espacial e das relações dos principais atributos químicos, usados na avaliação da fertilidade (VIANA, 2005).

O entendimento de que a lavoura não é homogênea, possibilita que, por exemplo, a quantidade de fertilizantes deixe de ser utilizada em quantidade média

para toda a área, atendendo apenas as necessidades médias e não considerando, desta forma, as necessidades específicas de cada gleba (FERREIRA, 2002).

A estratégia de controle das necessidades de insumos e das taxas a serem aplicadas pode ser efetuada por meio de mapas definidos a partir de informações de atributos da fertilidade do solo, rendimentos obtidos e esperados. Neste sentido, as aplicações podem ser comandadas por meio de dispositivos nas máquinas de aplicação que comandam as decisões de variação da aplicação, processando os dados dos sensores existentes e os dados inseridos pelo usuário (SCHLOSSER, 1999), ou seja, exige equipamento de localização do aplicador no campo (GPS), bem como de equipamento que armazene o mapa de variabilidade com as taxas programadas (MOLIN, 1997).

A amostragem composta de solo significando uma média para toda a área faz da recomendação agrônômica e da aplicação de fertilizantes, um processo excessivamente simplista. Consequentemente, a aplicação de uma taxa fixa de fertilizantes em um solo espacialmente variável, causa efeitos de doses excessivas em algumas áreas e em outras, de subdosagens. Atherton et al. (1999) identificaram os tipos de informações necessárias para a prática da AP e dentre os principais fatores listados que influenciam a variabilidade da produtividade. Os autores incluíram a movimentação de nutrientes através de processos erosivos e lixiviação, o pH do solo, a profundidade da camada superior do solo, a capacidade de troca catiônica (CTC), a distribuição de tamanhos e a mineralogia das partículas primárias, a população e atividade de micro e macro organismos, bem como a porosidade do solo.

A aplicação de fertilizantes em taxa variada, baseada na variabilidade do solo dentro de um campo, tem um potencial para reduzir sub e sobre doses, e assim melhorar a eficiência de uso de fertilizantes, o rendimento das culturas e o lucro líquido da propriedade (FIEZ et al., 1994).

No Brasil, a agricultura de precisão está predominantemente sendo difundida no que se refere a monitores de produtividade e aplicações em taxas variadas (ATV) de calcário e fertilizantes, utilizando-se principalmente máquinas que realizam a aplicação em superfície, com distribuição a lanço. O controle da aplicação dos insumos é feito por dispositivos responsáveis pela variação da vazão, montados em equipamentos especializados para aplicação, principalmente de produtos sólidos, ou

mesmo em semeadoras-adubadoras, e normalmente acionados por motores hidráulicos governados eletronicamente.

A premissa da aplicação de técnicas de agricultura de precisão é a aplicação de insumos agrícolas em locais específicos e nas quantidades requeridas. O insumo aplicado de maneira inadequada, principalmente agrotóxicos e fertilizantes, pode gerar impactos ambientais severos e aumento do custo de produção das culturas (BIERMACHER et al., 2006). Menegatti et al. (2006) e Barbieri et al. (2008) mencionam que, na experiência de usinas produtoras de cana-de-açúcar, que implantaram as técnicas de ATV, utilizando critérios localizados e detalhados de aplicação de insumos, houve redução no uso desses insumos sem causar queda na produtividade.

2.4 Adubação nitrogenada no algodoeiro

O algodoeiro é uma das principais plantas domesticadas pelo homem e uma das mais antigas, tendo registros de seu uso a mais de 4.000 anos, sendo cultivado comercialmente em mais de 65 países. A cultura caracteriza-se por apresentar rigorosos critérios de avaliação de qualidade e altos custos de produção. A utilização de fertilizantes e corretivos é responsável por 30% do custo com insumos e cerca de 15% do custo total de produção da cultura (FERREIRA, 2006).

O excesso de nitrogênio estimula o crescimento vegetativo com prolongamento do ciclo do algodoeiro, o que nem sempre é desejável, principalmente em regiões onde podem ocorrer chuvas durante a colheita ou ataques tardios de pragas e doenças. Neste sentido, Frye e Kairuz (1990) comentam que o excesso de N produz plantas vigorosas, porém com pouca frutificação e abertura tardia e irregular dos capulhos.

O nitrogênio é um dos nutrientes aplicados em grandes quantidades na cultura do algodoeiro, que extrai, em média, 60 a 70 kg ha⁻¹ de N para a produção de uma tonelada de algodão em caroço, havendo necessidade de adubação para complementar a quantidade fornecida pelo solo (CARVALHO et al., 2007). Além do incremento da produtividade, a adubação deve ser realizada de forma racional evitando desperdícios de fertilizantes, contaminações ambientais, perda de competitividade devido ao aumento excessivo de custos, dentre outros.

Durante a maior parte do ciclo da planta de algodão há diversos eventos ocorrendo ao mesmo tempo, como crescimento vegetativo, aparecimento de gemas reprodutivas, florescimento, crescimento e maturação de frutos (Figura 1).

Figura 1 – Esquema mostrando o ciclo de crescimento do algodoeiro. Fonte: ROSOLEM, 2001.

Cada um destes eventos é importante para a produção final, mas é necessário que eles ocorram de modo balanceado. Durante boa parte do ciclo da planta ocorre uma forte competição interna pelos carboidratos da fotossíntese. Assim, se houver uma queda excessiva de estruturas reprodutivas, haverá crescimento vegetativo exagerado, aumentando o auto-sombreamento que, por sua vez, causará maior queda de estruturas reprodutivas (ROSOLEM, 2001).

A queda de estruturas reprodutivas é um fenômeno natural do algodão influenciado pela ocorrência de condições adversas de clima, a queda é regulada pelo balanço entre açúcares no tecido e teor de etileno, isto ocorre quando a planta tem uma forte demanda por carboidrato ocasionando desbalanceamento entre açúcares e o etileno (ARRUDA et al., 2002).

Figura 2 - Massa seca da parte aérea de plantas de algodão, em dias após emergência no sistema de plantio direto. Fonte: CAMACHO, 2013.

Ao observar o acúmulo de massa seca em função do tempo (dias após a emergência), verifica-se que o período compreendido entre, aproximadamente 50 a 100 DAE, é o período de maior acúmulo de massa (Figura 2), ou seja, maior quantidade de biomassa produzida por unidade de tempo. Rosolem (2001) verificou que a partir de 90-95 DAE, a planta está em processo importante de enchimento dos frutos e maturação de fibras, o que leva um maior acúmulo de matéria seca na planta.

Assim, de acordo com a marcha de absorção de nitrogênio, a adubação nitrogenada em cobertura deve ser realizada até os 55-60 dias após a emergência das plantas, divididas em, no máximo, duas aplicações. Aplicações mais tardias, além de não resultarem em maior produtividade, podem induzir maior crescimento vegetativo e alongar o ciclo da planta (ROSOLEM, 1999), tendo como consequência maior custo, maior queda de estruturas reprodutivas, havendo então maior porcentagem de maçãs ou capulhos apodrecidos na parte mais baixa da planta.

Quando o suprimento de N excede a necessidade da cultura, o excesso é perdido por escoamento superficial e lixiviação, podendo contaminar ecossistemas aquáticos e o lençol freático (WOOD et al., 1993). Essa perda de nitrogênio para o meio ambiente representa também perda econômica para os agricultores. Entretanto, redução inapropriada no suprimento de nitrogênio pode resultar em redução de produtividade, e por consequência, perda econômica. Com esse dilema, a solução seria um método adequado de avaliar os teores de N e sua variabilidade na lavoura.

Para aumentar a eficiência no uso do nitrogênio em sistemas agrícolas é necessária uma maior sincronia entre a demanda de N pela cultura e o fornecimento dos nutrientes por todas as fontes durante a safra (CASSMAN et al., 2002). A mineralização do N é influenciada por vários fatores como a textura do solo, temperatura, umidade e pH, além do método de preparo do solo e cultura antecessora.

Segundo Kluthcouski et al. (2006), em condições climáticas adversas, condicionadas pelo teor de MOS, textura do solo, época e método de aplicação do fertilizante, o N torna-se um nutriente que é facilmente perdido por lixiviação, volatilização e desnitrificação no solo. Como decorrência disso, a eficiência da adubação é reduzida, situando-se, nas melhores condições, entre 50 a 60%.

A absorção de nitrogênio pelas culturas é variável em uma safra, entre safras, entre locais dentro de um mesmo talhão e entre culturas, mesmo quando o fornecimento de N, tanto do solo quanto aplicações adicionais de fertilizantes são abundantes (LEMAIRE, 2002). A deficiência de nitrogênio causa mudanças previsíveis no desenvolvimento e composição das folhas das plantas e, indiretamente, mudanças na distribuição espectral de radiação refletida pelas folhas de plantas deficientes (TARPLEY et al., 2000). Portanto, métodos que avaliam a distribuição espectral de radiação refletida pelas plantas são um bom indicador para estimar doses de N a serem aplicadas nas culturas (SCHÄCHTL et al., 2005).

Pesquisas evidenciaram que informações a campo sobre variabilidade de N são muito valiosas para o entendimento da derivação de recomendações de fertilizantes de N para sítios específicos da área agrícola em questão (LINK et al., 2005). Com isso, o uso de sensores tem sido intensificado nos últimos anos aumentando o número de estudos visando a otimização de bandas e índices espectrais com mais sensibilidade para estimar o conteúdo de N nas culturas. Esses estudos tem mostrado que o uso de índices de vegetação é essencial para prever doses ótimas de N (REUSCH, 2003; SCHMIDHALTER et al., 2003, MISTELE et al., 2004).

A nutrição de N em plantas tem sido estimada a partir do uso de métodos baseados em medições de refletância por sensores remotos ativos ou passivos. Tais métodos baseiam-se em adquirir dados em tempo real a partir do uso de sensores com o intuito de controlar operações em locais específicos da lavoura enquanto a máquina se desloca. Os dados coletados refletem o estado atual da planta em alta

resolução espacial, permitindo assim, a detecção das necessidades de N em tempo real, transformando essas necessidades em uma taxa de fertilizante nitrogenado a ser aplicada após a medição do sensor (PORTZ, 2011).

