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

Uniformidade na aplicação localizada de fertilizantes à taxa variada: estudo de caso

Erik Augusto Barreto Junior

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

**Piracicaba
2013**

Erik Augusto Barreto Junior
Engenheiro Agrônomo

Uniformidade na aplicação localizada de fertilizantes à taxa variada: estudo de caso

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS MILAN**

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

**Piracicaba
2013**

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

Barreto Junior, Erik Augusto

Uniformidade na aplicação localizada de fertilizantes à taxa variada: estudo de caso / Erik Augusto Barreto Junior.- - Piracicaba, 2013.
71 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Mecanismos dosadores 2. Controle estatístico do processo 3. Aplicação à taxa variável I. Título

CDD 631.8
B273u

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

Erik Augusto Barreto, Maria Aparecida Milo Barreto e
Eduardo Augusto Milo Barreto

Com Amor Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Ao meu Pai Erik Augusto Barreto pelo amor e confiança depositada em mim e à minha querida Mãe Maria Aparecida Milo Barreto pelo amor e carinho.

À Universidade de São Paulo e a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela oportunidade de estudo.

Ao Departamento de Engenharia de Biossistemas e todos os funcionários que contribuem para seu funcionamento.

Ao Professor Dr. Marcos Milan, pela orientação, franqueza e paciência ao longo de minha formação.

Ao Professor Dr. Gabriel Adrián Sarriés, pelo tempo dedicado e contribuições no desenvolvimento da dissertação.

Ao Professor Dr. Thiago Romanelli, pela amizade e contribuições no desenvolvimento da dissertação.

Ao Professor Dr. Antonio José da Silva Maciel, pelas contribuições no desenvolvimento da dissertação.

A CAPES pelos recursos financeiros.

Ao Engenheiro Agrônomo André Freitas Colaço, pelos dados disponibilizados para o estudo e pela contribuição na dissertação.

A Estatística Natália da Silva Martins, pelas considerações, correções e contribuições no desenvolvimento da dissertação.

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação, Adriano A. Alselmi, Fernanda C. S. Silva, Giancarlo C. Rocco, João Paulo S. Veiga, Maria Carolina S. Andréa, Mark Spekken, Nelson C. Franco Jr. e Rafael C. Tieppo.

Ao G9, Camila M. Ortiz, Larissa G. Pagliuca, Mônica Georgino, Viviane P. Paulenas, André Freitas Colaço, Diego G. Chiou, Heitor H. Arakawa e Leonardo Bordin que fizeram parte e fazem parte dessa realização.

A República Perdição, representada pelos ex-moradores e atuais moradores, pelo acolhimento e amizade durante os inesquecíveis anos da graduação e parte da pós-graduação.

EPÍGRAFE

“É fundamental diminuir a distância entre o que se diz e o que se faz, de tal maneira que num dado momento a tua fala seja a tua prática.”

Paulo Freire

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Adubação	23
2.2 Agricultura de precisão a aplicação à taxa variável	23
2.3 Controle estatístico do processo (CEP)	26
2.4 Controle estatístico aplicado à agricultura	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Análise dos dados	35
3.2 Filtragens	38
3.2.1 Transições entre as doses	38
3.3 Normalidade dos dados	39
3.4 Transformação dos dados	39
3.4.1 Transformação Johnson	39
3.4.2 Transformação Box-Cox	40
3.5 Gráficos de controle de Shewhart e gráficos de controle pela média móvel exponencialmente ponderada (MMEP)	40
3.6 Capacidade do processo (Cp)	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Cálculo da diferença (Dif1)	47
4.2 Testes de normalidade	50
4.3 Transformação dos dados	50
4.4 Gráficos de controle pela média móvel exponencialmente ponderada (MMEP)	51
4.5 Transições entre as doses	57
4.6 Gráficos de controle pela média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) sem os pontos de transição	59
4.7 Capacidade do processo (Cp)	63
5 CONCLUSÃO	65

REFERÊNCIAS 67

RESUMO

Uniformidade na aplicação localizada de fertilizantes à taxa variada: estudo de caso

A operação de adubação responde por parte significativa dos custos de produção agrícola. Melhorar a qualidade dessa operação acarreta benefícios econômicos e ambientais. O processo de adubação normalmente é realizado a uma taxa média, representativa de uma área, no entanto, propriedades químicas do solo podem variar consideravelmente dentro dessa área. Desse modo, alguns locais poderão receber fertilizantes e/ou corretivos em excesso, enquanto outros poderão receber quantidades insuficientes. A alternativa à taxa média é a realizar a aplicação à taxa variada, que se caracteriza por aplicar os insumos de acordo com as necessidades específicas dentro da área. Para que essa aplicação aconteça, mecanismos dosadores controlam a aplicação. O objetivo deste estudo é avaliar os mecanismos dosadores de uma carreta adubadora de arrasto, comportas e esteiras, atendem as prescrições de doses previstas no mapa de recomendação de adubação. Para avaliar a uniformidade da operação utilizou-se o controle estatístico do processo. De acordo com os resultados obtidos pode-se afirmar que os mecanismos dosadores não atenderam a condição de realizar a aplicação à taxa variável de maneira uniforme.

Palavras-chave: Mecanismos dosadores; Controle estatístico do processo; Aplicação à taxa variável

ABSTRACT

Uniform application of fertilizers located at variable rates: a case study

The operation fertilization accounts for a significant portion of the costs of agricultural production. Improve the quality of this operation entails economic and environmental benefits. The process of fertilization is usually performed at an average rate representative of an area, however, the chemical properties of soil can vary considerably within the area. Thus, some locations may receive fertilizer and / or lime in excess, while others may receive insufficient amounts. The alternative is to average the application to perform variable rate, characterized by applying inputs according to the specific requirements within the area. For this application happens, metering mechanisms control the application. The aim of this study is to evaluate the dosing mechanisms of a truck hauling fertilizer, locks and mats, meet the requirements of the prescribed dose map fertilizer recommendation. To evaluate the uniformity of operation used the statistical process control. According to the obtained results it can be stated that the meter mechanism did not meet the condition to perform variable rate application to uniformly.

Keywords: Mechanisms feeders; Statistical process control; Variable rate application

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de controle com delimitação de zonas entre os limites de controle	27
Figura 2 - Talhões onde foram realizadas as coletas das amostras, aplicações e disposição das linhas da cultura	33
Figura 3 - Esquema do sistema dosador composto por comporta e esteira; A - Vista frontal; B - Vista lateral	34
Figura 4 - Fluxograma das etapas para avaliação dos dados	36
Figura 5 - Dispersão das doses recomendadas e aplicadas no talhão 16	45
Figura 6 - Dispersão das doses recomendadas e aplicadas no talhão 35	46
Figura 7 - Histogramas das diferenças entre as doses aplicadas e doses recomendadas (Dif1) para o talhão 16	48
Figura 8 - Histogramas das diferenças entre as doses aplicadas e doses recomendadas (Dif1) para o talhão 35	49
Figura 9 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 1, talhão 16.....	52
Figura 10 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 2, talhão 16	52
Figura 11- Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 3, talhão 16	52
Figura 12 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 1, talhão 35	53
Figura 13 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 2, talhão 35	53
Figura 14 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 3, talhão 35	54
Figura 15 - Gráfico da DRc de KCL (30% do total) e Dif1, aplicação 1, talhão 16	56
Figura 16 - Gráfico da DRc de KCL (35% do total) e Dif1, aplicação 2, talhão 16	56
Figura 17 - Gráfico da DRc de KCL (35% do total) e Dif1, aplicação 2, talhão 16	57
Figura18 - Histograma da DS, para o talhão 16, aplicações 1, 2 e 3	58
Figura 19 - Histograma da DS, para o talhão 35, aplicações 1, 2 e 3	59
Figura 20 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 1, talhão 16	60
Figura 21 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 2, talhão 16	60
Figura 22 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 3, talhão 16	60
Figura 23 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 1, talhão 35	61
Figura 24 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 2, talhão 35	61
Figura 25 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 3, talhão 35	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das ocorrências e taxas de falhas	43
Tabela 2 - Filtragem dos dados das aplicações nos talhões 16 e 35	45
Tabela 3 - Parâmetros estatísticos referentes às doses recomendadas (DRc) e aplicadas (DAc) para o talhão 16	46
Tabela 4 - Parâmetros estatísticos referentes às doses recomendadas (DRc) e aplicadas (DAc) para o talhão 35	47
Tabela 5 - Estatística das diferenças entre as doses para o talhão 16 (Dif1) em %	48
Tabela 6 - Estatística das diferenças entre as doses para o talhão 35 (Dif1) em %	49
Tabela 7 - Valores referentes à avaliação da normalidade dos dados de aplicações, nos talhões 16 e 35	50
Tabela 8 - Transformações aplicadas aos dados nos talhões 16 e 35	51
Tabela 9 - Sumário dos gráficos de controle MMEP para as aplicações nos talhões 16 e 35	54
Tabela 10 - Filtragem II dos dados referentes às aplicações nos talhões 16 e 35	57
Tabela 11- Valores referentes à avaliação da normalidade dos dados de aplicações, nos talhões 16 e 35	59
Tabela 12 - Sumário dos gráficos de controle MMEP para as aplicações nos talhões 16 e 35	62
Tabela 13 - Determinação dos índices de capacidade de confiança e taxa de falhas de acordos com os limites especificados	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAE	American Society of Association Executives
CEP	Controle Estatístico do Processo
Cp	Capacidade do Processo
Cpc	Capacidade de Confiança
Cpk	Capacidade Efetiva do Processo
CV	Coefficiente de Variação
D _{Ac}	Dosagem Aplicada
D _{if1}	Diferença de Dosagem
D _{Rc}	Dosagem Recomendada
D _S	Dosagem Sem Transição
GIS	Sistema de Informações Geográficas
GPS	Sistema de Posicionamento Global
ISO	International Standard Organization
KCL	Cloreto de Potássio
LC	Linha Central
LIC	Limite Inferior de Controle
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSC	Limite Superior de Controle
LSE	Limite Superior de Especificação
MMEP	Média Móvel Exponencialmente Ponderada

1 INTRODUÇÃO

O processo agrícola de adubação consiste em fornecer determinados nutrientes ao solo com intuito de recuperar e conservar a fertilidade proporcionando, desse modo, o adequado desenvolvimento das culturas vegetais. Considerando que o custo dos fertilizantes contribui de forma significativa com os custos de produção agrícola, o processo de adubação deve ser conduzido de maneira precisa e para isso as amostragens de solo são indispensáveis.

Os agricultores realizam, tradicionalmente, as amostragens de solo coletando várias amostras em uma determinada área de acordo com critérios técnicos, amostras essas denominadas de subamostras. As subamostras são misturadas e, a partir delas, uma amostra geral é retirada e considerada como representativa da área. As análises e as recomendações para a aplicação de insumos, fertilizantes e/ou corretivos, são efetuadas então com base na amostra geral. Com isso, a aplicação é caracterizada por ser realizada a uma taxa média, representativa de uma área; no entanto, as propriedades químicas do solo podem variar consideravelmente dentro dessa área. Desse modo, alguns locais poderão receber fertilizantes e/ou corretivos em excesso, enquanto que outros podem receber quantidades insuficientes. O excesso de insumos aplicados na área é caracterizado como prejuízo e ainda pode acarretar um dano ambiental, contaminando o solo e as águas subterrâneas. Por outro lado, quantidades insuficientes afetam o potencial de produção.

