

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

**Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua
utilização em equipamentos de aplicação localizada de
fertilizantes sólidos**

por

Marcelo de Mello Martins

ORIENTADOR: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

Parecer

Este exemplar corresponde a
edição final da dissertação
de Mestrado defendida por
Marcelo de Mello Martins e
aprovada pela Comissão Jul-
gadora em 22 de setembro de
1999. Campinas, 22 de novembro
de 1999.

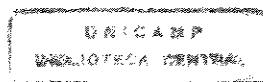
Dissertação apresentada à Comissão de Pós-
graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola,
como requisito parcial para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola.

Campinas – São Paulo – Brasil

(SETEMBRO / 1999)

X 
Presidente da Banca

20.000.469



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	J/Unicamp
	M366d
V.	Ex.
TOMBO BC	39917
PROC.	278/00
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	12/03/00
N.º CPD	

CM-00137830-7

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

M366d Martins, Marcelo de Mello
Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos / Marcelo de Mello Martins.-- Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Nelson Luis Cappelli
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Máquinas agrícolas. I. Cappelli, Nelson Luis. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

*À minha Mãe que lutou muito para
viver este momento.*

*À meu Pai que incentivou
nos momentos difíceis.*

*À minha Esposa, incansável no
transcorrer desta jornada.*

Ao meu Filho, fruto de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudos concedida.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro, indispensável para o sucesso deste trabalho.

À Justino de Moraes, Irmãos S.A.- JUMIL, pelo fornecimento do dosador.

Ao Departamento de Máquinas Agrícolas da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI – UNICAMP, por todas as facilidades colocadas à disposição.

Ao Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC, pela colaboração na realização da fase experimental deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli que, além de orientar, soube ser um bom amigo, habilidoso e atencioso, sempre disposto a colaborar e a ensinar.

Ao Prof. Dr. Antônio José da Silva Maciel pelos conselhos na elaboração deste trabalho.

Ao amigo Eng. MS. Claudio Kiyoshi Umezu pelo auxílio em todas as fases da tese.

Aos técnicos do DMQAG: Luiz Carlos dos Santos Silva, Francisco Ferreira dos Santos Filho, José Maria da Silva, Roberto Carlos de Souza e Dennis Jefersons Moraga, pelo apoio sempre demonstrado.

SUMÁRIO

.....	II
AGRADECIMENTOS.....	III
SUMÁRIO.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
RESUMO	X
SUMMARY.....	XII
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 – REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 – AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	3
2.1.1 - Mapa de produtividade.....	6
2.2 – RELAÇÕES ENTRE SOLO, FERTILIDADE E PLANTA.....	9
2.2.1 - Solo e fertilidade.....	9
2.2.2 - Interação solo-planta.....	10
2.2.3 - Fertilidade natural do solo.....	12
2.2.4 - Calagem e adubação.....	16
2.2.5 - Qualidade dos fertilizantes.....	21
2.2.6 - Determinação da fertilidade do solo.....	22
2.2.7 – Recomendações para adubação.....	23
2.2.8 - Mapas da variabilidade espacial dos nutrientes do solo.....	27
2.2.9 - Métodos estratégicos para aplicação de fertilizantes.....	29

2.3 - MÁQUINAS PARA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES	30
2.3.1 – Classificação.....	30
2.3.2 - Dispositivos dosadores	31
3 - MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 – MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS.....	36
3.2 – BANCADA DE TESTES	38
3.2.1 – Projeto e construção mecânica da bancada.....	39
3.2.2 – Sistema de instrumentação e aquisição de dados.....	41
3.2.2.1 - Medição da vazão mássica média.....	42
3.2.2.2 - Determinação da vazão instantânea	43
3.2.2.3 - Medição da rotação do eixo do motor.....	45
3.2.2.4 - Medição do torque de acionamento	46
3.2.2.5 – Sistema de aquisição de dados.....	47
3.3 – DOSADOR HELICOIDAL FLUTUANTE	48
3.3.1 Cálculo da vazão volumétrica	50
3.3.2 Cálculo da vazão mássica	51
3.3.3 Eficiência do dosador	51
3.4 – TESTES REALIZADOS COM OS DOSADORES.....	52
3.5 – PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	52
3.5.1 – Processamento e análise dos sinais.....	53
3.5.1.1 – Retirada das amostras.....	53
3.5.1.2 – Filtragem.....	53
3.5.1.3 – Análise espectral de frequência.....	54
3.3.2 - Análise estatística.....	54
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 – PROPRIEDADES DAS MATÉRIAS-PRIMAS	56
4.2 - BANCADA DE TESTES - CALIBRAÇÃO	57
4.3 - FILTRAGEM DOS DADOS	59
4.4 – AVALIAÇÃO DO DOSADOR ORIGINAL	61
4.5 - AVALIAÇÃO DO DOSADOR MODIFICADO	66
4.6 – COMPARAÇÃO ENTRE O DOSADOR ORIGINAL E O MODIFICADO	68
4.7 – DOSADOR MODIFICADO OPERANDO COM DIVERSAS MATÉRIAS-PRIMAS	73
5 – CONCLUSÕES	78
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo da agricultura de precisão (Fraisse, 1998)	5
Figura 2 - Mapa de produtividade de uma cultura de milho em kg ha ⁻¹ , obtido para uma área de 36 ha localizada em Centralia, Missouri – EUA, em 1993 (Fraisse, 1998)	6
Figura 3 - Mapa de produtividade de uma cultura de soja em kg ha ⁻¹ , obtido para uma área de 36 ha localizada em Centralia, Missouri – EUA, em 1994 (Fraisse, 1998)	7
Figura 4 – Distribuição da área do globo terrestre (IAP, 1999)	9
Figura 5 – Principais necessidades de nutriente das plantas (adaptado de IAP, 1999)	11
Figura 6 – Representação da “lei do mínimo” para os nutrientes contidos no solo (adaptado de IAP, 1999)	12
Figura 7 – Susceptibilidade dos nutrientes à lixiviação (IAP, 1999)	14
Figura 8 – Disponibilidade dos nutrientes em função do pH (IAP, 1999)	17
Figura 9 – Porcentagem de aproveitamento pelas culturas no primeiro ano (IAP, 1999)	18
Figura 10 – Porcentagem de aproveitamento do fósforo no primeiro ano (IAP, 1999)	19
Figura 11 – Diagramas de amostragem de solo (Fraisse, 1998)	22
Figura 12 – Variabilidade espacial da disponibilidade de potássio no solo (adaptado de Reifsteck, 1999)	27
Figura 13 – Variabilidade espacial da disponibilidade de fósforo no solo (Reifsteck, 1999)	28
Figura 14 – Dosador helicoidal para adubo. 1 - transmissão, 2 - dosador (Balastreire, 1987)	32
Figura 15 – Dosador de rotor dentado para adubo. 1 - rotor dentado, 2 - lingüeta ajustável (Balastreire, 1987)	33
Figura 16 – Dosador de adubo de disco horizontal rotativo. 1 - disco, 2 - lingüeta raspadora, 3 - orifício de saída, 4 - base (Balastreire, 1987)	34

Figura 17 – Dosador de adubo de rotor vertical impulsor. 1 - rotor, 2 - eixo, 3 - depósito (Balastreire, 1987).....	34
Figura 18 – Dosador de adubo de correia. 1 - correia, 2 - agitador, 3 - depósito (Balastreire, 1987)	35
Figura 19 – Determinação do ângulo de talude.....	37
Figura 20 – Vista geral da bancada de testes	39
Figura 21 – Diagrama esquemático da estrutura principal da bancada de testes	40
Figura 22 – Diagrama esquemático da estrutura secundária da bancada de testes	41
Figura 23 – Diagrama esquemático do sistema de instrumentação e aquisição de dados.....	42
Figura 24 – Instalação da célula de carga para a determinação da vazão mássica média	43
Figura 25 – Diagrama esquemático do sensor de vazão instantânea.....	43
Figura 26 – Medição da vazão instantânea	44
Figura 27 – Diagrama esquemático do dispositivo montado para determinação da frequência natural de oscilação do sensor de vazão instantânea.....	45
Figura 28 – Montagem do sensor para medição da rotação do motor.....	46
Figura 29 – Montagem da célula de carga para a medição do torque de acionamento	47
Figura 30 – Sistema de instrumentação e aquisição de dados MGCplus	48
Figura 31 – Dimensões do helicóide flutuante.....	49
Figura 32 – Vista superior do dosador original.....	49
Figura 33 – Vista superior do dosador modificado	50
Figura 34 – Oscilação natural do sensor de vazão instantânea	58
Figura 35 – Análise espectral de frequência da oscilação natural do sensor de vazão mássica instantânea	59
Figura 36 – Análise espectral de frequência do sinal do sensor de vazão mássica instantânea antes da filtragem digital.....	60
Figura 37 – Análise espectral de frequência do sinal do sensor de vazão mássica instantânea depois da filtragem digital.....	60
Figura 38 – Gráficos da vazão mássica em função do tempo, comparando-se os dados originais com os dados filtrados.....	61
Figura 39 – Vazão mássica em função do tempo para as rotações de 28 min^{-1} e 147 min^{-1} do eixo do dosador original, operando com a matéria-prima M1	63
Figura 40 – Variação simulada da quantidade equivalente de fertilizante aplicada por hectare, em função da distância percorrida pelo equipamento de aplicação	64

Figura 41 – Análise espectral de frequência da vazão mássica para diversas rotações do eixo do dosador	65
Figura 42 – Frequência dominante da vazão mássica instantânea em função da 65	65
rotação do eixo de acionamento do dosador	65
Figura 43 – Vazão mássica em função do tempo para as rotações de 28 min ⁻¹ e 147 min ⁻¹ do eixo do dosador modificado, operando com a matéria-prima M1	67
Figura 44 – Variação simulada da quantidade equivalente de fertilizante aplicada por hectare, em função da distância percorrida pelo equipamento de aplicação	68
Figura 45 – Vazão mássica média e vazão volumétrica média em função da rotação, para os dosadores original e modificado	69
Figura 46 – Desvio padrão e coeficiente de variação da aplicação em função da vazão mássica média do dosador original e do modificado	70
Figura 47 – Potência mecânica para acionamento do dosador modificado e do original em função da vazão mássica média	71
Figura 48 – Eficiência mássica do dosador modificado e do original em função da rotação do eixo de acionamento	72
Figura 49 – Vazão mássica média em função da rotação do eixo de acionamento do dosador modificado para as matérias-primas M2 a M10	73
Figura 50 – Desvio padrão em função da vazão mássica média do dosador modificado para as matérias-primas M2 a M10	74
Figura 51 – Coeficiente de variação em função da vazão mássica média do dosador modificado para as matérias-primas M2 a M10.....	75
Figura 52 – Potência mecânica consumida pelo dosador modificado em função da vazão mássica média para as matérias-primas M2 a M10	76
Figura 53 – Eficiência mássica do dosador modificado em função da rotação do eixo de acionamento do dosador para as matérias-primas M2 a M10	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Perdas médias de solo e de nutrientes em função de diferentes técnicas de preparo do solo	13
TABELA 2 – Remoção de nutrientes pelas colheitas.....	15
TABELA 3 - Porcentagem de nutrientes exportados nos grãos.....	15
TABELA 4 - Custo/benefício da aplicação de calcário no Brasil (milho, ano 1989)	16
TABELA 5 - Principais fertilizantes básicos	18
TABELA 6 – Nitrogênio perdido por volatilização de amônia em 7 dias.....	20
TABELA 7 - Fechamento da fórmula 0-20-20 - Formulação nº 1.....	21
TABELA 8 - Fechamento da fórmula 0-20-20 - Formulação nº 2.....	21
TABELA 9 – Recomendação de adubação mineral para o plantio da soja	24
TABELA 10 – Recomendação de adubação mineral para o plantio de milho grão.....	25
TABELA 11- Adubação de cobertura para a produção de milho grão	26
TABELA 12 – Matérias-primas utilizadas na avaliação do dosador helicoidal	37
TABELA 13 – Granulometria das matérias-primas	56
TABELA 14 – Densidade, ângulo de talude e diâmetro médio ponderado das matérias-primas.....	57
TABELA 15 – Resultados obtidos com o dosador original, para a matéria-prima M1	62
TABELA 16 – Resultados obtidos com o dosador modificado, para a matéria-prima M1	66
TABELA 17 – Potência de acionamento dos dosadores em função da vazão mássica média	71

RESUMO

O fenômeno da globalização da economia obriga a agricultura brasileira buscar a utilização de tecnologias de ponta a fim de fazer frente aos grandes concorrentes no mercado internacional. Um espaço no mercado mundial para nossos produtos agropecuários só pode ser obtido se dispusermos de tecnologias que os possibilitem serem competitivos em preço e qualidade. Na busca por novas tecnologias que tornem o processo produtivo mais eficiente surgiu a chamada “agricultura de precisão” que, embora não seja um conceito novo, vem tomando espaço nos países mais desenvolvidos como uma alternativa para a otimização do processo produtivo agrícola. As ações que conduzem à chamada agricultura de precisão exigem, como um todo, diversas etapas para sua implementação. Contudo, uma das mais importantes está relacionada com a aplicação localizada e precisa dos insumos. Para isto, tem-se a necessidade do desenvolvimento de máquinas capazes de executar tal tarefa. A primeira dificuldade encontrada para o desenvolvimento de uma máquina para a dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis está relacionada à precisão dos dispositivos dosadores das matérias-primas utilizados nas semeadoras - adubadoras convencionais, pois não atingem os requisitos necessários.

Foi estudado o comportamento de um dosador helicoidal utilizado por uma máquina do tipo semeadora - adubadora disponível comercialmente. O estudo verificou a possibilidade da utilização deste tipo de dosador em máquinas de aplicação de fertilizantes sólidos, a taxas variáveis, de acordo com as necessidades localizadas de nutrientes. Para a avaliação do dosador helicoidal foi construída uma bancada de testes onde foram acoplados o dosador helicoidal e o sistema de acionamento. Construiu-se uma segunda estrutura onde foram acoplados os sensores de vazão e de peso. Foram utilizados sensores de rotação, de vazão e de peso ligados a um

sistema de aquisição de dados. Testou-se o dosador em 11 níveis distintos de rotação do eixo de acionamento com 10 tipos diferentes de matérias-primas.

Verificou-se uma relação linear entre a rotação do eixo de acionamento do dosador e a vazão mássica média do fertilizante e a necessidade de calibração do dosador em função de cada tipo de fertilizante utilizado. O dosador apresentou uma característica periódica na aplicação do fertilizante e melhor uniformidade de aplicação quando operando a vazões mais elevadas. Os resultados obtidos indicaram a necessidade de alteração no projeto original para se obter melhor uniformidade de aplicação. As alterações realizadas foram eficazes quanto à melhora da uniformidade de aplicação do produto, porém, como resultado secundário, foi observado uma menor eficiência mássica do dosador e a necessidade de uma maior potência para acionamento do eixo. Concluiu-se que estes efeitos secundários poderiam ser aceitos face aos benefícios obtidos na uniformidade de aplicação e que o dosador, com as alterações propostas, pode ser utilizado em máquinas com sistemas de aplicação localizada de fertilizantes sólidos a taxas variáveis.

PALAVRAS CHAVES: Dosador helicoidal, semeadora-adubadora, agricultura de precisão, taxas variáveis.

SUMMARY

The globalization phenomenon of economy forces Brazilian agriculture to look for new technologies to dispute in the international market. A place in the world market, for our agricultural products, can only be achieved if these new technologies can become available. In the search for new technologies, which can make the productive process more efficient, emerge the "precision farming". Although it is not a new concept, only now it is becoming available in developed countries as an alternative for the improvement of the agricultural productive process. Precision farming demand several stages before its implantation. One of the most important is related with correct location for fertilizers application. Therefore it is necessary to develop a solid fertilizers application implement with variable rates capable to operate accurately. This dissertation studied the behavior of a auger metering device used by a commercial fertilizer-grain drill. The study showed the possibility of use of this type of metering device for solid fertilizers application, with variable rates, as required in localized needs of nutritious. To evaluate the metering device a structure of tests was built where the auger metering device and the drive system were coupled. Another structure was built for adaptation of the flow sensor and the weight sensor. The rotation sensor, flow sensor and weight sensor were connected to a data acquisition system. The metering device was tested in 11 different rotational speeds of the drive shaft and with 10 different types of fertilizers. A linear relationship was verified between the rotational speed of the shaft metering device and fertilizer mass flow. The need of calibration of the metering device was also verified as a function of each type of fertilizer. The metering device presented, in the application of the fertilizer, a periodic characteristic. A better application uniformity was obtained when operating at higher flows. The results indicated the need of modifications in the original project to obtain a better application uniformity. The alterations made were effective in relationship to the improvement of the product uniformity application, but

it was observed a smaller efficiency of the metering device and the need of higher power levels to drive the shaft. It was concluded that these secondary effects could be accepted face to the benefits obtained in the application uniformity and the metering device, with the alterations proposals, can be used in implements with systems of site specific of solid fertilizers application with variable rates.

KEY WORDS: auger metering device, fertilizer-grain drill, precision farming, variable rates.

1 - INTRODUÇÃO

De acordo com Cappelli (1999) o fenômeno da globalização da economia obriga a agricultura brasileira buscar a utilização de tecnologias de ponta, a fim de fazer frente aos grandes concorrentes no mercado internacional, como Estados Unidos, França, Canadá, Austrália e outros. Um espaço no mercado mundial para nossos produtos agropecuários só pode ser obtido se dispusermos de tecnologias que os possibilitem serem competitivos em preço e qualidade.

A decisão de investir na pesquisa para o desenvolvimento de nossos sistemas de produção agrícola é, antes de mais nada, estratégica, pois, devido as características distintas de alguns de nossos sistemas produtivos, grande parte das tecnologias necessárias não está disponível em qualquer outro lugar do mundo para simplesmente ser importada e aplicada.

A chamada “agricultura de precisão”, embora não seja um conceito novo, vem tomando espaço nos países mais desenvolvidos como uma alternativa para a otimização do processo produtivo agrícola.

A agricultura de precisão é, antes de mais nada, uma filosofia de trabalho para a exploração e administração da produção agrícola. Trata basicamente da coleção e manuseio de informações a respeito do processo agrícola com o objetivo final de conduzir a lavoura de forma a se otimizar a produção, reduzir a quantidade de insumos utilizados e preservar o meio ambiente.

As ações que conduzem à chamada agricultura de precisão exigem, como um todo, diversas etapas para sua implementação. Contudo, uma das mais importantes está relacionada a aplicação localizada e precisa dos insumos. Para isto, tem-se a necessidade do desenvolvimento de máquinas capazes de executar tal tarefa.

Estas máquinas, com dispositivos de controle que possibilitem a aplicação localizada de insumos a taxas variáveis, podem basear-se na utilização de sensores em tempo real ou em mapas

de aplicação localizada de insumos, previamente confeccionados. Em ambos os casos é necessário a utilização de um sistema para a localização do equipamento de aplicação.

O sistema denominado “*Global Positioning System*” – GPS tem se fixado como o sistema padrão para localização das máquinas no campo. Contudo, dado aos erros intrínsecos deste sistema, tem-se a necessidade de realizar uma correção diferencial em tempo real para minimizar os erros de forma a mantê-los em uma magnitude aceitável para a determinação do posicionamento das máquinas de aplicação localizada de insumos.

No que tange à aplicação de fertilizantes, até o momento não se tem disponíveis sensores em tempo real para os macros nutrientes das plantas (nitrogênio, fósforo e potássio – NPK) contidos no solo. Portanto, as máquinas de aplicação localizada de fertilizantes deverão, ainda que por algum tempo, basear-se em mapas de aplicação localizada previamente confeccionados.

A semeadora – adubadora, utilizada na implantação das culturas de grãos, é o alvo principal deste trabalho. Esta, além da precisão, deve ter a característica de aplicação a taxas variáveis – não só da semente, mas também do adubo - a fim de aproveitar as potencialidades e corrigir as deficiências localizadas do solo.

Na implantação de culturas de grãos com as semeadoras - adubadoras disponíveis no mercado nacional, as operações de plantio e adição de fertilizantes são realizadas ao mesmo tempo. São utilizados fertilizantes sólidos pré-formulados, baseados principalmente em dados médios da necessidade de nutrientes do campo e na expectativa da produtividade média. O que se deseja é a aplicação de cada nutriente de acordo com a necessidade localizada. Para isto, a indústria nacional de equipamentos agrícolas ainda não dispõe de um implemento capaz de dosar e aplicar fertilizantes sólidos a taxas variáveis.

A primeira dificuldade encontrada para o desenvolvimento de uma máquina para a dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis está relacionada à precisão dos dispositivos dosadores das matérias-primas utilizados nas semeadoras - adubadoras convencionais, pois não atingem os requisitos necessários.

Pretendeu-se com este trabalho, estudar o comportamento dos dosadores helicoidais utilizados pela maioria das máquinas do tipo semeadora - adubadora disponíveis comercialmente. O estudo procurou verificar a possibilidade da utilização destes dosadores em máquinas de aplicação de fertilizantes sólidos, a taxas variáveis, de acordo com as necessidades localizadas de nutrientes.

2 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – AGRICULTURA DE PRECISÃO

A prática da agricultura de precisão não é recente (Molin, 1997). Na verdade, conceitualmente, sua utilização é anterior à agricultura hoje praticada. Nesta última, a busca pelo aumento da capacidade de trabalho do homem levou à mecanização e à agricultura em grande escala. Assim, a solução hoje utilizada é a de focar grandes áreas e entendê-las como homogêneas, levando ao conceito da necessidade média para a aplicação dos insumos - fertilizantes, defensivos, água, etc. – e fazendo com que, por exemplo, a mesma formulação e/ou quantidade do fertilizante seja utilizada para toda a área, atendendo apenas as necessidades médias e não considerando, desta forma, as necessidades específicas de cada parte do campo. O mesmo acontece para os demais insumos, tendo como consequência excessos onde são menos necessários e falta onde são mais necessários. Como resultado, tem-se uma lavoura com produtividade não uniforme e com o custo de produção onerado.

Ao contrário da agricultura tradicional, a chamada agricultura de precisão tenta focar a variabilidade espacial e temporal dos requerimentos de aplicação de insumos durante todo o processo produtivo. Para que ela tenha sucesso, é necessário a utilização de tecnologias avançadas e a obtenção e interpretação da maior quantidade de informações possíveis sobre o processo.

É sabido que o aumento da eficiência de um sistema depende da tecnologia utilizada e que, por sua vez, seu bom aproveitamento depende da quantidade de informação disponível para guiar e sincronizar a aplicação de cada um dos recursos existentes. Pode-se ainda esperar que a

eficiência de um processo altamente organizado tenda a aumentar com o decorrer do tempo e à medida que mais informações sobre o mesmo sejam agregadas.

Destacam-se duas motivações que induzem à agricultura de precisão. Uma diz respeito à preservação do meio ambiente, onde deseja-se cada vez mais a redução das quantidades de fertilizantes e agroquímicos. A outra diz respeito à margem de lucro cada vez menor, o que sugere a diminuição da quantidade de insumos – principalmente fertilizantes, agroquímicos e energia – necessários ao processo produtivo.

A agricultura de precisão é, antes de mais nada, uma questão de gestão. Ou seja, está apoiada no planejamento e no acompanhamento contínuo do processo produtivo e, principalmente, na disponibilidade de informação para a tomada de decisão.

Ainda não há uma solução única, em qualquer lugar do mundo, aplicável a todos os casos. Soluções particulares são necessárias para cada campo e cultura.

As técnicas de agricultura de precisão possibilitam um melhor conhecimento do campo de produção permitindo, desta forma, um processo de tomada de decisão melhor embasado. Com isto, tem-se uma maior capacidade e flexibilidade para a distribuição dos insumos nos locais e no tempo em que são mais necessários, minimizando os custos de produção.

A uniformidade na produtividade é alcançada pela correção dos fatores que contribuem para sua variabilidade – fertilidade do solo, infestação de ervas daninhas, infestação de pragas, deficiência hídrica, etc. - obtendo-se, com isto, um aumento global da produtividade.

Balastreire (1994) foi quem primeiro difundiu em nosso país o termo Aplicação Localizada de Insumos – ALI. A aplicação localizada de insumos, necessários para sustentar uma alta produtividade, contribui com a preservação do meio ambiente, já que estes insumos são aplicados somente nos locais, nas quantidades e no tempo corretos.