A espectrometria óptica baseia-se no fato de que os pigmentos como a clorofila absorvem a radiação nos comprimentos de onda dentro do espectro do visível, enquanto isso, a radiação no infravermelho próximo é refletida pela folha (MINOLTA, 1989). Nesse sentido a determinação da clorofila, indiretamente, determinaria o estado nutricional da planta, reiterando que grande parte do N é encontrado nessa molécula (MINOLTA, 1989; RAMBO et al., 2004).

O uso de sensores que fazem leitura do estado nutricional da cultura em uma visão oblíqua, somado à avaliação da biomassa agrícola diminuída da biomassa da superfície do solo pode levar a medidas mais confiáveis, especialmente na fase inicial de crescimento das culturas onde a superfície do solo tem maior influência sobre a leitura do sensor (MISTELE et al., 2004).

O manejo eficiente da adubação nitrogenada é essencial para obtenção de altas produtividades, redução de custo, proteção ambiental e viabilização dos sistemas de produção existentes no cerrado brasileiro. O uso racional de corretivos e fertilizantes depende da disponibilidade de nutrientes no solo, da exigência nutricional da cultura, dos fatores que afetam sua eficiência, das relações econômicas entre os preços da pluma e dos insumos, além do impacto sobre o meio ambiente.

2.5 Sensoriamento remoto na agricultura

O sensoriamento remoto é a aquisição de informações sobre um objeto sem que haja contato físico (COLWELL, 1983). A óptica é forma mais utilizada e as informações obtidas geralmente dependem da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos alvos de interesse (CAMPBELL, 1987).

O sensor remoto é um dispositivo capaz de responder à Radiação Eletromagnética (REM) de determinada faixa do espectro eletromagnético, registrá-la e gerar um produto numa forma adequada à interpretação pelo usuário (STEFFEN et al., 1981). Cada objeto apresenta um comportamento frente à radiação nele incidente, que depende de diversos fatores, muitos dos quais não são controlados. As frações de energia transmitida, refletida e absorvida pelos objetos variam com

suas propriedades físico-químicas, estrutura e posição em relação à fonte de radiação (NOVO, 1992). Mesmo assim, dentro de determinadas condições é possível estabelecer a característica espectral de alguns alvos.

Todos os materiais da superfície terrestre com temperatura superior a zero absoluto podem emitir, refletir, transmitir ou absorver seletivamente a REM. Na maioria das vezes, contudo, o uso do sensoriamento remoto em estudos da vegetação inclui a reflectância como o fenômeno físico mais analisado (PONZONI, 2001). A fonte de REM mais importante para o sensoriamento remoto é a radiação solar para os sensores passivos, sendo estes normalmente orbitais ou aéreos. No entanto, há sensores ativos, mais próximos ao alvo, que possuem sua própria fonte de energia, e funcionam independentemente da radiação solar.

Diversos produtos podem ser obtidos com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto na agricultura. Segundo Formaggio (1988), muita informação pode ser retirada a partir da análise de apenas uma banda espectral, porém a disponibilidade de várias bandas permite a exploração mais eficiente das características espectrais dos alvos, ou seja, quanto maior o número de bandas espectrais dispuser um sistema sensor, mais possibilidades de extração de informações do objeto de estudo ele poderá abranger.

O registro da informação se dá por meio da captura de ondas refletidas pelo alvo constituída por bandas do espectro eletromagnético, sendo que cada banda compreende uma faixa de comprimento de onda específico. A imagem digital gerada é uma função bidimensional de intensidade de energia eletromagnética refletida ou emitida, no caso das bandas termais, representada por uma matriz $f(x, y)$, onde os valores de f são resultantes da intensidade (brilho) dos materiais da área correspondente ao pixel de coordenada (x, y) (CROSTA, 1993).

A mensuração da reflectância espectral é a abordagem sem contato e não destrutiva mais promissora para a determinação de características das culturas, como a deficiência de nitrogênio (TUMBO et al., 2002). Em estudos onde foi avaliada a resposta espectral de folhas verdes, constatou-se que no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 700 nm (faixa do visível - Vis) a reflectância é baixa, da ordem de 10%, com um suave aumento da resposta na região do verde (550 nm) (MOREIRA, 2005). A queda da reflectância está associada à absorção pelos pigmentos foliares, principalmente pela clorofila. Na região do azul, a absorção ocorre nas proximidades do comprimento de onda de 445 nm e está associada à

presença dos pigmentos xantofila, carotenos, clorofilas 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 reflectância, para valores próximos a 50%, devido à estrutura interna da folha (tamanho e formato das células, e à quantidade de espaços intercelulares). Daí em diante, até 2500 nm (infravermelho médio - IVM), há um gradual decréscimo, na reflectância, aparecendo algumas feições de absorção pelo conteúdo de água líquida.

Os índices espectrais de vegetação, ou simplesmente índices de vegetação (IVs), podem ser definidos como a combinação de dados de duas ou mais dessas bandas espectrais, selecionadas com o objetivo de melhorar a relação desses dados com as variáveis da vegetação. Um índice de vegetação ideal deve ser capaz de responder a sutis variações no estado fenológico da vegetação, independentemente da situação temporal ou espacial, e não pode sofrer fortes influências por variações de tipos de solo, na geometria de iluminação e visada e nas condições atmosféricas (HUETE, 1996).

Com o trabalho de Rouse et al. (1973) surgiu o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), o qual preconizava uma relação entre medidas espectrais de duas bandas que melhor resolvia o problema das interferências do solo na resposta da vegetação e também diminuía 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 foi adequadamente eliminada, tendo surgido diversas variações para o NDVI, na tentativa de obter um índice menos sensível a tais interferências. Atualmente, utiliza-se qualquer par de bandas do VI e do IVP, proveniente de sensor óptico, e alguns estudos mais recentes têm investigado a aplicabilidade de bandas do IVM (MIURA et al., 1998).

Quanto ao comportamento espectral de uma planta exposta a uma REM, parte desta é refletida à atmosfera, parte absorvida e utilizada nos processos fisiológicos vitais e o restante é transmitida, sendo estes dependentes do comprimento de onda da energia incidente. Para Machado et al. (1985), a reflectância engloba os efeitos de muitos fatores biofísicos, tais como estrutura e geometria das plantas, tamanho, anatomia e idade das folhas, arranjo das plantas no campo, entre outros.

Para a região do infravermelho próximo, fora do espectro do visível, os processos relativos à reflectância, absorbância e transmitância estão diretamente relacionados a estrutura interna da folha (tamanho e formato das células e quantidade de espaços intercelulares) (CICONE, 1984), o que tem relação direta no aumento na quantidade de biomassa (MOREIRA, 2000).

Fatores como a celulose, encontrada nas paredes celulares, os solutos (íons e moléculas), espaços intercelulares, pigmentos dentro do cloroplasto, estágio fenológico, aspectos sanitários, idade e maturação e senescência da vegetação influenciam na resposta espectral da planta submetida à incidência de REM (PONZONI, 2001).

De acordo com Galvão et al. (1999), existem diversos fatores que interferem na obtenção dos índices de vegetação, podendo ser separados em dois grupos: fatores relacionados à superfície observada e fatores relacionados à obtenção de dados. Fatores relacionados à superfície observada incluem os aspectos intrínsecos à vegetação, que influenciam diretamente nas medidas espectrais dos sensores. Fatores relacionados ao processo de obtenção dos dados envolvem as características do sensor, como a largura e posicionamento das bandas e calibração do equipamento, bem como a geometria e iluminação do fundo, normalmente solo e de visada do sensor e os efeitos atmosféricos (absorção e espelhamento) (MOREIRA, 2000).

De acordo com Schadchina (1995), o teor de clorofila da folha, assim como a produção de MS, se correlacionam positivamente com doses de N e com a produtividade, tendo em vista que 50 a 70% do N total das folhas são integrantes de enzimas que estão associadas aos cloroplastos, bem como que o incremento de N na planta proporciona a elevação da quantidade de MS produzida e produtividade.

Os dados de sensoriamento remoto podem ser usados para caracterizar dados espaciais de uma cultura (STEVEN, 2004), e a informação obtida pode ser usada para melhorar a qualidade das culturas, monitorar a irrigação, processos de fertilização e o manejo de plantas daninhas.

O sensoriamento remoto tem sido utilizado para estimar variáveis das culturas como radiação fotossinteticamente ativa, índice de área foliar (BARET, 1991), conteúdo de clorofila nas folhas (TUMBO et al., 2002), cobertura do solo (BOISSARD et al., 1992), acumulação total de matéria seca (TUCKER et al., 1981),

conteúdo de água (WAHEED et al., 2006), produtividade (FISCHER et al., 1993), conteúdo de nitrogênio (SOLIE et al., 2002) e falhas de plantio (FRASSON, 2007).

O uso de sensores ópticos terrestres propicia maiores correlações com as variáveis das culturas, quando comparado com fotografias aéreas e imagens de satélite (WRIGHT et al., 2004), além de não ser possível obter sempre as imagens de satélite com a qualidade desejada devido a condições climáticas, como a presença de nuvens. A aquisição de dados com sensores portados manualmente, ou em veículos, são menos dependentes das condições climáticas do que dados orbitais ou sub-orbitais (STEVEN, 2004). Os sensores terrestres após obterem os dados de reflectância geram os índices de vegetação diretamente, diferente da imagem digital gerada nos sensores aéreos e orbitais passivos.

Sui et al. (1998) desenvolveram um sensor óptico para diagnose de sanidade de plantas de algodoeiro. O sensor mede a reflectância do dossel nas bandas do visível e do IVP. Os resultados mostraram que a reflectância do dossel de algodoeiro foi fortemente correlacionada com a produtividade e estresse de nitrogênio. Varco (2004) considera que a aplicação de diferentes doses de N induziu a uma ampla variação na concentração de nitrogênio foliar com um aumento efetivo na concentração de clorofila; desta forma, a distinção de plantas deficientes em nitrogênio pode ser detectada pela reflectância foliar na faixa do visível ao infravermelho próximo, desde que nenhum outro nutriente esteja em falta na cultura.