A alternativa à taxa média é a de realizar a aplicação em taxa variável, que se caracteriza por aplicar os insumos de acordo com as necessidades específicas dentro da área. Tanto na taxa média quanto na variável, a aplicação é realizada normalmente por meio de máquinas aplicadoras de insumos equipadas com um sistema dosador. Quando a aplicação é feita em taxa variável, o sistema dosador é associado a um controlador, permitindo assim a variação da quantidade aplicada, dose. A dosagem é realizada de acordo com um mapa de recomendação o qual é baseado em unidades de gerenciamento que representam uma menor heterogeneidade de fatores limitantes da produtividade. As unidades de gerenciamento podem ser delineadas por amostragens e técnicas estatísticas. O mapa de recomendação é interpretado pelo controlador à medida que a máquina desloca-se pela área. Um sistema de posicionamento global (GPS) é responsável por associar a posição da máquina na área com as coordenadas do mapa de recomendação, o que permite aplicar as doses de acordo com as necessidades do local.

Embora as doses aplicadas sejam previstas para serem realizadas de acordo com o mapa, elas podem não ser adequadas devido à amostragem e a aplicação em si. Quanto à

amostragem, a inadequação está associada ao número de amostras que sejam representativas para caracterizar as diferenças dentro da área e para se obter as unidades de gerenciamento. Quanto à variação na aplicação, ela está associada às características operacionais inerentes à máquina e seus mecanismos dosadores. Para verificar esta possibilidade de variação na aplicação, o objetivo deste estudo é analisar se os mecanismos dosadores de uma máquina de aplicação de insumos, carreta adubadora de arrasto, atendem às doses previstas no mapa de recomendação, ao longo de uma aplicação à taxa variável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão abordará tópicos relacionados à adubação, agricultura de precisão, aplicação à taxa variável, controle estatístico do processo (CEP) e exemplificará como o CEP vem sendo empregado para melhorar os processos agrícolas.

2.1 Adubação

As exigências nutricionais das plantas podem ser supridas pelo fornecimento de fertilizantes em quantidades adequadas, associadas com a época e modo de aplicação (GUARESCHI et al., 2011). As quantidades necessárias de fertilizantes são determinadas pelas análises de solo, análises essas, que fornecem um diagnóstico para avaliação da fertilidade do solo, permitindo um planejamento da operação de aplicação de adubos (OLIVEIRA, 2005).

As práticas de adubação e calagens assumem um lugar de destaque na produção agrícola, visto que as mesmas são responsáveis por cerca de 50% dos ganhos de produtividade das culturas, necessitando assim, serem realizadas de modo mais eficiente possível (LOPES e GUILHERME, 2000). Posto isso, o modo de aplicação é fundamental. Nas aplicações à taxa média, as doses aplicadas podem ser insuficientes ou excederem as necessidades da cultura. Doses insuficientes limitam a produção, devido ao déficit de nutrientes, enquanto as doses excessivas são caracterizadas como desperdício e representam um risco as águas subterrâneas (TISSOT et al., 2002). Estima-se que a eficiência global nas aplicações de fertilizantes está em torno de 50% para nitrogênio (N), menos do que 10% para fósforo (P) e próximo de 40% para potássio (K) (BALIGAR e BENNETT, 1986).

A baixa eficiência na incorporação dos fertilizantes decorre devido às significativas perdas por lixiviação, escoamento, emissão de gases e fixação pelo solo. Essas perdas contribuem para degradação da qualidade do solo (BALIGAR, FAGERIA e HE, 2001). Ao considerar que essas perdas são potencializadas pelas aplicações à taxa média, pode-se dizer que, as aplicações à taxa variável são hoje, uma necessidade, razão por que se desenvolvem inúmeras tecnologias voltadas para esse tipo de operação (WERNER, 2007).

2.2 Agricultura de precisão e aplicação à taxa variável

As tecnologias empregadas nas aplicações à taxa variável podem englobar mecanismos dosadores e aplicadores, sensores, antenas receptoras do sistema de posicionamento global

(GPS), softwares dedicados à agricultura e sistemas de informações geográficas (GIS), os quais são ferramentas da agricultura de precisão. Sendo essa definida como um conjunto de técnicas e ações de gerenciamento das lavouras, que considera a variabilidade espacial do solo, possibilitando melhores resultados que o tradicional gerenciamento por parâmetros médios (MASCARIN, 2006).

Outra definição de agricultura de precisão é apresentada por Molin (2001), como sendo um sistema contínuo, em que muitas das etapas se repetem a cada ciclo da cultura. O ciclo completo realiza-se quando é feita a intervenção nos fatores de produção que foram considerados importantes para o manejo da variabilidade da produção.

Buscando avaliar diferentes sistemas de manejo Lambert e Lowenberg-Deboer (2000) avaliaram 108 estudos, os quais relacionavam técnicas de agricultura de precisão com resultados econômicos. Os autores concluíram que em 63% dos estudos, o retorno financeiro foi positivo quando fertilizantes e calcários foram aplicados à taxa variável, e em 11% dos trabalhos houve prejuízo.

Em um experimento com a cultura do café, a área que recebeu fertilizantes aplicados à taxa variada apresentou produtividade 34% maior se comparada com a área que recebeu adubação à taxa fixa. Além disso, a aplicação à taxa variada apresentou uma redução de 23% na quantidade de fósforo e aumento de 13% no consumo de potássio quando comparada com a aplicação dos fertilizantes à taxa fixa (MOLIN et al., 2010).

Koch et al. (2004) demonstraram que aplicações de nitrogênio à taxa variável, em áreas de cultivo de milho com gerenciamento localizado, são mais rentáveis que as áreas em que a aplicação de nitrogênio foi realizada à taxa média.

Em outro experimento, onde se dividiu um talhão cultivado com milho em faixas de aplicação, à dose fixa e a dose variada. A produtividade média obtida onde se realizou a adubação em dose fixa, foi de 6.981 kg ha⁻¹, enquanto que para a adubação em dose variada foi de 7.259 kg ha⁻¹, um aumento de aproximadamente 4% em relação à dose fixa (MOLIN, MASCARIN e VIEIRA JUNIOR, 2006).

Amado et al. (2006) compararam as aplicações de fertilizantes à taxa variável em relação à taxa média e verificaram uma redução de 53% na quantidade de fertilizantes aplicados em áreas de cultivo de milho, o que representou uma economia total de R\$ 122,50 ha⁻¹.

Dellamea (2008) concluiu em seu estudo que o manejo localizado proporcionou uma economia de 17% na quantidade total dos insumos e um crescimento de 8% na produtividade da soja, o que representou um retorno financeiro bruto de R\$ 72,05 ha⁻¹.

A aplicação à taxa variável nem sempre apresenta redução nas demandas de fertilizantes, como visto nos trabalhos apresentados, contudo contribuiu de maneira significativa para que mesmo seja alocado no lugar adequado, o que reduz o desperdício de adubo.

Para que os fertilizantes sejam aplicados nos locais em que realmente exista a necessidade, atendendo os princípios da agricultura de precisão, os equipamentos distribuidores de insumos à taxa variável devem ser utilizados de modo correto, o que é fundamental para a qualidade da distribuição dos referidos insumos, levando-se a maiores produtividades (BAIO, MOLIN e LEAL, 2012).

Segundo Al-Gaadi e Ayers (1999) os insumos são aplicados em doses determinadas para cada cultura e condição de solo. No entanto, os equipamentos não são capazes de oferecer qualidade na distribuição dos mesmos, isso porque, mudanças de doses durante o trajeto inserem a maioria dos erros de aplicação, segundo os autores.

Molin et al. (2002) avaliando o tempo de resposta do sistema dosador em relação a mudança de doses aplicadas, verificaram que mudanças crescentes de doses atrasavam em 3,1 segundos, enquanto mudanças decrescentes atrasavam em 5,6 segundos o tempo de resposta da aplicação, quantificando desta maneira os erros de aplicação.

Por meio dos estudos citados verifica-se que os mecanismos responsáveis pela aplicação à taxa variável não respondem instantaneamente as doses recomendadas pelos mapas de aplicação. Fatores como velocidade de aplicação, algoritmos de controle, configuração do sistema de controle, atuadores, largura de aplicação e características químicas dos fertilizantes, contribuem para a inadequação dos aplicadores à taxa variável segundo (CHAN et al., 2004).

Para compreender os atrasos nas aplicações, Fulton et al. (2005) avaliaram aplicadores de fertilizantes quanto ao atraso e tempo de transição entre as doses, tanto aumento quanto diminuição das mesmas. Os autores concluíram que alguns erros de aplicação à taxa variável, podem ser minimizados com hardwares adequados e correções de software, como por exemplo, ajuste do tempo de iniciação, transições de taxas de aplicação que ocorrem nos limites das zonas de gerenciamento, minimizando os erros nas transições entre as doses.

2.3 Controle Estatístico do Processo (CEP)

Milan e Fernandes (2002), afirmam que o controle estatístico do processo (CEP) constitui-se de ferramentas que permitem melhorias na qualidade e maior produtividade nas empresas.

Segundo Montgomery (2004) estas ferramentas são de coleta, análise e interpretação de dados, e tem como objetivo melhoria dos processos por meio da eliminação de causas especiais de variação. De Vries e Reneau (2010) acrescentam, ainda, que essas ferramentas auxiliam no monitoramento e controle da qualidade.

A principal ferramenta empregada pelo CEP é o gráfico de controle de Shewhart, que monitora uma variável qualitativa tanto pelo seu valor médio quanto pela sua variabilidade (TAKAHASHI, 2011).

Segundo Montgomery (2004), os gráficos de controle permitem verificar se o processo em análise é estatisticamente estável e se possui tendência de permanecer estável. Caso o processo de indícios de instabilidade é necessário atuar sobre ele, averiguando o motivo dessa mudança possibilitando a interferência no processo e deste modo, o aprimoramento contínuo do mesmo mediante a redução de sua variabilidade. De acordo com Pylro (2008) isso é possível graças à construção de certos limites e que os cálculos das probabilidades de observações futuras estarem dentro desses limites.

Para Montgomery e Runger (2003), a apresentação de um gráfico de controle é esquematizada por três linhas horizontais. A linha central (LC), que representa a média dos valores encontrados das características investigadas, e as outras duas linhas, as quais estão simetricamente dispostas em relação à linha central, referentes ao limite superior de controle (LSC) e ao limite inferior de controle (LIC). Os pontos amostrais representam as observações grafadas em uma sequência temporal, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Gráfico de controle com delimitação de zonas entre os limites de controle

Segundo Ferreira (2011), Shewhart demonstrou que os limites são calculados por meios de recursos matemáticos, fundamentados em teorias estatísticas. Desse modo, quando se encontra um ponto acima do LSC ou abaixo do LIC, possivelmente, existe uma causa especial para essa variação, que proporciona instabilidade ao processo. Tal variação é caracterizada por alterações identificáveis, responsáveis por mudança real no processo.

Segundo Takahashi (2011), existem, também, as variações comuns, que são representadas por pequenas variações inevitáveis, as quais são resultantes de fatores naturais do processo. Tais variações são dificilmente rastreáveis e estão dentro dos limites de controle.