A abordagem convencional para a implantação da agricultura de precisão baseia-se, resumidamente, no mapa de produtividade, na identificação dos fatores causadores da variabilidade da produção e na correção destes fatores através da aplicação dosada e localizada de insumos. Esta abordagem viabiliza-se com a tecnologia do chamado “Sistema de Posicionamento Global” – GPS, utilizado em tempo real e com correção diferencial.



Figura 1 – Ciclo da agricultura de precisão (Fraisie, 1998)

Basicamente, as informações espaciais e temporais georeferenciadas do meio físico, associadas a um mapa de produtividade, possibilitarão a confecção dos “Mapas de Aplicação Localizada de Insumos” – MAPLI. Estes mapas de aplicação deverão ser utilizados pelas máquinas de aplicação localizada.

As correlações existentes entre a produtividade e as informações provenientes do meio físico em que se desenvolve a cultura, precisam ainda ser bem determinadas e entendidas, abrindo, aqui, um amplo campo para a investigação científica.

Haverá, também, a necessidade de desenvolvimento de *softwares* para auxiliar o agricultor na manipulação do grande volume de informação disponível para o processo de tomada de decisão.

Os mapas de aplicação de insumos precisam ter rigoroso fundamento técnico, pois a aplicação localizada e precisa de insumos não surte efeito se sua prescrição não estiver correta.

2.1.1 - Mapa de produtividade

O “Mapa de Produtividade” - MP de uma determinada cultura mostra a quantidade do produto colhida a cada ponto georeferenciado da lavoura e visa, primariamente, a determinação da variabilidade espacial da produtividade.

Hoje isto é possível graças a disponibilidade da tecnologia do GPS associada a sensores instalados nas colhedoras. Diversas empresas já possuem comercialmente disponível sistemas integrados capazes de gerar mapas de produtividade. Os principais sistemas são: *Advanced Farming Systems* – AFS (Case IH); *Greenstar* (John Deere); *Fieldstar* (Agco), *Precision Farming System* (AgLeader Technology).

A variabilidade da produtividade pode também ser conhecida através da interpretação de imagens obtidas por sensoriamento remoto, contudo com menor precisão.

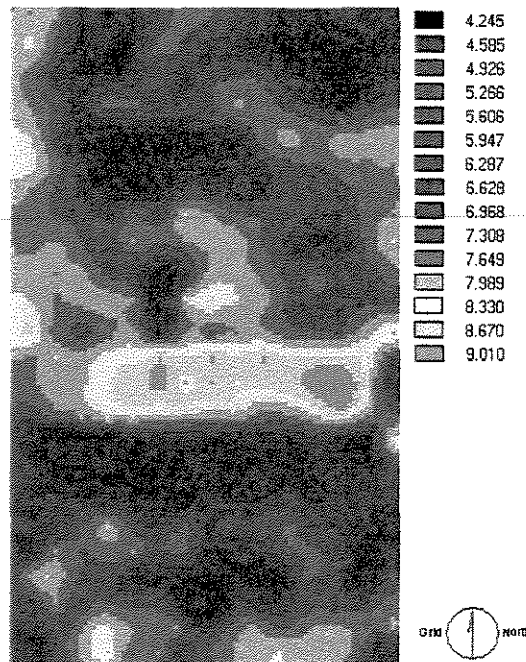


Figura 2 - Mapa de produtividade de uma cultura de milho em kg ha^{-1} , obtido para uma área de 36 ha localizada em Centralia, Missouri – EUA, em 1993 (Fraisie, 1998)

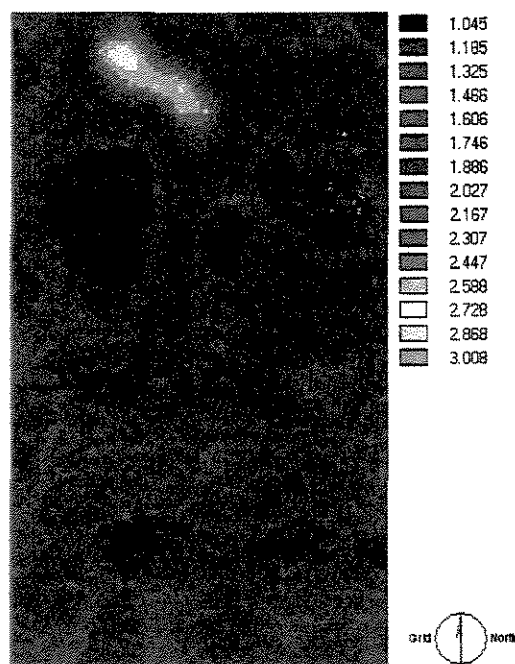


Figura 3 - Mapa de produtividade de uma cultura de soja em kg ha^{-1} , obtido para uma área de 36 ha localizada em Centralia, Missouri – EUA, em 1994 (Fraisie, 1998)

O mapa de produtividade (Figuras 2 e 3) é apenas uma etapa de todo o processo relacionado à agricultura de precisão. Lark & Stafford (1996) afirmam que o mapa de produtividade representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte desta variabilidade pode ser atribuída a fatores permanentes ou que variam lentamente, enquanto outros são transitórios, mudando sua importância e distribuição espacial e temporal de uma safra para outra.

Ao interpretar um mapa de produtividade com a finalidade de gerenciamento do campo, deve-se considerar principalmente as causas consistentes de variabilidade, pois aquelas que não persistem no tempo podem ter pouco ou nenhum controle. Aqui aparecem as primeiras dificuldades na interpretação de um mapa de produtividade. Estas consistem na identificação e na separação de cada uma das classes de variabilidade. A próxima dificuldade encontra-se na investigação das causas consistentes. Estas causas só podem ser compreendidas, acompanhando-

se e analisando-se os possíveis fatores de influência na variabilidade durante safras seguidas. Com esta metodologia espera-se resultados a partir da terceira safra e resolução do problema da uniformidade da produção possivelmente após a quinta colheita.

A interpretação do mapa de produtividade pode ser útil para a correção dos fatores de produção persistentes ao longo do tempo, tais como: variação do tipo de solo, acidez do solo em locais específicos, deficiência de fertilizantes, formulação inadequada de N-P-K, locais com falta ou excesso de água, etc.

Schepers et al (1996), contudo, observaram que os mapas de colheita podem variar de ano para ano devido às mudanças climáticas anuais. Portanto, esperar até a próxima colheita para avaliar a adequação das práticas da agricultura de precisão deixa muito a desejar, uma vez que naquele momento é difícil determinar quais fatores reduziram a produção e quando o problema ocorreu.

Sem dúvida, o ponto inicial para a obtenção da produtividade uniforme da lavoura é a correção da variabilidade espacial da fertilidade do solo.

Morgan & Ess (1997) mencionam que o processo de amostragem e análise de solo constitui-se em uma das etapas mais críticas para a instalação de uma cultura. Os métodos de amostragem dos solos e da análise de suas propriedades foram mantidos, por um longo período, praticamente inalterados. Ultimamente, porém, novos métodos e tecnologias que melhoram a precisão e a confiabilidade dos programas de amostragem dos solos têm sido disponibilizados.

Basicamente, três fatores tem contribuído para mostrar a variabilidade espacial das propriedades do solo e permitido aos produtores gerenciar melhor a aplicação dos insumos. Primeiro: o sistema de posicionamento GPS pode fornecer a localização exata do ponto de amostragem do solo, favorecendo a confecção de um mapa mais preciso de suas propriedades; segundo: os fazendeiros estão começando a reconhecer o valor das análises de solo e a variabilidade que ocorre dentro de cada campo de produção e, com isto, coletado mais amostras por hectare e, finalmente: os produtores podem agora utilizar computadores para registrar os resultados em mapas eletrônicos, suprimindo dados referenciais essenciais para o gerenciamento dos solos.

Este elenco de fatores ajuda a formular as bases para a aplicação localizada de insumos a taxas variáveis.

2.2 – RELAÇÕES ENTRE SOLO, FERTILIDADE E PLANTA

2.2.1 - Solo e fertilidade

Segundo IAP (1999) os estudos relativos ao solo e suas propriedades vêm evoluindo significativamente. Foram desenvolvidos métodos de determinação de suas características físicas, como por exemplo: constituição granulométrica, capacidade de retenção de água, permeabilidade, grau de compactação, erodibilidade e características químicas como: índice de acidez, capacidade de reter nutrientes, quantidade total de nutrientes no solo e sua disponibilidade, isto é, foram criadas análises de laboratório capazes de prever a quantidade de um determinado nutriente que estará disponível para as plantas. Essa tecnologia foi gerada pelos seguintes motivos:

- possibilitar o emprego racional de insumos agrícolas, por exemplo: corretivos e fertilizantes;
- porque o solo é um recurso de produção escasso.

Área Agrícola X Área Terrestre



Figura 4 – Distribuição da área do globo terrestre (IAP, 1999)

Observa-se, através da Figura 4, que 71% da área do globo terrestre é recoberta por água. Existe ainda 22,8% com áreas não agrícolas (áreas onde o solo não se desenvolveu ou que

possuem uma declividade muita acentuada). Do total, apenas 6,2% representam solos que podem ter desenvolvimento de culturas agrícolas (o que representa 3,18 bilhões de hectares do total de 51,0 bilhões de hectares do globo terrestre).

Conclui-se que as fronteiras agrícolas são limitadas, havendo necessidade da manutenção de níveis elevados na fertilidade dos solos para que esses atendam à demanda por alimentos.

2.2.2 - Interação solo-planta

O solo originou-se das rochas, isto é, pequenas partículas que se fragmentaram ao longo de milhões de anos das rochas de origem, através de processos físicos (ventos e glaciações ocorridas há milhões de anos, ações tectônicas e vulcânicas) ou químicos (ação da água e de chuvas ácidas ocorridas no passado). Esse material de granulometria inferior (colóide) possibilitou o desenvolvimento de seres vivos que passaram a incorporar matéria orgânica ao solo, garantindo sua estruturação.

Apesar do raio da terra medir 6370 km, é apenas no primeiro metro superficial do solo em que se desenvolvem todas as culturas agrícolas. É este perfil da camada superior da crosta terrestre que apresenta maior fertilidade. Disso resulta a grande importância da conservação dessa camada de solo, a qual detém os nutrientes que, após dissolução em água, serão absorvidos pelas plantas. A Figura 5 ilustra os nutrientes necessários para a produção vegetal.

As plantas captam a energia luminosa para a realização da fotossíntese, absorvendo água da irrigação e das chuvas, e o gás carbônico do ar, contido no interior do solo. A água antes de ser absorvida pelas plantas entrou em contato com o solo, promovendo a solubilização dos nutrientes. Dessa forma, esses nutrientes que são essenciais ao crescimento vegetal, podem entrar nas plantas para desempenharem suas funções. Desse modo, verifica-se que a solubilização dos fertilizantes em água é fundamental à nutrição vegetal.

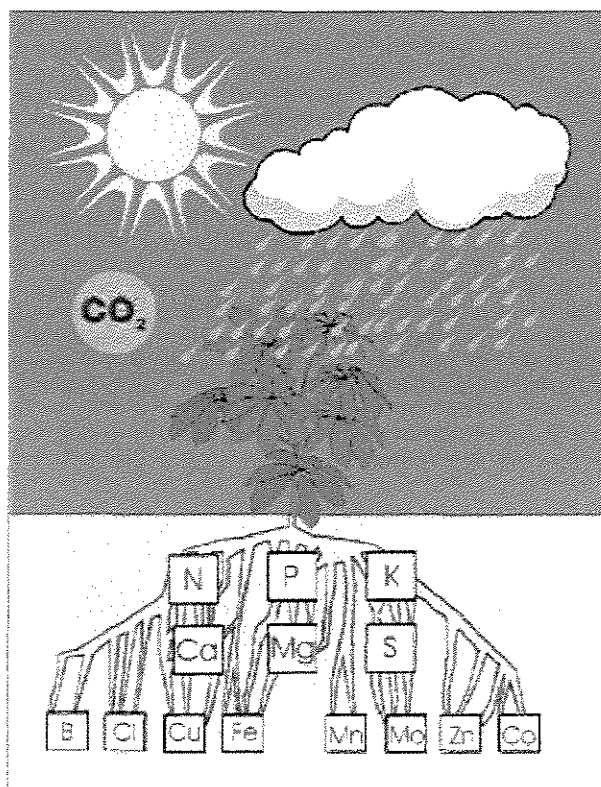


Figura 5 – Principais necessidades de nutriente das plantas
(adaptado de IAP, 1999)

Para crescer e produzir, um vegetal necessita de grandes quantidades dos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio, que via de regra são supridos na adubação com fertilizantes contendo N, P e K. O cálcio e o magnésio são adicionados ao solo pela calagem, mas necessitam também de enxofre, que muitas vezes é esquecido, e se o solo apresentar baixos níveis de enxofre a produção será limitada pela falta desse nutriente.

A produção máxima que um vegetal pode atingir é dependente da oferta equilibrada de todos os nutrientes. A “lei do mínimo”, citada por IAP (1999) como sendo proposta por Liebig em 1860, é representada através da Figura 6, que pode ser interpretada da seguinte forma: cada tábua do barril representa um nutriente essencial para o crescimento e produção das plantas (que equivale à água acumulada dentro do barril). Se as deficiências de N, P, K e S forem corrigidas, a falta de zinco será a próxima limitação, e assim por diante. Conclui-se que a produção das culturas é limitada pelo nutriente menos disponível para as plantas.

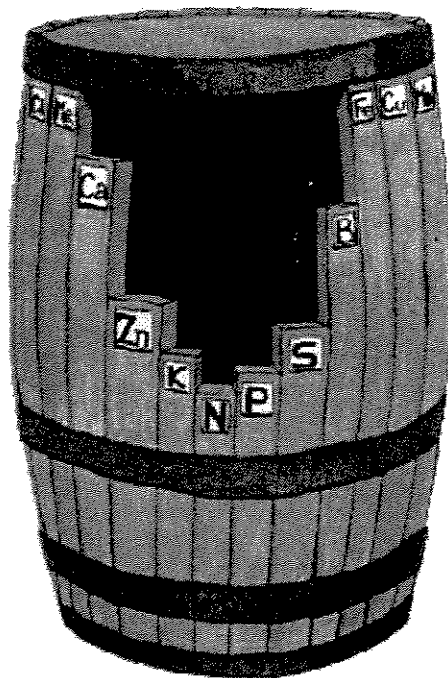


Figura 6 – Representação da “lei do mínimo” para os nutrientes contidos no solo (adaptado de IAP, 1999)

2.2.3 - Fertilidade natural do solo

A fertilidade natural dos solos, representada pela quantidade de nutrientes que possuem, depende da composição química de sua rocha originária. Assim, existem os solos ricos em nutrientes (por exemplo, os solos oriundos de rochas basálticas) e os solos com menores quantidades de nutrientes (exemplo: solos derivados de arenitos). As quantidades dos nutrientes minerais contidos no solo, que poderão vir a ser disponíveis às plantas, nem sempre permanecem inalteradas no solo.

Esse meio ambiente é muito dinâmico, onde ocorrem inúmeros processos físicos, químicos e biológicos, podendo resultar em perdas desses nutrientes. Além da queimada (que provoca perdas de matéria orgânica, nitrogênio e enxofre) outros processos de perdas de nutrientes do solo são:

- erosão;
- lixiviação;
- remoção pelas plantas.

Uma das principais formas de perda de nutriente do solo é através do processo de erosão, havendo perda do próprio solo onde estão os nutrientes. As práticas agrícolas podem interferir na quantidade de solo e de nutrientes que podem se perder via erosão, como podemos ver na Tabela 1.

TABELA 1 - Perdas médias de solo e de nutrientes em função de diferentes técnicas de preparo do solo

Prática agrícola/tratamento	Perdas de solo [t ha ⁻¹]	Perdas de nutrientes [kg ha ⁻¹]				
		Ca	Mg	K	P	Matéria orgânica
Palha queimada, 1 aração e 4 niveladoras	18,03	19,6	4,1	3,6	0,12	660
Palha incorporada, 1 aração e 4 niveladoras	12,83	16,6	4,1	3,3	0,06	410
Palha incorporada, 1 grade pesada e 4 niveladoras	8,00	7,7	1,9	1,9	0,05	300
Palha queimada, 1 aração e 2 niveladoras	6,92	8,3	1,7	1,2	0,04	235
Palha incorporada, 1 grade pesada e 2 niveladoras	3,63	3,5	1,0	0,9	0,02	144
Palha incorporada, 1 aração e 2 niveladoras	2,78	3,4	0,8	0,7	0,02	84
Resteva na superfície e plantio direto	0,14	0,16	0,04	0,004	0,001	5

Fonte: Iapar (1981), citado por IAP (1999)

Para manter a fertilidade existente nos solos, há necessidade de conservação do solo, evitando sua compactação e mantendo sua superfície coberta. O agricultor pode ainda adotar: rotação de culturas, plantio em nível, terraceamento e plantio direto, reduzindo a níveis mínimos as perdas.

A lixiviação representa outro processo de perda, ocorrendo quando se ultrapassa a quantidade de água que um solo consegue reter, e o volume de água não retido no solo irá passar pelo perfil do mesmo, levando os minerais que se solubilizam nessa água até camadas mais profundas, onde as raízes não alcançam. A Figura 7 mostra que os nutrientes mais passíveis de serem lixiviados são o nitrogênio, o potássio e o enxofre, enquanto o cálcio e o magnésio apresentam perdas muito pequenas. O fósforo, por apresentar uma mobilização muito pequena no solo, não apresenta perdas significantes por lixiviação.

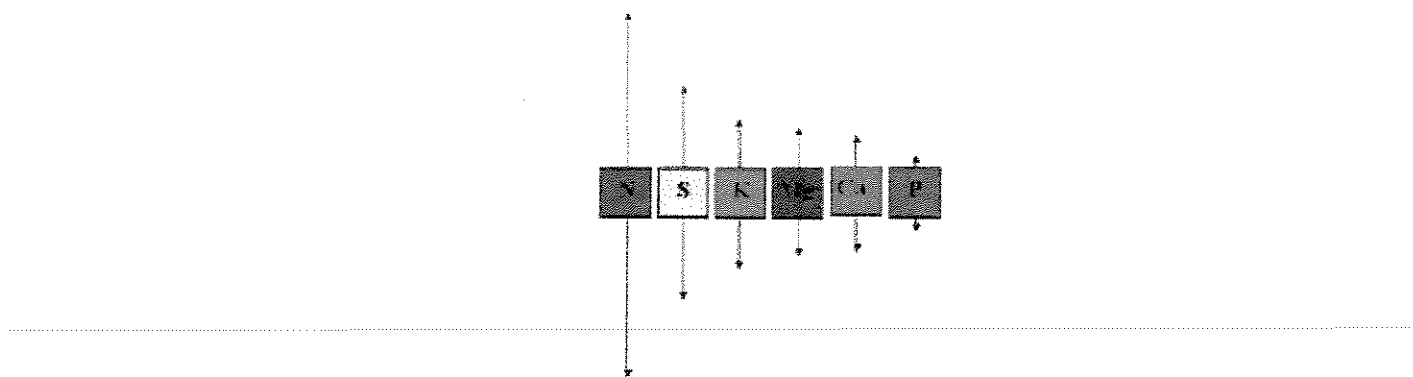


Figura 7 – Susceptibilidade dos nutrientes à lixiviação (IAP, 1999)

O processo de perda de nutrientes, que é inevitável para a produção agrícola, é o processo de retirada desses elementos do solo pelo crescimento das plantas. A Tabela 2 traz um levantamento das quantidades de nutrientes extraídos do solo por diversas lavouras dependendo do seu nível de produtividade.

TABELA 2 – Remoção de nutrientes pelas colheitas

Cultura	Colheita [t ha ⁻¹]	Remoção de nutrientes [kg ha ⁻¹]					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Abacaxi	100,0	100,0	30,0	200,0	150,0	-	-
Algodão	1,3	844,0	8,0	66,0	61,0	13,0	33,0
Arroz	4,0	120,0	21,0	79,0	32,0	33,0	11,0
Banana	30,0	627,0	69,0	1390,0	278,0	-	-
Batatinha	40,0	200,0	8,0	220,0	52,0	17,0	11,0
Cana	100,0	132,0	8,0	110,0	13,0	19,0	12,0
Café (coco)	2,0	253,0	19,0	232,0	143,0	33,0	27,0
Eucalipto	1000,0	60,0	6,0	50,0	80,0	20,0	-
Feijão	3,0	102,0	9,0	93,0	54,0	18,0	25,0
Laranja	61,0	124,0	10,0	90,0	27,0	8,0	12,0
Milho	5,0	170,0	35,0	175,0	27,0	39,0	19,0
Pinus	1000,0	12,0	1,0	44,0	3,0	2,0	6,0
Soja	3,0	300,0	40,0	115,0	70,0	35,0	23,0
Trigo	3,0	125,0	22,0	92,0	16,0	14,0	14,0

Fonte: Malavolta, citado por IAP (1999)

TABELA 3 - Porcentagem de nutrientes exportados nos grãos

Elemento	Porcentagem exportada nos grãos
Nitrogênio	+/- 70%
Fósforo	+/- 80%
Potássio	+/- 30%
Cálcio	+/- 5%
Magnésio	+/- 30%
Enxofre	+/- 60%
Ferro	+/- 10%
Cobre	+/- 20%
Boro	+/- 30%
Manganês	+/- 15%
Zinco	+/- 50%
Molibdênio	+/- 70%

Fonte: IAP (1999)

Para a maioria das culturas produtoras de grãos, do total de N, P e K retirados do solo, grande parte sairá com o produto colhido (Tabela 3). O restante, permanecendo nos restos vegetais, pode ser reaproveitado nas próximas culturas.

Essas quantidades de extração de nutrientes representam um dos parâmetros utilizados pelos órgãos de pesquisa para a formulação de tabelas de recomendação de reposição de nutrientes.

2.2.4 - Calagem e adubação

A única forma de repor todos os nutrientes removidos é a realização da calagem e da adubação. É visível o benefício econômico do uso do calcário. Um exemplo é o estudo da relação custo/benefício que a aplicação de calcário traria para a cultura do milho no Brasil, conforme dados apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 - Custo/benefício da aplicação de calcário no Brasil (milho, ano 1989)

Área	12,9 milhões de hectares
Produção	25,3 milhões de toneladas
Produtividade	1,95 toneladas por hectare
Área a corrigir	11,2 milhões de hectares
Aplicando 3 t ha ⁻¹ de calcário em média, tem-se:	
Produtividade com correção	2,62 toneladas por hectare
Incremento de produção com correção	8,71 milhões de toneladas
Equivale a 1 bilhão de dólares a mais	
Custo de correção	500 milhões de dólares
Relação custo/benefício	cada dólar aplicado retorna 2
Adaptado de IAP (1999)	

As explicações técnicas para o benefício da calagem podem ser visualizadas na Figura 8.

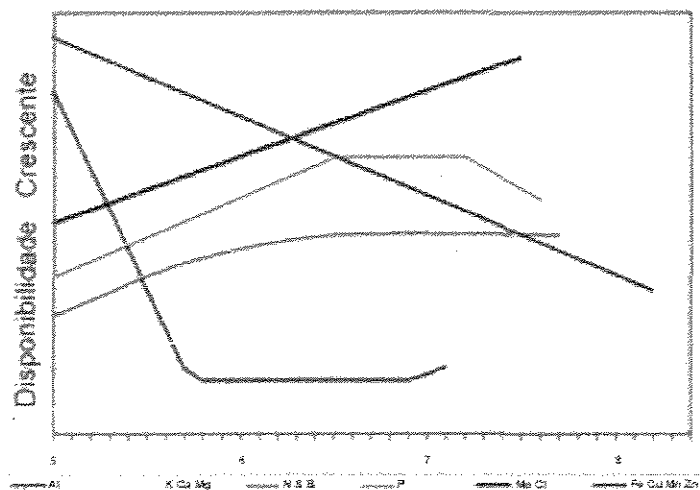


Figura 8 – Disponibilidade dos nutrientes em função do pH (IAP, 1999)

A calagem irá fornecer cálcio e magnésio essenciais para as plantas. Apesar de indisponibilizar um pouco os micronutrientes Fe, Cu, Mn e Zn, o aumento do pH às faixas adequadas para as culturas traz os seguintes benefícios:

- disponibilizará maiores quantidades de P, S, N, K, Mo, Cl e B;
- favorece a formação de hidróxido de alumínio (substância insolúvel em água) que não passa para a solução do solo. Dessa forma, o alumínio não é absorvido pela planta, não causando toxidez às raízes;
- estimula a ação dos organismos vivos do solo sobre a matéria orgânica, liberando vários nutrientes.