Quando as plantas estão sujeitas a estresses, ocorre aumento nas concentrações de carotenoides e redução na produção de clorofila, o que causa menor absorção de energia pelas folhas e, portanto, um aumento na reflectância visível e assim a planta aparecerá amarela ou clorótica, devido ao aumento das concentrações de carotenoides (FERRI, 2002).

2.5.1 Sensores ópticos de reflectância

A espectrometria óptica se baseia na premissa de que pigmentos como a clorofila, absorvem a radiação nos comprimentos de onda dentro do espectro do visível, enquanto que a radiação no infravermelho próximo é refletida pela folha (MINOLTA, 1989). Dessa forma, através da determinação da clorofila pode-se obter uma estimativa indireta do estado nutricional da planta, pois grande parte do

nitrogênio está presente nessa molécula (MINOLTA, 1989; LEMAIRE, 1997; RAMBO et al., 2004).

Os aspectos positivos desta tecnologia quanto a outros métodos de diagnose se referem à pequena necessidade de procedimentos laboratoriais e, conseqüentemente, menores custos; além disso, o tempo entre amostragens e resultados é muito menor do que quando são feitas análises de indicadores do solo, essencial para a correção de deficiência de N (SCHRÖDER et al., 2000).

O uso de sensores de reflectância nas principais culturas ainda é restrito devido ao seu elevado custo. Segundo Reusch (2006) existem três principais sensores de reflectância disponíveis comercialmente, o Crop Circle, o GreenSeeker e o N-SensorTM ALS, mas novos modelos estão surgindo como o CropSpec, Frizmeier, dentre outros. As versões mais recentes desses sensores são ativas, ou seja, possuem a própria fonte de luz a qual possibilita à aplicação em taxa variada sem considerar as condições de luz do ambiente.

O N-SensorTM ALS é um *scanner* multiespectral montado sobre um veículo agrícola (BERNTSEN et al., 2006). Este equipamento consiste em dois diodos com espectrômetros, sendo que um analisa a luz refletida por quatro lentes com um ângulo oblíquo sobre as culturas. O segundo espectrômetro é usado para mensurar o ambiente luminoso para correção do sinal de reflectância e assegurar leituras estáveis com a mudança de condições de irradiação (REUSCH et al., 2002; ZILLMAN et al., 2006).

Em plantas com deficiência de N ocorre redução dos teores de clorofila, diminuindo também a reflectância no infravermelho devido a mudanças na estrutura das células da planta, e esse decréscimo induz a um aumento na reflectância no vermelho. Alguns trabalhos constataram que os sensores de reflectância foram capazes de detectar a deficiência de nitrogênio, em milho (BLACKMER et al., 1996), trigo (STONE et al., 1996), feijão (THAI et al., 1998), algodão (SUI, 2005) e citros (LEE, 2005).

Jasper et al. (2009) reportaram que a relação da reflectância dos comprimentos de onda de 730 e 760 nm, utilizadas pelo N-SensorTM ALS, foi a que melhor estimou a quantidade de N absorvida pelas plantas. Portz et al. (2012) encontraram elevada correlação entre o índice de vegetação obtido com esse sensor e a matéria seca (MS) e com a quantidade de N absorvido pela cana-de-

açúcar. Porém, este sensor apresentou menor eficiência quando a quantidade de biomassa foi reduzida, em estádios iniciais, ou quando a quantidade foi muito elevada, em estádios avançados da cultura. Neste último estágio, observa-se o efeito de saturação que também foi reportada para os demais sensores de cultura que utilizam índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (POVH et al., 2008; POVH, 2011).

Entre as principais vantagens da fertilização nitrogenada utilizando-se sensor destacam-se o incremento de produtividade entre 3,0 a 13,0 % e a redução na quantidade de N em até 14,0 % na cultura da cana-de-açúcar (SINGH et al., 2006). Outros trabalhos reportaram incrementos menores na produtividade dos cereais, variando de 0,8 a 5,1 % (TRENGOVE, 2009), ou até mesmo não encontraram aumento da produtividade (RAUN et al., 2005).

Não há informação disponível na literatura brasileira para o uso do N-SensorTM ALS por produtores de algodão. No entanto, há uma grande oportunidade para o uso do sensor visando a economia na aplicação de nitrogênio em lavouras de algodão, porém, antes disso, o sensor deve ser calibrado, validado e testado para a cultura (ISHWAR SINGH, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição geral

Este trabalho foi desenvolvido ao longo de três safras (2012/13, 2013/14, 2014/15) da cultura do algodoeiro. As duas primeiras safras foram conduzidas no município de Chapadão do Céu - GO e a última em Campo Verde - MT. As lavouras nas duas regiões apresentaram comportamento muito semelhante quanto às características climáticas e topográficas, diferindo em relação ao tipo de solo. As áreas vêm sendo manejadas sob Sistema Plantio Direto - SPD há mais de 10 anos.

Ao longo das safras utilizou-se um sensor ativo de dossel (N-SensorTM ALS), sonares e clorofilômetro (N-TesterTM) para avaliar o desenvolvimento da cultura. Baseado nas leituras do sensor ativo de dossel foram testados diferentes algoritmos de recomendação da adubação nitrogenada por meio de experimentos em faixas.

O delineamento dos experimentos e tipos de avaliações foram diferentes de acordo com a finalidade, desta forma, em cada ano houveram objetivos diferentes a serem respondidos (Anexo A). Em cada um dos locais foram conduzidas ao menos duas áreas, sendo de cultivo convencional (espaçamento de 76 – 80 cm entre fileiras de semeadura) e adensado (45 cm).

Para uma melhor compreensão, inicialmente serão descritos em tópicos as características de cada local, seguido pelas especificações dos equipamentos e as avaliações realizadas.

3.2 Descrição dos locais

3.2.1 Chapadão do Céu - GO

As áreas experimentais localizadas neste município caracterizam-se por apresentar clima tropical de altitude (Cwa), com estação chuvosa no verão e seca no inverno (KÖPPEN, 1948). O município está localizado nas coordenadas geográficas de 18°23'S e 52°39'O a uma altitude que varia entre 750 e 800 m. A precipitação média anual é de aproximadamente 2.005 mm e a temperatura média diária varia ao longo do ano entre 10 e 28°C, segundo dados da prefeitura municipal.

Neste local, fazenda Amambai (grupo Wink) foram selecionados quatro talhões, sendo: a) cultivo convencional: dois talhões, um com 155 ha e outro 95 ha utilizando espaçamento de 80 cm entre fileiras e uma densidade populacional de 100.000 plantas ha^{-1} ; b) cultivo adensado, fazenda Âncora: dois talhões com cerca de 90 ha cada, espaçamento entre fileiras de 45 cm e densidade populacional de 190.000 plantas ha^{-1} .

3.2.2 Campo Verde – MT

Esta região apresenta clima tropical (Aw) com estação chuvosa no verão e seca no inverno (KÖPPEN, 1948). O município se localiza nas coordenadas geográficas de 18°23'S e 52°39'O em uma altitude média de 730 m. O índice pluviométrico é de aproximadamente 1.700 mm ano^{-1} e a temperatura média anual é de 22°C, segundo dados da prefeitura municipal. A topografia das áreas experimentais é classificada como suave ondulada.

Nesse local, fazenda Água Azul (grupo Bom Futuro), foram selecionados dois talhões, sendo: a) cultivo convencional: talhão de 100 ha utilizando espaçamento de 80 cm entre fileiras e densidade populacional de 95.000 plantas ha^{-1} ; b) cultivo adensado: talhão com 200 ha espaçamento entre fileiras de 45 cm e densidade populacional de 205.000 plantas ha^{-1} .

3.3 Descrição dos equipamentos

3.3.1 Sensor ativo de dossel

Para avaliação do desenvolvimento da cultura do algodoeiro e as taxas de N a serem aplicadas em cobertura utilizou-se o equipamento N-SensorTM ALS (Yara Internacional de Hanninghof, Duermen – Alemanha). O sensor foi instalado sobre um equipamento autopropelido de adubação a lanço (Hércules 5.0, Stara, Não-Me-Toque, Brasil), entre a cabine e o reservatório de produto, a uma altura aproximada de 3,5 m da superfície do terreno. A mensuração da reflectância espectral é realizada nas laterais da máquina por meio da emissão de luz xenon numa frequência de 10 Hz. Ao lado do emissor de luz há igualmente em cada extremidade, dois fotodiodos que captam a intensidade de reflectância chegando ao equipamento

nos comprimentos de onda de 730 e 760 nm na frequência de 20 Hz, ou seja, nas exatas 10 vezes que o feixe de luz xenon é disparado e outras 10 vezes nos intervalos das emissões. Isso permite descontar da intensidade de reflectância o valor correspondente à radiação solar (JASPER, 2006). Por possuir a característica de emitir a radiação que vai captar, esse tipo de sensor é classificado como sensor ativo de dossel.

A área amostrada em cada lado da máquina corresponde a uma elipse de aproximadamente 3 m de diâmetro na maior porção. A área de leitura pode variar em função da posição e altura que o sensor é instalado na máquina (Figura 3). O software interno calcula a média das leituras das duas laterais e fornece o valor de um índice de vegetação próprio (Portz, 2011).

Figura 3 – Demonstração da localização do o sensor ativo de dossel no maquinário e a simulação da faixa de leitura do sensor

3.3.2 Clorofilômetro

Para estimativa de clorofila nas folhas utilizou-se o clorofilômetro portátil N-Tester™ (Yara Internacional de Hanninghof, Duermen – Alemanha), que é um equipamento manual que estima a concentração de clorofila através da análise de transmitância de luz através da folha em comprimentos de onda específicos (YARA,

2014). Por sua vez, o teor de clorofila está diretamente associado ao teor de nitrogênio na folha (Taiz & Zeiger, 2009)

A medição consiste basicamente em colocar a folha da planta entre duas superfícies na área de medição do equipamento, sendo que uma possui luzes de LEDs com os comprimentos de onda de luz desejados e a outra superfície possui um fotodiodo que detecta o quanto de luz passou o limbo foliar e o quanto foi impedido ou absorvido pela folha analisada. Esta diferença fornece um valor que neste trabalho foi correlacionado com as análises foliares de nitrogênio em laboratório.