Quando todos os pontos se encontram dentro dos limites de controle dos gráficos, outros padrões de não aleatoriedade podem ser investigados. Caso nenhum padrão de não aleatoriedade seja detectado, o processo está somente sob a ação de causas comuns, sendo assim, o mesmo encontra-se sob controle estatístico.

Os gráficos de controle são divididos de acordo com as características ou finalidades de sua aplicação. Albiero (2010) define que o tipo de medida nos gráficos de controle é essencial para direcionar os cálculos e discussões. Esse aspecto se refere à característica que se quer mensurar, variável ou atributo. Uma variável perante o CEP e a estatística é uma característica de qualidade que pode ser expressa em uma escala numérica.

Os gráficos de atributo geram um ponto que se relacionam com a conformidade ou não, em relação a alguma especificação, de uma característica de qualidade. A terminologia então não é numérica, mas qualitativa, sendo defeituoso (não adequado) ou não defeituoso (adequado).

Segundo Smeti et al. (2006) e Guarnieri (2010), um dos tipos de gráficos mais utilizados no controle estatístico do processo por variáveis para pequenas variações, são os da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP).

Para utilizar os gráficos de controle é importante que as amostras tenham distribuição normal, o que nem sempre acontece, sendo assim, os gráficos de controle de Shewhart têm como limitação a necessidade de normalidade.

Caso a suposição de normalidade não seja atendida, pode-se aplicar uma transformação aos dados na tentativa de que estes encontrem aderência a uma distribuição normal. Assim, a suposição de normalidade seria atendida (MASON, GUNST e HESS 2003). As transformações mais usuais são as de Box-Cox (logarítmica e raiz quadrada), desenvolvidas por Box e Cox (1964) e a Johnson, descrita por Johnson (1949).

Os dados podem não apresentar normalidade, mesmo depois das transformações. Com isso, os gráficos de controle de Shewhart não poderiam ser utilizados para a verificação do controle estatístico do processo, (ALBIERO, 2010). Para contornar tal situação, Roberts (1959) desenvolveu a metodologia da média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) associada aos gráficos de controle.

Lucas e Saccucci (1990), Moraes (2006) e Albiero et al. (2012), estudaram a metodologia MMEP para os gráficos de controle, a qual é insensível à suposição de normalidade. A utilização dos gráficos de controle pela MMEP torna-se uma alternativa para a análise de controle estatístico de processo quando os dados não apresentam distribuição normal.

Hines et al. (2006) explicam que a MMEP é considerada uma média ponderada de todas as observações, sendo assim os pesos decrescem geometricamente com as observações, atribuindo menores pesos às observações que ocorreram a mais tempo ou com menor frequência.

De acordo com Campos (2011), a sensibilidade do gráfico de controle pela MMEP é dada pelo parâmetro λ . Este parâmetro está contido no intervalo de zero a um, sendo que a proximidade com o zero reflete a menor capacidade de detectar pequenas mudanças. Segundo Montgomery (2004) valores de λ entre 0,05 a 0,20 são as escolhas mais utilizadas.

A suposição incorreta de normalidade dos dados pode acarretar consequências como falsos alarmes na análise de gráficos de controle individuais e cálculo incorreto de índices de capacidade do processo (MORAES, 2006). Gonzalez e Werner (2009) e Chang e Wu (2009) relatam que o desconhecimento de ferramentas adequadas para análise da capacidade do processo, para dados não normais, proporcionam interpretações equivocadas em relação aos índices de capacidade utilizados.

Índices de Capacidade do Processo (C_p) ou Capacidade Efetiva do Processo (C_{pk}) são medidas capazes de verificar se o processo se encontra dentro das especificações limites.

Avaliando se um determinado processo é capaz de gerar produtos ou realizar operações que atendam as especificações.

O estudo da capacidade do processo é uma técnica fundamental para programas de melhoria da qualidade (Montgomery, 2004). Sendo assim, o C_p indica até que ponto o processo se manterá dentro de limites de tolerância, auxiliando no planejamento e modificações do mesmo.

O C_p é uma medida da habilidade do processo estar dentro das especificações limites das características de qualidade (ALBIERO, 2010). Entretanto, para utilização do C_p e C_{pk} os dados devem ter uma distribuição normal, caso contrário, é necessário utilizar um índice de capacidade de processo que não seja afetado pela não normalidade dos dados.

Luceño (1996) define um índice de capacidade do processo que insensível a não normalidade dos dados, índice de Capacidade de Confiança (C_{pc}), que é baseado na esperança de uma amostra, o qual é utilizado por (ALBIERO, 2010).

2.4 CEP aplicado à agricultura

Conceitos de qualidade utilizados pelas indústrias estão sendo adaptadas à agricultura e são, com algumas modificações, aplicáveis a maioria dos processos agrícolas. Visto que, tais processos são realizados em cadeia, e deste modo, à falta de qualidade de uma etapa prejudica as etapas subsequentes.

Inúmeros autores têm estudado a aplicação de técnicas estatísticas de controle na agricultura, as quais objetivam melhorar a qualidade em operações agrícolas e mecanizadas, nas mais diversas aplicações, tais com: aplicação de adubos, colheita, preparo de solo, entre outras.

Segundo Bonilha (1994) o controle de qualidade é adaptável ao sistema de produção agrícola, o qual, com a correção de falhas e eliminação de desperdícios geram redução de custos e maior produtividade.

A utilização de ferramentas estatísticas de controle da qualidade possibilita detectar variações e oscilações nas operações agrícolas, a tempo de minimizar a possibilidade de sua realização fora dos padrões especificados para o processo (BONILHA, 1995).

Pasqua, Milan e Peche Filho (1996) utilizaram técnicas estatísticas de controle de qualidade em operações agrícolas de semeadura, adubação de cobertura e pulverizações. Com os resultados obtidos, nas pulverizações, mais especificamente na regularidade de vazão pelos

bicos aplicadores, verificaram que o processo não se encontrava sob controle estatístico e que o mesmo não atendia às especificações determinadas pelo fabricante.

Sanriés (1997) aplicou o controle estatístico do processo (CEP) durante o processo de carregamento da cana-de-açúcar, avaliando impurezas minerais provenientes dessa operação. Concluiu que a utilização do CEP, principalmente a ferramenta de gráfico de controle, possibilitou identificar as cargas com impurezas minerais elevadas e também identificar as causas especiais, que geraram o excesso de impureza nas cargas.

Milan e Fernandes (2002) concluíram que a adoção do controle estatístico na operação de escarificação, resultou em uma melhora de 21% de dados dentro dos limites especificados. Nas operações de gradagem ocorreu um aumento de 75% de torrões de tamanho aceitáveis, controlando-se melhor a operação de preparo de solo para implantação da cultura do milho.

Bonato (2004) estudou a qualidade operacional da fenação, aplicando o controle estatístico do processo, considerando as operações de sega e de enfardamento como críticas sob o ponto de vista econômico e qualitativo em relação ao produto final. O autor relata ainda, que a implantação de sistemas de controle de qualidade em operações agrícolas mecanizadas, por meio do CEP, permitiu caracterizar tecnicamente a qualidade de execução das operações e gerar melhorias na qualidade do produto.

Rouverson et al. (2007) avaliaram as perdas quantitativas, no solo e na planta, de uma colheita mecanizada de algodão em Goiás. Gráficos de controle foram elaborados para verificar a qualidade da operação de colheita e constatou-se que as perdas provenientes da colheita do algodão foram elevadas, principalmente as perdas no solo (algodão que caiu no solo). Estes resultados indicam que a colhedora apresentava deficiência na operação, isto é, o processo de colheita de algodão não se encontrou dentro dos padrões de qualidade, sob o ponto de vista do CEP, o que implica, segundo o autor em uma revisão nas condições de colheita.

Campos, Milan e Siqueira (2008) desenvolveram um trabalho envolvendo operações mecanizadas agrícolas, avaliando-as segundo o controle estatístico do processo. Os autores aplicaram uma simplificação na análise dos gráficos. A simplificação baseou-se na exclusão dos piores 5% pontos de um gráfico de controle. Concluindo que a simplificação proposta não influenciou os resultados significativamente.

Takahashi (2011) aplicou ferramenta do CEP no monitoramento de alguns setores da fazenda (nutrição, cria, reprodução e ordenha), a qual permitiu ao produtor por meio dos gráficos de controle identificar fatores responsáveis pela queda na qualidade do leite.

A associação de gráficos de controle, histogramas e dos sistemas de informações geográficas (GIS) permitiram a caracterização da variabilidade operacional e formam um conjunto de ferramentas eficientes para a análise da qualidade do processo de pulverização de herbicida, (SUGISAWA et al., 2007).

Albiero (2010) e Albiero et al. (2012), tecem algumas considerações em relação ao controle estatístico do processo. Os processos agrícolas não devem ter o mesmo nível de controle que processos industriais, visto que esses processos têm controle muito mais preciso e imediatos que os processos agrícolas, que são influenciados por inúmeras variáveis, ao contrário das indústrias automobilística, software e eletrônica que abandonaram o índice 3 sigma, ou índice de controle de 99,74 % dentro do controle estatístico, (MONTGOMERY, 2004). Essas indústrias têm um controle mais rigoroso e em tempo real do processo. Segundo Albiero (2010), elas trabalham constantemente em uniformidade e com diminuta variabilidade, sendo possível atingir índices de falhas 6 sigma), precisão de 99,99966%.

É importante salientar que as ferramentas 3 sigma e 6 sigma, foram desenvolvidas a princípio para a indústria, desse modo, às condições de manufatura são controladas, isso possibilita que índices de falhas sejam menores que 0,26% ou 3 sigma.

Para processos agrícolas, assim como salientado anteriormente, as inúmeras variáveis prejudicam a implantação do controle 3 sigma, o que faz com que a agricultura trabalhe com índices distantes dos utilizados pela indústrias. No entanto, com intuito de comparar os índices obtidos no CEP com índices empregados na agricultura, relatam-se alguns trabalhos.

Albiero et al. (2012) relata que índices de falhas na semeadura um pouco abaixo de 10% são considerados ótimos para processo agrícolas em questão. O processo agrícola de aplicações a lanço de insumos utiliza o coeficiente de variação (CV) como um índice de qualidade. O método utilizado para avaliar a uniformidade da distribuição, é a norma ASAE (2003). Norma esta que define termos e estabelece as condições e os procedimentos de ensaio, assim como a maneira de apresentar os resultados. Outra norma é a ISO 5690/1, que trata igualmente das condições de ensaio, procedimentos e resultados. Ortiz-Cañavale (2003), considera que o coeficiente de variação CV é satisfatório se abaixo de 15%, bom entre 10 e 5% e ótimo para valores menores que 5% para os distribuidores centrífugos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para satisfazer ao objetivo deste estudo, analisar se os mecanismos dosadores de uma máquina de aplicação de insumos, carreta adubadora de arrasto, atendem às doses previstas no mapa de recomendação, a metodologia empregada foi a da carta de controle e a determinação da capacidade do processo. A carta de controle permite afirmar se o processo é estável e previsível e a capacidade é uma medida de uniformidade. A capacidade compara a variabilidade própria do processo com as exigências ou especificações do mesmo.