Os demais nutrientes devem ser repostos através das adubações. A Tabela 5 traz uma relação dos principais fertilizantes na agricultura. É importante observar que os fertilizantes fosfatados monoamôniofosfato (MAP), diamôniofosfato (DAP), superfosfatos (simples e triplo) apresentam solubilidade em água, sendo portanto recomendados para suprir fósforo nas culturas anuais, enquanto que os fosfatos naturais e o termofosfato são insolúveis em água, necessitando de alguns anos para liberarem o fósforo para a solução do solo e a planta possa absorver esse nutriente.

TABELA 5 - Principais fertilizantes básicos

Fertilizantes	Nutrientes [%]						
	N	P	K	Ca	Mg	S	Total
Uréia	45	-	-	-	-	-	45
Nitrato de amônio	34	-	-	-	-	-	34
Sulfato de amônio	21	-	-	-	-	24	45
MAP	10	52	-	-	-	-	62
DAP	18	46	-	-	-	-	64
Superfosfato simples	-	18	-	20	-	12	50
Superfosfato triplo	-	44	-	12	-	1	57
Termofosfato	-	17	-	20	7	-	44
Cloreto de potássio	-	-	60	-	-	-	60
Sulfato de potássio	-	-	48	-	-	16	64

Fonte: IAP (1999)

É comum o questionamento sobre as quantidades de nutrientes aproveitados pelas plantas sobre as quantidades de nutriente aplicados pela adubação. A Figura 9 ilustra quanto as plantas conseguem aproveitar do N, P e K aplicados via fertilizantes.

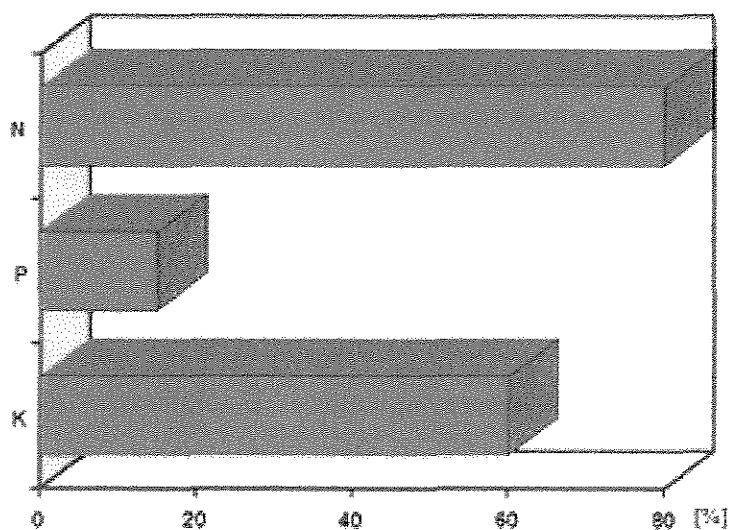


Figura 9 – Porcentagem de aproveitamento pelas culturas no primeiro ano
(IAP, 1999)

Observa-se um menor índice de aproveitamento para o fósforo. A eficiência de aproveitamento do fósforo varia muito com as condições do solo e também com a espécie cultivada (como pode ser observado na Figura 10). Verifica-se uma menor eficiência de aproveitamento do fósforo aplicado para a batata, fazendo com que a quantia deste nutriente tenha que ser aumentada em relação ao potássio e ao nitrogênio na adubação dessa cultura.

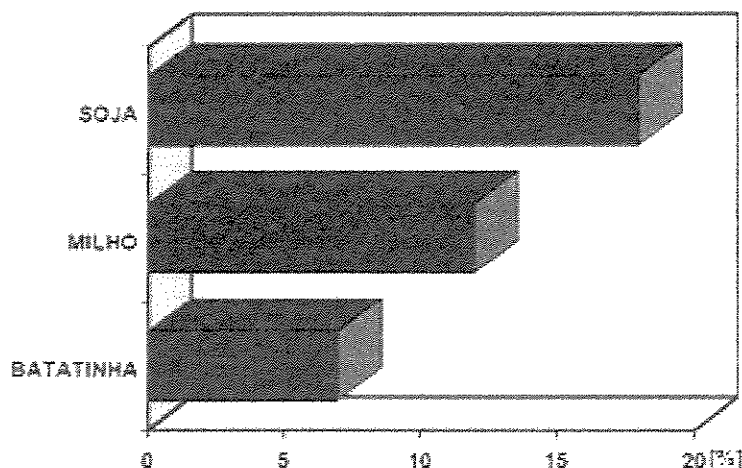


Figura 10 – Porcentagem de aproveitamento do fósforo no primeiro ano
(IAP, 1999)

Ocorre que o fósforo possui uma reatividade muito grande no solo, em condições de pH baixo (solo ácido) existem grandes quantidades de Fe^{+3} , Al^{+3} e Mn^{+2} livres na solução do solo, o fósforo irá reagir com os elementos citados formando compostos insolúveis (fosfatos de ferro, alumínio e manganês).

Em contrapartida, o uso demasiado do calcário poderá propiciar a reação do fósforo (ânion fosfato) com o cálcio, levando a formar fosfato de cálcio (baixa solubilidade em água). Em ambos os casos o fósforo ficará indisponibilizado para a absorção radicular.

Essas particularidades com relação ao fósforo fazem com que esse nutriente apresente uma baixa mobilidade no solo e um baixo índice de aproveitamento pelas culturas. A quantidade total de fósforo no solo varia de 800 a 4000 kg ha^{-1} , e somente cerca de 5 kg desses passam para a solução do solo, tornando a adubação fosfatada essencial para a produtividade.

Com relação à adubação com nitrogênio e potássio, na maioria das culturas, convém parcelar a aplicação desses nutrientes para melhor aproveitamento. Na adubação em cobertura com uréia convém incorporá-la ao solo, pois, podem ocorrer perdas expressivas de nitrogênio por volatilização dessa substância.

Os fatores ambientais também são importantes. Quando a uréia é aplicada na superfície de solos secos e a umidade do ar é baixa, o adubo pode permanecer inalterado por muito tempo e, portanto, não sujeito a perdas de amônia. Já a aplicação de uréia em solos úmidos favorece a volatilização de amônia.

Por outro lado, a ocorrência de chuvas (ou irrigação) após adubação contribui para arrastar a uréia, que é muito solúvel em água, para dentro do solo, diminuindo as perdas. Índice pluviométrico de 10 a 20 mm são insuficientes, porém chuvas tardias (mais de 5 dias após a adubação) podem não fazer efeito já que a hidrólise da uréia em solos úmidos é muito rápida. A Tabela 6 traz informações com relação à perda de nitrogênio que pode ocorrer quando não se incorpora a uréia.

TABELA 6 – Nitrogênio perdido por volatilização de amônia em 7 dias

Sob condições de laboratório [%]		
Solo	Uréia	Sulfato de amônio
1	30,2	0,7
2	21,6	1,4
3	12,2	2,4
Sob condições de campo [%]		
Solo	Uréia	Sulfato de amônio
1	22,5	0,7
2	17,1	0,9
3	16,4	0,9

Fonte: IAP (1999)

2.2.5 - Qualidade dos fertilizantes

As fábricas produtoras de fertilizantes podem formular um produto de diversas maneiras diferentes. Uma fórmula “0-20-20”, por exemplo, pode ser feita conforme ilustrado nas Tabelas 7 e 8.

TABELA 7 - Fechamento da fórmula 0-20-20 - Formulação nº 1

Matéria Prima	Quantidade	Custo Relativo
Cloreto de Potássio	334	40,0
Superfosfato triplo	309	34,0
Superfosfato simples	357	26,0
Total	1000	100,0
S=4,5% Ca=10,0%		

Fonte: IAP (1999)

TABELA 8 - Fechamento da fórmula 0-20-20 - Formulação nº 2

Matéria Prima	Quantidade	Custo Relativo
Cloreto de potássio	334	40,0
Superfosfato triplo	455	50,0
Inerte	211	3,0
Total	1000	93,0
S=0% Ca=3,0%		

Fonte: IAP (1999)

Observa-se que apesar da primeira formulação ser 7 pontos percentuais mais cara, ela é de melhor qualidade, por ter apenas material fertilizante (sem enchimento, que pode ser areia ou granilha), contendo outros nutrientes importantes ao crescimento vegetal (mais 45 kg de enxofre por tonelada e mais 100 kg de cálcio por tonelada), enquanto que a formulação mais barata não oferece essas vantagens.

2.2.6 - Determinação da fertilidade do solo

Segundo Fraisse (1998), a variabilidade da fertilidade do solo em um campo de cultura é um dos fatores mais importantes a ser levado em consideração em um programa de “agricultura de precisão”, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e de água para as culturas. Atualmente a maneira mais comum para a amostragem do solo é o estabelecimento de uma rede de pontos (*grid*) espaçados regularmente no campo.

O espaçamento utilizado nas áreas experimentais variam entre 20 e 30 metros. No caso de áreas comerciais, o número de amostras coletadas cai para 1 a 2,5 amostras por hectare, devido ao custo envolvido no processo de amostragem e análise do solo (cerca de R\$ 15,00 por uma análise completa).

Existem dois métodos para amostragem (Figura 11):

- Pontual (*grid point*), no qual a amostra enviada para análise é composta de amostras coletadas dentro de um raio de 2 a 3 metros ao redor dos pontos da rede. Neste caso, o mapa de solo final será obtido através de um processo de interpolação dos valores determinados para cada ponto.
- Área (*grid cell*), no qual a amostra enviada para análise é composta de amostras coletadas dentro da área compreendida entre quatro pontos da rede. Neste caso, o resultado obtido é diretamente atribuído para aquela área ou célula e nenhum processo de interpolação é necessário.

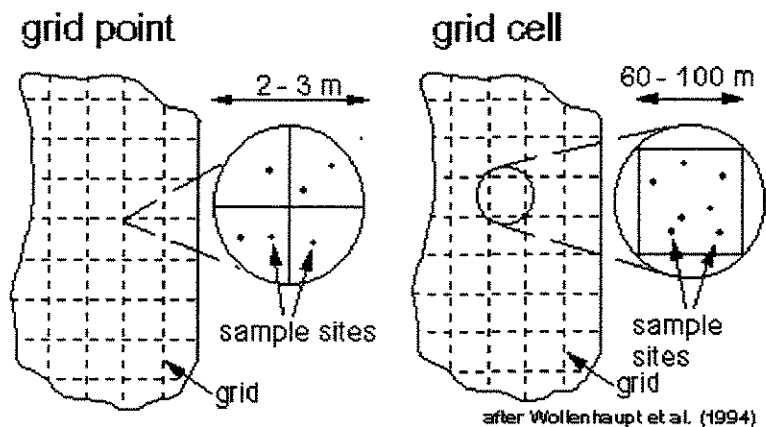


Figura 11 – Diagramas de amostragem de solo (Fraisse, 1998)

Muitas pesquisas e controvérsias tem ocorrido no estabelecimento de metodologias para a amostragem de solo e, por enquanto, deve-se fazer uso do bom senso. Se o campo apresenta alta variabilidade um programa de amostragem mais denso é recomendado, no caso de áreas mais homogêneas, menos amostras devem ser coletadas. A utilização de fotografias aéreas e imagens de satélites podem ajudar muito neste processo de decisão, indicando áreas do campo de maior ou menor variabilidade.

2.2.7 – Recomendações para adubação

Para culturas anuais tais como a de soja e a de milho, máquinas de múltiplas linhas associadas às semeadoras, sulcam, distribuem o adubo, fazem outro sulco menos profundo, distribuem as sementes e cobrem com terra. Tais máquinas devem ser corretamente reguladas de forma a aplicar as quantidades recomendadas de fertilizantes.

O método tradicional de recomendação para adubação de culturas anuais baseia-se na determinação média da disponibilidade de nutrientes no solo e na produtividade esperada.

Para as culturas de soja e milho a Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, órgão da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Governo do Estado de São Paulo (1999), recomenda as adubações mineral de plantio que se seguem.

Soja

A maioria dos solos onde a soja é plantada no Estado de São Paulo localiza-se na Alta e Média Mogiana e na Média Sorocabana e são identificados como solos ácidos, deficientes em alguns nutrientes.

Com práticas adequadas de exploração, manejo e conservação do solo, mesmo nos solos de cerrado consegue-se altas produtividades.

A recomendação de adubação mineral para o plantio da soja está apresentada na Tabela 9.

TABELA 9 – Recomendação de adubação mineral para o plantio da soja

Produtividade Esperada [t ha ⁻¹]	P resina [mg dm ⁻³]				K ⁺ trocável [mmol dm ⁻³]			
	P ₂ O ₅ [kg ha ⁻¹]				K ₂ O [kg ha ⁻¹]			
	0 – 6	7 – 15	16 – 40	> 40	0 – 0,7	0,8 – 1,5	1,6 – 3,0	> 3,0
1,5 – 1,9	50	40	30	20	60	40	20	–
2,0 – 2,4	60	50	40	20	70	50	30	20
2,5 – 2,9	80	60	40	20	70	50	50	20
3,0 – 3,4	90	70	50	30	80	60	50	30
3,5 – 4,0	100	80	50	40	80	60	60	40

Deve-se aplicar 15 kg ha⁻¹ de enxofre para cada tonelada de produção esperada. Em solos deficientes em manganês, deve-se aplicar 5 kg ha⁻¹ de manganês.

Nas dosagens de K₂O acima de 50 kg ha⁻¹, aplicar metade da dose em cobertura, principalmente em solos arenosos, 30 a 40 dias após a germinação.

Observações: a) a má distribuição e a incorporação muito rasa do calcário podem causar ou agravar a deficiência de manganês em alguns solos, causando queda de produtividade; b) no cultivo de primavera-verão, a inoculação das sementes dispensa a adubação nitrogenada. Entretanto, no cultivo de outono-inverno, devido à baixa atividade simbiótica, recomenda-se além da inoculação a aplicação de 50 kg ha⁻¹, sendo 25 % dessa dose com adubação no sulco de plantio e o restante em cobertura antes do florescimento; c) em solos arenosos ácidos pode ocorrer deficiência de molibdênio, o que acarreta má fixação de nitrogênio. A deficiência pode ser resolvida pela calagem, que aumenta a disponibilidade do nutriente, podendo também ser aplicado 50 g ha⁻¹ de molibdato de sódio em mistura com 50 kg de sementes; d) deficiências de micronutrientes na soja são raras em São Paulo. Na suspeita de sua ocorrência, realizar análises de solo e foliar e, uma vez constatada a deficiência, podem-se aplicar, com a adubação do plantio seguinte, 5 kg ha⁻¹ de zinco, e/ou 2 kg ha⁻¹ de cobre, e/ou 1 kg ha⁻¹ de boro.

Milho

O milho é uma das culturas que mais responde à adubação. A adubação mineral para o plantio de milho grão deve ser realizada de acordo com a análise de solo e a meta de produtividade, conforme a Tabela 10.

TABELA 10 – Recomendação de adubação mineral para o plantio de milho grão

Produtividade Esperada [t ha ⁻¹]	N [kg ha ⁻¹]	P resina [mg dm ⁻³]				K ⁺ trocável [mmol dm ⁻³]			
		P ₂ O ₅ [kg ha ⁻¹]				K ₂ O [kg ha ⁻¹] ⁽²⁾			
		0 - 6	7 - 15	16 - 40	> 40	0 - 0,7	0,8 - 1,5	1,6 - 3,0	> 3,0
2 - 4	10	60	40	30	20	50	40	30	—
4 - 6	20	80	60	40	30	50	50	40	20
6 - 8	20	90	70	50	30	50	50	50	30
8 - 10	30	⁽¹⁾	90	60	40	50	50	50	40
10 - 12	30	⁽¹⁾	100	70	50	50	50	50	50

Observações: (1) é improvável a obtenção de altas produtividades de milho em solos com teores muito baixos de fósforo, independentemente da dose de adubo empregada; (2) para evitar excesso de sais no sulco de plantio, a adubação potássica para doses maiores que 50 kg ha⁻¹ de K₂O está parcelada, prevendo-se a aplicação em cobertura.

Deve-se aplicar 20 kg ha⁻¹ de enxofre para metas de produtividade até 6 t ha⁻¹ de grãos e 40 kg ha⁻¹ de enxofre para produtividade maiores.

Deve-se aplicar 4 kg ha⁻¹ de zinco em solos com teores de zinco (DTPA) no solo inferiores a 0,7 mg dm⁻³ de zinco quando os teores estiverem de 0,7 a 1,5 mg dm⁻³.

Os adubos devem ser aplicados no sulco de plantio, 5 cm ao lado e abaixo das sementes.

A adubação de cobertura deve ser aplicada levando em conta a classe de resposta esperada a nitrogênio, o teor de potássio no solo e a meta de produtividade, de acordo com a seguinte Tabela 11.

TABELA 11- Adubação de cobertura para a produção de milho grão

Produtividade Esperada [t ha ⁻¹]	Classe de resposta a N			K ⁺ trocável [mmol dm ⁻³]		
	N [kg ha ⁻¹]			K ₂ O [kg ha ⁻¹]		
	Alta	Média	Baixa	0 – 0,7	0,8 – 1,5	1,6 – 3,0
2 – 4	40	20	10	–	–	–
4 – 6	60	40	20	20	–	–
6 – 8	100	70	40	60	–	–
8 – 10	120	90	50	90 ⁽¹⁾	60	20
10 – 12	140	110	70	110 ⁽¹⁾	80 ⁽¹⁾	40

Observação: (1) em solos argilosos, o potássio aplicado em cobertura pode não ser eficiente. Assim, principalmente nesses solos, quando os teores de potássio forem muito baixos ou baixos (<1,5 mmol dm⁻³) e as doses recomendadas em cobertura, iguais ou superiores a 80 kg ha⁻¹ de K₂O, é aconselhável transferir a adubação potássica de cobertura para a fase de pré-plantio, aplicando o fertilizante a lanço e incorporando-o ao solo. Nesse caso, acrescentar mais 20 kg ha⁻¹ de K₂O à dose recomendada.

As classes de resposta esperada a nitrogênio têm o seguinte significado: 1 - alta resposta esperada: solos corrigidos, com muitos anos de plantio contínuo de milho ou outras culturas não-leguminosas; primeiros anos de plantio direto; solos arenosos sujeitos a altas perdas por lixiviação; 2 - média resposta esperada: solos muito ácidos, que serão corrigidos; ou com plantio anterior esporádico de leguminosas; solo em pousio por um ano; ou uso de quantidades moderadas de adubos orgânicos; 3 - baixa resposta esperada: solo em pousio por dois ou mais anos, ou cultivo de milho após pastagem (exceto em solos arenosos); cultivo intenso de leguminosas ou plantio de adubos verdes antes do milho; uso constante de quantidades elevadas de adubos orgânicos.

Deve-se aplicar o nitrogênio ao lado das plantas, 30 dias após a germinação, em quantidades até 80 kg ha⁻¹. Deve-se aplicar o restante 20 a 30 dias depois. Deve-se aplicar o potássio juntamente com a primeira cobertura de nitrogênio.

Em áreas irrigadas o nitrogênio pode ser parcelado em 3 ou mais vezes, até o florescimento, e aplicado com a água de irrigação.

As doses de nitrogênio podem ser reduzidas em condições climáticas desfavoráveis ou em lavouras com grande crescimento vegetativo.

Milho safrinha: cultivado sem irrigação e com produtividade esperada até 4 t ha^{-1} , pode não responder à adubação em cobertura devido à insuficiência de chuva. Assim, recomenda-se aumentar a adubação nitrogenada de plantio para 30 kg ha^{-1} de nitrogênio, subtraindo-se o que foi colocado a mais no plantio, da adubação de cobertura.

2.2.8 - Mapas da variabilidade espacial dos nutrientes do solo

A retirada de amostras de solo e a análise de seus nutrientes é uma das etapas básicas para a diminuição da variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes no solo.

Reifsteck (1999) apresenta mapas da variabilidade espacial da disponibilidade de potássio e fósforo numa área de produção de uma propriedade norte-americana.

O mapa apresentado na Figura 12 mostra a quantia de potássio disponível no solo.

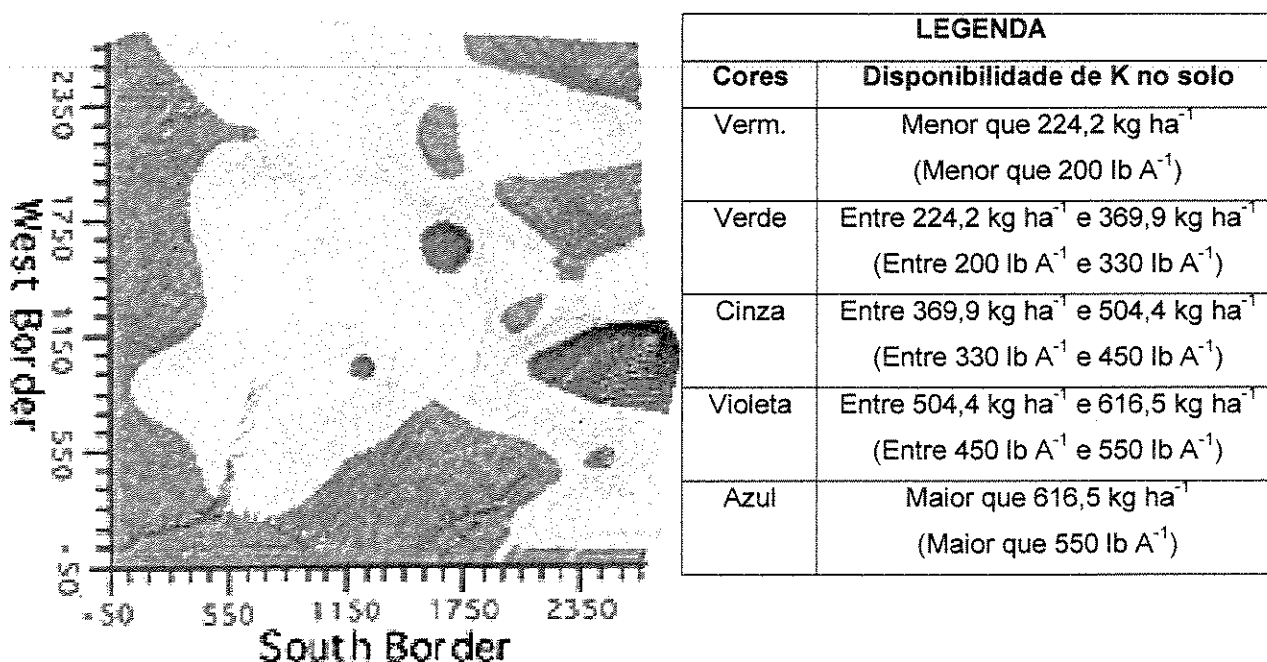


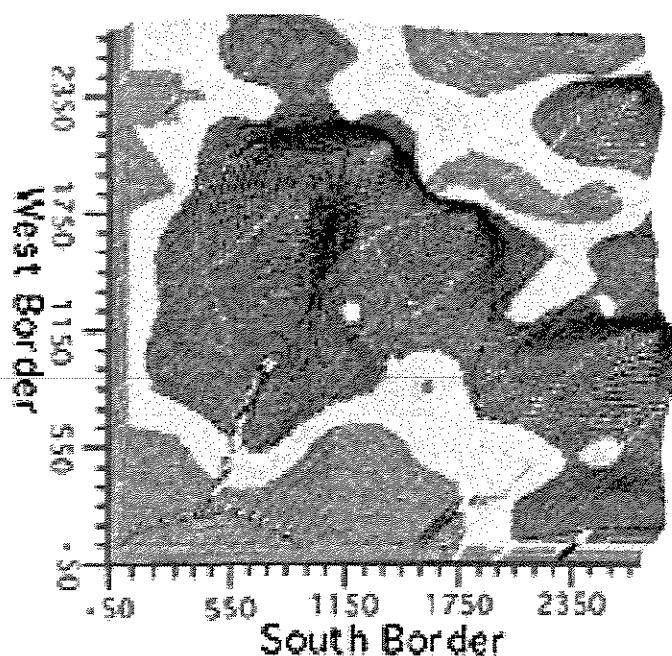
Figura 12 – Variabilidade espacial da disponibilidade de potássio no solo

(adaptado de Reifsteck, 1999)

Segundo Reifsteck (1999), para este solo é recomendável uma disponibilidade em torno de $336,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O (300 lb A^{-1}). Portanto, as áreas vermelha e verdes indicadas no mapa poderiam receber entre $369,9 \text{ kg ha}^{-1}$ e $392,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (330 lb A^{-1} a 350 lb A^{-1}) de fertilizante potássico, enquanto as outras áreas deveriam receber $224,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (200 lb A^{-1}) de fertilizante potássico.