3.3.3 Sensor ultrassônico (sonar)

Para a mensuração da altura de plantas utilizou-se sonares instalados em braços laterais da máquina a uma distância de aproximadamente 1,5 m da borda externa do pneu da máquina (Figura 4). Os sonares (série 6500 Polaroid) operam na frequência de ressonância de 50 kHz. Uma característica chave de sensores ultrassônicos é o padrão de propagação expressado por suas ondas, também ilustrativamente chamado de "largura de feixe". Os lóbulos podem ser definidos como a faixa angular entre a direção normal, ou seja, 0° , e um zero da primeira derivada da trama. Como pode ser visto, na Figura 4, o lóbulo principal é de cerca de $\pm 15^\circ$ de largura. O lóbulo secundário é de cerca de $\pm 30^\circ$ e o lóbulo superior é cerca de $\pm 45^\circ$ de largura (CAO et al., 2002). O sensor CropCircle que aparece na Figura 4, ao lado dos sonares, faz parte de um projeto de pesquisa parceiro.

Figura 4 - Sensor ultrassônico Polaroid 6500 (A), padrão de propagação da onda emitida pelo sensor (B) e posição de instalação do sensor na máquina (C)

Fonte: (A) e (B), Cao et al. (2002)

3.4 Descrição das avaliações

3.4.1 Relação entre as leituras do sensor ativo de dossel e os parâmetros de planta

Esta avaliação foi realizada durante duas safras (2012/13 e 2013/14) no município de Chapadão do Céu – GO. Na primeira safra as áreas foram conduzidas da seguinte maneira:

- 15-20 dias após emergência (DAE) – primeira aplicação de N em cobertura; (estádio vegetativo)
- 40 DAE – segunda aplicação de N em cobertura; (estádio de botão floral)
- 55 DAE – primeira aplicação de reguladores de crescimento; (estádio de floração)

- Entre 55 e 125 DAE – 2 a 3 aplicações de reguladores de crescimento; (estádio de maçãs)
- 125 DAE – última aplicação de reguladores de crescimento; (estádio de capulhos)
- 180 DAE – aplicação de desfolhantes. (estádio de capulhos)

A aplicação de N em cobertura foi realizada em superfície, a lanço (nitrato de amônio granulado, 32% N) com o uso do distribuidor autopropelido de fertilizantes.

Para relacionar as leituras do o sensor ativo de dossel com os atributos de plantas (altura, massa seca, massa fresca e N acumulado) foram escolhidas cinco regiões da lavoura apontadas pelo sensor como contendo classes de biomassa diferentes. Em cada uma das classes foram alocados seis pontos amostrais e coletadas as informações de planta aos 35, 50 e 85 DAE em média.

A amostragem foi realizada medindo-se a altura média de cinco plantas por ponto amostral, este correspondendo a 1,0 m linear de três fileiras adjacentes, cortando a planta na altura do solo e medindo a massa fresca da amostra (Figura 5). Após a coleta o material foi picado e retirada uma subamostra de 250 g por ponto amostral para determinação de matéria seca e do teor total de N. A matéria seca foi obtida secando a amostra em estufa de ventilação forçada a temperatura de 65°C até a amostra adquirir peso constante. O teor de N foliar foi determinado no Laboratório de Análise de Tecidos Vegetais da ESALQ-USP.

Figura 5 – Esquema de leituras com o sensor e amostragem das plantas

Foram realizadas três avaliações em cada área, aos 38, 51 e 85 DAE na área de cultivo convencional e aos 33, 51 e 72 DAE na área de cultivo adensado. Esses

períodos foram escolhidos considerando-se o efeito das adubações nitrogenadas realizadas anteriormente, proporcionando leituras após a absorção do nutriente pela cultura, seguindo-se assim a curva de absorção de N. Para coleta dos dados do sensor óptico ativo a máquina percorreu toda a área a uma velocidade média de $5,5 \text{ m s}^{-1}$, com espaçamento de 30 m entre passadas e com as configurações de posição como demonstradas na (Figura 6). A partir da relação entre as reflectâncias das duas bandas espectrais do sensor, este fornece os valores do índice de vegetação da cultura de acordo com a equação (1):

$$VI = 100 * (IVP / \text{RedEdge} - 1) \quad (1)$$

em que:

VI = índice de vegetação;

IVP = reflectância no infravermelho próximo;

RedEdge = reflectância no “RedEdge”

Figura 6 - Ponto de instalação dos sensores no veículo (setas), à esquerda e vista geral da cultura aos 38 e 51 DAE no algodão convencional (superior), e aos 33 e 51 DAE no algodão adensado (inferior)

Os dados de índice de vegetação foram georreferenciados e coletados com frequência de 1 Hz. Para o sensor óptico ativo a partir da coordenada central registrada, projetou-se os valores individuais de cada lado do sensor para o centro do campo de visão deste, a fim de melhor representar a área sensoriada.

Os mapas de índice de vegetação produzido pelo sensor óptico ativo foram visualmente inspecionados e então utilizados para direcionar os 30 pontos amostrais

de cada avaliação, a fim de abranger toda a amplitude dos dados registrados pelo sensor.

3.4.2 Relação entre as leituras do clorofilômetro e os parâmetros de planta

Na primeira amostragem (40 DAE) foram realizadas medições com o N-Tester™ na quinta folha a partir do ápice, no período de florescimento (RAIJ et al., 1996), sendo que em cada ponto amostral 30 plantas foram amostradas para gerar a média de um índice proprietário do N-Tester™. As 30 folhas medidas (clipadas) pelo N-Tester™ foram retiradas e encaminhadas para a determinação do teor de N em laboratório. O clorofilômetro foi utilizado apenas no primeiro e segundo ano do projeto.

3.4.3 Relação entre as leituras do sonar e os parâmetros de planta

A utilização de sensores ultrassônicos para correlação com os parâmetros de planta foi realizada no segundo e terceiro ano do projeto, sendo desta forma nas áreas experimentais do Goiás e Mato Grosso. Nas áreas de Chapadão do Céu utilizou-se o sensor Polaroid 6500 e em Campo Verde no ano seguinte o sistema foi implementado em sonares comandados com Arduíno.

O sensores foram instalados lateralmente na máquina há uma distância de aproximadamente 2,0 m de altura do chão. No caso do sonares Polaroid foram utilizados somente um em cada lado da máquina; para a composição utilizando o sistema Arduíno, foram quatro, sendo dois em cada lado.

3.4.4 Estratégia de adubação nitrogenada baseada nas leituras do sensor ativo de dossel

Para avaliar qual a melhor estratégia de adubação nitrogenada visando o aumento de produtividade de algodão, foram instalados experimentos em faixas no segundo e terceiro ano do projeto (safras 2013/14 e 2014/15). Os experimentos consistem na utilização de uma estratégia de adubação para cada faixa de aplicação do equipamento, seguindo traçados retilíneos que cruzem a maior porção do talhão. Essa é uma maneira de substituir a experimentação clássica em parcelas quando se

busca avaliar o efeito de um tratamento em grandes áreas e diferentes condições ambientais de desenvolvimento para a cultura.

Conforme a Tabela 1, quatro estratégias de adubação (tratamentos) foram testadas em faixas com número de repetições variáveis em função do ano e sistema de cultivo adotado (convencional e adensado). O delineamento adotado para os tratamentos foi em blocos casualizados com quatro repetições. O tamanho de cada faixa correspondeu a duas vezes a largura de aplicação do fertilizante pelo comprimento do talhão, retirando-se assim uma área útil entre as duas passadas para a obtenção dos dados de colheita. Na Figura 7, são mostradas as estratégias de adubação onde se utilizaram algoritmos com inclinação positiva e negativa sendo: a) inclinação positiva: fornecer uma maior quantidade de nitrogênio para as plantas mais vigorosas e assumir que a limitação de desenvolvimento das porções mais fracas não é causada pela deficiência de N; b) inclinação negativa: fornecer uma maior quantidade de N para as plantas com menor desenvolvimento visando buscar a uniformização da área.

Figura 7 - Representação esquemática do comportamento do algoritmo de adubação nitrogenada em função da leitura do sensor

A adubação nitrogenada foi parcelada em três aplicações durante o ciclo do algodoeiro, sendo aos 20, 40 e 60 DAE. A aplicação aos 20 DAE foi realizada em taxa fixa tanto na área de cultivo convencional quanto adensado, afim de garantir um teor de nitrogênio mínimo em todos os tratamentos, para a partir daí realizar as redistribuições do fertilizante nos tratamentos. As diferenças de tratamentos começaram aos 40 DAE conforme descrito na Tabela 1. Em específico, o tratamento quatro foi realizado na tentativa de uniformizar mais as plantas de algodão com a redistribuição com o algoritmo negativo e privilegiar as plantas mais vigorosas posteriormente com o algoritmo positivo.

Tabela 1 - Detalhamento dos tratamentos utilizados para a aplicação nas faixas

Tratamentos	1ª Aplicação (20 DAE ¹)	2ª Aplicação (40 DAE)	3ª Aplicação (60 DAE)
T1	21 kg ha ⁻¹ ² (fixo)	30 kg ha ⁻¹ (fixo)	30 kg ha ⁻¹ (fixo)
T2	21 kg ha ⁻¹ (fixo)	30 kg ha ⁻¹ (variável- inclinação negativa)	30 kg ha ⁻¹ (variável- inclinação negativa)
T3	21 kg ha ⁻¹ (fixo)	30 kg ha ⁻¹ (variável- inclinação positiva)	30 kg ha ⁻¹ (variável- inclinação positiva)
T4	21 kg ha ⁻¹ (fixo)	30 kg ha ⁻¹ (variável- inclinação negativa)	30 kg ha ⁻¹ (variável- inclinação positiva)

¹: Dias após emergência. ²: kg/ha de nitrogênio (fertilizante utilizado: YaraBela Nitromag – 27% N + 4% Ca + 2% Mg).

A aplicação nitrogenada em cobertura foi realizada a lanço utilizando um equipamento autopropelido de adubação (Figura 8). Realizou-se uma checagem para que fosse adotada nesse trabalho uma regulagem do distribuidor que mantivesse o coeficiente de variação da faixa de aplicação (distribuição horizontal) abaixo dos 10% (Anexo B), para isso utilizou-se o software Adulanço 3.1 (SPEKKEN et al., 2007).