Os dados utilizados referem-se a três aplicações de adubo, cloreto de potássio (KCL). As aplicações foram realizadas no ano de 2010 em uma área comercial de produção de laranjas, localizada no município de Botucatu-SP, de coordenadas geográficas 22°57'26" S 48°39'03" O (sede). O local de coleta dos dados se refere a dois talhões, denominados de 16 e 35, Figura 2. Cada talhão possui uma área aproximada de 25 hectares, cultivados com a variedade Rubi. Esta variedade é identificada como precoce na classificação de maturação do fruto.

Figura 2 – Talhões onde foram realizadas as coletas das amostras, aplicações, mostrando a disposição das linhas da cultura

As três aplicações referem-se à prescrição de adubação, que ficou parcelada da seguinte forma: Para a área 16 a primeira aplicação recebeu 30%, e 35% na segunda e terceira aplicações; Para a área 35 a primeira aplicação recebeu 35%, e 32,5% na segunda e terceira aplicações.

As doses aplicadas de KCL são referentes as quantidades que constam no mapa de recomendação. As doses recomendadas são calculadas a partir dos resultados das amostragens de solo, folhas e dos mapas de produtividade da área. Esses dados foram obtidos em locais específicos de cada talhão, georreferenciados, permitindo assim a determinação das doses recomendadas para a recomposição da fertilidade do solo.

Para as aplicações, utilizou-se uma máquina aplicadora, carreta adubadora de arrasto, com mecanismo dosador volumétrico e mecanismo distribuidor pneumático, composto por duas esteiras transportadoras independentes e comportas ajustáveis, dutos de ar, motor hidráulico, tanque de adubo e defletores. A carreta tem capacidade de carga de 2000 kg, largura de trabalho que pode variar de 3 a 4 metros e velocidade de aplicação variando de 5 a 8 km h⁻¹, com variações de dose de 30 a 650 kg ha⁻¹.

As doses aplicadas (DAc) referem-se as quantidades aplicadas durante a operação realizada por meio da carreta. Elas são determinadas pelo sistema dosador (Figura 3) o qual é acionado por um controlador hidráulico de vazão comandado por uma central de processamento. A central é conectada a uma antena receptora de sinal do sistema de posicionamento global (GPS).

Figura 3 - Esquema do sistema dosador composto por comporta e esteira; A – Vista frontal; B – Vista lateral

Na Figura 3, observa-se que a alteração da altura h , obtida por meio da movimentação da comporta, altera a área para a saída do produto, fertilizante ou corretivo. A área, abertura da comporta, combinada com a velocidade (v) da esteira transportadora permite a variação da vazão e consequentemente da dose. Para o presente caso, a dose aplicada (DAc) foi calculada e fornecida juntamente com os dados¹ de dose recomendada (DRc), latitude, longitude, velocidade e hora de aplicação. O mapa de recomendação georreferenciado, em sincronismo

¹Dados (Dose aplicada, dose recomendada, latitude, longitude, velocidade e horário de aplicação) Colaço (2012).

com o sinal do GPS, fornece ao sistema dosador as informações sobre as doses a serem aplicadas. A central de processamento, por meio de uma válvula derivadora de fluxo de óleo, altera a velocidade (v) das esteiras e a altura (h) da abertura da comporta, ajustando a dose de acordo com a posição da carreta no talhão. Caso ocorra mudança na velocidade de trabalho, a velocidade das esteiras e abertura das comportas será ajustada automaticamente.

3.1 Análise dos dados

Para verificar se os mecanismos dosadores de uma máquina de aplicação de insumos, carreta adubadora, atendem às doses previstas no mapa de recomendação, determinou-se a diferença entre as doses (Dif1), em porcentagem, dose recomendada (DRc) e a dose aplicada (DAc) de cloreto de potássio (KCL), equação 1:

$$Dif1 = \left(\frac{DAc - DRc}{DRc} \right) 100 \quad (1)$$

em que:

$Dif1$ = Diferença entre as doses (%);

DRc = Dose Recomendada ($kg\ ha^{-1}$);

DAc = Dose Aplicada ($kg\ ha^{-1}$).

A diferença entre as doses (Dif1) foi utilizada, para que se possa determinar o quanto da dose aplicada (DAc) é igual a dose recomendada (DRc), como valor relativo a DRc. Uma vez que, a diferença entre DAc e DRc, absoluta, poder-se-ia fazer suposições errôneas a respeito da eficiência dos mecanismos dosadores.

Os dados, latitude, longitude, dose aplicada e recomendada, velocidade e hora de aplicação, foram armazenados em planilhas de Excel e analisados de acordo com a sequência apresentada no fluxograma da Figura 4. Para análise utilizou-se os *softwares* Microsoft Office Excel® 2007, Microsoft; R versão 2.15.0 (Free Software Foundation, Boston, EUA) e STATISTICA, versão 11, (Data Analysis Software System-StatSoft, Inc. 2012).

Figura 4 - Fluxograma das etapas para avaliação dos dados

Na Figura 4, o fluxograma inicia pela entrada dos dados (1) armazenados em planilhas do Excel. Esses dados referem-se à quantidade de adubo recomendada (DRc) e aplicada (DAc), latitude, longitude, horário e velocidade de aplicação. A seguir, a primeira filtragem (2) é realizada e consiste na exclusão de pontos duplicados de latitude, longitude e horários de aplicação. Realiza-se então uma análise preliminar dos dados (3), que consiste na determinação da média, máximo, mínimo, amplitude e desvio padrão das doses aplicadas (DAc), doses recomendadas (DRc). Calcula-se em seguida a diferença entre as doses (Dif1), em porcentagem (4). Na sequência aplica-se um teste de verificação de normalidade (5), teste de Shapiro-Wilk. Se os dados referentes à Dif1 apresentarem uma distribuição normal aplica-se a carta de controle (6), sendo possível estabelecer se o processo está ou não sob controle. Estando o mesmo fora de controle, deve-se adotar um procedimento para avaliação das possíveis causas (9). Caso contrário, avalia-se a capacidade do processo (7). Sendo o processo considerado não capaz, ou seja, não se mantém dentro dos limites especificados, deve-se adotar um procedimento para avaliar as causas (9). Sendo o processo capaz, determina-se o nível de falhas por meio de valores de especificação para o processo (8).

No entanto, se distribuição dos dados não atender a condição de normalidade (5), utiliza-se a transformação dos mesmos (10) e para tanto, dois métodos são empregados: Box-Cox e Johnson. A transformação tem como objetivo alterar uma distribuição não normal em uma normal e após essa, aplica-se o teste de normalidade (11). Verificando-se a normalidade na distribuição dos dados, desenvolvem-se as cartas de controle (6) dando continuidade ao processo de análise descrito anteriormente.

Entretanto, se nenhum dos dois métodos empregados for eficaz na transformação dos dados, o qual é verificado pelo teste de normalidade (11), utiliza-se a carta de controle pela média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) para a totalidade dos dados, devido à característica de insensibilidade da MMEP à condição de normalidade. Na avaliação das cartas MMEP (12), estando o processo fora de controle, deve-se adotar um procedimento para avaliação das possíveis causas (9). Caso contrário, avalia-se a capacidade do processo (13) por meio dos índices de capacidade de confiança, utilizados para distribuições não normais. Se o processo for considerado não capaz, o mesmo não se manterá dentro dos limites especificados. Neste caso, deve-se adotar um procedimento de avaliação das causas (9). Sendo o processo capaz, determina-se o nível de falhas por meio de valores de especificação estabelecidos para o processo (8).

Após o teste de normalidade (11) uma opção é a não utilização da totalidade os dados, com a retirada dos pontos referentes às transições entre as doses, esses pontos representam os

locais nos quais os mecanismos dosadores não respondem adequadamente as prescrições de recomendação de adubação. Na filtragem II (14) retiram-se os pontos de transição entre as doses. Realiza-se uma análise preliminar (15) dos dados restantes para verificar a forma de distribuição dos mesmos e após, aplica-se o teste de normalidade (16). Verificada a normalidade na distribuição, segue-se para a carta de controle (6). Caso contrário, segue-se para as cartas de controle (12) pela média móvel exponencialmente ponderada (MMEP), seguindo com o processo descrito anteriormente até a definição de valores especificados (8) e término da análise. O procedimento de avaliação das causas de não adequação ao processo, referentes às cartas de controle e capacidade do processo, não faz parte do escopo desse trabalho.

3.2 Filtragens

A primeira filtragem de dados, denominada no fluxograma de filtragem I, é realizada com objetivo de eliminar os valores duplicados de latitude, longitude e horário de aplicação. Esses valores duplicados podem ocorrer durante a coleta dos dados devido a manobras nas bordas do talhão e problemas com a qualidade do sinal do GPS. Caso existam valores duplicados, elimina-se um deles dos dados da planilha.

A filtragem II tem como objetivo refinar a avaliação do funcionamento dos mecanismos dosadores (comportas e esteiras) dentro de zonas de aplicação, de modo que as transições entre doses não sejam consideradas. As transições entre as doses são descritas na literatura como as maiores responsáveis por erros de aplicação.

3.2.1 Transições entre as doses

As transições entre as doses são pontos em que os mecanismos dosadores podem não responder adequadamente as prescrições de recomendação de adubação, ou seja, a maioria dos erros de aplicação está relacionada com as mudanças de doses durante o trajeto, Al-Gaadi e Ayers (1999), Molin et al. (2002) e Fulton et al. (2005).

Para determinar os pontos de transição entre as doses, manteve-se os pontos para os quais as DAc estejam entre uma faixas de variação da DRc. O índice utilizado foi de $\pm 5\%$ em torno da dose recomendada. As doses sem os pontos de transição entre as aplicações (DS) estão contidas no intervalo definidos pela expressão 2:

$$0,950 DRc \leq DAc \leq 1,050 DRc \quad (2)$$

em que:

$DRc = Dose Recomendada (kg ha^{-1})$;

$DAc = Dose Aplicada (kg ha^{-1})$.

3.3 Normalidade dos dados

Como uma primeira aproximação para avaliar a normalidade dos dados, utilizou-se o histograma de frequência, a simetria e curtose. A simetria e a curtose comparam estatisticamente os valores das distribuições a serem testadas, em relação ao valor de uma distribuição normal, que deve ser zero (0) para simetria e três (3) ou menos (-3) para curtose.

O método utilizado para determinar a normalidade foi o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO e WILK, 1965), visto que o mesmo apresentou melhor teste de aderência à normalidade de acordo com Leotti, Birck e Riboldi (2005).

3.4 Transformação dos dados

Caso a normalidade dos dados não seja verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, a utilização dos gráficos de controle de Shewhart torna-se inviável. Com o objetivo de transformar uma distribuição não normal em normal utilizou-se de dois tipos de transformação dos dados: Johnson (JOHNSON, 1949); Box e Cox (BOX-COX, 1964).

3.4.1 Transformação de Johnson

A transformação Johnson converte a distribuição de uma variável aleatória x à distribuição normal, o referido processo ajusta uma distribuição empírica aos dados, expressa pela equação 3:

$$y = \gamma + \eta \cdot \text{Sinh}^{-1} \left[\frac{x - \varepsilon}{\lambda} \right] \quad (3)$$

em que :

γ e η são constantes a serem estimadas;

ε e λ são parâmetros de ajuste da curva.

Para η , $\lambda > 0$, $-\infty < \gamma < \infty$, $-\infty < \varepsilon < \infty$, $-\infty < x < \infty$.