Para uma aplicação convencional o recomendado seria a aplicação de $224,2 \text{ kg ha}^{-1}$ a $280,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (200 lb A^{-1} a 250 lb A^{-1}) de fertilizante potássico em toda a área.

O mapa apresentado na Figura 13 mostra a quantia de fósforo disponível no solo.



LEGENDA	
Cores	Disponibilidade de P no solo
Verm.	Menor que $33,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (Menor que 30 lb A^{-1})
Verde	Entre $33,6 \text{ kg ha}^{-1}$ e $56,0 \text{ kg ha}^{-1}$ (Entre 30 lb A^{-1} e 50 lb A^{-1})
Cinza	Entre $56,0 \text{ kg ha}^{-1}$ e $78,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (Entre 50 lb A^{-1} e 70 lb A^{-1})
Violeta	Entre $78,5 \text{ kg ha}^{-1}$ e $100,9 \text{ kg ha}^{-1}$ (Entre 70 lb A^{-1} e 90 lb A^{-1})
Azul	Maior que $616,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (Maior que $100,9 \text{ lb A}^{-1}$)

Figura 13 – Variabilidade espacial da disponibilidade de fósforo no solo
(Reifsteck, 1999)

Segundo Reifsteck (1999), para este solo é recomendável uma disponibilidade em torno de $44,8 \text{ kg ha}^{-1}$ (40 lb A^{-1}) de P_2O_5 . Portanto, as áreas vermelhas e verdes indicadas no mapa poderiam receber entre $302,6 \text{ kg ha}^{-1}$ e $448,4 \text{ kg ha}^{-1}$ (270 lb A^{-1} a 400 lb A^{-1}) de fertilizante

fosfatado, enquanto as áreas azuis e violetas deveriam receber de 0 a 44,8 kg ha⁻¹ (40 lb A⁻¹) de fertilizante fosfatado.

Para uma aplicação convencional o recomendado seria a aplicação de 224,2 kg ha⁻¹ a 280,2 kg ha⁻¹ (200 lb A⁻¹ a 250 lb A⁻¹) de fertilizante fosfatado em toda a área.

2.2.9 - Métodos estratégicos para aplicação de fertilizantes

Tradicionalmente, a recomendação para a adubação tem sido realizada baseando-se na fertilidade do solo, obtida através de amostragens e análises do solo, e na quantidade necessária de nutrientes para o desenvolvimento da cultura, considerando-se um determinado nível esperado de produção. Esta recomendação fundamenta-se em dados médios e não permite a correção da variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes para as plantas.

No âmbito da “agricultura de precisão” procura-se minimizar a variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes através da aplicação localizada de adubo na quantidade suficiente e necessária para a uniformização da produtividade.

Estudos, como o reportado por Veseth (1989), demonstram a necessidade da adoção de uma estratégia de aplicação localizada de fertilizantes a taxas variáveis. O autor reporta que em uma área estudada o rendimento da produção de trigo de inverno freqüentemente variava entre 2,09 e 6,96 t ha⁻¹, sendo a média de todo o campo 5,22 t ha⁻¹. Quando aplicado uniformemente nitrogênio no campo para uma produção esperada de 5,22 t ha⁻¹, áreas de alta produtividade eram sub fertilizadas, reduzindo o rendimento potencial e o conseqüente lucro. Reciprocamente, áreas de baixo potencial de produção eram fertilizadas com quantidades acima do necessário, reduzindo o lucro líquido através do aumento do custo da adubação.

2.3 - MÁQUINAS PARA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES

2.3.1 – Classificação

As máquinas de aplicação de fertilizantes e corretivos são aquelas utilizadas para promover a dosagem e distribuição de adubos e corretivos no solo. Segundo Mialhe (1974) estas máquinas podem ser classificadas em três categorias:

- categoria 1 – máquinas de solo, acopladas a tratores agrícolas ou atreladas a animais domésticos;
- categoria 2 – máquinas para aplicação aérea, acopladas a aeronaves agrícolas de asas fixas ou móveis;
- categoria 3 – equipamentos especiais, tais como: conjuntos de irrigações, para introdução de fertilizante na água a ser aplicada, equipamentos para transporte e transbordo de fertilizante e, finalmente, equipamentos para preparo e aplicação de fertilizantes líquidos.

A categoria 1 abrange quatro tipos de máquinas:

-
- distribuidores de adubos orgânicos - Os fertilizantes orgânicos, esterco na forma sólida e chorume na líquida, são normalmente aplicados a lança sobre toda superfície do terreno. As máquinas para aplicação de esterco denominam-se “distribuidores de esterco” e para chorume de “distribuidoras de adubos líquidos”;
 - distribuidores de adubos líquidos - São utilizadas em algumas culturas, porém, são ainda pouco usuais em nosso país. Constitui-se um exemplo típico os distribuidores de “acqua amônia” e de vinhaça, utilizados nas lavouras canavieiras, montados em equipamentos tratorizados. No caso da vinhaça são montados em caminhões e em carretas tratorizadas;
 - distribuidores de amônia – A aplicação da amônia anidra ainda não tem uso difundido no Brasil. Este equipamento exige cuidados especiais em sua utilização;

- distribuidores de adubos sólidos – Os equipamentos para aplicação de fertilizantes e corretivos sólidos são os de uso mais comum em nosso meio.

As máquinas distribuidoras de adubo sólido podem ser enquadradas em dois grandes grupos, de acordo com a forma que realizam a aplicação:

- adubadoras ou distribuidoras a lança e;
- adubadoras de fileiras.

As adubadoras a lança, como o próprio nome diz, são máquinas que realizam a distribuição do produto a lança sobre a superfície do solo, promovendo a adubação ou a calagem de cobertura.

As adubadoras de fileiras são máquinas que realizam a distribuição do produto ao longo do sulco do plantio, no caso da adubação de fundação, ou ao longo das fileiras das plantas, em adubação de cobertura. No primeiro caso geralmente a adubadora está associada à semeadora e, no segundo, ao cultivador mecânico.

2.3.2 - Dispositivos dosadores

De acordo com Balastreire (1987) as semeadoras - adubadoras tem a função de colocar simultaneamente a semente e o adubo no solo. Para isto dispõem, da mesma forma como são utilizados para a semente, de dosadores de adubo. Estes últimos diferem em sua construção dependendo do fabricante. Os principais tipos utilizados de dosadores de adubo estão apresentados a seguir.

- Helicoidal - O dosador helicoidal consta de um eixo com um helicóide colocado sob o depósito de adubo, sendo a quantidade deste variada através de um sistema de transmissão por engrenagem, como ilustra a Figura 14. Este tipo de dosador de adubo tem sido ultimamente utilizado pelos fabricantes de semeadoras - adubadoras.

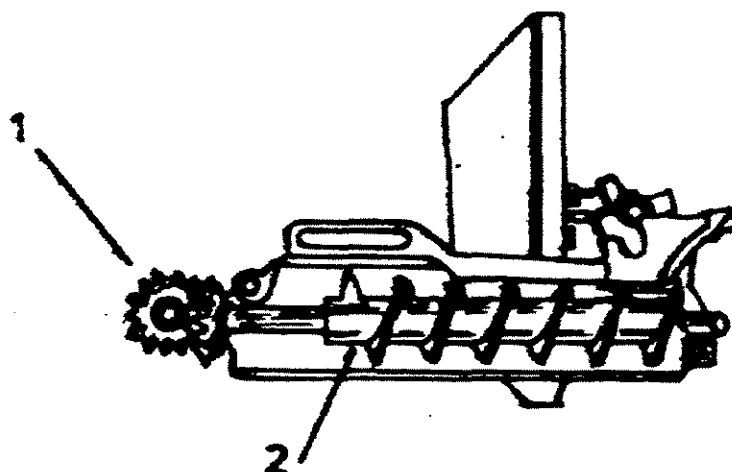


Figura 14 – Dosador helicoidal para adubo. 1 - transmissão, 2 - dosador
(Balastreire, 1987)

- **Rotores Dentados** - Os dosadores de adubo de rotores dentados foram os primeiros a surgir, tendo sido utilizados em quase todos os modelos de grãos miúdos fabricados no passado. Continuam a ser utilizados em semeadoras - adubadoras devido a construção simples e precisão adequada. Esses dosadores são montados no fundo do depósito de adubos das semeadoras e se constituem basicamente de um rotor dentado horizontal que gira sobre uma placa de apoio que contém o orifício de saída do adubo. O rotor recebe o movimento de rotação a partir de um eixo único, que recebe o movimento de rotação das rodas de sustentação da máquina, transmitindo essa rotação ao rotor dosador. A Figura 15 ilustra a composição do fundo do depósito de adubo de uma semeadora e a forma de montagem dos rotores dosadores. A quantidade de adubo que é empurrada pelo rotor para o orifício de saída é regulada através de uma lingüeta ajustável, que controla a espessura da camada de adubo que é empurrada pelos dentes do rotor.

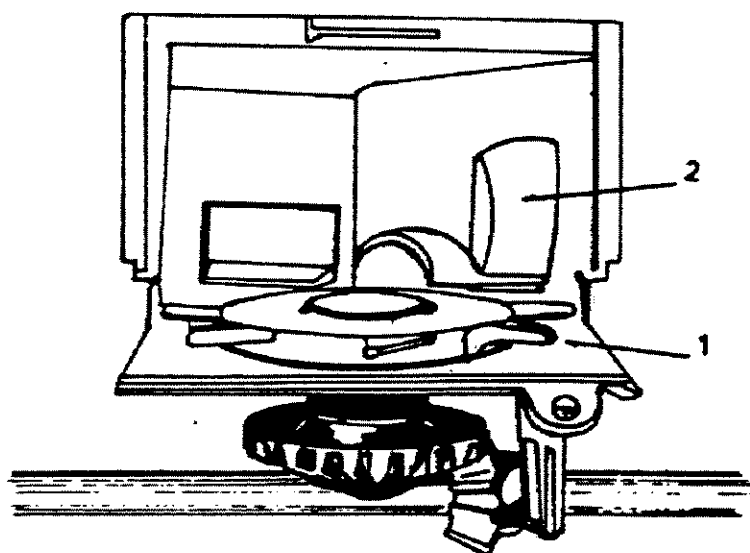


Figura 15 – Dosador de rotor dentado para adubo. 1 - rotor dentado, 2 - lingüeta ajustável (Balastreire, 1987)

- **Discos Horizontais Rotativos** - Os dosadores de discos horizontais rotativos são utilizados normalmente em semeadoras para grãos graúdos onde existem dosadores e depósitos de adubos individuais, para cada linha de semeadura. Neste caso, o dosador consta basicamente de um disco liso rotativo, acoplado a uma engrenagem coroa, que gira contra uma lingüeta raspadora. A lingüeta raspadora direciona o adubo para o adubo de saída, à medida que o disco rotativo empurra o adubo contra a mesma. A dosagem da quantidade de adubo aplicado é função da abertura da janela de saída, que varia em função da rotação do depósito de adubo, o qual é solidário ao anel fundido. A Figura 16 ilustra a posição relativa dos componentes desse tipo de dosador.

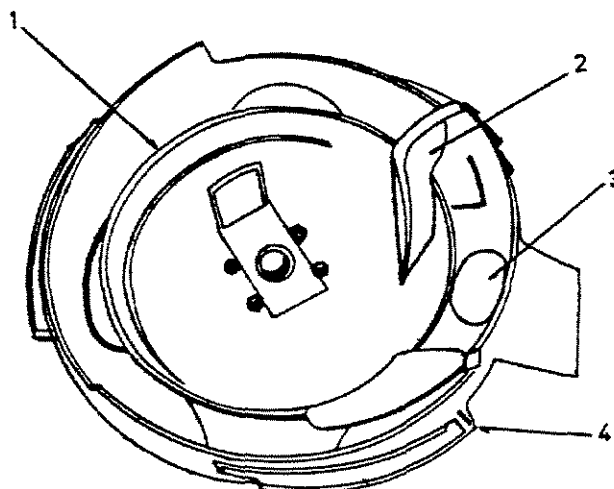


Figura 16 – Dosador de adubo de disco horizontal rotativo. 1 - disco,
2 - lingüeta raspadora, 3 - orifício de saída, 4 - base (Balastreire, 1987)

- Rotor Vertical Impulsador - O rotor impulsador é um dosador constituído por seções impulsadoras de chapa, ferro fundido ou náilon, que fixadas a um eixo de acionamento adquirem uma dupla função: agitação e impulsão do adubo para fora da janela de saída. A dosagem do adubo é ajustada, regulando-se a posição da chapa deslizante que funciona como janela de saída regulável. A Figura 17 ilustra a construção desse tipo de dosador. Os fabricantes que utilizam este tipo de dosador afirmam que uma das suas principais vantagens é a uniformidade de aplicação de adubo.

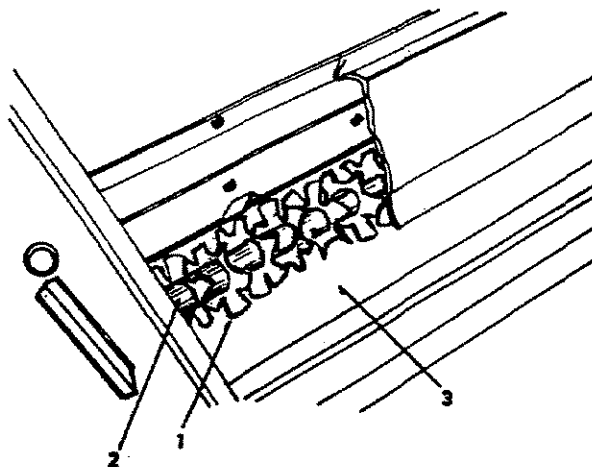


Figura 17 – Dosador de adubo de rotor vertical impulsor. 1 - rotor, 2 - eixo,
3 - depósito (Balastreire, 1987)

- Correias ou Correntes - Os dosadores de correias ou correntes se constituem de uma correia ou corrente que trabalham sob o fundo do depósito de adubo, dosando a quantidade de material a ser aplicada pelo transporte através de uma abertura regulável. A Figura 18 ilustra esse tipo de dosador.

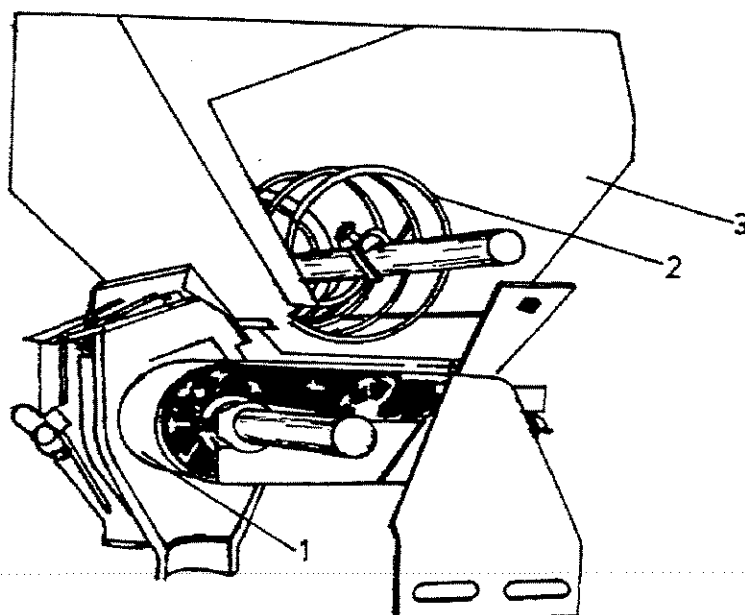


Figura 18 – Dosador de adubo de correia. 1 - correia, 2 - agitador,
3 - depósito (Balastreire, 1987)

3 - MATERIAL E MÉTODOS

A parte experimental deste trabalho foi realizada no Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC, com o apoio do Laboratório de Protótipos do Departamento de Máquinas Agrícolas da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

3.1 – MATÉRIAS-PRIMAS UTILIZADAS

Inicialmente foi utilizado um fertilizante comercial granulado, fornecido pela empresa Fertilizantes Heringer Ltda¹, cuja composição declarada foi de: 4 % de nitrogênio total, 20 % de óxido de fósforo (P_2O_5) solúvel em ácido cianídrico e água, 20 % de óxido de potássio (K_2O) solúvel e 0,4 % de zinco, resultando numa mistura comercialmente denominada “4-20-20”.

Com a intenção de estudar o comportamento do dosador para eventualmente utilizá-lo na formulação de adubos, foram utilizadas, além da citada anteriormente, as demais matérias-primas constantes na Tabela 12.

As matérias-primas denominadas de M2 a M10, apresentadas na Tabela 12, foram escolhidas por serem as normalmente utilizadas na maioria das formulações comerciais.

¹Obs: As marcas citadas neste trabalho não constituem recomendação por parte do autor

TABELA 12 – Matérias-primas utilizadas na avaliação do dosador helicoidal

Denominação	Matérias-primas
M1	Fertilizante (4-20-20)
M2	Fosfato natural de alta reatividade
M3	Sulfato de amônia granulado
M4	MAP em pó
M5	Nitrato de amônia
M6	Nitrocálcio granulado
M7	Cloreto de potássio granulado
M8	Uréia granulada
M9	Superfosfato simples granulado
M10	MAP granulado

Para a caracterização das propriedades físicas das matérias-primas foram determinados os seguintes parâmetros: densidade, ângulo de talude, granulometria e diâmetro médio ponderado.

As densidades das matérias-primas foram obtidas através da coleta de amostras de 500 cm³ e da pesagem de cada uma delas. Para tanto foi utilizado um recipiente com volume aferido e uma balança semi-analítica.

O ângulo de talude de cada matéria-prima foi determinado pela medição da inclinação formada pela superfície de deposição natural dos produtos, conforme mostra esquematicamente a Figura 19.

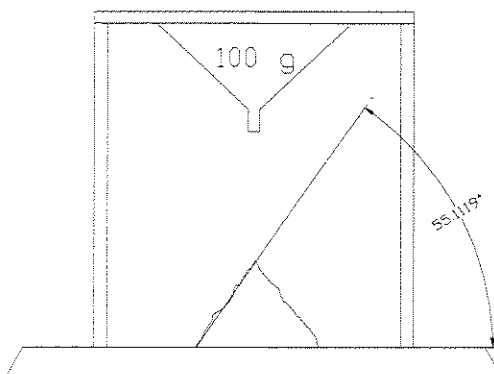


Figura 19 – Determinação do ângulo de talude

A granulometria das matérias primas foi obtida com a utilização de uma peneira vibratória tipo “*Rotap*”, marca W.S. Tyler, modelo RX29-16 e com um conjunto de peneiras marca Solotest, de tamanhos padronizados. As peneiras foram escolhidas de acordo com o produto a ser classificado. A pesagem do material depositado em cada uma das peneiras foi efetuada por uma balança eletrônica marca Micronal, modelo B6000, resolução de 0,1 g, com capacidade de 500 g.

O diâmetro médio ponderado foi determinado segundo a metodologia apresentada por Youker & McGuinness citado por Kiehl (1979) e calculado pela Equação 1:

$$DMP = \sum C \times P \quad (1)$$

onde:

DMP = diâmetro médio ponderado, em mm;

C = tamanho dos furos das peneiras, em mm;

P = proporção do peso do material retido em cada peneira, em relação ao peso total da amostra, adimensional.

3.2 – BANCADA DE TESTES

Para a avaliação do dosador helicoidal foi construída uma bancada de testes constituída de uma estrutura metálica de sustentação, de um sistema de acionamento eletro-mecânico e de um sistema de medição e armazenamento de dados. A Figura 20 mostra a bancada, com o dosador sob testes montado, e o sistema de medição e aquisição de dados.

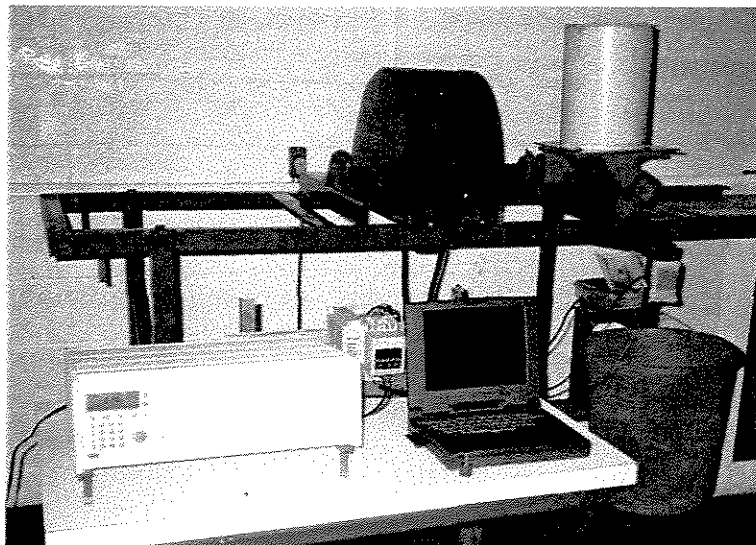


Figura 20 – Vista geral da bancada de testes

3.2.1 – Projeto e construção mecânica da bancada

A bancada de testes constitui-se dos seguintes componentes mecânicos: estrutura principal, estrutura secundária e elementos de acionamento.

A estrutura principal tem a finalidade de suportar o dosador helicoidal, o reservatório de matéria-prima, os elementos de acionamento, o motor elétrico e os sensores de torque e rotação. Foi construída com cantoneiras de abas iguais, de 38,1 mm (1 ½ polegadas) e unidas por solda.

A estrutura secundária tem a finalidade de suportar o sensor para a medição da vazão mássica instantânea e o sensor para medição da vazão mássica média. Esta estrutura foi montada de forma isolada da primeira a fim de não receber vibrações do sistema de acionamento e do dosador helicoidal, minimizando, dessa forma, ruídos nos sinais medidos. Foi construída com cantoneiras de abas iguais, de 38,1 mm (1 ½ polegadas) e unidas por solda.

O acionamento do eixo do dosador foi feito através de polias acopladas por correia trapezoidal e por um sistema de transmissão coroa e pinhão, obtendo desta forma, uma relação final de 10,5:1.

Utilizou-se um motor elétrico trifásico marca WEG, modelo 80 286, potência nominal de 1,10 kW (1,5 cv), rotação nominal de 3480 min⁻¹, ligado em triângulo (220 Vac). O motor foi

acionado por um inversor de frequência, marca Allen Bradley, modelo 160S – CMA1, capacidade de 1,49 kW (2 HP), alimentação monofásica (220 Vac).

A utilização de um inversor de frequência foi necessária uma vez que precisou-se variar continuamente a rotação do eixo do dosador.

A Figura 21 mostra esquematicamente a estrutura principal da bancada de testes com seus componentes principais.

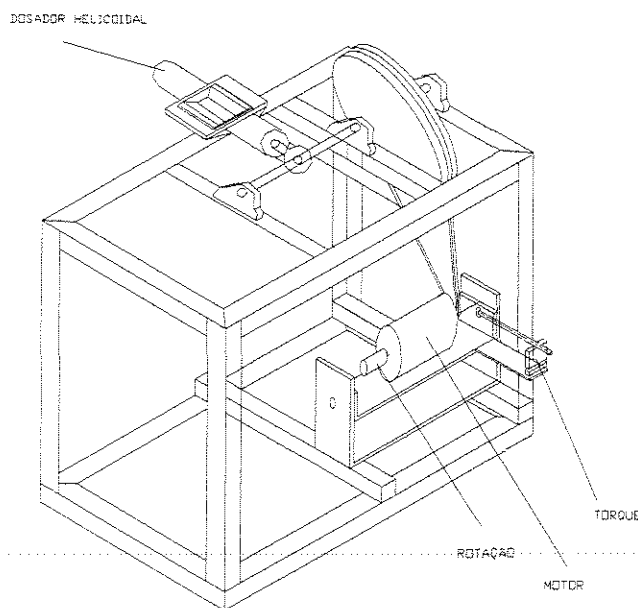


Figura 21 – Diagrama esquemático da estrutura principal da bancada de testes

A Figura 22 mostra esquematicamente a estrutura secundária da bancada de testes com os sensores de vazão mássica instantânea e média.