Figura 8 - Veículo autopropelido para adubação a lanço

O primeiro ensaio das faixas experimentais foi instalado (fazenda Amambaí) na safra de 2013/14, em Chapadão do Céu - GO. Dois talhões foram utilizados, sendo: 1) Talhão 13: aproximadamente 155 ha (Figura 16); 2) Talhão 2: 95 ha, onde se localizaram também os pontos amostrais de altura e biomassa.

A semeadura foi realizada nos dias 29/12/2013 para o talhão 13 e 03/01/2014 para o talhão 2, ambos em sistema de semeadura direta sobre palhada de feijão que foi cultivado de setembro a dezembro. Utilizou-se a cultivar de algodão FM 975WS,

semeada em espaçamento convencional (0,80 m entre fileiras) com uma população estimada de 100.000 plantas ha^{-1} . A adubação de base na linha de semeadura foi realizada por haste sulcadora na profundidade aproximada de 0,08 m utilizando-se 150 kg ha^{-1} de MAP (11-52-00).

Na segunda área (fazenda Âncora) utilizou-se também dois talhões, o talhão Âncora 1, de 94 ha (Figura), onde foi implantada a parte do experimento que envolve as faixas de aplicação a taxa variável, e o talhão Âncora 2, de 90 ha, onde se concentraram os pontos amostrais de altura e biomassa. A semeadura aconteceu nos dias 15/01/2014 para o talhão Âncora 1 e 18/01/2014 para o talhão Âncora 2, ambos em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja que foi cultivada de setembro a janeiro.

A cultivar utilizada foi a FM 975WS, semeada em espaçamento adensado (0,45 m entre fileiras) e população estimada de 200.000 plantas ha^{-1} . A adubação de base na linha de semeadura foi realizada por haste sulcadora na profundidade aproximada de 0,08 m utilizando-se 190 kg ha^{-1} de MAP (11-52-00). Nas áreas das faixas foram seguidos os detalhes de cada tratamento e nas áreas das amostragens as fertilizações foram realizadas em taxa fixa e as demais práticas culturais foram as usualmente empregadas na propriedade.

Com base no acompanhamento e análise dos dados da safra 2013/14, foi possível observar grande influência da localização das faixas na produtividade final de cada tratamento. A partir disso no ano de 2015, ano em que foram mudadas as áreas de estudo, buscou-se caracterizar melhor o solo do local (sobretudo textura) utilizando o mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo em alta densidade. Para isso foi utilizado o equipamento Veris 3100 (Veris Technologies, Salina – KS, USA) que realiza a mensuração da condutividade elétrica aparente do solo em duas camadas de profundidade (0 – 0,30 e 0 - 0,90m) por meio de seis discos em cortam o solo, onde dois realizam a injeção da corrente elétrica e os demais captam o sinal de retorno (MOLIN; RABELLO, 2011).

A informação de condutividade elétrica coletada por esse equipamento está altamente associada a características como umidade e textura do solo (MOLIN; RABELLO, 2011). Desta forma, permite visualizar o potencial de disponibilidade hídrica em cada local da lavoura, fator relevante para produtividade do algodoeiro em sistema de sequeiro.

Na safra 2014/15 foi realizada a terceira etapa, no município de Campo Verde - MT, onde houve a investigação em dois campos de algodão. Utilizou-se dois talhões, o talhão 116, de aproximadamente 100 ha, onde foi implantada a parte do experimento que envolve as faixas de aplicação a taxa variável em algodão convencional, e o talhão 12, de 200 ha, onde se implantou o experimento em faixas em algodão adensado.

A semeadura foi realizada nos dias 02/01/2015 para o talhão 116 e 17/01/2015 para o talhão 12, ambos em sistema de semeadura direta sobre palhada de soja que foi cultivada de setembro a janeiro. Utilizou-se a cultivar de algodão FM 975WS.

A adubação fosfatada foi realizada a lanço utilizando-se 100 kg ha^{-1} de MAP (12-46-00 + 7%S), tanto no algodão convencional quanto no adensado. Foram realizadas quatro adubações nitrogenadas de cobertura, duas com ureia (45%N) e duas com sulfato de amônio (21%), 300 kg de sulfato de amônio dividido aos 25 dias após emergência (DAE) e aos 40 DAE e 200 kg de ureia, divididos aos 50 DAE e 60 DAE.

Nessa etapa, não houve a coleta dos pontos amostrais somente a instalação das faixas para avaliar a melhor estratégia de adubação.

Os resultados foram obtidos a partir da coleta dos mapas de produtividade gerados pelas colhedoras, devidamente calibradas.

Figura 9 – Sensor do fluxo de massa. Fonte: DEERE, 2016.

Os sensores do fluxo de massa de algodão (Figura 9) transmitem feixes de energia de microondas através dos seus respectivos dutos plásticos, insidindo no fluxo de algodão. Uma parte desta energia reflete e volta para o sensor, onde a energia refletida é detectada (DEERE, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Relação entre as leituras do sensor ativo de dossel e os parâmetros de planta

A relação entre os atributos de planta e as leituras do sensor ativo de dossel foi de maneira geral alta, apresentando coeficiente de correlação médio de 0,81 (Tabela 2). Os quatro parâmetros avaliados comportaram-se de maneira similar, não havendo uma característica que tenha apresentado correlação média com valores muito distintos das demais. O que pode-se observar é uma tendência de valores mais elevados de correlação nas primeiras leituras (33 e 35 DAE). Isso se explica devido a cultura do algodoeiro não ter fechado entrelinha nesta fase, o que ocasiona em leituras com presença de solo e gera uma amplitude maior nos valores do sensor, favorecendo a correlação linear. A única exceção ocorreu no ano 2 para o sistema de cultivo convencional, isso se deve ao fato de haver variabilidade textural do solo desse talhão, o que limitou significativamente o desenvolvimento da cultura nas regiões com menos de 20% de argila, aumentando a amplitude das leituras ao longo do ciclo.

Quando analisados os anos separadamente, observa-se uma melhora nos coeficientes no ano 2, isso ocorreu devido a escolha de áreas mais heterogêneas, com manchas mais consistentes, para implantação dos experimentos. Essa foi uma premissa baseada nas observações visualizadas no ano 1, em que a potencialidade de utilização do sensor é maior em áreas com maior variabilidade.

Tabela 2 - Coeficiente de correlação entre o índice de vegetação S1 e os parâmetros da cultura do algodoeiro cultivados em diferentes arranjos espaciais em Chapadão do Céu – GO

Atributo	Ano 1						Ano 2					
	Adensado			Convencional			Adensado			Convencional		
	35 ¹	50	85	35	50	85	33	51	72	38	51	85
Altura	0,84	0,74	0,64	0,90	0,90	0,61	0,82	0,80	0,85	0,90	0,95	0,95
Massa Fresca	0,85	0,73	0,64	0,90	0,87	0,69	0,86	0,82	0,75	0,80	0,96	0,96
Massa Seca	0,88	0,70	0,61	0,90	0,87	0,58	0,88	0,75	0,68	0,84	0,96	0,96
N Acumulado	0,86	0,70	0,62	0,91	0,84	0,56	0,85	0,74	0,72	0,84	0,95	0,94

¹ Dias após a emergência; as leituras foram realizadas de 7-10 dias após a adubação nitrogenada.

A análise descritiva inicial dos dados coletados pelo sensor mostrou grande assimetria, com concentração de valores pequenos e alta dispersão nos valores

maiores. Buscando atender os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias, estes foram submetidos à transformação logarítmica antes das análises.

A análise estatística dos dados constitui-se da análise de variância entre a característica sendo estimada e o valor fornecido pelo sensor, sendo consideradas as possíveis interações com o estágio fenológico da cultura e o sistema de espaçamento entre fileiras utilizado. A predição realizada pela regressão linear levou em consideração as interações significativas.

A fim de facilitar a compreensão, para apresentação dos resultados na forma gráfica, foram utilizados os resultados sem transformação, usando-se os dois eixos em escala logarítmica. O valor da raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE) apresentado na, figura 10, também está apresentado na escala original dos dados, sendo obtido pela aplicação da transformação inversa nos resíduos da regressão linear. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando-se o software R, versão 3.1.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

A análise de variância revelou efeito significativo da interação entre índice de vegetação, estágio da cultura e os dois sistemas de espaçamento na predição de massa fresca e seca, N acumulado e altura, para o sensor avaliado. Devido à presença da interação, esses dois fatores foram incluídos no modelo de predição, o que na prática significa que é necessário que sejam fornecidas essas informações em complemento ao índice gerado pelo sensor óptico ativo para que este seja mais eficiente.

A relação entre massa fresca predita pelo sensor e a observada foi significativa, com um aumento significativo do coeficiente de determinação chegando a valores acima de 0,9 no segundo ano (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Esse resultado indica que o desempenho do sensor em prever massa fresca no algodoeiro é superior ao de outras culturas, como por exemplo, a cana-de-açúcar, onde o coeficiente de determinação geral entre os valores preditos pelo mesmo sensor óptico ativo e os observados foi de 0,83 (PORTZ et al., 2013). Valores semelhantes do coeficiente de determinação para a predição de massa seca também foram obtidos. Observa-se uma melhora significativa no desempenho do sensor no ano 2 e, principalmente, no sistema convencional, isso se deve ao fato da maior variabilidade dessas situações, colaborando com o melhor desempenho do sensor.

O valor do coeficiente de determinação para a predição do N acumulado foi maior que 0,9 para o sensor, também na mesma situação da variabilidade espacial da lavoura (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Este valor é maior, porém próximos, aos observados por Portz et al. (2012), que ao utilizarem o mesmo sensor para estimar o N acumulado em cana-de-açúcar com altura de colmo entre 0,20 e 0,60 m, obtiveram valores de 0,83 ao considerarem diferentes áreas. Bragagnolo et al. (2013) também usaram o equipamento para estimar nitrogênio acumulado na cultura do milho entre os estádios de desenvolvimento V4 e V12, obtendo coeficientes de determinação de 0,87, também inferiores aos obtidos na cultura do algodoeiro.