3.4.2 Transformação de Box-Cox

De acordo com Yeo e Johnson (2000), a contribuição de Box e Cox (1964) foi o maior passo na determinação de uma maneira objetiva de se efetuar transformação de dados. A transformação de Box-Cox consiste em encontrar um λ , utilizando-o como potência da variável x , ou seja, y . O valor do parâmetro λ deve minimizar o erro quadrático, e consequentemente o desvio padrão da variável transformada, equação 4:

$$y = x^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & (\lambda \neq 0) \\ \ln x & (\lambda = 0) \end{cases} \quad (4)$$

em que:

y = variável dependente após a transformação;

λ = parâmetro que define a transformação.

3.5 Gráficos de controle de Shewhart e gráficos de controle pela média móvel exponencialmente ponderada (MMEP)

Os parâmetros para elaboração dos gráficos de controle de Shewhart e gráficos de controle MMEP, são definidos por Montgomery (2004) pelas equações 5 e 6:

$$LSC = \mu + L \sigma \quad (5)$$

$$LIC = \mu - L \sigma \quad (6)$$

em que:

LSC = Limite superior de controle;

LIC = Limite inferior de controle;

μ = Média da diferença entre a dose recomendada (DRc) e dose aplicada (DAc);

L = Distância entre a linha central e o limite especificado, nesse estudo é 3;

σ = Desvio padrão.

As equações 5 e 6 são utilizadas quando os dados possuem uma distribuição normal. Casos os dados não apresentem uma distribuição normal, calcula-se a MMEP, Montgomery (2004), equação 7 e aplica-se os gráficos de controle cujos limites são determinados pela equações 8 e 9, descritas por (ALBIERO et al., 2012):

$$z_i = \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda)x_{i-j} + (1 - \lambda)^i z_0 \quad (7)$$

em que:

z_i = média ponderada de todas as médias anteriores;

z_0 = média alvo do processo;

x_i = valor da característica medida;

λ = peso da média, sensibilidade em captar mudanças.

$$LSC = \mu + L \sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad (8)$$

$$LSC = \mu - L \sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad (9)$$

Nas equações 8 e 9 um fator ponderador é atrelado ao desvio padrão, o qual regula os limites de controle em função da progressão de amostragem, possibilitando um ajuste em função do número de amostras i .

3.6 Capacidade do processo (C_p)

Com o processo sob controle estatístico, determina-se a capacidade do processo (C_p). A capacidade é utilizada para avaliar se o processo é potencialmente capaz de produzir itens dentro dos limites especificados, (GONZALEZ e WERNER, 2009), equação 10:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (10)$$

em que:

LSE = Limite Superior de Especificação;

LIE = Limite Inferior de Especificação;

σ = Desvio padrão.

A capacidade do processo ou índice da capacidade do processo é definida pelos limites superior e inferior especificado, definidos em literatura específica. A capacidade efetiva do processo (Cpk) leva em consideração o posicionamento da média em relação as especificações superior e inferior, calculado por meio das equações 11 e 12:

$$Cpks = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (11)$$

$$Cpki = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (12)$$

em que:

$Cpks$ = Capacidade efetiva do processo superior

$Cpki$ = Capacidade efetiva do processo inferior

LSE = Limite Superior de Especificação;

LIE = Limite Inferior de Especificação;

μ = Média da diferença entre as dose recomendada (DRc) e dose aplicada (DAc);

σ = Desvio padrão.

Os índices Cp e Cpk são utilizados quando a distribuição dos dados é normal. No entanto, quando os dados não possuem essa distribuição, utiliza-se o índice de capacidade de confiança (Cpc). Esse índice é baseado na esperança de uma amostra, pois a esperança independe da normalidade, equação 13:

$$Cpc = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\frac{\pi}{2}c}} \quad (13)$$

em que:

$c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - T|$, esperança da distribuição da variável aleatória X ;

$T = (LSE - LIE)/2$, valor alvo;

LSE = Limite Superior de Especificação;

LIE = Limite Inferior de Especificação.

A partir do cálculo do índice Cpc e com o valores da Tabela 1, pode-se determinar a taxa de falhas, assim como a descrição da qualificação da ocorrência da falha, sendo o Cpc utilizada para determinar a taxa de falhas do processo.

Tabela 1 - Classificação das ocorrências e taxa de falhas

Qualificação de Ocorrências	Taxa de falhas possíveis	Cpk ou Cpc
Muito alta: Falha é quase inevitável	≥ 1 em 2	$< 0,33$
	1 em 3	$\geq 0,33$
Alta: Falhas repetitivas	1 em 8	$\geq 0,51$
	1 em 20	$\geq 0,67$
Moderada: Falhas ocasionais	1 em 80	$\geq 0,83$
	1 em 400	$\geq 1,00$
	1 em 2.000	$\geq 1,17$
Baixa: Relativamente poucas falhas	1 em 15.000	$\geq 1,33$
	1 em 150.000	$\geq 1,50$
Remota: Falhas são raras	$\leq$ em 1.500.000	$\geq 1,67$

Fonte: Albiero et al., (2012)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira análise realizada, a partir dos dados da planilha do Excel, foi a filtragem do conjunto de dados visando eliminar os pontos de mesma coordenada geográfica e/ou horário de aplicação. Nesse caso, entende-se que ocorreu uma duplicação de valores e, portanto, os dados duplicados não correspondem à realidade. De um total de 15730 linhas, cada uma com dados de latitude, longitude, velocidade de aplicação, dose aplicada e dose recomendada, obtidos nas três aplicações, nos dois talhões, foram eliminadas 808 linhas pelo motivo descrito, o que corresponde a 5,13% do total. A Tabela 2 apresenta a quantidade de dados para as três aplicações realizadas nos dois talhões.

Tabela 2 - Filtragem dos dados das aplicações nos talhões 16 e 35

Quantidade de Dados						
Filtragem	Talhão					
	16			35		
	Aplicação					
	1	2	3	1	2	3
Pré	2827	2718	2657	2588	2433	2507
Pós	2677	2562	2524	2450	2319	2390
Total Excluídos	150	156	133	138	114	117
%	5,31	5,74	5,01	5,33	4,69	4,67

Observa-se na Tabela 2 que no talhão 16, foram excluídos 150, 156 e 133 pontos nas aplicações 1, 2 e 3, respectivamente, totalizando 439 pontos, o que representa à média de 5,4% dos dados. No talhão 35 exclui-se 369 pontos, sendo 138, 114 e 117 nas aplicações 1, 2 e 3 respectivamente, o que representou à média de 4,9% dos dados do referido talhão. Após a exclusão dos pontos duplicados realizou-se a análise preliminar dos dados por meio do gráficos de dispersão, Figura 5, para as aplicações 1, 2 e 3 no talhão 16.

Figura 5 - Dispersão das doses recomendadas e aplicadas no talhão 16

Na Figura 5, referente às aplicações 1, 2 e 3, visualiza-se a dispersão dos pontos relativos as doses recomendadas (DRc) e doses aplicadas (DAc), obtendo-se o coeficiente de determinação R^2 cujo valor explica a correlação entre as variáveis DAc e DRc, o quanto uma está relacionada com a outra (TRIOLA, 1999). A aplicação 1 apresenta um R^2 de 0,70 enquanto que as aplicações 2 e 3 apresentam um R^2 de 0,50 o que revela, a princípio, uma melhor relação entre DRc e DAc para a aplicação 1. A Tabela 3 apresenta os parâmetros da estatística descritiva referentes as doses aplicadas e recomendadas.

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos referentes às doses recomendadas (DRc) e aplicadas (DAc) para o talhão 16

Parâmetros Estatísticas	Dosagem (kg ha ⁻¹)					
	Talhão 16					
	Aplicação					
	1		2		3	
	DRc	DAc	DRc	DAc	DRc	DAc
Média	80,74	79,87 ^{NS 1}	95,09	93,97 ^{NS 2}	93,70	92,85 ^{NS 3}
Máximo	132,00	152,00	172,00	200,00	172,00	173,00
Mínimo	19,00	21,00	28,00	27,00	28,00	13,00
Amplitude	113,00	131,00	144,00	173,00	144,00	160,00
Desvio Padrão	16,96	17,35	20,35	20,92	20,18	20,80

Dose Aplicada (DAc); Dose Recomendada (DRc); NS 1 não significante com nível de 0,05 probabilidade entre DRc e DAc para aplicação 1; NS 2 não significante com nível de 0,05 probabilidade entre DRc e DAc para aplicação 2; NS 3 não significante com nível de 0,05 probabilidade entre DRc e DAc para aplicação 3

Para o talhão 16, Tabela 3, as médias das doses aplicadas (DAc) foram estatisticamente iguais as médias das doses recomendadas (DRc), de acordo com o teste t-Student. Nas aplicações 2 e 3, as DRc apresentam os mesmos valores de máximo, mínimo e consequentemente da amplitude, o que justifica-se pelo parcelamento da adubação.

Na Figura 6, observa-se os gráficos de dispersão entre pontos referentes as doses recomendadas (DRc) e as doses aplicadas (DAc) para o talhão 35.

Figura 6 - Dispersão das doses recomendadas e aplicadas no talhão 35

A aplicação 1 apresenta um coeficiente de determinação R^2 de 0,66 enquanto que as aplicações 2 e 3 apresentam R^2 de 0,55 e 0,54 respectivamente; deste modo, a aplicação 1 apresenta uma melhor relação entre DRc e DAc. Caso as doses aplicadas fossem idênticas às doses recomendadas, o R^2 seria 1, indicando que o mecanismo da máquina aplica a dose recomendada corretamente.

Na Tabela 4, visualiza-se parâmetros estatísticos referentes às doses aplicadas (DAc) e doses recomendadas (DRc) para o talhão 35.

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos referentes às doses recomendadas (DRc) e aplicadas (DAc) para o talhão 35

Parâmetros Estatísticas	Dosagem (kg ha ⁻¹)					
	Talhão 35					
	Aplicação					
	1		2		3	
	DRc	DAc	DRc	DAc	DRc	DAc
Média	90,72	89,77 ^{NS 1}	83,66	82,84 ^{NS 2}	83,59	82,82 ^{NS 3}
Máximo	139,00	156,00	140,00	152,00	140,00	187,00
Mínimo	24,00	27,00	36,00	35,00	36,00	35,00
Amplitude	115,00	129,00	104,00	117,00	104,00	152,00
Desvio Padrão	17,10	17,25	16,86	17,18	16,68	17,42

Dose Aplicada (DAc); Dose Recomendada (DRc); NS 1 não significante com nível de 0,05 probabilidade entre DRc e DAc para aplicação 1; NS 2 não significante com nível de 0,05 probabilidade entre DRc e DAc para aplicação 2; NS 3 não significante com nível de 0,05 probabilidade entre DRc e DAc para aplicação 3

Na Tabela 4 as médias das doses aplicadas (DAc) foram estatisticamente iguais às médias das doses recomendadas (DRc), de acordo com o teste t-Student. Nas aplicações 2 e 3, as DRc apresentam valores de máximo, mínimo e consequentemente amplitude iguais, o que justifica-se pelo parcelamento da adubação.