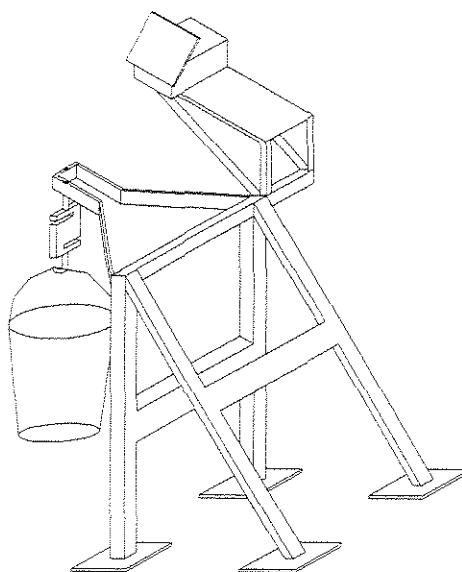


Figura 22 – Diagrama esquemático da estrutura secundária da bancada de testes

3.2.2 – Sistema de instrumentação e aquisição de dados

Utilizou-se um sistema de instrumentação e aquisição de dados com a finalidade de quantificar as características operacionais do dispositivo dosador.

O sistema de instrumentação e aquisição de dados foi constituído por sensores de vazão, de peso, de torque e de rotação e seus respectivos condicionadores de sinais, conversores analógicos / digitais (A/D), dispositivo de armazenamento temporário de dados e um microcomputador do tipo “*notebook*” para armazenamento definitivo e processamento dos dados.

A Figura 23 apresenta um diagrama esquemático do sistema de instrumentação e aquisição de dados.

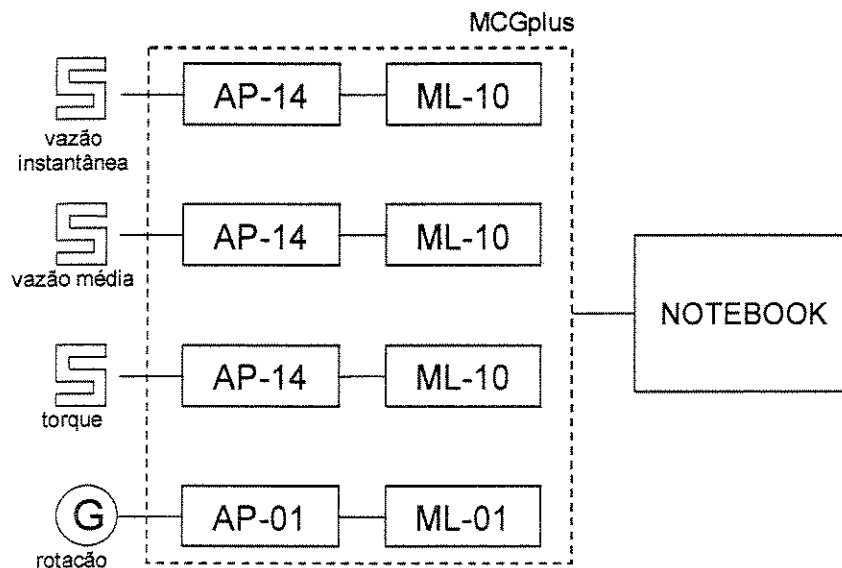


Figura 23 – Diagrama esquemático do sistema de instrumentação e aquisição de dados

3.2.2.1 - Medição da vazão mássica média

A vazão mássica média foi obtida pesando-se a matéria-prima utilizada durante o intervalo de tempo das medições.

A pesagem foi realizada coletando-se o material em um recipiente suportado por uma célula de carga extensométrica. A célula de carga utilizada foi do tipo “S”, marca Interface, modelo S-10, capacidade nominal de 98 N (10 kgf) e sensibilidade nominal de 2 mV V^{-1} .

A célula de carga foi ligada a um cartão de conexão marca Hottinger Baldwin Messtechnik – HBM, modelo AP-14, acoplado a um amplificador de corrente contínua, marca HBM, modelo ML-10, montado em sistema de medição marca HBM, modelo MGCplus.

A Figura 24 mostra a instalação da célula de carga na estrutura secundária.

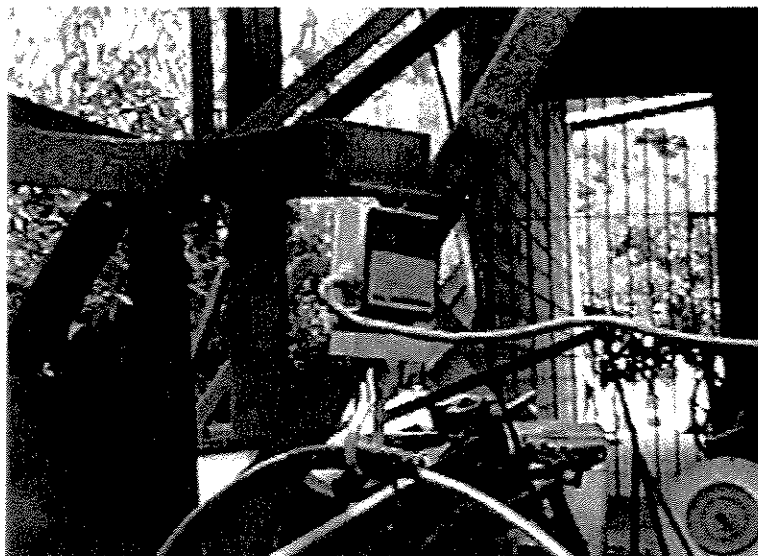


Figura 24 – Instalação da célula de carga para a determinação da vazão mássica média

3.2.2.2 - Determinação da vazão instantânea

Para a determinação da vazão instantânea foi construído um sensor composto por um anteparo de acrílico montado a 45° em uma célula de carga extensométrica. Este anteparo foi necessário para garantir o escoamento do produto sem que ocorresse sua retenção. Um diagrama esquemático desta montagem está apresentado na Figura 25.

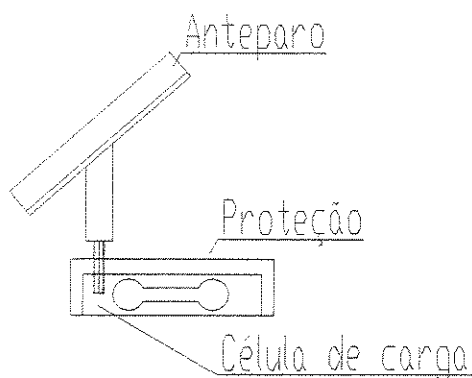


Figura 25 – Diagrama esquemático do sensor de vazão instantânea

A célula de carga utilizada foi da marca Interface, modelo T-6, capacidade nominal de 4,9 N (0,5 kgf) e sensibilidade nominal de $0,5 \text{ mV V}^{-1}$, ligada a um cartão de conexão marca Hottinger Baldwin Messtechnik – HBM, modelo AP-14, acoplado a um amplificador de corrente contínua, marca HBM, modelo ML-10, montado em sistema de medição marca HBM, modelo MGCplus.

A Figura 26 mostra o posicionamento do sensor de vazão e o fluxo do material durante a realização de uma medição.

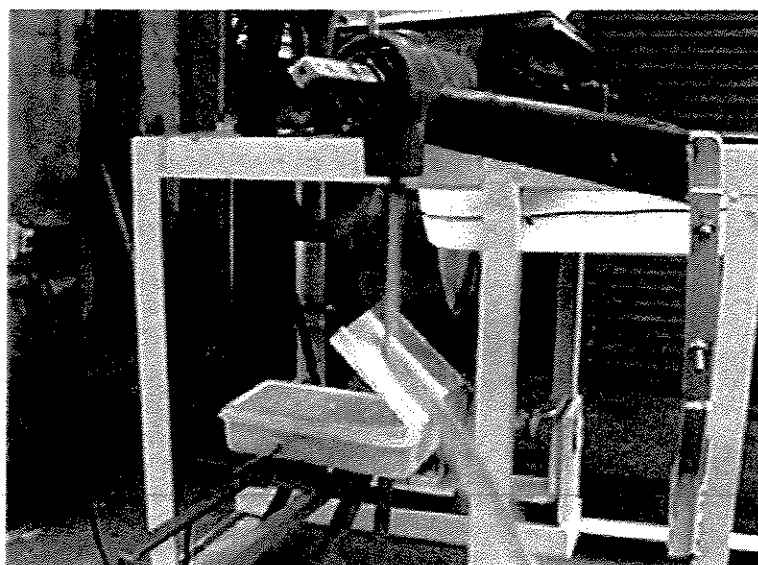


Figura 26 – Medição da vazão instantânea

A vazão instantânea foi obtida multiplicando-se o valor instantâneo proveniente do sensor pela relação entre o valor médio da vazão, obtido conforme descrito no item anterior, e o valor médio indicado pelo sensor.

Determinação da característica dinâmica do sensor de vazão instantânea

Para a determinação da frequência natural de oscilação do sensor de vazão instantânea (conjunto célula de carga e placa de impacto) realizou-se um teste simulando uma entrada do tipo impulso no sensor. Para obter-se um sinal impulsivo foi usada uma esfera de aço de 20 g que foi

lançada de uma altura de 15 cm no centro da placa de impacto do sensor de vazão, como mostra esquematicamente a Figura 27.

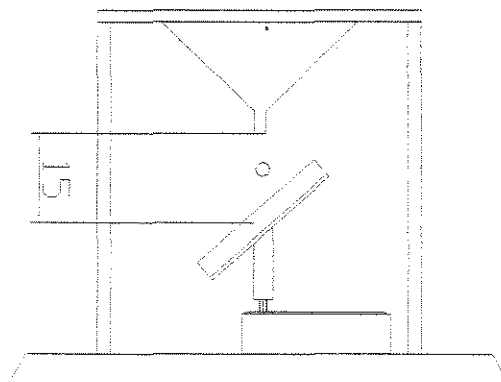


Figura 27 – Diagrama esquemático do dispositivo montado para determinação da frequência natural de oscilação do sensor de vazão instantânea

Coletou-se os dados do sensor de vazão instantânea utilizando-se uma taxa de amostragem elevada (9600 amostras por segundo), para garantir que a resposta dinâmica do sistema fosse corretamente captada.

3.2.2.3 - Medição da rotação do eixo do motor

Para a medição da rotação do eixo do motor de acionamento do dosador utilizou-se um motor de corrente contínua, marca Bueher, modelo MPI 77671273, funcionando como gerador. O sinal elétrico gerado foi acoplado a cartão de conexão marca Hottinger Baldwin Messtechnik – HBM, modelo AP-01, acoplado a um amplificador de corrente contínua, marca HBM, modelo ML-10, montado em sistema de medição marca HBM, modelo MGCplus. O sensor de rotação foi instalado diretamente no eixo do motor conforme mostra a Figura 28.

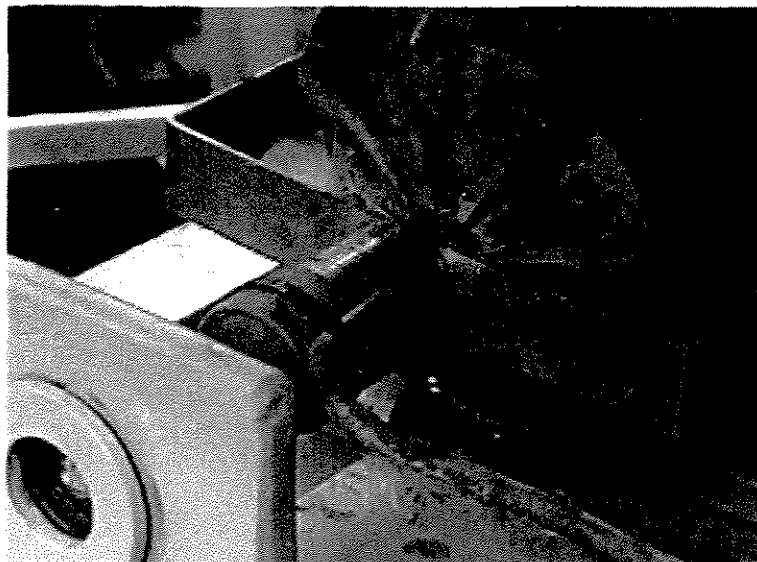


Figura 28 – Montagem do sensor para medição da rotação do motor

3.2.2.4 - Medição do torque de acionamento

O torque de acionamento do sistema foi medido através de uma célula de carga extensométrica montada na extremidade de um braço de 200 mm, acoplado diretamente no motor acionamento. A célula de carga utilizada foi do tipo “S”, marca Alfa Instrumentos, modelo S-5, capacidade nominal de 49 N (5 kgf) e sensibilidade nominal de 2 mV V⁻¹. A célula de carga foi ligada a um cartão de conexão marca Hottinger Baldwin Messtechnik – HBM, modelo AP-14, acoplado a um amplificador de corrente contínua, marca HBM, modelo ML-10, montado em sistema de medição marca HBM, modelo MGCplus.

A Figura 29 mostra a montagem da célula de carga para medição do torque de acionamento.

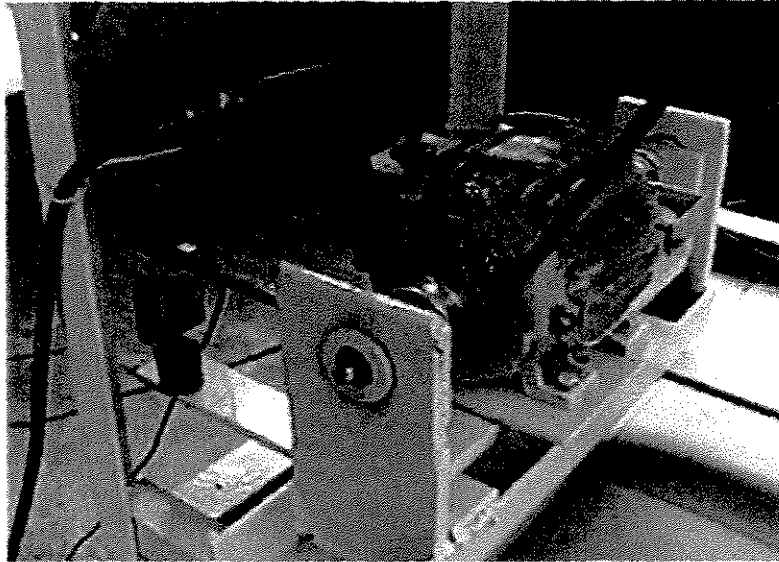


Figura 29 – Montagem da célula de carga para a medição do torque de acionamento

3.2.2.5 – Sistema de aquisição de dados

Utilizou-se um sistema de instrumentação e aquisição de dados marca HBM, modelo MGCplus, microprocessado, visor gráfico multifunção, disco rígido interno padrão PCMCIA para armazenamento temporário de dados, conversores Analógicos / Digitais (A/D) com resolução de 20 *bits*, máxima taxa de amostragem de 9600 amostras por segundo para cada canal, filtros digitais incorporados, interfaces RS-232C e paralela, alimentação 12 Vdc.

Foram coletados os sinais dos sensores de vazão mássica média, vazão mássica instantânea, torque de acionamento e rotação do motor, a uma taxa de 100 amostras por segundo para cada um dos canais.

A Figura 30 mostra o sistema de instrumentação e aquisição de dados MGCplus.

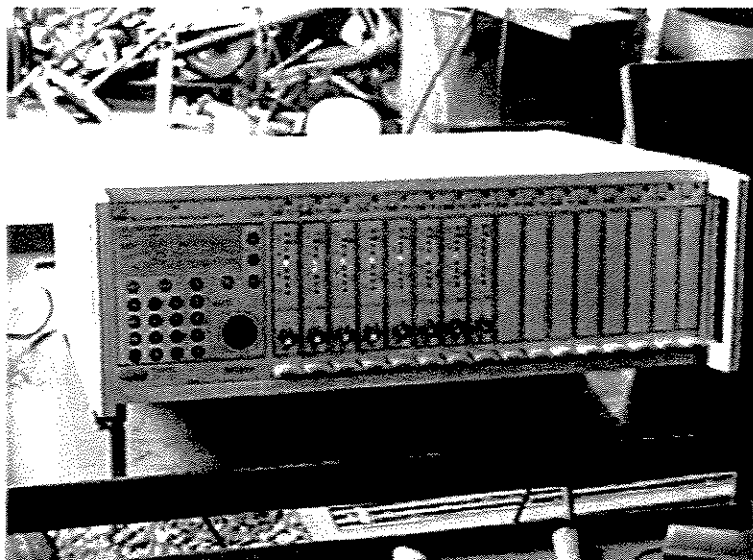


Figura 30 – Sistema de instrumentação e aquisição de dados MGCplus

3.3 – DOSADOR HELICOIDAL FLUTUANTE

Os dosadores de adubo sólido normalmente encontrados nas semeadoras - adubadoras comerciais são do tipo helicoidais flutuantes. Neste tipo de dosador o helicóide é confeccionado enrolando uma fita metálica de perfil triangular solidária ao eixo.

Inicialmente testou-se um dosador comercial, utilizado nos implementos comerciais do tipo semeadora - adubadora.

A Figura 31 mostra o desenho do helicóide utilizado pelo dosador cujas dimensões são:

- H: comprimento = 295 mm
- P: passo = 45 mm
- D: diâmetro externo do helicóide = 46 mm
- d: diâmetro interno do helicóide = 34 mm
- e: espessura do helicóide = 7 mm
- λ : ângulo de avanço = 75°

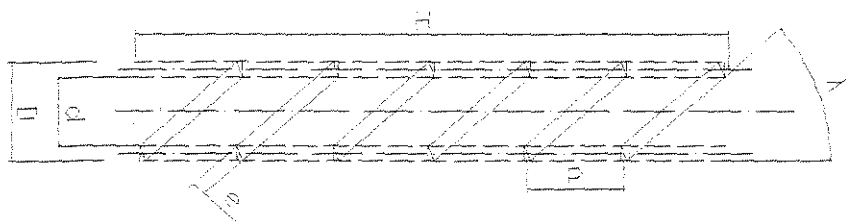


Figura 31 – Dimensões do helicóide flutuante

O helicóide flutuante é montado em um tubo de ferro fundido com revestimento interno de um material plástico anti-aderente, conforme mostra a Figura 32.

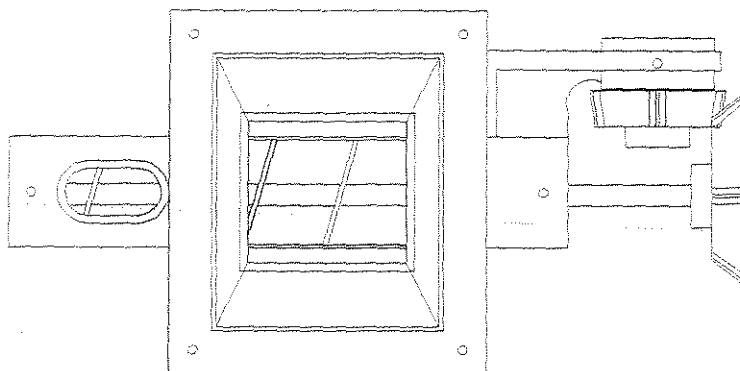


Figura 32 – Vista superior do dosador original

As dimensões originais do dosador de adubo foram modificadas com o propósito de se obter uma melhor uniformidade de aplicação. Para isto foi aumentado o comprimento do tubo original em 150 mm, preservando-se o comprimento do helicóide flutuante, conforme mostra a Figura 33. A função do alongamento do tubo foi eliminar o volume vazio formado entre as espiras do helicóide. Este volume vazio ocorre devido ao não enchimento total do espaço entre as espiras e devido ao efeito do arraste e transporte do material.

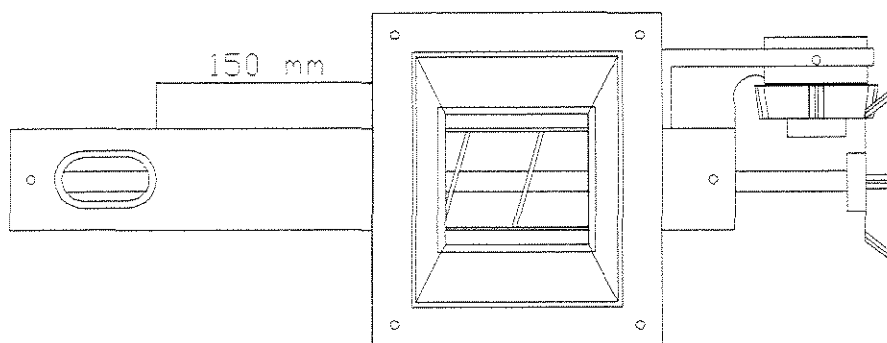


Figura 33 – Vista superior do dosador modificado

3.3.1 Cálculo da vazão volumétrica

A vazão volumétrica do dosador helicoidal flutuante foi calculada em função da rotação do eixo, do avanço do hélice helicoidal, da área útil de deslocamento e da eficiência do dosador, através da expressão apresentada pela Equação 2.

$$\dot{q}_v = k \cdot \eta \cdot R \cdot P \cdot A \quad (2)$$

onde:

$\dot{q}_v$ = vazão volumétrica, em $[\text{cm}^3 \text{s}^{-1}]$;

R = rotação do eixo do dosador, em $[\text{min}^{-1}]$;

P = passo ou avanço do helicóide, em $[\text{mm}]$;

A = área útil de deslocamento, em $[\text{mm}^2]$;

η = eficiência do dosador, adimensional;

k = fator de conversão de unidades (1/60000).

A área útil de deslocamento considerada é a determinada pelo diâmetro externo e interno do helicóide, calculada pela expressão apresentada pela Equação 3.

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \quad (3)$$

onde:

D = diâmetro externo do helicóide flutuante, em [mm];

d = diâmetro interno do helicóide flutuante, em [mm].

3.3.2 Cálculo da vazão mássica

A vazão mássica do dosador helicoidal flutuante foi obtida considerando-se a densidade da matéria-prima utilizada, e foi calculada pela expressão apresentada pela Equação 4.

$$\dot{q}_m = k \cdot \eta \cdot R \cdot P \cdot A \cdot D \quad (4)$$

onde:

$\dot{q}_m$ = vazão mássica, em [g s⁻¹];

D = densidade da matéria-prima, em [g cm⁻³].

3.3.3 Eficiência do dosador

A eficiência mássica do dosador foi obtida medindo-se a vazão mássica, a rotação do eixo do dosador e a densidade da matéria-prima utilizada e calculando-se a expressão apresentada pela Equação 5.

$$\eta = \frac{\dot{q}_m}{k.R.P.A.D} \quad (5)$$

3.4 – TESTES REALIZADOS COM OS DOSADORES

Para a determinação do comportamento do dosador original foram realizados testes com um fertilizante sólido, pré-formulado comercial “4-20-20”, acionando-se o dispositivo com 11 rotações distintas (28, 39, 51, 62, 76, 86, 99, 112, 122, 135 e 147 min⁻¹), distribuídas na faixa de rotações recomendada pelo fabricante, já que correspondem aos valores geralmente utilizados em aplicações reais.

Após realizada uma alteração no dosador original, testou-se o dosador modificado com 9 matérias-primas, além do pré-formulado (4-20-20), impondo-se as mesmas rotações do teste anterior.

A duração de cada um dos testes foi estabelecida pelo tempo necessário para que o dispositivo dosador aplicasse um volume equivalente a 5 kg de matéria-prima.

3.5 – PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados teve por objetivo separar dos sinais originais apenas as informações desejadas sobre o processo. Os dados gerados pelo sistema de instrumentação e aquisição de dados MGCplus foram exportados para um arquivo eletrônico no formato ASCII. Neste arquivo os dados referentes aos sinais dos sensores de vazão mássica instantânea, vazão mássica média, torque de acionamento e rotação do motor foram dispostos em colunas para processamento posterior.

3.5.1 – Processamento e análise dos sinais

O processamento e a análise dos sinais foram efetuados, após a coleta dos dados, com a utilização do software Matlab, versão 4.2, desenvolvido por MathWorks, instalado em um computador do tipo PC, com processador do tipo Pentium II e tiveram como principais objetivos a eliminação de ruídos espúrios e análise espectral de frequência.

3.5.1.1 – Retirada das amostras

De cada amostra foram extraídos 2000 dados dos valores medidos em cada teste, tomando-se o cuidado de selecionar um trecho dos dados onde o sistema já estivesse funcionando em regime estável.

3.5.1.2 – Filtragem

Para a realização dos estudos iniciais, visando o conhecimento do comportamento do dispositivo dosador, os dados dos sensores de vazão mássica média e de vazão instantânea foram filtrados em pós-processamento através de filtros digitais, implementados com o software Matlab. Das diversas estruturas de filtros existentes escolheu-se o tipo “*butterworth*”, na configuração passa-baixa. Utilizou-se um filtro de 2ª ordem com frequência de corte de 5 Hz.