Pode-se observar que mesmo aos 85 DAE, período em que todo o N de cobertura usualmente já foi aplicado, o sensor continua demonstrando bom desempenho e não apresenta sinais de saturação por excesso de biomassa da cultura, já que nessa fase a lavoura se encontra em fechamento da entrelinha, dificultando o desempenho do sensor em diferenciar as manchas da lavouras. Essa constatação é importante porque possibilita maior período de tempo para as aplicações do N em taxa variável. Considerando que o algodão apresenta um ciclo médio de 180 dias, ou seja, maior que as outras culturas anuais, há potencial de parcelamento da dose total em maior número de aplicações, reduzindo os riscos de elevadas perdas de N por lixiviação em áreas com baixa CTC ou sujeitas a chuvas intensas.

Com relação à altura de plantas, o sensor obteve um ótimo desempenho com o coeficiente de determinação também superiores a 0,9. De forma geral, para os quatro parâmetros analisados, os valores de coeficiente de determinação são altos, evidenciando que o uso para a predição desses parâmetros no algodoeiro é suficientemente confiável em áreas que apresentem uma certa variabilidade, pois em áreas mais homogêneas o desempenho do sensor é bastante prejudicado.

Figura 10 - Comportamento do N-SensorTM ALS na estimação de massa fresca em todas as datas de leitura nos anos 1 e 2, respectivamente.

Figura 11 - Comportamento do N-SensorTM ALS na estimação de massa seca em todas as datas de leitura nos anos 1 e 2, respectivamente.

Figura 12 - Comportamento do N-Sensor™ ALS na estimação de N acumulado em todas as datas de leitura nos anos 1 e 2, respectivamente.

Figura 13 - Comportamento do N-Sensor™ ALS na estimação de altura em todas as datas de leitura nos anos 1 e 2, respectivamente.

4.2 Relação entre as leituras do clorofilômetro e os parâmetros de planta

As leituras com o clorofilômetro (N-Tester™) não apresentaram o mesmo desempenho de predição de N visualizados para o sensor ativo de dossel e sonar. Cabe salientar que neste caso a determinação de N em laboratório foi realizada somente nas folhas analisadas pelo clorofilômetro, ao contrário dos casos anteriores, onde a determinação de N foi realizada em planta inteira.

A ausência de relação entre o nitrogênio foliar e os índices do clorofilômetro pode ser visualizada na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Tanto o sistema densado como o convencional não apresentaram níveis desejáveis de predição de nitrogênio foliar.

Figura 14 – Desempenho do clorofilômetro em prever nitrogênio foliar nos dois sistemas de cultivo.

A falta de resposta do clorofilômetro pode ter sido causada por dificuldades em amostrar a folha desejável no estágio recomendado segundo a literatura.

4.3 Relação entre as leituras do sonar e os parâmetros de planta

O sonar montado no equipamento de leitura mostrou-se estável e capaz de diferenciar as regiões com variabilidade na lavoura. Na Figura pode-se observar regiões da lavoura com altura de planta estimada variando de 0 (locais com falha de plantas) até 1,56 m. Um indicador da confiabilidade das leituras é a característica da distribuição das manchas, delimitando regiões distintas, indicando a presença de dependência espacial.

Figura 15 – Mapa da altura predita pelo sensor ultrassônico para o talhão 12 (sistema de cultivo adensado) na safra 2014/15

A partir do mapa da Figura foram coletadas amostras de planta para avaliar a relação entre as leituras. Da mesma maneira que o sensor de reflectância, o sonar foi capaz de estimar a altura de plantas com uma grande eficiência, apresentando coeficiente de regressão de 0,86 (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Como na cultura do algodoeiro a altura de planta está diretamente associada aos fatores de massa fresca, massa seca e N acumulado, esta característica auxiliou na predição destes atributos pelo sonar. No entanto, assim como o N-SensorTM ALS, o sonar teve uma melhora significativa na predição das leituras do segundo ano; isso se deve a presença de áreas mais heterogêneas. Um fato que deve ser destacado é que a amostragem realizada privilegiava o N-Sensor por sua ampla faixa de leitura da cultura. Enquanto o sonar realiza a leitura de uma a duas linhas laterais à passada da máquina, o N-Sensor realiza a varredura de 3,0 m de comprimento em cada lado da máquina e isso torna seu desempenho mais robusto na forma de amostragem que realizada.

Figura 15 - Desempenho do Sonar em prever o acúmulo de massa fresca e seca, nitrogênio acumulado e altura do algodoeiro em todas as datas de leitura do ano 2

4.4 Avaliação das estratégias de adubação nitrogenada baseada nas leituras do sensor óptico ativo

A avaliação das estratégias de adubação nitrogenada foi realizada no segundo e terceiro ano do projeto em locais diferentes. Na Figura 16 pode-se observar o delineamento e a disposição dos tratamentos no talhão 13 (Chapadão do Céu, GO, safra 2013/14, cultivo adensado), como camada de fundo da imagem tem-se o mapa de produtividade. Percebe-se claramente que a produtividade, devido a sua agregação e distribuição espacial, foi influenciada por fatores intrínsecos do solo e não diretamente por efeitos dos tratamentos utilizados.

Figura 16 - Delineamento e disposição dos tratamentos no talhão 13 (Chapadão do Céu-GO) de sistema de cultivo convencional (0,80 m) com o mapa de produtividade final como camada de fundo (safra 2013/14)

A produtividade apresentou alta variabilidade dentro das faixas, o que aumentou o coeficiente de variação de cada tratamento, e portanto, reduziu a possibilidade de obter influência significativa da estratégia de adubação na produtividade (Figura). Outro fator que contribuiu para esse resultado foi a uniformidade de biomassa do talhão no momento das leituras com o sensor, resultando em pequenas variações de doses nitrogenadas, mesmo para os diferentes algoritmos testados.

Figura 18 – Produtividade dos tratamentos no talhão 13 (Chapadão do Céu-GO, safra 2013/14) de sistema de cultivo convencional (0,80 m)

No experimento em faixas de cultivo adensado (talhão âncora 1, Chapadão do Céu – GO, safra 2013/14) também observou-se alta variabilidade da produtividade dentro dos tratamentos, além de uma distribuição da produtividade ligada a outros fatores que não a adubação nitrogenada.

Como ocorreu no talhão de cultivo convencional, não houve grande variabilidade nas leituras do sensor durante a aplicação das taxas variadas de nitrogênio, resultando em doses muito parecidas entre os tratamentos no momento da aplicação (Figura). Isso resultou em um comportamento aleatório da produtividade dos tratamentos (Figura Figura 17).

Figura 19 - Delineamento e disposição dos tratamentos no talhão âncora 1 (Chapadão do Céu - GO) de sistema de cultivo adensado (0,45 m) com o mapa de produtividade final como camada de fundo (safra 2013/14)

A produtividade média do sistema de cultivo convencional foi maior que o adensado em todos os tratamentos, esse resultado é esperado, uma vez que o sistema de cultivo adensado acelera o ciclo da cultura devido a competição entre plantas. Por outro lado, há uma redução dos custos com defensivos uma vez que a cultura exige aplicações semanais destes. Além disso, esse sistema é importante quando se tem uma janela de safrinha curta para o estabelecimento da cultura.

Figura 17 - Produtividade de algodão tratamentos no talhão âncora 1 (Chapadão do Céu - GO, safra 2013/14) de sistema de cultivo adensado (0,45 m)

No terceiro ano do projeto (safra 2014/15) os experimentos foram conduzidos em Campo Verde – MT. Por meio de imagem de satélite, obtida do Landsat (através do site da NASA - *National Aeronautics and Space Administration*), durante o transcorrer do ciclo da cultura (Figura), observa-se a existência de regiões com alta variabilidade no talhão 12 (cultivo adensado) e homogeneidade no talhão 116 (cultivo convencional).

Figura 21 – Imagem de satélite (composição falsa-cor) obtida do dia 04 de junho de 2015 evidenciando a heterogeneidade (talhão 12 - adensado) e homogeneidade (talhão 116 - convencional) dos talhões experimentais utilizados na safra 2014/15

Para auxiliar na determinação da variabilidade dos talhões, foram realizadas leituras de condutividade elétrica aparente do solo (CE_a). A densidade de pontos de condutividade elétrica em função do seu valor no interior de cada tratamento pode auxiliar como um indicativo do potencial produtivo da área, uma vez que a condutividade elétrica é uma importante ferramenta para estimar a umidade e textura do solo (MOLIN; RABELLO, 2001). Os efeitos da umidade do solo sobre a produtividade são favorecidos nas condições destes experimentos devido a maior parte do ciclo do algodoeiro coincidir com os meses secos (menores índices de pluviosidade) na região de estudo.

A condutividade elétrica foi utilizada como um indicativo do potencial produtivo de cada tratamento, pois indica a disponibilidade hídrica dentro das faixas e pode ser determinante em anos de déficit hídrico para a cultura. Desta forma, para o sistema de cultivo adensado, apesar a aleatorização das faixas, houve um pequeno favorecimento dos tratamentos 1 e 3 devido à localização das parcelas

experimentais ocorrerem em regiões com maior CE_a (Figura 18). No caso do cultivo convencional, onde há maior variabilidade do solo e amplitude nos valores de CE_a , ocorreu um desfavorecimento do tratamento 2 que teve a maior parte da sua área em local arenoso, com baixa CE_a e portanto, disponibilidade hídrica (Tabela 3).

Figura 18 – Histograma da densidade de pontos amostrais de condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) no interior das faixas de cada tratamento no sistema de cultivo adensado (esquerda) e convencional (direita)

Tabela 3 – Análise estatística dos tratamentos x condutividade elétrica do solo na condição de sistema convencional

Fator	G. L.	Estat. F	P-valor
Tratamento	3	1,13	0,34
CE 30	1	197,14	<0,01
Tratamento X CE 30	3	0,31	0,82
Resíduos	160		

Tabela 4 - Análise estatística dos tratamentos x condutividade elétrica do solo na condição de sistema adensado

Fator	G. L.	Estat. F	P-valor
Tratamento	3	7,62	<0,01
CE 30	1	70,81	<0,01
Tratamento X CE 30	3	8,33	<0,01
Resíduos	160		

Como a distribuição da dose de nitrogênio aplicada em cada tratamento é variável e depende do índice de biomassa determinado pelo sensor, realizou-se uma análise da distribuição das taxas utilizadas em cada tratamento por meio do arquivo de aplicação da máquina, essa análise permite verificar o comportamento dos

algoritmos frente a variação de biomassa e a eficiência do equipamento na redistribuição da taxa alvo (taxa média final).