4.1 Cálculo da Diferença (Dif1)

Após a primeira filtragem e a análise preliminar dos dados, determinou-se a diferença entre a dose aplicada (DAc) e dose recomendada (DRc) em relação a DRc, em porcentagem, sendo denominada de (Dif1), a qual é determinada com intuito avaliar a eficiência do mecanismo dosador, visto que, caso fosse empregado o cálculo de diferença, DAc menos DRc, não poderia-se aferir a eficiência do mecanismo dosador adequadamente.

A Tabela 5 apresenta a estatística descritiva das diferenças entre as doses (Dif1) para o talhão 16.

Tabela 5 - Estatísticas das diferenças entre as doses (Dif1) em %

Parâmetros Estatísticas	Diferença entre as Doses (Dif1) em %		
	Talhão 16		
	Aplicação		
	1	2	3
Média	-0,36	0,06	0,31
Máximo	152,00	214,00	110,00
Mínimo	-61,00	-63,00	-69,00
Amplitude	213,00	277,00	179,00
Desvio Padrão	13,35	17,45	17,24
Curtose	15,68	15,65	7,82
Simetria	1,27	1,56	1,04

Na tabela 5 observa-se que a média tende a zero (0), característica desejada, deste modo, DAc tende a ser igual a DRc. No caso da aplicação 2, o valor máximo de 214,00%, representa uma aplicação de 2,14 vezes mais KCL que a DRc. O valor mínimo de - 63,00%, significa que somente 63,00% da DRc de KCL foi aplicada. Em relação, ao valor menor do desvio padrão, referentes as diferenças entre as doses, na aplicação 1, esse fato sugere que tal aplicação apresentou uma menor variabilidade em relação as aplicações 2 e 3, o que implicaria em um melhor processo de adubação. Já os valores de curtose e simetria indicam a forma da distribuição. Valores de curtose próximos de três (3) e menos três (-3), e de simetria próximos de zero (0) indicam uma tendência à distribuição normal dos dados, característica indispensável para utilização dos gráficos de controle. Os valores obtidos de curtose e simetria, na Tabela 5, indicam que a distribuição dos dados não é normal. Na Figura 7 são apresentados os histogramas das diferenças entre as doses, para as aplicações 1, 2 e 3 para o talhão 16.

Figura 7 – Histogramas das diferenças entre doses aplicadas e doses recomendadas (Dif1) para o talhão 16

Na Figura 7 observa-se que, em relação à curtose, nenhum dos histogramas apresenta a forma de distribuição normal, as aplicações apresentaram formas de distribuições

denominadas de leptocúrticas, isto é, distribuições estreitas na sua parte superior. A aplicação 1 apresenta maior quantidade de pontos em torno da média, aproximadamente 1200, enquanto que as aplicações 2 e 3, apresentam, aproximadamente, 1000 pontos. Os histogramas revelam que aplicação 1 é mais adequada, maior número de pontos ao redor da média. As aplicações no talhão 35 apresentaram a mesma tendência, Tabela 6.

A Tabela 6 apresenta a estatística descritiva das diferenças entre as doses (Dif1), para o talhão 35.

Tabela 6 - Estatísticas das diferenças entre as doses (Dif1) em %

Parâmetros Estatísticas	Diferença entre as Doses (Dif1) em %		
	Talhão 35		
	Aplicação		
	1	2	3
Média	-0,36	0,12	0,11
Máximo	107,00	189,00	192,00
Mínimo	-69,00	-67,00	-67,00
Amplitude	176,00	256,00	259,00
Desvio Padrão	12,18	16,53	16,28
Curtose	9,91	29,72	25,95
Simetria	0,68	2,75	2,52

Na Tabela 6, observa-se que a média, tende à zero (0), característica desejada, visto que deste modo, DAc tende a ser igual a DRc. O menor valor do desvio padrão na aplicação 1 referente às diferenças entre as doses, sugere que tal aplicação apresentou uma menor variabilidade em relação as aplicações 2 e 3, o que indica um melhor processo de adubação. Na Figura 8 são apresentados os histogramas das diferenças entre as doses, para as aplicações 1, 2 e 3 para o talhão 35.

Figura 8 – Histogramas das diferenças entre doses aplicadas e doses recomendadas (Dif1) para o talhão 35

Os histogramas da Figura 8 apresentam forma de distribuição leptocúrtica, semelhantes aos histogramas da Figura 7. A semelhança entre os histogramas dos talhões 16 e 35, para as aplicações 1 e quantidades de pontos em torno da média, indicam a princípio, um melhor funcionamento dos mecanismos dosadores para as primeiras aplicações (1).

4.2 Teste de Normalidade

Como observado nos histogramas das Figuras 7 e 8, os dados de diferença entre as doses (Dif1) não apresentam, aparentemente, distribuição normal, sendo este o requisito fundamental para a elaboração dos gráficos de controle. Deste modo, é necessária a aplicação de um teste para verificar se existe ou não normalidade nos dados. Para verificação da normalidade nas distribuições dos dados de diferenças entre as doses (Dif1), aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk, Tabela 7.

Tabela 7 - Valores referentes à avaliação da normalidade das aplicações, nos talhões 16 e 35

Valores referentes à avaliação da normalidade das aplicações, nos talhões 16 e 35						
Normalidade	Diferença entre as Doses (Dif1) em %					
	Talhão					
	16			35		
	Aplicação					
	1	2	3	1	2	3
Teste Shapiro-Wilk	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Na Tabela 7, observa-se que o teste de Shapiro-Wilk apresentou valor de p menores que 0,05. Para que os dados referentes as diferenças entre as doses (Dif1) apresentassem uma distribuição normal, os valores de p deveriam ser maiores que 0,05. Deste modo, nenhuma das aplicações apresentou normalidade na distribuição dos dados.

4.3 Transformação dos Dados

Como nenhuma das aplicações realizadas apresentou uma distribuição normal, condição necessária para utilização dos gráficos de controle, uma das alternativas foi utilizar a transformação dos dados. A transformação tem como função alterar os dados, para que esses tenham uma distribuição normal, possibilitando a utilização dos gráficos de controle de Shewhart. Dois métodos foram empregados na transformação dos dados. Johnson (1949) e Box e Cox (1964). A Tabela 8 apresenta um sumário das transformações.

Tabela 8 - Transformações aplicadas aos dados nos talhões 16 e 35

		Diferença entre Doses (Dif1) em %					
Transformação	Normalidade	Talhão					
		16			35		
		Aplicação					
		1	2	3	1	2	3
Nenhuma	Curtose	15,689	15,653	7,820	9,910	29,720	25,950
	Simetria	1,279	1,561	1,040	0,680	2,750	2,520
	Teste Shapiro-Wilk (p)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Johnson	Curtose	2,339	2,176	2,221	2,284	2,286	2,220
	Simetria	0,017	-0,059	-0,043	0,020	-0,038	0,001
	Teste Shapiro-Wilk (p)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Box-Cox	Curtose	10,392	7,355	6,475	9,340	11,906	12,800
	Simetria	0,084	0,041	-0,038	0,226	-0,196	0,520
	Teste Shapiro-Wilk (p)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Na Tabela 8, nota-se que tanto a transformação Johnson quanto a Box-Cox, não obtiveram êxito em transformar dados com distribuição não normal em uma distribuição normal. Todos os valores de p no teste de Shapiro-Wilk foram menores que 0,05 atestando a não normalidade das distribuições analisadas. Curtose e simetria aferiram a sensibilidade das transformações utilizadas, ou seja, valores mais próximos zero (0) para simetria, e próximos de três (3) ou menos três (-3) para curtose, revelam tendência a distribuição ser normal.

4.4 Gráficos da média móvel exponencialmente ponderada (MMEP).

Devido ao fato, de que a distribuição normal não se ajustou de forma adequada aos dados, tanto na forma original quanto transformada, aplicou-se os gráficos de controle com base na média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) aos dados originais, pois, os gráficos de controle MMEP são insensíveis a não normalidade dos dados, Albiero et al. (2012). Para elaboração dos gráficos de controle MMEP utilizou-se $\lambda = 0,1$ (parâmetro de sensibilidade) e $L = 3,0$ que se refere à distância entre a linha média e as linhas de controle superior e inferior, (determinadas pelas equações 8 e 9). Nas Figuras 9, 10 e 11, apresentam-se os gráficos de controle MMEP, nos quais é possível observar os pontos que excederam os limites de controle, para dados referentes às aplicações 1, 2 e 3 no talhão 16.

Figura 9 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 1, talhão 16

Figura 10 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 2, talhão 16

Figura 11 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 3, talhão 16

Na aplicação 1, um total de 124 pontos, excederam os limites de controle superior e inferior, quantidade essa superior aos 23 e 35 pontos que excedem os limites dos gráficos das aplicações 2 e 3, respectivamente. O elevado número de pontos que excedem os limites na aplicação 1 é devido a maior concentração de pontos próximos da média, visto que, esses pontos influenciam na determinação dos limites e desse modo o gráfico torna-se mais restritivo.

Nas Figuras 12, 13 e 14 observam-se os gráficos de controle MMEP, referentes ao talhão 35, destacando-se os pontos fora dos limites de controle.

Figura 12 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 1, talhão 35

Figura 13 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 2, talhão 35

Figura 14 - Gráfico de controle MMEP da Dif1, aplicação 3, talhão 35

Na Figura 12, aplicação 1 apresenta 88 pontos fora dos limites de controle, quantidade maior que os 28 e 26 pontos referentes aos gráficos 13 e 14, respectivamente. A menor dispersão dos pontos na aplicação 1 faz com que os limites estreitem-se, propiciando um maior número de pontos fora dos limites, ou seja, um gráfico mais restritivo, assim como aconteceu para as aplicação 1 no talhão 16.

A Tabela 9 apresenta um sumário dos dados referentes à utilização dos gráficos de controle pela média móvel exponencialmente ponderada para os talhões 16 e 35.

Tabela 9 - Sumário dos gráficos de controle MMEP para as aplicações, nos talhões 16 e 35

Média Móvel Exponencialmente Ponderada - MMEP	Quantidade de dados e limites					
	Talhão					
	16			35		
	Aplicação					
	1	2	3	1	2	3
Número de pontos	2677	2562	2524	2450	2319	2390
Pontos fora do controle	124	23	35	88	28	26
Pontos fora do controle (%)	4,63	0,90	1,39	3,59	1,21	1,09
Limite Superior de Controle (%)	5,71	9,81	10,14	5,53	8,83	8,88
Limite Inferior de Controle (%)	-6,44	-9,68	-9,53	-6,25	-8,59	-8,66
Média	-0,36	0,06	0,30	-0,35	0,12	0,10

Na Tabela 9 observa-se que a aplicação 1 para o talhão 16, apresenta 4,63% dos pontos fora dos limites de controle e as aplicações 2 e 3 apresentam 0,90 e 1,39%, respectivamente. Para o talhão 35 a aplicação 1 apresenta 3,59% dos pontos fora dos limites de controle e as aplicações 2 e 3 apresentam 1,21 e 1,09%, respectivamente.

Para os dois talhões, 16 e 35, a aplicação 1 foi a que apresentou as maiores porcentagens de pontos fora dos limites de controle, visto que os limites são mais restritivos, devido uma

maior semelhança entre as doses recomendadas (DRc) e as doses aplicadas (DAc). De acordo com o resultado da Tabela 9 nenhuma das aplicações está sob controle estatístico. A condição para que isso ocorra é a de que somente 0,26% dos pontos poderiam estar fora dos limites.