Após a escolha da estrutura, ordem e frequência de corte do filtro, ajustou-se os parâmetros dos filtros internos do sistema de aquisição de dados MGCplus

Os dados dos sensores de torque e de rotação do motor foram filtrados pelo sistema de aquisição de dados MGCplus com filtros do tipo “*butterworth*”, na configuração passa-baixa de 2ª ordem, com frequência de corte de 0,5 Hz. A escolha de uma frequência de corte inferior à utilizada no filtro do sinal do sensor de vazão instantânea, foi devido ao fato destes sinais não possuírem uma dinâmica muito elevada.

3.5.1.3 – Análise espectral de frequência

Ao se analisar o sinal resultante do sensor de vazão instantânea em função do tempo, notou-se que o mesmo possui uma característica cíclica, podendo-se visualmente, através de uma análise gráfica, notar um componente de baixa frequência associada a um componente de frequência superior ao primeiro.

Fez-se uso da ferramenta de análise espectral para se estudar o comportamento deste sinal no domínio da frequência. Para se transformar o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência utilizou-se a Transformada Rápida de *Fourier* (FFT), executada através do Matlab.

3.3.2 - Análise estatística

Desvio padrão – Dispersão dos dados dentro de uma amostra. Indica a variação existente em relação ao valor médio obtido e é calculado pela expressão apresentada pela Equação 6.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (6)$$

onde:

s = desvio padrão;

X_i = valor do i -ésimo dado;

$\bar{X}$ = valor médio;

n = número total de dados.

Coefficiente de variação – Representa a dispersão dos dados de uma amostra em relação à sua média e é calculado pela expressão apresentada pela Equação 7.

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$

onde:

CV = coeficiente de variação.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – PROPRIEDADES DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As propriedades físicas das matérias-primas utilizadas foram determinadas conforme a metodologia apresentada no item 3.1.

Os resultados dos testes de granulometria realizados para cada uma das matérias-primas são apresentados na Tabela 13.

TABELA 13 – Granulometria das matérias-primas

Mat.	Granulometria [%]													
	75	110	150	297	425	600	710	850	1,00	1,18	2,00	2,36	3,35	
	[μm]								[mm]					
M1									9,8	8,2	17,9	39,8	14,3	
M2	20,9	15,5	12,3	24,4	26,9									
M3						31,2	10,5	15,5	12,7	24,0	5,5			
M4	4,0	14,0	42,0	18,4	19,9									
M5								6,1	3,5	12,3	36,9	39,5		
M6								3,1	6,4	9,1	37,2	39,9		
M7									2,4	5,3	20,3	52,7	14,0	
M8								0,7	12,1	20,3	52,7	14,0		
M9									9,6	16,7	20,2	32,7	8,5	
M10									2,4	4,2	10,4	48,7	34,0	

A Tabela 14 mostra a densidade, o ângulo de talude e diâmetro médio ponderado para cada uma das matérias-primas utilizadas para avaliação dos dosadores helicoidais.

TABELA 14 – Densidade, ângulo de talude e diâmetro médio ponderado das matérias-primas

Matérias-primas	Densidade [g cm ⁻³]	Ângulo de Talude [°]	Diâmetro Médio Ponderado [mm]
M1	1,13	42	1,971
M2	1,69	25	0,238
M3	1,02	40	0,914
M4	0,86	34	0,221
M5	0,97	32	1,902
M6	1,05	33	1,883
M7	1,08	37	2,205
M8	0,74	44	1,751
M9	1,20	35	1,754
M10	0,93	38	2,570

4.2 - BANCADA DE TESTES - CALIBRAÇÃO

A calibração das células de carga extensométricas utilizadas no sensor de vazão mássica instantânea, no sensor de vazão mássica média e no sensor de torque de acionamento foi realizada com a utilização de pesos padrões, impondo-se três ciclos de carregamento e descarregamento.

Com o propósito de avaliar o comportamento da célula de carga como sensor de vazão instantânea, mediu-se a frequência de ressonância do conjunto célula e placa defletora. Na Figura 34 tem-se o comportamento do sinal resultante no domínio do tempo, podendo-se notar um comportamento oscilatório com amortecimento.

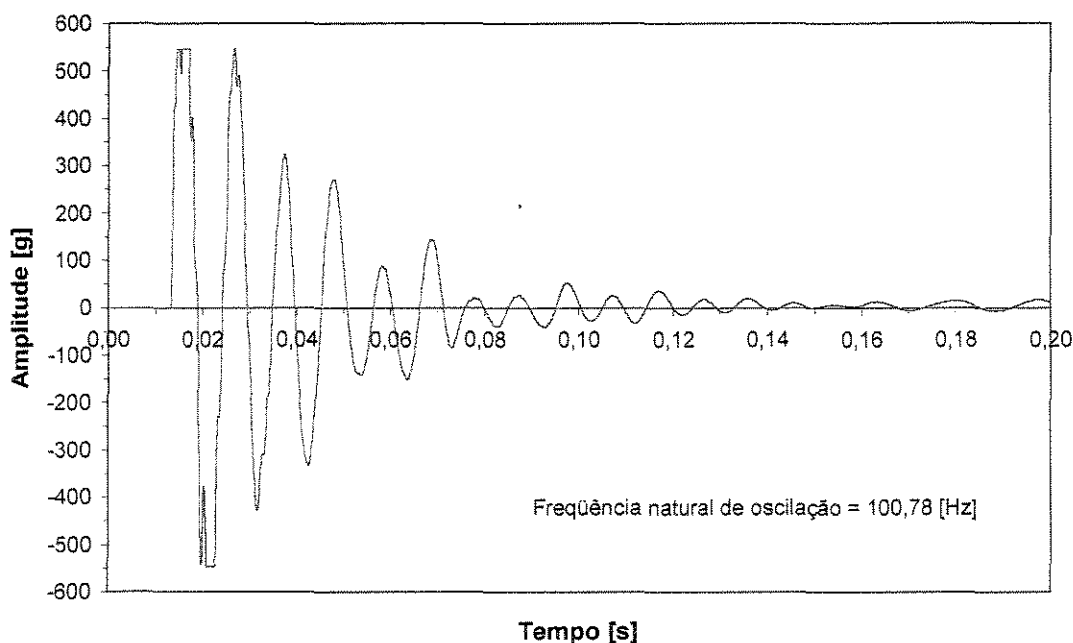


Figura 34 – Oscilação natural do sensor de vazão instantânea

Para a identificação do comportamento dinâmico do sensor de vazão mássica instantânea, procedeu-se uma análise espectral de frequência do sinal gerado neste teste. Tem-se na Figura 35 o gráfico da densidade espectral de potência. Nota-se uma concentração acentuada de sinais com frequência próxima a 100 Hz. O valor obtido para a frequência natural de oscilação do sensor de vazão mássica instantânea foi de 100,78 Hz.

Esse teste serviu de subsídio para a escolha da frequência de amostragem. Segundo o Teorema de *Nyquist*, a frequência de amostragem utilizada (100 Hz) impõe que somente sinais com frequência inferior a 50 Hz serão registrados pelo sistema de aquisição de dados.

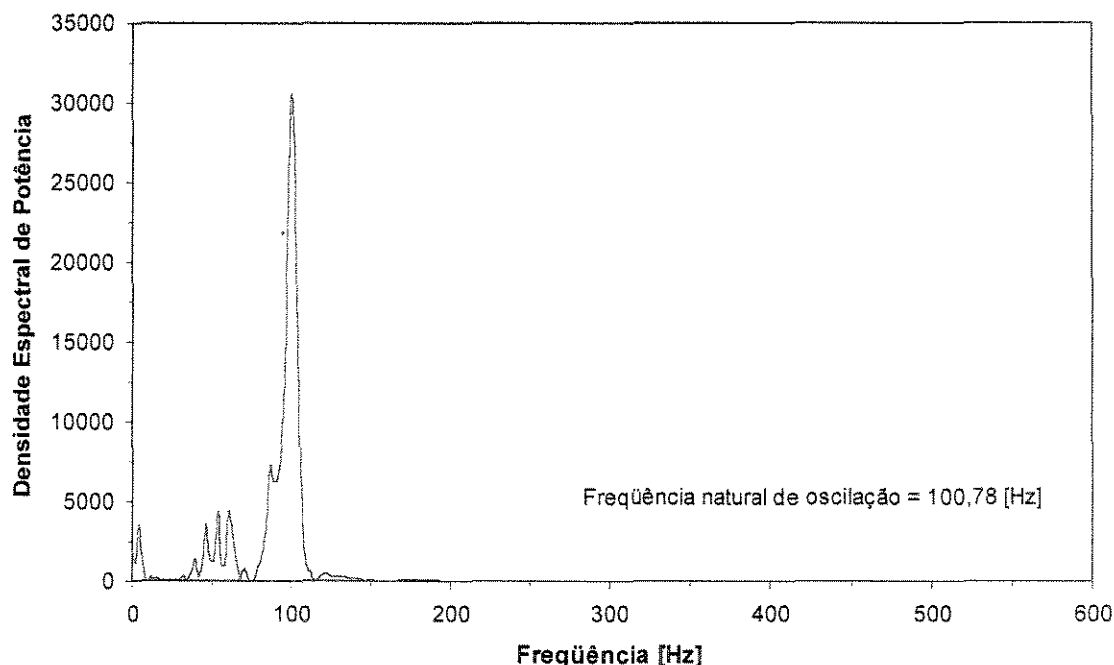


Figura 35 – Análise espectral de frequência da oscilação natural do sensor de vazão mássica instantânea

4.3 - FILTRAGEM DOS DADOS

Realizou-se um teste inicial com o dosador operando a uma rotação intermediária. Esse teste indicou a necessidade de filtragem digital dos dados do sensor de vazão mássica instantânea. Para tanto realizou-se uma análise espectral de frequência no sinal proveniente do sensor de vazão mássica instantânea. Conforme pode ser observado na Figura 36, existem sinais espúrios com frequências na faixa de 10 a 15 Hz e em 40 Hz que foram praticamente eliminados através de filtragem digital. Utilizou-se um filtro digital passa-baixa de 2ª ordem, do tipo “*butterworth*”, com frequência de corte de 5 Hz. Realizou-se uma nova análise espectral de frequência dos dados filtrados, cujo resultado é mostrado na Figura 37.

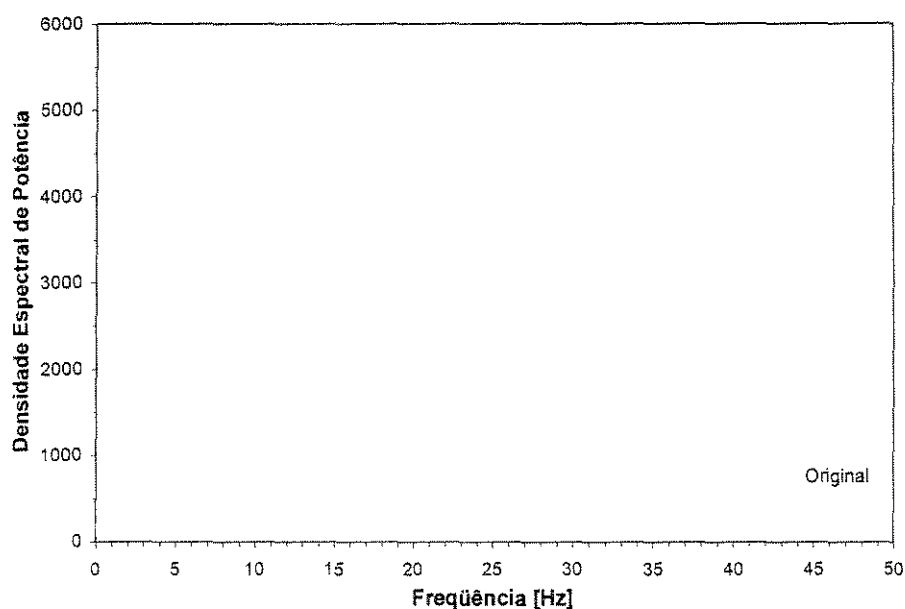


Figura 36 – Análise espectral de frequência do sinal do sensor de vazão mássica instantânea antes da filtragem digital

Nota-se, através da Figura 37, que as componentes de alta frequência do sinal foram eliminadas após a filtragem, sem que houvesse comprometimento do sinal de interesse.

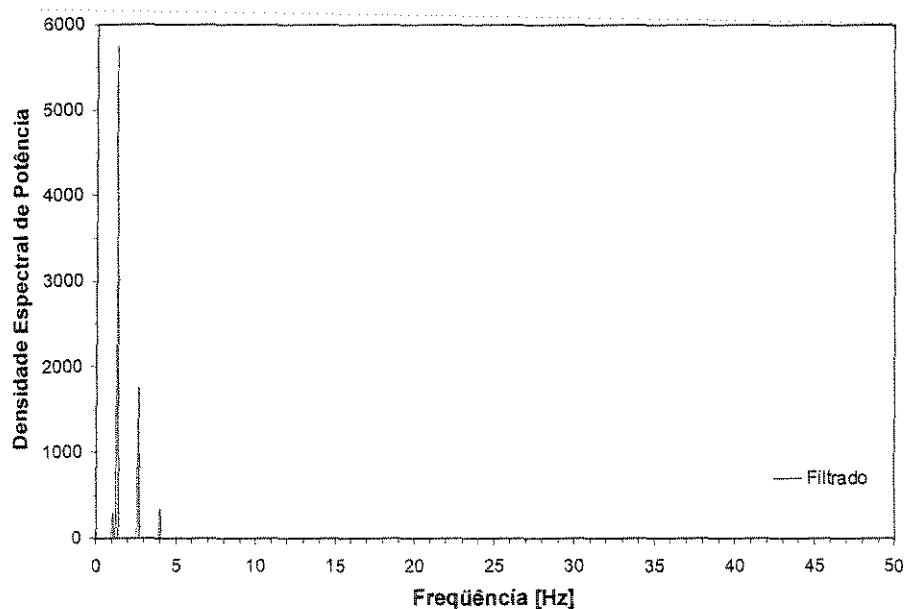


Figura 37 – Análise espectral de frequência do sinal do sensor de vazão mássica instantânea depois da filtragem digital

A Figura 38 compara os sinais correspondentes ao sensor de vazão mássica instantânea antes e depois da filtragem digital. Após a filtragem, as componentes de frequências mais elevadas foram praticamente eliminadas, restando apenas o sinal de interesse.

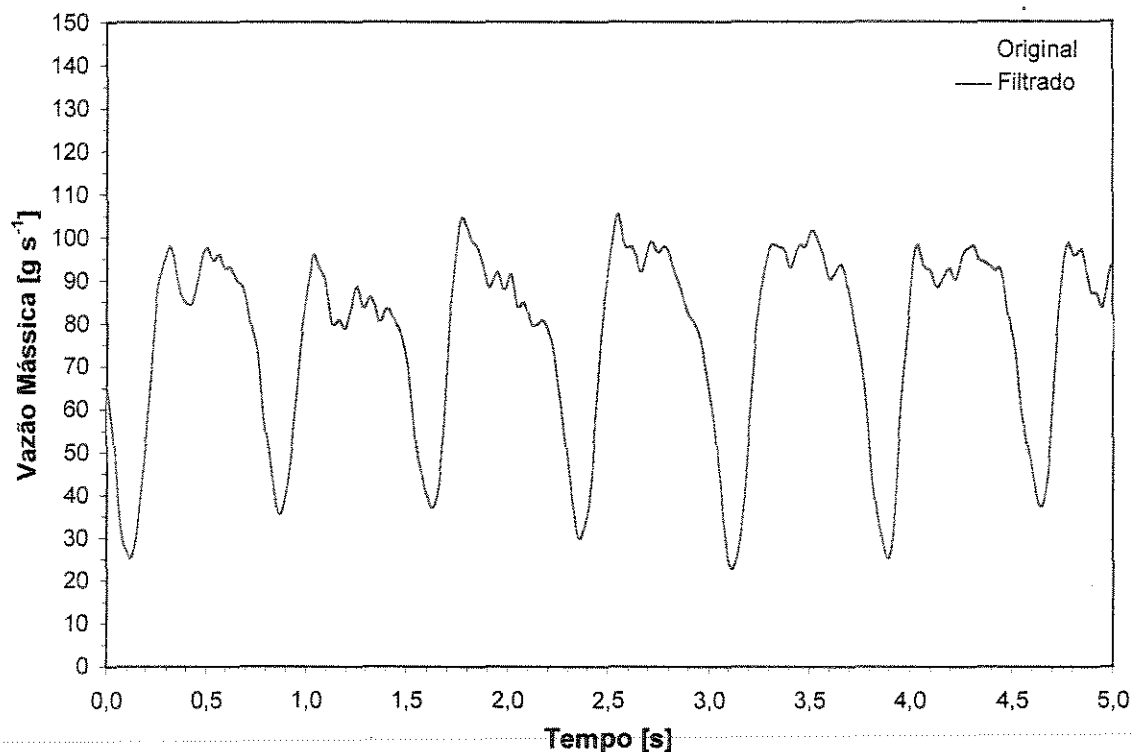


Figura 38 – Gráficos da vazão mássica em função do tempo, comparando-se os dados originais com os dados filtrados

4.4 – AVALIAÇÃO DO DOSADOR ORIGINAL

A avaliação do dosador original foi realizada com o fertilizante comercial, denominado M1, com o eixo de acionamento do dosador operando nas rotações anteriormente estabelecidas. A Tabela 15 apresenta os resultados de vazão mássica média, vazão volumétrica média, desvio padrão da vazão mássica e coeficiente de variação em função das rotações do eixo de acionamento.

TABELA 15 – Resultados obtidos com o dosador original, para a matéria-prima M1

Rotação [min^{-1}]	Vazão mássica média [g s^{-1}]	Vazão volumétrica média [$\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$]	Desvio padrão [g s^{-1}]	Coefficiente de variação [%]
28	20,4	18,1	4,9	24,1
39	28,2	24,9	7,9	27,9
51	36,8	32,5	8,7	23,5
62	44,5	39,4	11,5	25,8
76	52,1	46,1	12,2	23,4
86	59,9	53,0	14,6	24,4
99	67,8	60,0	15,5	22,9
112	74,8	66,2	16,2	21,7
122	84,6	74,8	17,8	21,0
135	92,0	81,4	18,2	19,8
147	97,8	86,5	19,1	19,6

Os resultados apresentados na Figura 39 mostram o comportamento do dosador original em função do tempo, quando operando com a matéria-prima M1, nas rotações de 28 min^{-1} e 147 min^{-1} . Nota-se um comportamento oscilatório da vazão mássica em ambas as rotações testadas. A amplitude e frequência de oscilação apresentam-se maiores na rotação mais elevada. Este comportamento “pulsante” na aplicação de fertilizante é característico dos dosadores do tipo helicoidal.

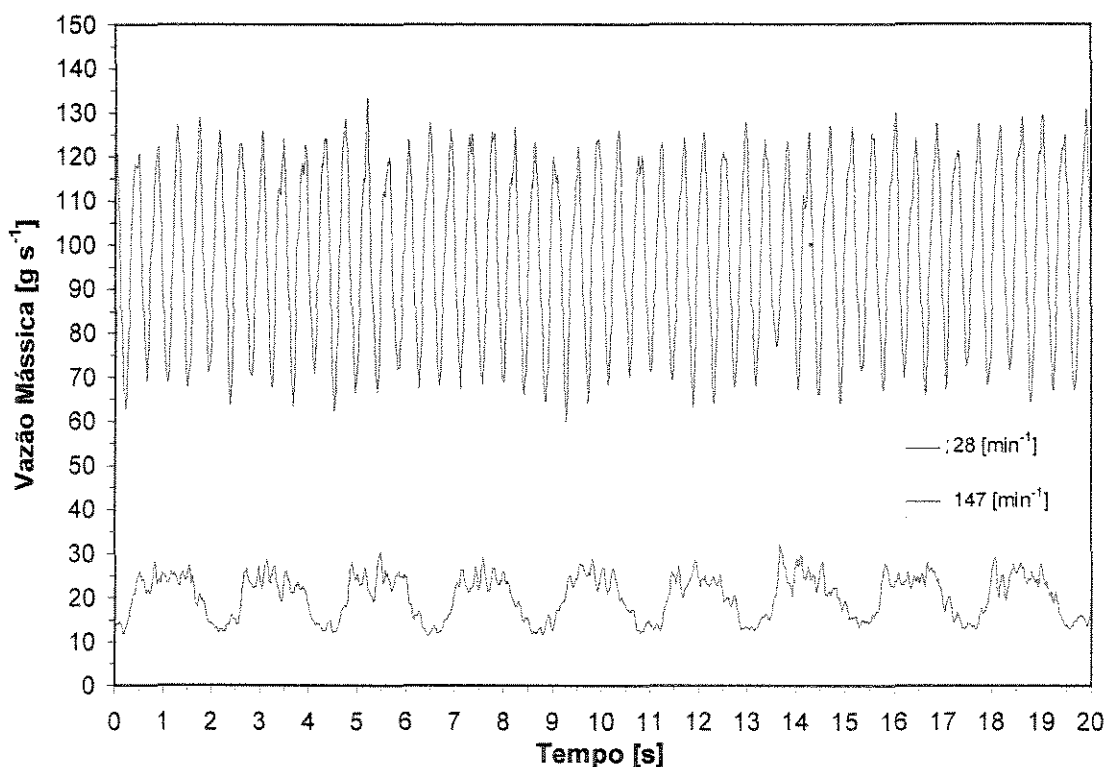


Figura 39 – Vazão mássica em função do tempo para as rotações de 28 min^{-1} e 147 min^{-1} do eixo do dosador original, operando com a matéria-prima M1

Considerando-se um equipamento de aplicação de fertilizante sólido no sulco, operando a $2,22 \text{ m s}^{-1}$ (8 km h^{-1}), com distância entre linhas de $0,8 \text{ m}$, pôde-se calcular a quantidade equivalente de fertilizante aplicado por hectare. A Figura 40 mostra a variação simulada da quantidade equivalente aplicada por hectare, em função da distância percorrida pelo equipamento de aplicação. Verifica-se que a distância entre os pontos de máxima e mínima aplicação são menores para as rotações de acionamento do eixo mais elevadas. Este comportamento favorece a uniformidade da distribuição. Este comportamento pode ser utilizado como um indicativo para futuros projetos de dosadores helicoidais flutuantes.

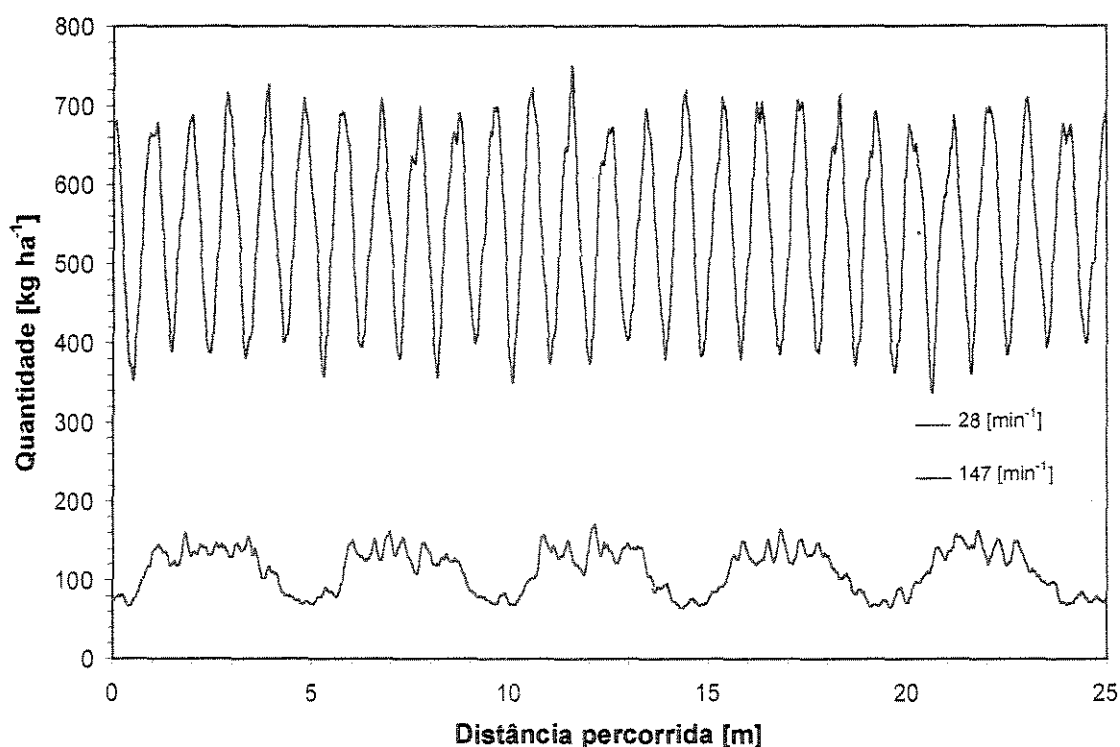


Figura 40 – Variação simulada da quantidade equivalente de fertilizante aplicada por hectare, em função da distância percorrida pelo equipamento de aplicação

Realizou-se uma análise espectral de frequência para cada rotação de acionamento do eixo do dosador, para se estudar a relação entre a frequência dominante do sinal do sensor de vazão mássica instantânea e a rotação do eixo do dosador. A Figura 41 ilustra os resultados da densidade espectral de potência para cada rotação e a Figura 42 evidencia uma relação linear entre a rotação do eixo do dosador e a frequência dominante do sinal do sensor de vazão mássica instantânea.