No talhão de cultivo adensado, onde observou-se a maior variabilidade de CE_a e manchas visíveis nas imagens de satélite, também foi onde ocorreu a maior distinção das taxas por conta da leitura do sensor, Figura e tabela 4. A área final representada pelas linhas de cada tratamento na Figura é igual para todos os tratamentos, isso demonstra que não houve favorecimento de nenhuma das estratégias de adubação quanto a dose final de N em cada tratamento, e demonstra a eficiência do equipamento em redistribuir a dose na área.

Figura 23 - Histogramas da quantidade de nitrogênio aplicado nos tratamentos das faixas experimentais sendo o adensado (esquerda) e o convencional (direita)

A observação do comportamento do índice de vegetação ao longo do ciclo da cultura no experimento de cultivo convencional permite visualizar que todas as estratégias de redistribuição da adubação nitrogenada ocasionaram a diminuição da variabilidade das leituras até os 102 DAE (Figura 19). Essa observação não significa que a variabilidade na lavoura foi corrigida mas é um comportamento comum dos sensores de dossel devido ao início da “saturação” das leituras. A diminuição da amplitude do índice ocorre devido ao estágio avançado de desenvolvimento cultura e fechamento total das entrelinhas.

Figura 19 - Histogramas do índice de vegetação nos diferentes tratamentos das faixas experimentais no sistema de cultivo convencional

A produtividade final dos experimentos mostrou-se mais dependente da localização espacial dos tratamentos do que devido a estratégia de adubação adotada (Figura 20). Como demonstrado pela condutividade elétrica, os tratamentos 1 e 3 no sistema adensado foram favorecidos o que foi observado na produtividade superior destas áreas (Tabela 5). Da mesma forma no sistema convencional ocorreu um claro desfavorecimento na alocação das faixas do tratamento 2 em relação aos demais, o que se refletiu em baixa produtividade.

Tabela 5 – Médias de produtividade e teste Tukey ($p < 0,05$) na condição de algodão adensado

Tratamento	Produtividade (kg ha^{-1})
Neg-Neg-Neg (T3)	4.176 A
Fixo-Fixo-Fixo (T1)	4.068 B
Neg-Neg-Pos (T4)	3.973 B
Pos-Pos-Pos (T2)	3.881 C

Figura 20 - Produtividade dos diferentes tratamentos das faixas experimentais do talhão 12 – adensado (esquerda) e do talhão 116 - convencional (direita) na safra 2014/15

5 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos ao longo de três anos de avaliações do uso de sensores e estratégias de adubação nitrogenada para uma melhor redistribuição do nutriente durante o ciclo do algodoeiro constatou-se que:

- o sensor ativo de dossel utilizado é eficiente em estimar altura de planta, massa fresca, massa seca e nitrogênio acumulado na cultura do algodoeiro para o tipo de metodologia adotada e nas condições do estudo;
- a utilização de clorofilômetro portátil para monitorar o teor de N foliar no algodoeiro não demonstrou ser uma técnica eficiente para a metodologia que foi adotada, por isso, recomenda-se mais análises para o seu uso nessa cultura;
- o uso de sensor ultrassônico (sonar) para estimar parâmetros de altura de planta, massa seca, massa fresca e nitrogênio acumulado na planta do algodoeiro é uma estratégia promissora que embora não tenha a mesma eficiência de sensores de dossel, demonstrou bons resultados na detecção da variabilidade nas lavouras;
- as diferentes estratégias de adubação nitrogenada no algodoeiro orientadas pelo sensor ativo de dossel não resultaram em efeitos claros na produtividade. A produtividade de cada tratamento mostrou-se mais dependente da localização das repetições dentro da área do que da estratégia de adubação adotada.

Como considerações sobre a pesquisa, torna-se importante salientar que a grande vantagem da utilização do sensor ativo de dossel para monitoramento da variabilidade da lavoura está ligada à sua praticidade de instalação, robustez e facilidade de operação. A possibilidade de redistribuição da adubação nitrogenada de acordo com o potencial de aproveitamento do algodoeiro representa um ganho produtivo e ambiental sem precedentes, pois a má gestão desse insumo pode gerar contaminação de mananciais e lençol freático.

Há dificuldade na obtenção de mapas de produtividade coerentes no sistema de cultivo adensado, já que nesse sistema as máquinas utilizadas para a colheita são antigas e necessitam de adaptações para instalação dos sensores que monitoram o fluxo de algodão. A dificuldade de o produtor rural adotar um

monitoramento da variabilidade da lavoura com o uso de sonares se limita no fato de não haver sistemas comerciais robustos para aplicações diretas no campo. Desta forma, há a necessidade de desenvolvimento do sistema para embarcar na máquina agrícola.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se uma investigação detalhada dos solos das áreas experimentais antes da implantação dos experimentos. Isso evitaria o favorecimento de algum tratamento e possibilitaria a correta alocação das faixas de tratamento.

REFERÊNCIAS

- ACOCK, B.; PACHEPSKY, Y.A. Holes in precision farming: mechanistic crop models. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, nº 1, 1997, London. **Proceedings...** London: SCI, 1997. p. 397-404.
- ARRUDA, F. P. et al. Emissão/abscisão de estruturas reprodutivas do algodoeiro herbáceo, cv. CNPA 7H: efeito do estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 21-27, 2002.
- ATHERTON, B.C. Site-specific farming: a perspective on information needs benefits and limitations. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 54, n. 2, p. 455-461, 1999.
- BARBIERI, D.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de propriedades químicas de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 645-653, 2008.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, p. 161-173, 1991.
- BELTRÃO, N.E.M. **Algodão brasileiro em relação ao mundo: situação e perspectivas**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, p. 16-27, v. 1, 1999.
- BIERMACHER, J.T.; EPPLIN, F.M.; BRORSEN, B.W.; SOLIE, J.B.; RAUN, W.R. Maximum benefit of a precise nitrogen application system for wheat. **Precision Agriculture**, New York, v. 7, p. 193-204, 2006.
- BLACKMORE, B.S.; LARSCHEID, G. Strategies for managing variability. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, nº 1, 1997, Warwick. **Proceedings...** London: BIOS Scientific, 1997. p. 851-859.
- BOISSARD, P.; POINTEL, J.G.; TRANCHEFORT, J. Estimation of the ground cover ratio of a wheat canopy using radiometry. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 13, n. 9, p. 1681-1692, 1992.
- BOQUET, D.J.; MOSER, E.B.; BREITENBECK, G.A. Boll weight and within-plant yield distribution in field-grown cotton given different levels of nitrogen. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 20-36, 1994.
- BOUMA, J. Precision agriculture: a unique tool to unify production and environmental requirements in agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION FARMING, nº 1, 1998, Minnesota. **Proceedings...** Minnesota: Front Cover, 1998. p. 595-601.

BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T.J.C.; NICOLOSO, R.D.S.; JASPER, J.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T.D.G. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I-plant nutrition and dry matter production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1288-1298, 2013.

CAMACHO, M.A.; MARCANTE, N.C.; SANTOS, R.B.; RUIZ, J.G.C.L.; ECCO, M.; PAREDES JÚNIOR, F.P.; SCHIAVO, J.A. Absorção de nitrogênio pelo algodoeiro herbáceo em dois sistemas de cultivo. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 29, n. 1, p. 51-58, Jan./Feb. 2013

CAMINHA JUNIOR, I.C.; SERAPHIM, O.J.; GABRIEL, L.R.A. Caracterização de uma área agrícola irrigada com efluente agroindustrial, através de análises químicas e da resistividade do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 40-54, 2000.

CAO, A.; BORENSTEIN, J. Experimental characterization of Polaroid ultrasonic sensors in single and phased array configuration. Michigan: University of Michigan, 2002. 5 p.

CARVALHO, M.C.S.; FERREIRA, G.B.; STAUT, L.A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E.C. (Ed.). **Algodão no Cerrado do Brasil**. Brasília: ABRAPA, 2007. p. 581-648.

CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T. Agroecosystems, nitrogen: use efficiency, and nitrogen management. **AMBIO**, Stockholm, v. 31, n. 2, p. 132-140, 2002.

CASTRO, C.N.; MOLIN, J.P. Definição de unidades de gerenciamento do solo através da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas utilizando classificação Fuzzy. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, nº 1, 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2004.

CLARK, R.L.; CHEN, F.; KISSEL, D.E.; ADKINS, W. Mapping soil hardpans with the penetrometer and electrical conductivity. INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, nº 1, 2002, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: P.C. Robert, 2000. 1 CD-ROM

COELHO, A.M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 1, p. 249-290.

COLWELL, R.N. Manual of remote sensing. **American Society of Photogrammetry**, Falls Church, v. 2, p. 138-336, 1983.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, 2015. v. 2, n. 12. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

DEERE, J. Disponível em: https://www.deere.com.br/pt_BR/products/equipment/cotton_picker/7760_harvester/7760_harvester.page>. Acesso em: 15/04/2016.

FAO. **FAOSTAT**: food and agricultural commodities production. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

FIEZ, T.E.; MILLER, B.C.; PAN, W.L. Assessment of spatially variable nitrogen fertilizer management in winter wheat. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 7, n.1, p. 86- 93, 1994.

FISCHER, R.A.; HOWE, G.N.; IBRAHIM, Z. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer: I. Grain yield and protein content. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 33, p. 37-56, 1993.

FRAISSE, C. Agricultura de precisão: a tecnologia de GIS/GPS chega às fazendas. **Revista Fator GIS**, Curitiba, n. 21, p. 28-33, 1998.