Após análise dos gráficos (dispersão e histograma) pode-se afirmar que a aplicação 1 foi a que apresentou melhor resultado, para os dois talhões. No entanto, os gráficos de controle MMEP indicaram que as aplicações 2 e 3 são as que apresentam menores quantidades de pontos fora dos limites de controle, contrariando os resultados dos gráficos de dispersão e histogramas. Contudo, uma característica deve ser observada nessas análises: os gráficos MMEP para as aplicações 1 possuem limites de controle diferentes das aplicações 2 e 3, o que descaracteriza as comparações entre os gráficos 1 com 2 e 3. Sendo que as comparações só são válidas para aplicações com mesmo parcelamento, recomendação.

As análises dos gráficos MMEP devem ser feitas referentes às diferenças entre as aplicações dentro do mesmo talhão, qualquer que seja ele: a aplicação 1 difere da aplicação 2 e 3, sendo que 2 e 3 são semelhantes, fato justificado pelo parcelamento da adubação e que pode ser observado nos gráficos das doses recomendadas para aplicação 1, 2 e 3 para o talhão 16. Quanto mais abruptas forem as diferenças entre as doses recomendadas, derivadas das análises de solo, de um ponto amostrado para outro adjacente, pior será a aplicação. Os gráficos de controle são únicos, ou seja, não se pode compará-los, desta forma, não se pode dizer que a aplicação 1, foi melhor que a 2, isso por que a aplicação 1 tem recomendação diferente da 2, o que pode-se afirmar é que a aplicação 1 por apresentar uma recomendação mais estável, faz com que a máquina responda de maneira mais uniforme. Os gráficos da MMEP apontam que aplicação 2 e 3 possuem menor número de pontos fora dos limites, no entanto, com já citado, os limites destas são mais amplos devido as maiores variações nas doses recomendadas. Desta forma, a comparação das aplicações só podem ser efetuadas caso elas apresentem as mesmas doses (parcelamento), o que acontece nas aplicações 2 e 3 para os dois talhões. Ainda assim, fatores como as condições climáticas, operador do conjunto, característica física do adubo no momento da aplicação e a calibração do mecanismo dosador podem influenciar na aplicação e a análise desses fatores não fazem parte do escopo desse trabalho.

Uma comparação entre as doses recomendadas (DRc) e diferença entre as doses (Dif1) permite observar que as doses recomendadas influenciam na determinação dos valores de diferenças entre as doses, Figuras 15, 16 e 17.

Figura 15 - Gráfico da DRc de KCL (30 % do total) e diferença entre as doses para aplicação 1, talhão 16

Figura 16 – Gráfico da DRc de KCL (35 % do total) e diferença entre as doses para aplicação 1, talhão 16

Figura 17 – Gráfico da DRc de KCL (35 % do total) e diferença entre as doses para aplicação 1, talhão 16

Observando-se o gráfico da Figura 15, aplicação 1, nota-se que as doses recomendadas DRc possuem uma menor variabilidade em relação as Figuras 16 e 17, aplicações 2 e 3, respectivamente, o que afeta a diferença entre as doses.

4.5 Transições entre as doses

O processo de filtragem II refere-se à exclusão dos dados de transições entre as doses, os quais são responsáveis pelas maiores diferenças entre as doses aplicadas (DAc) e as doses recomendadas (DRc), possibilitando assim, uma avaliação do mecanismo dosador em aplicações mais constantes, menor variabilidade. De acordo com o processo já apresentado no fluxograma da Figura 4, a retirada dos dados referentes às transições entre as doses, filtragem II, fornece os resultados apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Filtragem II dos dados referentes às aplicações 1, 2 e 3 nos talhões 16 e 35

Filtragem R dos dados referentes às aplicações 1, 2 e 3 nos talhões 16 e 35						
Filtragem	Quantidade de Dados					
	Talhão					
	16			35		
	Aplicação					
	1	2	3	1	2	3
Pré	2677	2562	2524	2450	2319	2390
Pós	1714	1227	1177	1616	1223	1226
Total Excluídos	963	1335	1347	834	1096	1164
%	35,97	52,11	53,37	34,04	47,26	48,70

Na Tabela 10, talhão 16 retirou-se 963, 1335 e 1347 pontos, das aplicações 1, 2 e 3, respectivamente, um total de 3645 pontos, média de 48,2% dos dados. No talhão 35 retirou-se 834, 1096 e 1164 pontos das aplicações 1, 2 e 3, respectivamente, o que totalizou 3094 pontos, média de 44,4% dos dados. Após a filtragem II realiza-se a análise preliminar dos dados

Na Figura 18 visualizam-se os histogramas das diferenças entre as doses sem transição (DS) para as aplicações 1, 2 e 3, realizadas no talhão 16.

Figura 18 - Histogramas da DS, para o talhão 16, aplicações 1, 2 e 3

Os histogramas das aplicações 1, 2 e 3 para o talhão 16, ficam limitados pela diferença máxima de 5% e mínima de -5%, procedimento que exclui a maioria dos pontos de transição entre as doses. Observa-se que na aplicação 1, apresenta maior quantidade de pontos em torno do valor zero (0), em relação as aplicações 2 e 3. Os histogramas ainda revelam uma tendência do mecanismo dosador, aplicar quantidades de adubos menores que a dose recomendada, valores negativos.

A Figura 19 apresenta os histogramas das diferenças entre as doses sem transição (DS) para as aplicações 1, 2 e 3, realizada no talhão 35.

Figura 19 - Histogramas da DS, para o talhão 35, aplicações 1, 2 e 3

Na Figura 19, o histograma da aplicação 1, aparentemente apresentou uma melhor distribuição, visto o maior número de barras de frequências em torno do valor zero (0), em relação as aplicações 2 e 3. A Tabela 11 apresenta as análises referentes à avaliação da normalidade dos dados nos talhões 16 e 35.

Tabela 11 - Valores referentes à avaliação da normalidade dos dados de aplicações, nos talhões 16 e 35

Normalidade	Diferença entre Doses sem transição (DS) em %					
	Talhão 16			Talhão 35		
	Aplicação			Aplicação		
	1	2	3	1	2	3
Curtose	2,35	3,41	3,85	2,57	3,23	3,04
Simetria	0,20	0,47	0,52	0,16	0,38	0,37
Teste Shapiro-Wilk (p)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Na Tabela 11 visualizam-se valores de curtose, simetria e Shapiro-Wilk, referentes aos dados após a filtragem II. Comparando os valores da Tabela 8, com os da Tabela 11, conclui-se que esses são mais próximos de uma distribuição normal, entretanto ainda não há normalidade em suas distribuições.

4.6 – Gráficos da média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) sem os pontos de transição

Mesmo sem os pontos de transições entre as doses, os gráficos não apresentaram uma distribuição normal. Com a não normalidade dos dados utilizou-se então os gráficos de controle com base na média móvel exponencialmente ponderada (MMEP), uma vez que esses são insensíveis a não normalidade dos dados. Nas Figuras 20, 21 e 22 apresentam-se os gráficos de controle MMEP, os quais mostram os pontos que excedem os limites de controle, para dados referentes às diferenças entre as doses sem transição (DS) no talhão 16 para as aplicações 1, 2 e 3.

Figura 20 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 1, talhão 16

Figura 21 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 2, talhão 16

Figura 22 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 3, talhão 16

Na aplicação 1, Figura 20, nota-se uma maior quantidade de pontos fora dos limites de controle, quando comparado com as aplicações 2 e 3, isso deve-se a uma menor variabilidade dos dados da aplicação 1, resultado em limites de controle mais estreitos, e consequentemente maior número de pontos fora dos limites.

As Figuras 23, 24 e 25 são referentes aos gráficos de controle MMEP, para as aplicações 1, 2 e 3, respectivamente, para o talhão 35.

Figura 23 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 1, talhão 35

Figura 24 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 2, talhão 35

Figura 25 - Gráfico de controle MMEP da DS, aplicação 3, talhão 35

Os gráficos das aplicações 2 e 3, Figuras 24 e 25, respectivamente, apresentam uma maior variabilidade em relação a aplicação 1, a maior variabilidade expande os limites de controle possibilitando que as aplicações 2 e 3 tenham menos pontos fora dos limites.

Na Tabela 12 apresenta-se um sumário dos valores dos gráficos de controle pela média móvel exponencialmente ponderada MMEP para os talhões 16 e 35.

Tabela 12 - Sumário dos gráficos de controle MMEP para as aplicações, nos talhões 16 e 35

Quantidade de dados e limites						
Média Móvel Exponencialmente Ponderada - MMEP	Talhão					
	16			35		
	Aplicação					
	1	2	3	1	2	3
Número de pontos	1714	1227	1177	1616	1223	1226
Pontos fora do controle	142	8	6	49	3	10
Pontos fora do controle (%)	8,28	0,65	0,51	3,03	0,25	0,82
Limite Superior de Controle (%)	0,60	0,73	0,59	0,69	0,76	0,79
Limite Inferior de Controle (%)	-1,74	-1,81	-1,68	-1,70	-1,86	-1,92
Média	-0,56	-0,53	-0,54	-0,50	-0,54	-0,56

Na Tabela 12 verifica-se que o processo não está sob controle estatístico, exceto para a aplicação 2 no talhão 35, visto que 0,25% dos pontos da referida aplicação estão fora dos limites de controle, valor inferior ao limite de 0,26% estabelecido pelo padrão 3 sigma utilizados pelos gráficos de controle. Avaliação dos resultados revelam que com exceção das aplicações 1, as quais apresentam maior porcentagem de pontos fora dos limites, segundo os gráficos de controle MMEP as aplicações 2 e 3 apresentam valores menores que 1,0% dos dados fora do controle, índices esses que para padrões agrícolas são satisfatório devido as inúmeras variáveis que influenciam os processos agrícolas.

4.7 - Capacidade do processo

A capacidade do processo avalia-se um determinado processo é capaz de gerar produtos ou se, neste caso a operação de adubação, atende aos limites especificados. Sendo que adequação aos limites especificados é fundamental para programas de melhoria da qualidade.

A capacidade do processo é avaliada segundo o índice de capacidade de confiança (Cpc), visto que, a capacidade do processo (Cp) e (Cpk) não podem ser aplicados devido a falta de normalidade dos dados. O índice Cpc para aplicação 2 no talhão 35 e sem pontos de transição entre as doses, pode ser calculado pela determinação dos valores do limite superior especificado (LSE) e limite inferior especificado (LIE), sendo que os mesmos são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Determinação dos índices de capacidade de confiança e taxa de falhas de acordo com limites especificados

Limites Especificados		Índice	Taxa de Falhas
Superior	Inferior	Capacidade de Confiança	
LSE	LIE	Cpc	(%)
4,00	-4,0	1,23	0,05
3,50	-3,5	1,08	0,25
3,00	-3,0	0,92	1,25
2,50	-2,5	0,77	5,00

A partir dos índices de capacidade de confiança (Cpc) determina-se a ocorrência de falhas previstas para o processo de acordo com o limite especificados superior (LSE) e limite especificado inferior (LIE) especificados para a operação.