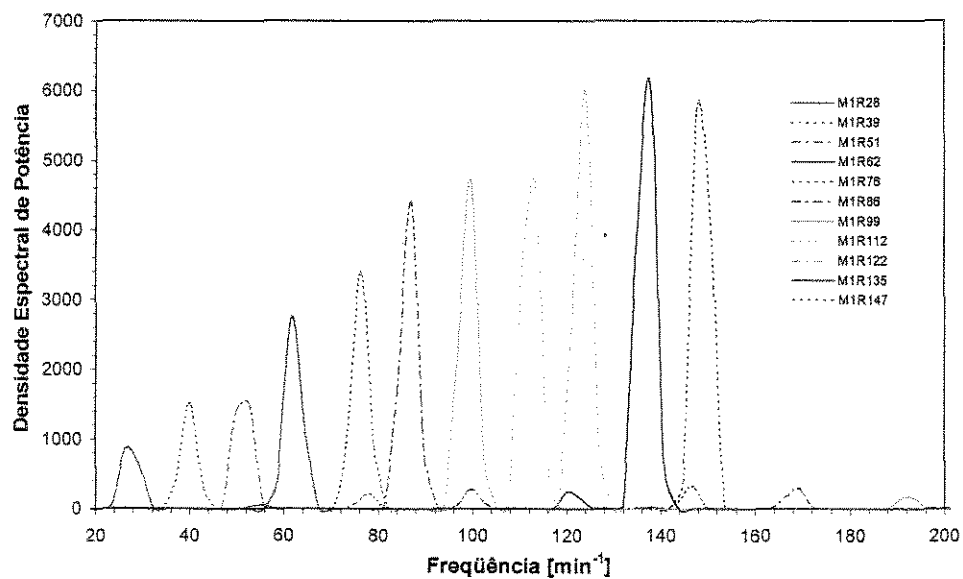


Figura 41 – Análise espectral de frequência da vazão mássica para diversas rotações do eixo do dosador

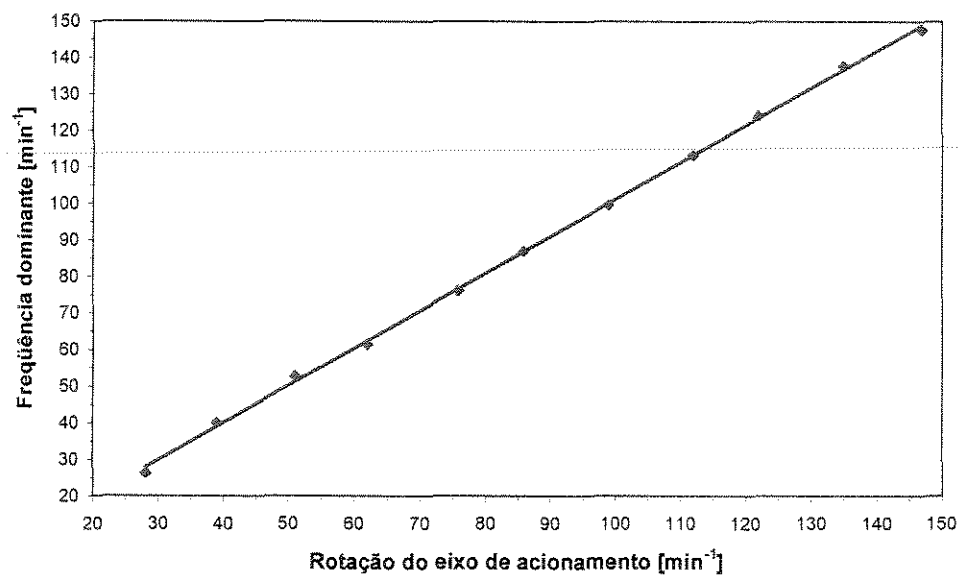


Figura 42 – Frequência dominante da vazão mássica instantânea em função da rotação do eixo de acionamento do dosador

A não uniformidade de aplicação apresentada pelo dosador helicoidal original foi considerada excessiva e motivou a alteração em seu projeto, mencionada no item 3.3 do Capítulo 3. Isto pôde ser constatado pelo coeficiente de variação, definido como a dispersão relativa em torno da média, que apresentou-se muito elevado.

4.5 - AVALIAÇÃO DO DOSADOR MODIFICADO

A avaliação do dosador modificado foi realizada com o fertilizante comercial, denominado M1, com o eixo de acionamento do dosador operando nas rotações anteriormente estabelecidas.

A Tabela 16 apresenta os resultados de vazão mássica média, vazão volumétrica média, desvio padrão da vazão mássica e coeficiente de variação em função das rotações do eixo de acionamento.

TABELA 16 – Resultados obtidos com o dosador modificado, para a matéria-prima M1

Rotação [min ⁻¹]	Vazão mássica média [g s ⁻¹]	Vazão volumétrica média [cm ³ s ⁻¹]	Desvio padrão [g s ⁻¹]	Coeficiente de variação [%]
28	15,6	13,8	2,5	16,3
39	20,0	17,7	3,4	16,9
51	26,2	23,1	4,1	15,7
62	31,8	28,1	4,2	13,3
76	38,1	33,7	4,9	12,8
86	45,2	40,0	5,6	12,3
99	52,5	46,4	5,6	10,8
112	58,5	51,8	6,1	10,4
122	65,0	57,5	6,8	10,4
135	72,3	63,9	6,2	8,6
147	76,8	68,0	5,9	7,7

Os resultados apresentados na Figura 43 mostram o comportamento do dosador modificado em função do tempo, quando operando com a matéria-prima M1, nas rotações de 28 min^{-1} e 147 min^{-1} . Nota-se também um comportamento oscilatório da vazão mássica em ambas as rotações testadas, porém a amplitude de oscilação apresenta-se menor em relação à obtida com o dosador original. Este fato pôde ser visualmente observado no momento da realização dos testes.

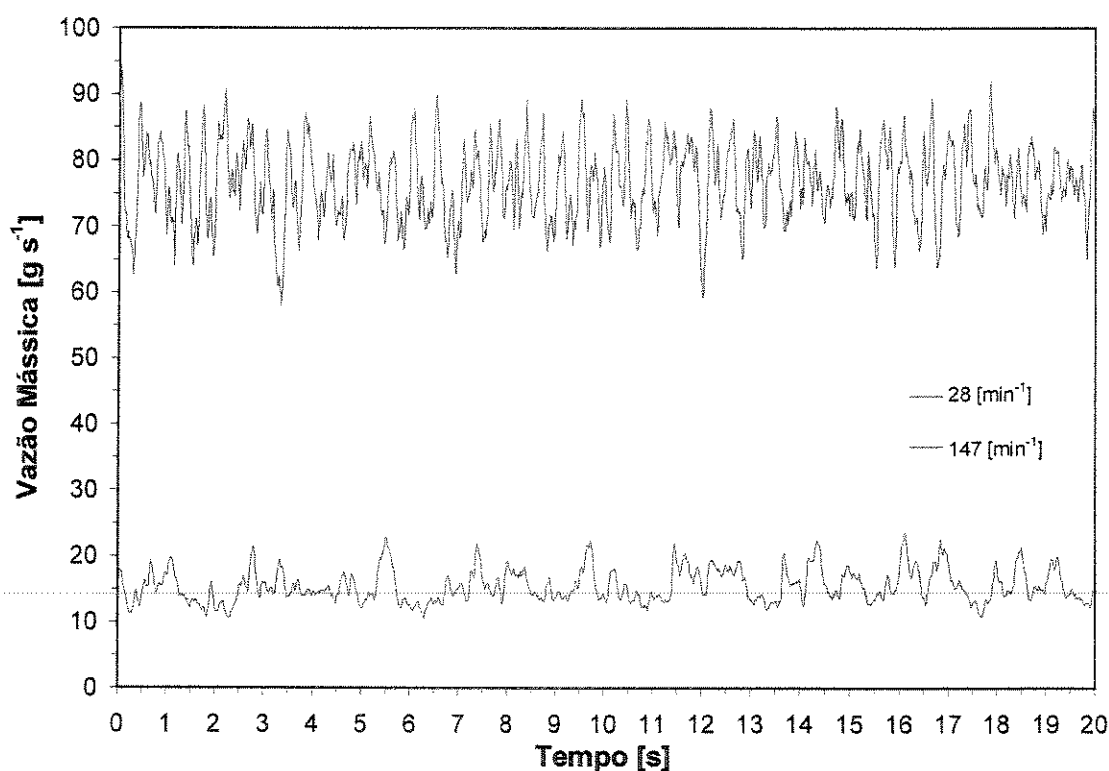


Figura 43 – Vazão mássica em função do tempo para as rotações de 28 min^{-1} e 147 min^{-1} do eixo do dosador modificado, operando com a matéria-prima M1

Simulando a aplicação em toneladas por hectare em função da distância percorrida pelo equipamento de aplicação de maneira análoga à realizada para o dosador original, pôde-se notar, através da Figura 44, que a variação simulada da quantidade equivalente aplicada teve um comportamento mais uniforme em relação ao dosador original.

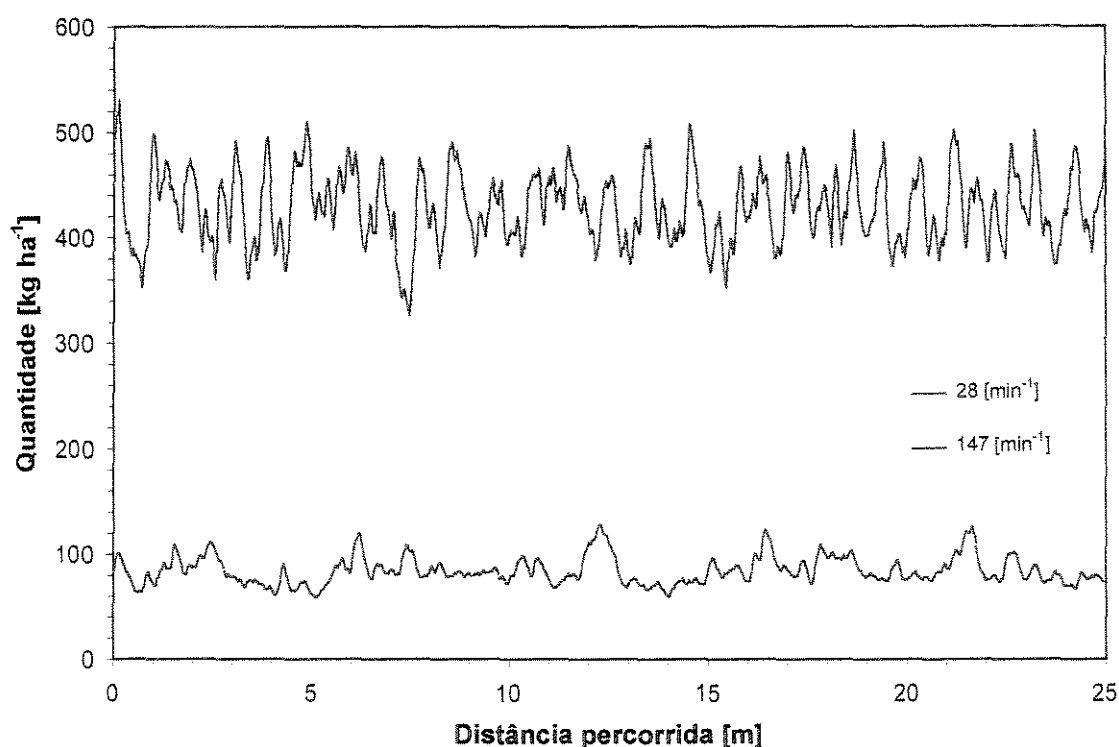


Figura 44 – Variação simulada da quantidade equivalente de fertilizante aplicada por hectare, em função da distância percorrida pelo equipamento de aplicação

A modificação realizada no dosador possibilitou uma aplicação mais uniforme do fertilizante sólido. Isto pôde ser verificado pelo valores inferiores do coeficiente de variação em relação aos obtidos com o dosador original.

Contudo, esta maior uniformidade foi acompanhada de uma redução na vazão mássica em função da rotação do eixo de acionamento do dosador helicoidal.

4.6 – COMPARAÇÃO ENTRE O DOSADOR ORIGINAL E O MODIFICADO

A Figura 45 mostra o comportamento da vazão mássica média e da vazão volumétrica média em função da rotação, para os dosadores original e modificado.

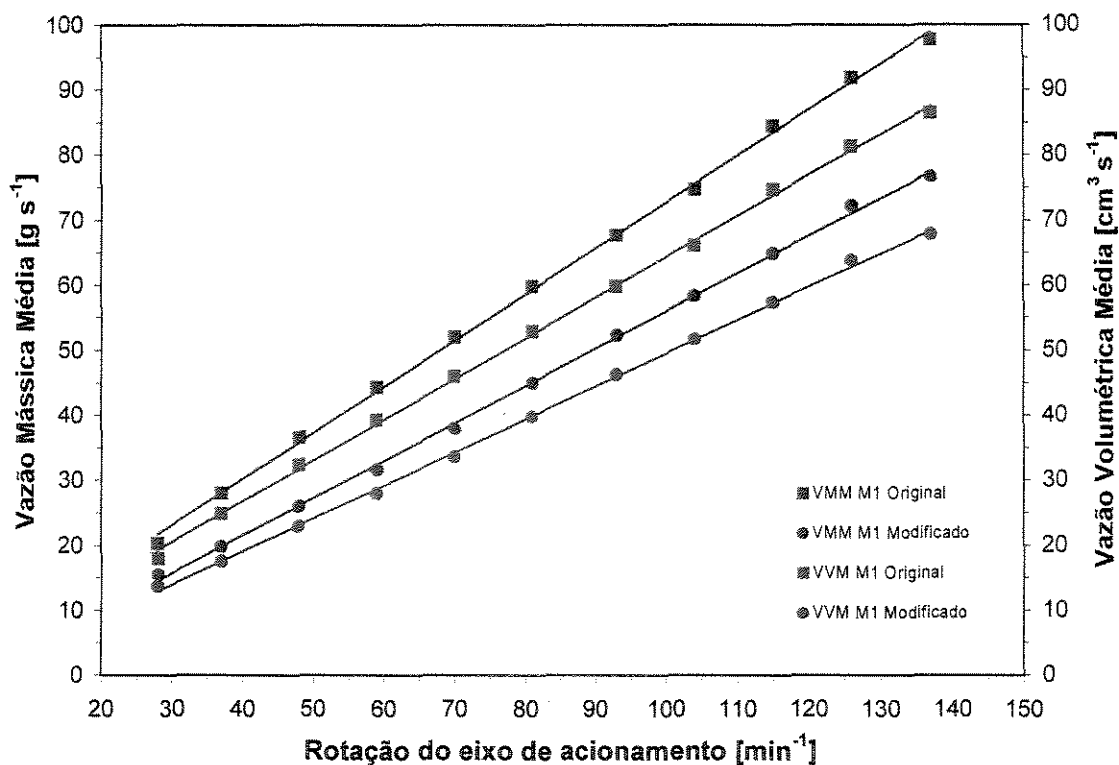


Figura 45 – Vazão mássica média e vazão volumétrica média em função da rotação, para os dosadores original e modificado

Nota-se claramente na Figura 45, que o comportamento da vazão mássica média em função da rotação do eixo de acionamento é semelhante para ambos os dosadores. Contudo, a vazão mássica média obtida com o dosador modificado é sempre inferior a obtida com o original.

O desvio padrão e o coeficiente de variação da aplicação, em função da vazão mássica média, para ambos os dosadores estão apresentados na Figura 46.

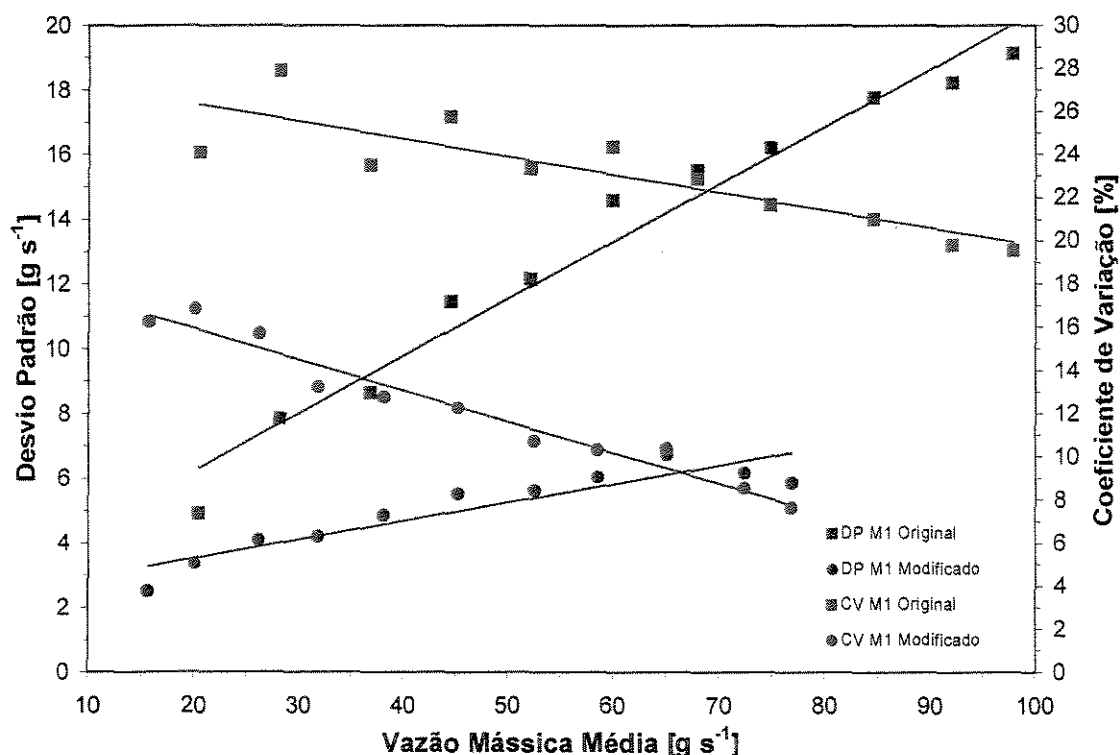


Figura 46 – Desvio padrão e coeficiente de variação da aplicação em função da vazão mássica média do dosador original e do modificado

Nota-se que o desvio padrão, para ambos os dosadores, é sempre crescente com o aumento da vazão mássica média, contudo o comportamento inverso é observado com relação ao coeficiente de variação. Nota-se ainda que a aplicação com o dosador modificado apresenta desvio padrão e coeficiente de variação inferiores à aplicação realizada com o dosador original. Isto indica que a alteração realizada contribuiu para a melhora na uniformidade de aplicação. O comportamento decrescente do coeficiente de variação com o aumento da vazão mássica média e, portanto, com o aumento da rotação do eixo de acionamento, indica que os dosadores helicoidais apresentam uma melhor uniformidade de aplicação quando operados a rotações do eixo de acionamento mais elevadas.

As potências necessárias para acionamento dos dosadores original e modificado, em função da vazão mássica média, estão apresentadas na Tabela 17 e os respectivos gráficos na Figura 47.

TABELA 17 – Potência de acionamento dos dosadores em função da vazão
mássica média

Dosador original		Dosador modificado	
Vazão mássica média [g s^{-1}]	Potência [W]	Vazão mássica média [g s^{-1}]	Potência [W]
20,4	12,9	15,6	20,0
28,2	17,8	20,0	26,0
36,8	24,7	26,2	31,5
44,5	27,6	31,8	40,8
52,1	35,8	38,1	48,0
59,9	43,2	45,2	56,7
67,8	46,2	52,5	71,3
74,8	54,2	58,5	82,6
84,6	60,0	65,0	89,1
92,0	69,6	72,3	104,7
97,8	87,0	76,8	116,5

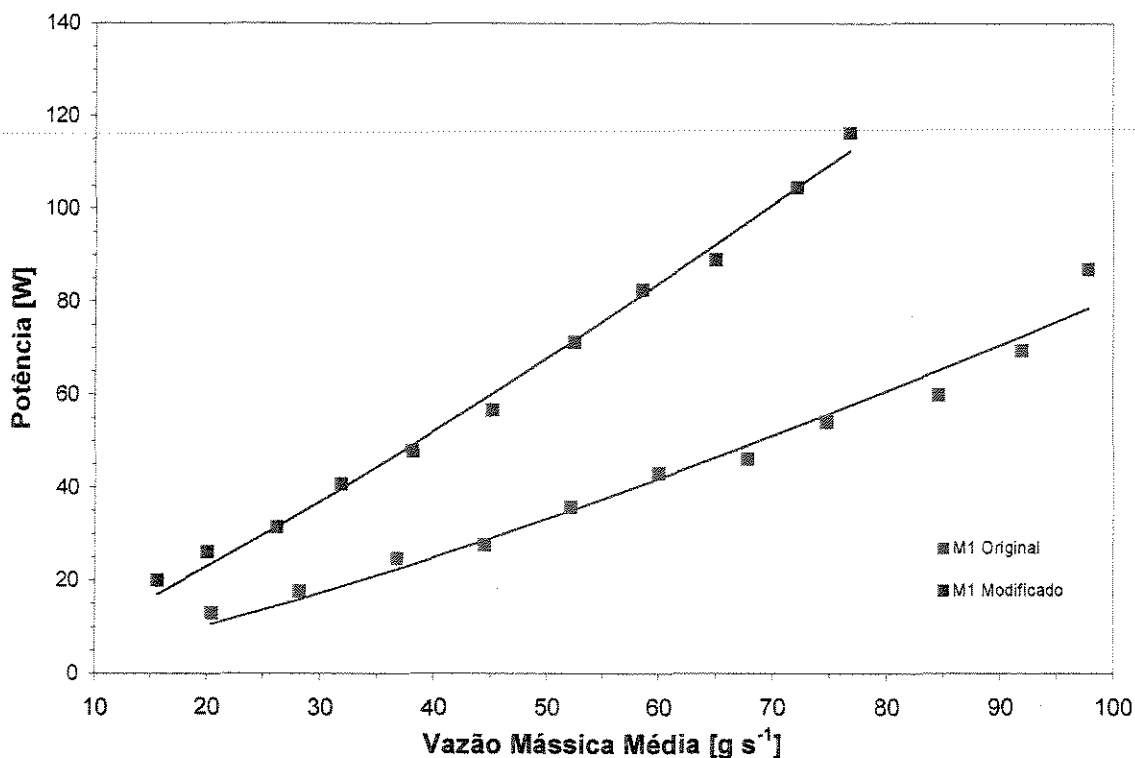


Figura 47 – Potência mecânica para acionamento do dosador modificado e do original em função da vazão mássica média

Nota-se um comportamento potencialmente crescente da potência necessária para o acionamento dos dosadores em função do aumento da vazão mássica média. O dosador modificado necessita de uma maior potência para o seu acionamento, já que a distância de arraste do material foi aumentada.

A Figura 48 apresenta a eficiência mássica dos dosadores em função da rotação do eixo de acionamento.