FRYE, I. A.A.; KAIRUZ, I.A.G. Manejo de suelos y uso de fertilizantes. In: FEDERACIÓN NACIONAL DE ALGODONEROS. **Bases técnicas para el cultivo del algodón em Colombia**. Bogotá: Guadalupe, 1990. p. 113-202.

GASTAL, G.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**. Inorganic Nitrogen Assimilation, Oxford, v. 53, p. 789-799, 2002.

GOERING, C.E.; HANS, S. A field information system for SSCM. In: INTERNATIONAL OFFHIGHWAY & POWERPLANT CONGRESS & EXPOSITION, nº 1, 1993, Milwaukee. **Proceedings...** Warrendale: SAE, 11p., 1993.

GONÇALVES, A.C.A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo de irrigação**. 1997. 118 p. Tese (Doutorado na área de irrigação) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GONÇALVES, A.O.; MOLIN, J.P.; MENEGATTI, L A.A. ADULANÇO 2.0: software para análise de distribuição transversal. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 42-48, 2003.

HOOGERHEIDE, H.C.; FRANCISCO, E. **Manejo de nutrientes para o algodoeiro de alta produtividade**. Piracicaba: IPNI, 2013. 5 p. (Informações Agronômicas, 141).

HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, Paris, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1996.

HUTMACHER, R.B.; Marsh, B.H. Response of recent Acala cotton cultivars to variable nitrogen rates in the San Joaquin Valley of California. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 48-62, 2004.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. N-sensor ALS—Active sensing of crop N status using optimized wavelength combination. In: MULLA, D.J. (Ed.). **Precision agriculture: proceedings...** Minneapolis: University of Minnesota, 2006.

JASPER, J.; REUSCH, S.; LINK, A. Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength combination: impact of seed rate, variety and growth stage. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 7., 2009, Wageningen. **Paper...** Wageningen, 2009. 1 CD-ROM.

KACHANOSKI, R.G.; GREGORICH, E.G.; WESENBECK, I.J. van. Estimating spatial variations of soil water content using non contacting electromagnetic inductive methods. **Canadian Journal of Soil Science**, Toronto, v. 68, p. 715-722, 1988.

KERBY, T.; PLANT, D.; HOFMANN, W.; HORROCKS, D. Predicting Pix response using the expert system Calex/Cotton. In: BELTWISE COTTON PRODUCTION RESEARCH CONFERENCES, nº 1, 1990, Memphis. **Proceedings...** National Cotton Council, Memphis, Tenn, p. 658-659, 1990.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S.T. Ground based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, p. 71-84, 2010.

KLUTHCOUSKI, J.; ALDAR H.; THUNG, M. **Manejo antecipado do nitrogênio nas principais culturas anuais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 64 p, 2006.

KOCH, B.; KHOSLA, R.; FRASIER, W.M.; WESTFALL, D.G.; INMAN, D. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 1572-1580, 2004.

KOPPEN, W.P. **Climatologia, com un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.

LEON, C.T.; SHAW, D.R.; COX, M.S.; ABSHIRE, M.J.; WARD, B.; WARDLAW III, M.C.; WATSON, C. Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. **Precision Agriculture**, Mississippi, v. 4, p. 359-384, 2003.

LINK, A.; REUSCH, S. Implementation of site-specific nitrogen application: status and development of the YARA N-Sensor. In: NORSE JERNBANEFORBUND SEMINAR 390, PRECISION TECHNOLOGY IN CROP PRODUCTION IMPLEMENTATION AND BENEFITS, 2006, Lillehammer. **Proceedings...** Lillehammer: Nordic Association of Agricultural Scientists, 2006. p. 37-41.

LINSLEY, C.M.; BAUER, F.C. **Test your soil for acidity**. Illinois: College of Agriculture and Agricultural Experiment Station, 1929. 16 p. (Circular, 346).

MINOLTA CAMERA. **Manual for chlorophyll meter SPAD 502**. Osaka: Minolta, Radiometric Instruments Divisions, 1989. 24 p.

MOGES, S.M.; 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, 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, 1997.

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

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, p. 83-92, 2002.

MOLIN, J.P.; RABELLO, L.M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 90-101, 2011.

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

MUNIER, D.J.; WEIR, B.L.; WRIGHT, S.D.; KERBY, T.A. Applying pix at variable rates when plant height varies in a cotton field. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCES, nº1, 1993, Memphis. **Proceedings...** National Cotton Council, Memphis, Tenn. p. 1206-1207, 1993.

NOVO, E.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1992. 388 p.

PORTZ, G.; MOLIN, J.P.; JASPER, J. Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Piracicaba, v. 13, n. 1, p. 33-44, 2012.

POVH, F.P. **Utilização de sensor ótico ativo em culturas de cereais**. 2007. 85 p. Dissertação (Mestrado em ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014.

RAMBO, L.; FERREIRA, P.R.S.; ARGENTA, R. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1279-1287, 2004.

READ, J.J.; WHALEY, E.L.; TARPLEY, L.; REDDY, R. **Evaluation of a hand-held radiometer for field determination of nitrogen status in cotton**. Madison: American Society of Agronomy, p. 100-105, 2003.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 29-48, 2003.

REUSCH, S. **Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen**. Thesis (Ph.D) – Kiel, 1997.

ROSOLEM, C. A. Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. **Informações Agronômicas**, N° 95, 9 p., 2001.

ROUSE, J.W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, v. 1, p. 309-317, 1973.

SCHÄCHTL, J.; HUBER G, MAIDL FX, STICKSEL, E. Laser-induced chlorophyll fluorescence measurements for detecting the nitrogen status of wheat (*Triticum aestivum* L.) canopies. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 6, p. 143-156, 2005.

SCHEPERS, J.S.; SHANAHAN, J.F. Variable-rate N management. **Fluid Journal**, Bethlehem, v. 13, n. 3, p. 20-23, 2005.

SHIRATSUCHI, L.S.; QUEIROS, L.R.; VINHAL, C.D.N. **Mapeamento da altura de algodão usando sensores ultrassônicos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2005. Disponível em: <www.cpac.embrapa.br/baixar/1029/t>. Acesso em: 15 set. 2014.

SINGH, I.; SRIVASTAVA, A.K.; PRAVESH, C.; GUPTA, R.K. Crop sensors for efficient nitrogen management in sugarcane: potential and constraints. **Sugar Tech**, Chicago, v. 8, n. 4, p. 299-302, 2006.

SPEKKEN, M.; POVH, F.P.; MACHADO, T.M.; MOLIN, J.P. Planilha simuladora para avaliação e calibração da distribuição transversal de fertilizantes e corretivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 6., 2007, São Pedro. **Anais...** Campinas: Embrapa, p. 216-220, 2007

STEFFEN, C.A. **Sensoriamento remoto**: princípios físicos; sensores e produtos e sistema Landsat. São José dos Campos: INPE, 72 p., 1981.

SUI, R.; THOMASSON, J.A. Ground-based sensing system for cotton nitrogen status determination. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 49, p. 1983-1991, 2006.

TAIZ, L; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre, Artmed, 848p. 2009.

TARPLEY, L.; REDDY, K.R.; SASSENATH-COLE, G.F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, Madison, v. 40, p. 1814-1819, 2000.

THAI, C. N.; GRANT, J. C. **Visible & NIR imaging of bush beans grown under different nitrogen treatments**. Saint Joseph: ASAE, 1998. 10 p.

TUCKER, C.J.; TOWNSHEND, J. R. G. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 11, p. 171-189, 1981.

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

VIANA, J.H.M. **Distribuição espacial de atributos físico-químicos, mineralógicos e micromorfológicos de latossolos visando o mapeamento de áreas produtivas**. 2005. 194 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

VIEIRA, S.R. **Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1995. 61 p.

WILLIAMS, B.G.; HOEY, D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay content of soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 25, n. 1, p. 7-21, 1987.

YARA INTERNATIONAL. Disponível em: <<http://www.sensoroffice.com>>. Acesso em: 12 jan. 2014.

ZANCANARO, L.; TESSARO, L.C. Calagem e adubação. In: MORESCO, E. (Org.). **Algodão: pesquisas e resultados para o campo**. Cuiabá: FACUAL, 2006. p. 57-81.

ANEXOS

Anexo A

Descrição geral das áreas experimentais e avaliações realizadas durante o desenvolvimento desse trabalho

Local	Safr	Faz.	Talhão	Espaçamento	Variedade	População (pl/ha)	Textura	Variabilidade	Produtividade (@/ha)	Experimentos	Sensores
Chapadão do Céu - GO	2012/13	NM_T13	TC1	Convencional – 80 cm	FM 975 WS	90000	Argiloso	Baixa	320	Amostragens	N-Sensor
Chapadão do Céu - GO	2012/13	AM_T06	TA1	Adensado – 45 cm	FM 975 WS	140000	Argiloso	Baixa	300	Amostragens	N-Sensor
Chapadão do Céu - GO	2013/14	AM_T13	TC2	Convencional – 80 cm	FM 975 WS	100000	Argiloso	Média	317	Faixas N	N-Sensor e Sonar
Chapadão do Céu - GO	2013/14	AN_T2	TA2	Adensado – 45 cm	FM 975 WS	190000	Média	Baixa	240	Amostragens	N-Sensor e Sonar
Chapadão do Céu - GO	2013/14	AM_T02	TC3	Convencional – 80 cm	FM 975 WS	100000	Argiloso	Baixa	292	Amostragens	N-Sensor e Sonar
Chapadão do Céu - GO	2013/14	AN_T1	TA3	Adensado – 45 cm	FM 975 WS	190000	Argiloso	Baixa	255	Faixas N	N-Sensor e Sonar
Campo Verde - MT	2014/15	SS_T116	TC4	Convencional – 76 cm	DP 1243 B2RF	95000	Argiloso	Média	270	Faixas N	N-Sensor e Sonar
Campo Verde - MT	2014/15	AA_T12	TA4	Adensado – 45 cm	TMG 81 WS	205000	Arenoso	Alta	275	Faixas N	N-Sensor e Sonar

Anexo B

Gráfico do coeficiente de variação em função das possíveis larguras de aplicação e com três condições de percurso.

Perfil de distribuição horizontal de fertilizante na regulação analisada