Na Tabela 13 estipula-se o LSE e o LIE, obtendo-se o índice Cpc de acordo com a equação 13. Os valores de taxas de falhas são determinados pelos valores Cpc, à partir da Tabela 1. A taxa de falhas cresce com o estreitamento dos LSE e LIE. Desta forma, quanto mais restritivo forem os limites utilizados, maior será a possibilidade dos pontos estarem fora dos limites e consequentemente maior será a taxa de falhas.

5 CONCLUSÃO

De acordo com as condições propostas para este trabalho, é possível afirmar que:

Os mecanismos dosadores não atenderam a condição de realizar uma aplicação variável dentro de limites, certa uniformidade;

Uma das principais causa da não uniformidade se refere ao atendimento das doses na faixa de transição;

Mesmo com a retirada dos pontos referentes à faixa de transição o processo se manteve instável, não uniforme, exceto em uma das aplicações, a qual se manteve sob controle, sendo possível determinação da capacidade do processo. Esse resultado, para a aplicação, indica que é possível obter uma uniformidade no processo, porém outras causas de variação devem ser investigadas.

As aplicações foram realizadas em épocas distintas e de forma parcelada. As diferenças de uniformidade entre a primeira aplicação e as duas subsequentes foram acentuadas, principalmente pelo parcelamento, além disso, possíveis causas dessas diferenças podem estar relacionadas com as condições de aplicação e a qualidade do adubo.

Os gráficos de controle MMEP podem ser utilizados para avaliar o processo de aplicação de adubo a taxa variada, quando esse processo apresente a mesma característica, doses de recomendação.

REFERÊNCIAS

- ALBIERO, D.; MACIEL, A.S.; MILAN, M.; MONTEIRO, L.A.; MION, R.L. Avaliação da distribuição de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo utilizando média móvel exponencial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 1, p. 86-95, 2012.
- ALBIERO, D. **Desenvolvimento e avaliação de máquina multifuncional conservacionista para a agricultura familiar**. 2010. 242p. Tese (Doutorado em Máquinas Agrícolas) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- AL-GAADI, K.A.; AYERS, P.D. Integrating GIS and GPS into a spatially variable rate herbicide application system. **Applied Engineering in Agriculture**, Michigan, v. 15, n. 4, p. 255-262, 1999.
- AMADO, T.J.C.; BELLÉ, G.L.; DELLAMEA, R.B.C.; PES, L.Z.; FULBER, R.; PIZZUTI, L.; SCHENATO, R.B.; LEMAINSKI, C.L. Projeto Aguaris-Cotrijal: Pólo de agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 91, n. 1, p. 39-47, 2006.
- ASAE. ASAE S341.3. **Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders**. St Joseph: ASAE Standards, 2003. p. 198-201.
- BAIO, F.H.R.; MOLIN, J.P.; LEAL, A.J.F. Avaliação da distribuição transversal de adubos sólidos aplicados em culturas anuais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 4, p. 527-536, 2012.
- BALIGAR, V.C.; BENNETT, O.L. NPK – fertilizer efficiency – a situation analysis for the tropics. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 10, p. 147-164, 1986.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; HE, Z.L. Nutrient Use Efficiency In Plants, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 7, p. 921-950, 2001.
- BONATO, R.G. **Qualidade operacional da operação de fenação: análise do processo de produção**. 2004. 100p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- BONILLA, J.A. **Métodos quantitativos para qualidade total na agricultura**. 2.ed. 250 p. Contagem: Littera Maciel, 1995.
- BONILLA, J.A. **Qualidade total na agricultura: fundamentos e aplicações**. 2.ed. Belo Horizonte: Centro de Estudos de Qualidade Total na Agricultura, 1994. 344p.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An Analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological)**, London, v.26, n. 2, p. 211-252, 1964.
- CAMARGO, M.E.; FILHO, W.P.; SORTICA, G.B.; SANTOS, A.I.; RUSSO, S.L. Análise do serviço de logística através de cartas de controle para dados individuais. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 12., 2005, Bauru. **Anais ...** Bauru: SIMPEP, 2005. 1 CD-ROM.
- CAMPOS, A.A. **Um algoritmo de detecção de falhas em sistemas multivariados**. 2011. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- CAMPOS, C.M.; MILAN, M.; SIQUEIRA, L.F.F. Identificação e avaliação de variáveis críticas no processo de produção de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 554-564, 2008.

CHAN, C.W.; SCHUELLER, J.K.; MILLER, W.M.; WHITNEY, J.D.; CORNELL, J.A. Error sources affecting variable rate application of nitrogen fertilizer. **Precision Agriculture**, Secausus, v. 5, p. 601-616, 2004.

CHANG, Y.C.; WU, C.W. Evaluation of process capability index for non-normal distributions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUSINESS AND INFORMATION, 2009. Kuala Lumpur, Malaysia, **Proceedings...** Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.

COLAÇO, A.F. **Efeito da adubação em doses variadas em pomares de laranjeiras ao longo de quatro safras**. 2012. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

DELLAMEA, R.B.C. **Eficiência da adubação à taxa variável em áreas manejadas com agricultura de precisão no rio grande do sul**. 2008. 161p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

DE VRIES, A.; RENEAU, J.K. Application of statistical process control charts to monitor changes in animal production systems. **Journal of Animal Science**, Savoy, v. 88, p. 11-24, 2010.

FERREIRA, E.B. Controle estatístico de processo no resfriamento de aves: Um estudo de caso. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 9, n. 2, p. 119-128, 2011.

FULTON, J.P.; SHEARER, S.A.; HIGGINS, S.F.; DARR, M.J.; STOMBAUGH, T.S. **Rate response assessment from various granual VRT applications** Transactions of ASAE, v. 48, n.6, p.2095–2103, 2005.

GONZALEZ, P.U.; WERNER, L. Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuição não normais. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 16, n. 1, p. 121-132, 2009.

GUARESCHI, R.F.; GAZOLLA, P.R.; PERIN, A.; SANTINI, J.M.K. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. **Ciência agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 4, p. 643-648, 2011.

GUARNIERI, J.P. **Eficiência dos gráficos de controle na detecção de outlier em processos autorregressivos e de médias móveis**. 2010. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

HINES, W.W.; MONTGOMERY, D.C.; GOLDSMAN, D.M.; BORROR C.M. **Probabilidade e Estatística na Engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 592p.

ISO. ISO 5690. **Equipment for distributing fertilizers**. Geneve: ISO Standars hand book 13, Agricultural machinery. 1982. Test methods – pt 1: full with fertilizers distributors p. 373-385.

JOHNSON, N.L. Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation. **Biometrika**, London, v. 36, n. 1, p. 149-176, 1949.

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

LAMBERT, D.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture profitability review. **Site-specific Management Center**. Lafayette: Purdue University, 2000. 154p.

LEOTTI, V.B.; BIRCK A.R.; RIBOLDI J. Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, Cramer-Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. In: SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA, 11., ; REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA (RBRAS), 50., 2005. Londrina.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agronômicos. São Paulo: ANDA, 2000. 72p. (**Boletim Técnico**, 4).

LUCAS, J.M.; SACCUCCI, M.S. Exponentially weighted moving average control schemes. **Technometrics**, Washington, v. 32, n. 1, p. 1-29, 1990.

LUCEÑO, A. **A process capability index with reliable confidence intervals**. Communications in Statistics, New York, v. 25, p. 235-245, 1996.

MASCARIN, L.S. **Caracterização de sistemas de colheita e desenvolvimento de técnicas para a obtenção de mapas de produtividade para citros**. 2006. 77p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

MASON, R.L.; GUNST, R.F.; HESS, J.L. **Statistical Design and Analysis of Experiments: With Application to Engineering and Science**. 2nd ed. New Jersey ;Hoboken: John Wiley, 2003. 68p.

MILAN, M.; FERNANDES, R.A.T. Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 261-266, 2002.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade**. 4 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004. 513p.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada a Probabilidade para Engenheiros**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 463p.

MORAES, C.F. **Estudo da utilização do gráfico de controle individual e do índice de capacidade sigma para dados não normais**. 2006. 166p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

MOLIN, J.P.; MOTOMIYA, A.V.A.; FRASSON, F.R.; FAULIN, G.D.C.; TOSTA, W. Test procedure for variable rate fertilizer on coffee. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 4, p. 569-575, 2010.

MOLIN, J.P.; MENEGATTI, L.; PEREIRA, L.L.; CREMONINI, L.C.M.; EVANGELISTA, M. Testing a fertilizer spreader with VRT. In: WORLD CONGRESS IN AGRICULTURE AND NATURAL RESOURCES, 2002, Foz do Iguaçu. **Proceedings of the World Congress in Agriculture and Natural Resources**. St. Joseph : ASAE, 2002. p. 232-237.

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

MOLIN, J.P.; MASCARIN, L.S.; VIEIRA JUNIOR, P. A. Avaliação de intervenções em unidades de aplicação localizada de fertilizantes e de populações de milho. **Engenharia Agrícola** Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 528-53, 2006.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. **Las Máquinas Agrícolas y su Application**. 6 ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2003. 528p.

OLIVEIRA, S. **Adubação com nitrogênio, fósforo e potássio para experimentos com cafeeiro em vasos**. 2005. 52p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

PASQUA, S.E.; MILAN, M.; PECHE FILHO, A. Controle de qualidade em operações agrícolas mecanizadas na cultura do milho (*Zea mays* L.) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1996, Bauru. **Anais...** Bauru: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. 1 CD-ROM.

PYLRO, A.S. **Modelo linear dinâmico de Harrison e Stevens aplicado ao controle estatístico de processo autocorrelacionados**. 2008. 113p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ROBERTS, S.W. Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages. **Technometrics**, Washington, v. 1, p. 239-250, 1959.

ROUVERSON P.S.; SOUZA, F.G.; CORTEZ, J.W.; FURLANI, C.E.A.; VIGNA, G.P. Variabilidade espacial e controle estatístico do processo de perdas na colheita mecanizada do algodoeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 742-752, 2007.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, London, v. 52, p. 591-611, 1965.

SARRIÉS, G.A. **Controle estatístico da qualidade para impurezas minerais em carregamento de cana-de-açúcar**. 1997. 88p. Tese (Doutorando em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

SMETI, E.M.; THANASOULIAS, N.C.; KOUSOURIS, L.P.; TZOUMERKAS, P.C. An approach for the application of statistical process control techniques for quality improvement of treated water. **ScienceDirect**. Desalination, Amsterdam, v. 213, p. 273-281, 2006.

SUGUISAWA, J.M.; FRANDO, F.N.; SILVA, S.S.; PECHE FILHO, A. Qualidade de aplicação de herbicida em lavoura de trigo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. esp., p. 41-47, 2007.

TAKAHASHI, F.H. **Aplicação do controle estatístico de processos (CEP) como ferramenta para a melhoria da qualidade do leite**. 2011. 25p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

TISSOT, S.O. MIRSEQUE, O.; MOSTADE, B.; HUYGHEBAERT, J.P. DESTAIN. Uniformity of N-fertilizer spreading and risk of ground water contamination. **Irrigation and Drainage**, Slough, v. 51, n. 1, p. 17-24, 2002.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: LTC, 1999. 410 p.

WERNER, V. Aplicação de fertilizantes à taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 658-663, 2007.

YEO, I.K.; JOHNSON, R.A. A New Family of Power Transformation to Improve Normality or Symmetry, **Biometrika** London, v. 87, p. 954-959, 2000.