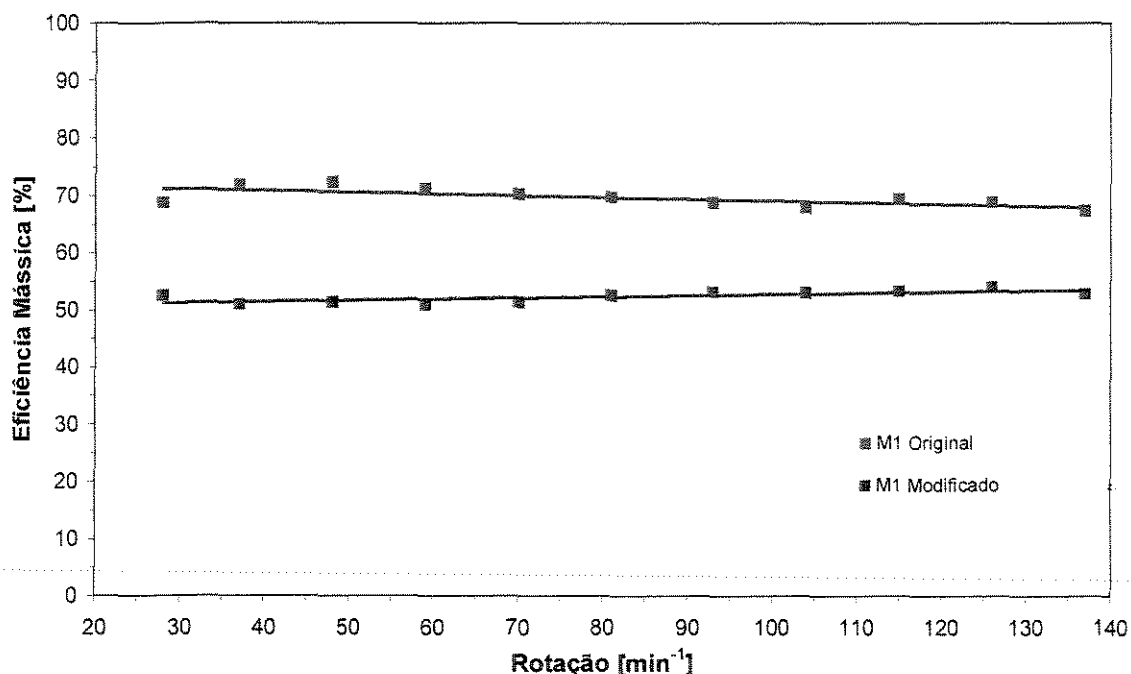


Figura 48 – Eficiência mássica do dosador modificado e do original em função da rotação do eixo de acionamento

Nota-se que a eficiência mássica de ambos os dosadores apresenta um comportamento constante em função da rotação do eixo de acionamento. O dosador modificado apresenta níveis inferiores de eficiência devido a um aumento da resistência ao arraste e conseqüente escorregamento do material entre o espaço formado pelo helicóide e o eixo e entre o helicóide e a superfície interna do tubo.

4.7 – DOSADOR MODIFICADO OPERANDO COM DIVERSAS MATÉRIAS-PRIMAS

Os melhores resultados obtidos com o dosador modificado em relação ao original e a possibilidade de utilizá-lo em um sistema de dosagem de fertilizantes sólido, a taxas variáveis, motivaram o estudo com as matérias-primas apresentadas no item 3.1.

A Figura 49 mostra a vazão mássica média em função da rotação do eixo de acionamento do dosador modificado operando com as matérias-primas M2 a M10.

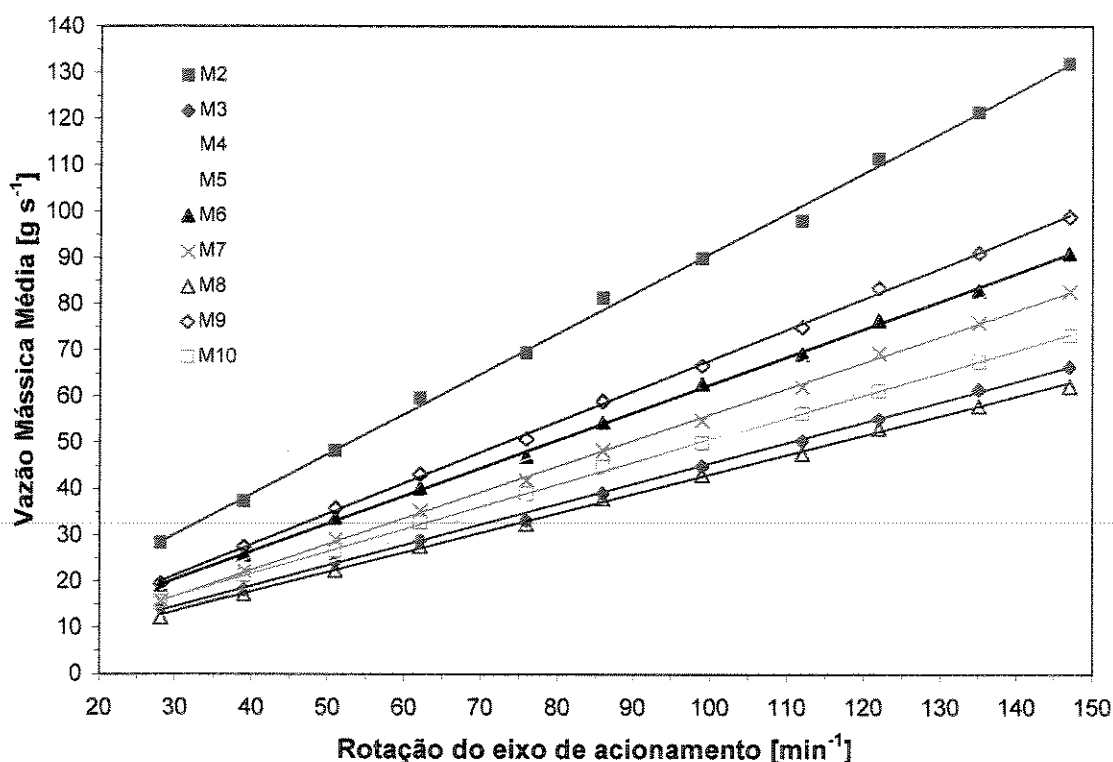


Figura 49 – Vazão mássica média em função da rotação do eixo de acionamento do dosador modificado para as matérias-primas M2 a M10

Nota-se que para todas as matérias-primas estudadas o dosador modificado apresenta um comportamento linearmente crescente, semelhante ao obtido com o fertilizante M1.

A Figura 50 mostra o desvio padrão em função da vazão mássica para o dosador modificado operando com as matérias-primas M2 a M10.

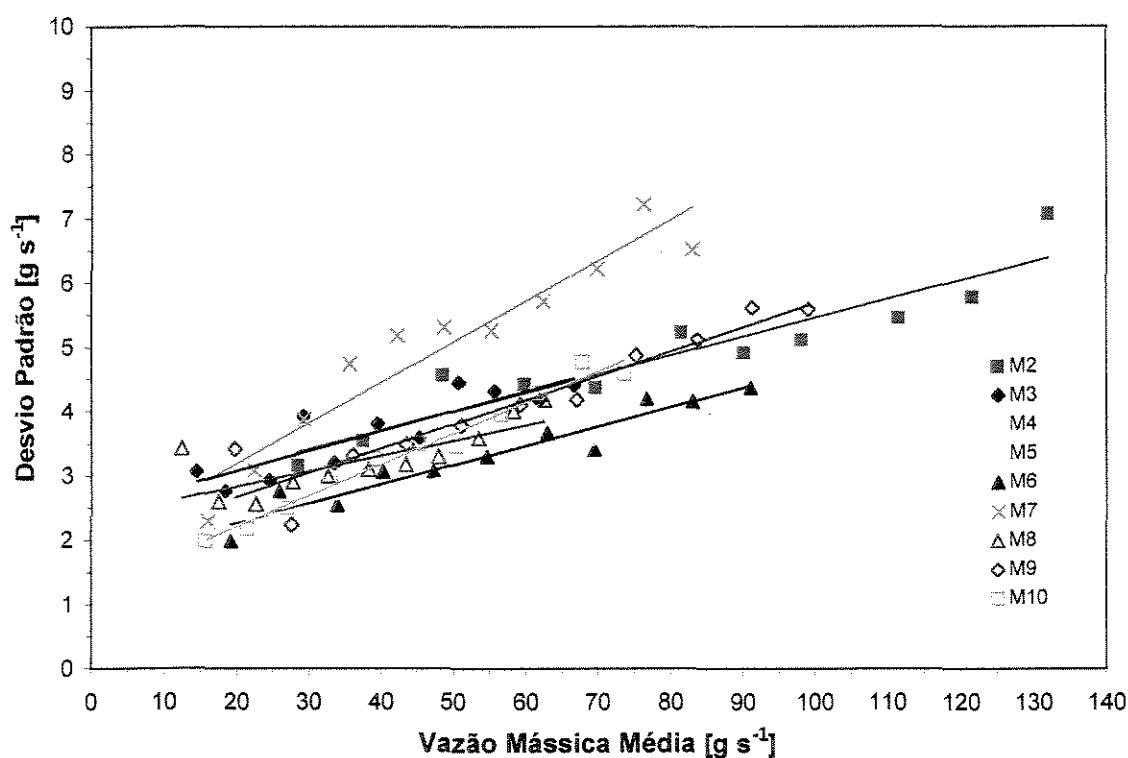


Figura 50 – Desvio padrão em função da vazão mássica média do dosador modificado para as matérias-primas M2 a M10

O comportamento obtido pelo desvio padrão em função da vazão mássica média do dosador modificado, operando com as matérias-primas M2 a M10, foi semelhante ao obtido com o fertilizante M1, com exceção à matéria-prima M4, cujo comportamento não pôde ser explicado neste trabalho.

A Figura 51 mostra o coeficiente de variação em função da vazão mássica média para o dosador modificado operando com as matérias-primas M2 a M10.

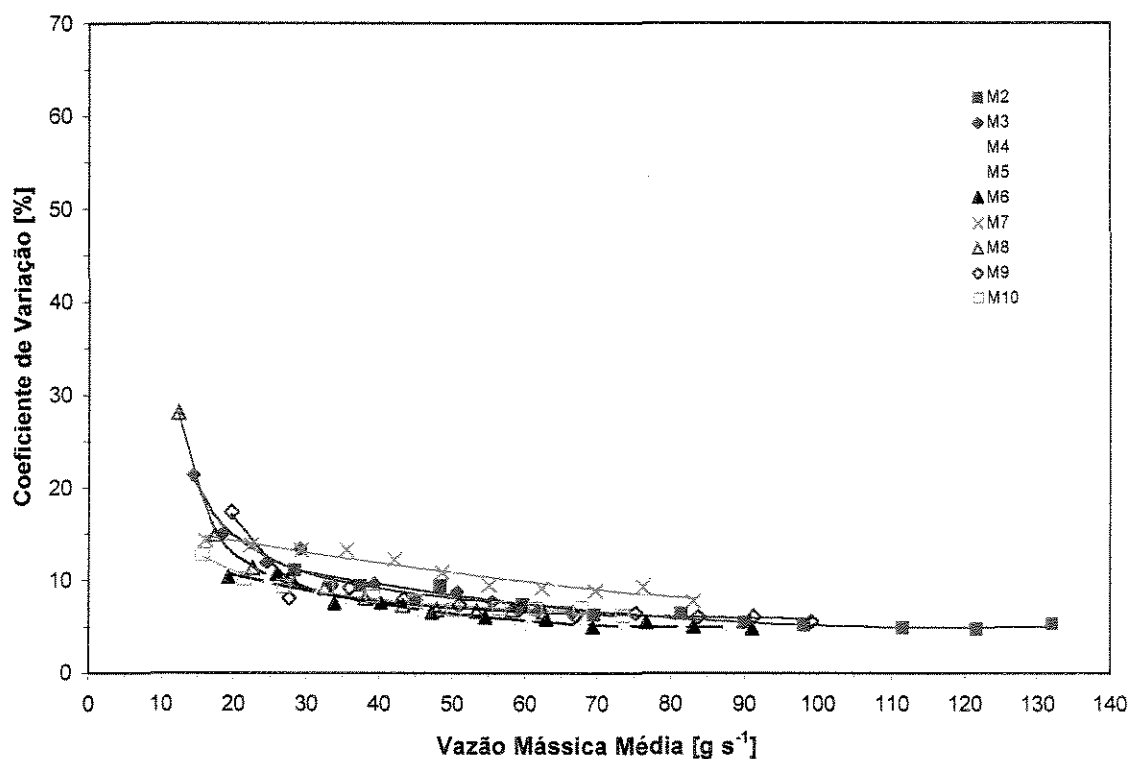


Figura 51 – Coeficiente de variação em função da vazão mássica média do dosador modificado para as matérias-primas M2 a M10

O comportamento obtido pelo coeficiente de variação em função da vazão mássica média do dosador modificado, operando com as matérias-primas M2 a M10, foi sempre inversamente proporcional, de maneira semelhante ao obtido com o fertilizante M1.

A Figura 52 mostra a potência mecânica necessária para acionamento do dosador modificado em função da vazão mássica média, quando operando com as matérias-primas M2 a M10.

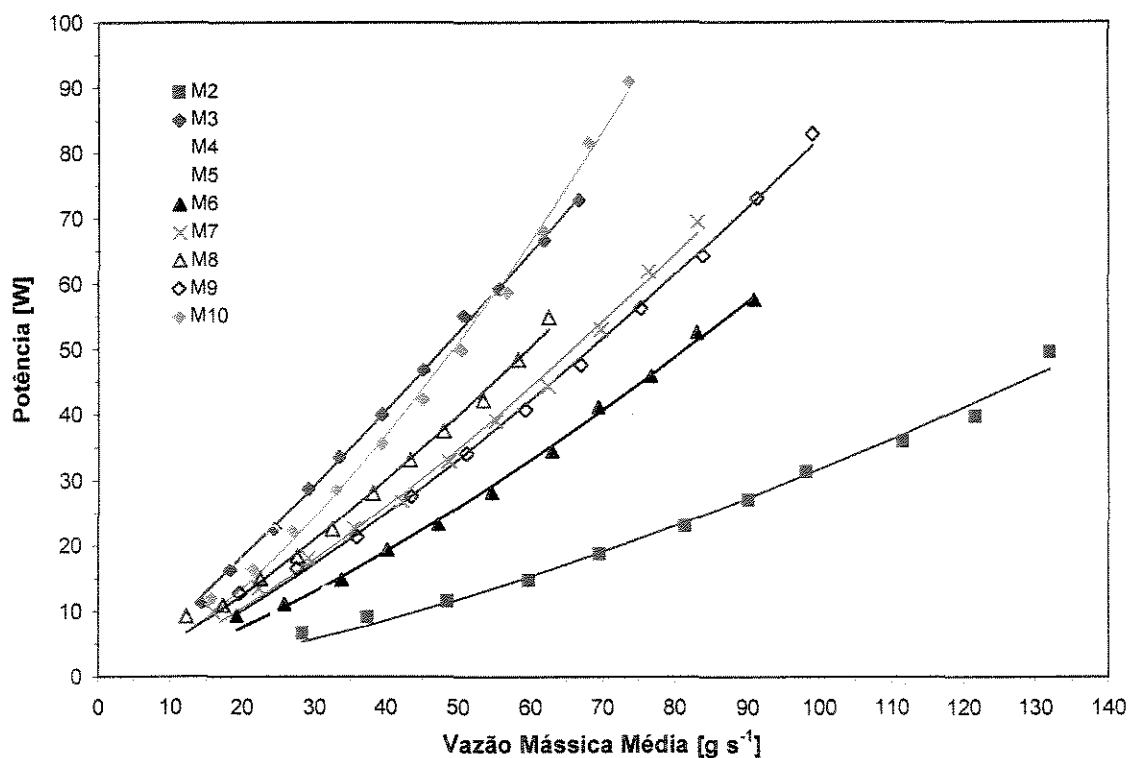


Figura 52 – Potência mecânica consumida pelo dosador modificado em função da vazão mássica média para as matérias-primas M2 a M10

Todas as matérias-primas apresentaram um comportamento crescente com a vazão mássica média, semelhante ao obtido com o dosador modificado operando com o fertilizante M1.

A medição da potência necessária para acionamento do dosador, em função da vazão mássica média, para as diversas matérias-primas pode ser útil para futuros projetos deste tipo de dosador.

A eficiência mássica em função da rotação do eixo de acionamento do dosador modificado operando com as diversas matérias-primas está apresentada na Figura 53.

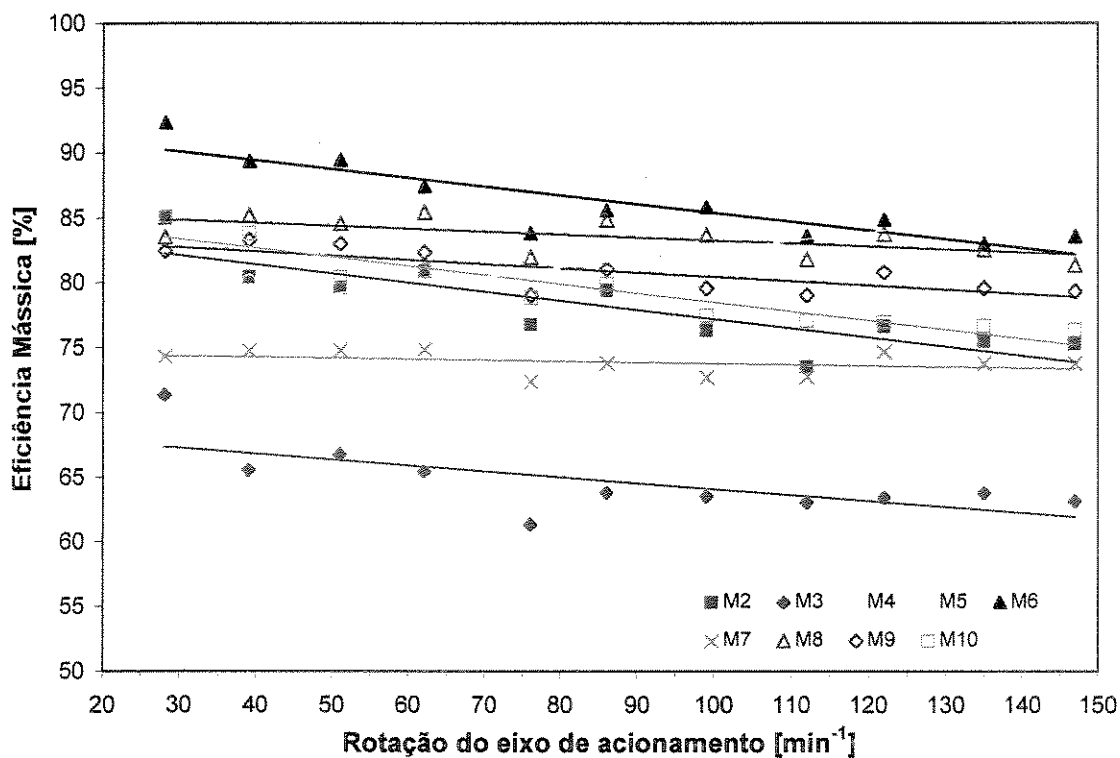


Figura 53 – Eficiência mássica do dosador modificado em função da rotação do eixo de acionamento do dosador para as matérias-primas M2 a M10

Nota-se que apesar do comportamento da eficiência mássica em função da vazão mássica média ser decrescente para as matérias-primas estudadas, seus valores absolutos variam entre 60 % a 95 %, dependendo da matéria prima.

Futuros projetos de dosadores helicoidais flutuantes devem levar em consideração este comportamento.

5 – CONCLUSÕES

A vazão mássica média dos produtos aplicados com o dosador tipo helicoidal flutuante é diretamente proporcional à rotação no seu eixo de acionamento.

A vazão mássica média em função da rotação do eixo de acionamento do dosador depende da densidade da matéria-prima utilizada.

O dosador helicoidal testado é um dosador do tipo volumétrico. Como as recomendações para adubação são prescritas em termos de quantidade mássica de fertilizante por hectare, o dosador helicoidal necessita ser calibrado em função de cada material utilizado.

Para todas as matérias-primas estudadas, o coeficiente de variação da vazão diminui com o aumento da rotação do eixo de acionamento do dosador e, conseqüentemente, com a vazão mássica média. Isto indica que os projetos de dosadores helicoidais devem contemplar rotações mais elevadas a fim de incrementar a uniformidade de aplicação.

Para todas as matérias-primas estudadas, com exceção da M4, o desvio padrão da vazão instantânea aumenta com o aumento da rotação do eixo de acionamento do dosador e, conseqüentemente, com a vazão mássica média

A vazão mássica em função do tempo, para todas as matérias-primas estudadas, apresenta uma característica periódica. O período é inversamente proporcional à rotação do eixo de acionamento do dosador.

O dosador do tipo helicoidal testado quando opera com rotações mais elevadas no eixo de acionamento, embora ainda apresente flutuações na quantidade aplicada, apresenta uma diminuição no intervalo entre os picos de máximas e mínimas quantidades aplicadas. Isto indica que projetos de dosadores helicoidais que operem a rotações mais elevadas podem apresentar uma característica de dosagem mais uniforme.

A potência necessária para o acionamento do eixo do dosador helicoidal, para os diversos materiais testados, é proporcional à vazão mássica média e podem ser utilizadas como indicação para futuros projetos de dosadores e de mecanismos de acionamento.

Apesar da concepção do dosador helicoidal ser clássica, verificou-se que com uma pequena modificação mecânica obteve-se resultados significativamente melhores no que se refere à uniformidade da aplicação de matéria-prima.

O dosador helicoidal modificado pode ser utilizado em máquinas de aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALASTREIRE, L. A. *Máquinas agrícolas*, 1º ed, São Paulo – SP, Manole, 1987, 307p.

BALASTREIRE, L.A. Aplicação Localizada de Insumos - ALI: Um Velho Conceito Novo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 23, 1994, Campinas, SP. *Anais...* Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1994, p. 248.

BLITZKOW, D. Navstar / GPS – Um Desafio Tornado Realidade. In: Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, 3, 1995, São Paulo, SP. *Anais...* São Paulo: Escola Politécnica da USP / Departamento de Eng. de Transporte / Laboratório de Geoprocessamento, 1995, p. 429-462.

CAPPELLI, N. L. *Agricultura de Precisão – Novas Tecnologias para o Processo Produtivo*. <http://www.cria.org.br/gip/gipap/capelli.htm>, 10 de agosto de 1999.

Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Governo do Estado de São Paulo, <http://www.cati.sp.gov.br/tecnologias/tecnologia.htm>, 02 de agosto de 1999.

FRAISSE, C. W. *Agricultura de Precisão – Mapas de Solo*. <http://www.fse.missouri.edu/~fraissec.ars/paintex.htm>, 14 de fevereiro de 1998.

IAP, *Solo: Fertilidade e Adubação*. São Paulo: <http://www.iap.com.br/index.html>, 10 agosto de 1999.

- KIEHL, E. J. *Manual de edafologia: relações solo-planta*. 1ª ed., São Paulo – SP, Agronômica Ceres, 1979, 262p.
- LARK, R.M.; STAFFORD, J.V. Consistency and change in spatial variability of crop yield over successive seasons: methods of data analysis. International Conference on Precision Agriculture Minneapolis, 23-26/6/1996. ASA / CSSA / SSSA / ASAE / ASPRS. Minneapolis, 1996.
- MIALHE, L. G., *Manual de mecanização agrícola*. Agronômica Ceres, São Paulo, SP, 1974. 301p.
- MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte I: O que é e estado da arte em sensoriamento. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v17, n.2, p.97-107, 1997.
- MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte II: Diagnóstico, aplicação localizada e considerações econômicas. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v17, n.2, p.108-121, 1997a.
- MOLIN, J. P. Utilização de GPS em agricultura de precisão. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v17, n.3, p.121-132, 1998.
- MORGAN, M.; ESS, D. *The precision-farming guide for agriculturists*. Moline, Illinois. John Deere Publishing, Dept. 374, 1997, 115p.
- REIFSTECK, J. *Production Information about the Reifsteck Farm*. <http://w3.aces.uiuc.edu/InfoAg/CyberFarm/Reifsteck/prod.htm>, 10 de fevereiro de 1997.
- SCHEPERS, J.S.; BLACKMER, T.M.; SHAH, T.; CHRISTENSEN, N. Remote sensing tools for site-specific management. International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, 23-26/6/1996. ASA / CSSA / SSSA / ASAE / ASPRS. Minneapolis, 1996.
- SPIEGEL, M.R. *Estatística*, McGraw – Hill, 580p, 1975.

VESETH, R; *Variable Fertilizer Application Improves Profits and Conservation*, Web Page, spring of 1989.
