

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

Viabilidade energética e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável

Leonardo Vargas Posada

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

**Piracicaba
2016**

Leonardo Vargas Posada
Engenheiro Agrônomo

Viabilidade energética e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. THIAGO LIBÓRIO ROMANELLI

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

Piracicaba
2016

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

Posada, Leonardo Vargas

Viabilidade energética e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável /
Leonardo Vargas Posada. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018
de 2011. - - Piracicaba, 2016.

81 p. : il.

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

1. Sustentabilidade 2. Agricultura de precisão 3. Energia 4. Economia I. Título

CDD 631.8
P855v

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

*Aos meus pais,
Lucely Posada e Henry Vargas,
E meu irmão,
Sebastian Vargas,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pelas oportunidades oferecidas no curso de Pós-Graduação.

Ao Professor Dr. Thiago L. Romanelli pela orientação e convívio ao longo da minha formação profissional e acadêmica.

Ao governo brasileiro e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida durante o período desse trabalho.

Aos amigos do PPGESA, em especial André Colaço, Daniela Oliveira, Taila Strabeli, Jonathan Vásquez, Mark Spekken, Argelio Paniago, João Paulo Veiga, Diana Carolina Vasquez, Mateus Eitelwein, Nelson Franco, Laura Pantoja, Álvaro Ramirez, Natalia Naranjo, Alejandro Ordoñez e ao gMAP, por me proporcionar formação e treinamento na área de mecanização e agricultura de precisão e pela troca de experiências e amizades.

À segunda família, em Piracicaba, República Matadouro e Los Caravanas, por anos de aprendizado e alegrias.

Aos professores Marcos Milan, José Paulo Molin e Silvio Frosini de Barros Ferraz, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos durante o curso de Pós-Graduação.

Aos grandes amigos Carlos Romero, Laura Potes, Diego Blanco, Michael Ruiz, Oscar Franco, Luisa Jimenez, Yesika Corredor, David Sarmiento, Alejandra Rojas, Juliana Díaz e Maria Isabel Soler que mesmo distantes também fizeram parte dessa conquista.

A todos meus familiares Vargas e Posada pelo apoio e carinho para a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Biosistemas, representado por todos os seus funcionários que apoiam as pesquisas e os seus alunos.

À todas as pessoas que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, e especialmente aos meus pais e irmão, por que sem eles esta conquista não fora possível.

“Cuando el objetivo te parezca difícil, no cambies de objetivo; busca un nuevo camino para llegar a él”.

Confucio.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Agricultura de precisão	21
2.2 Aplicação em taxa variável	23
2.2.1 Sustentabilidade da aplicação em taxa variável	24
2.2.2 Importância econômica da aplicação taxa variável.....	26
2.2.3 Importância da agricultura de precisão em culturas perenes (café e laranja)	27
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Algoritmo	31
3.1.1 Algoritmo – Análise de energia	33
3.1.2 Algoritmo – Análise econômica	41
3.2 Verificação do algoritmo (estudos de caso).....	47
3.2.1 Estudo caso de café.....	47
3.2.2 Estudo caso de laranja.....	49
3.3 Cenário	50
3.3.1 Cenário base.....	50
3.3.2 Cenário alternativo.....	51
3.3.3 Cenário modificado.....	51
3.4 Análise de sensibilidade.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Análise de energia.....	53
4.2 Análise econômica	56
4.3 Análise de sensibilidade.....	60
5 CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS	67
ANEXOS	75

RESUMO

Viabilidade energética e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável

A sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas envolve fatores ambientais, econômicos e socioculturais. Um dos componentes essenciais do sistema de produção agrícola é a prática da fertilização. Portanto o uso de fertilizantes pode contribuir para o aumento da produção sustentável em diversas culturas. A Agricultura de Precisão por meio da técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável permite o uso de diferentes doses de insumos segundo as exigências da cultura e solo. Com isso pode ser possível otimizar as aplicações, aprimorando assim o retorno econômico e a conservação do ambiente. Contudo, existe a necessidade de conferir os benefícios desta técnica. As análises de energia e econômica permitem avaliar a eficácia desta técnica, já que determinam a disponibilização e eficiência energética de um sistema produção, e a lucratividade para condições particulares de cada produtor. Assim, o objetivo do trabalho foi analisar a viabilidade energética e econômica da aplicação em taxa variável de fertilizantes, a fim de avaliar seus efeitos sobre as culturas. Estabeleceu-se um algoritmo para as operações efetuadas na fertilização (amostragem de solo e aplicação de fertilizantes). Dessa forma, analisou-se a viabilidade energética e econômica por meio de indicadores (energia incorporada e lucro da técnica). O modelo foi verificado com estudos de caso em culturas de café e laranja. Determinou-se que a técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável apresentou viabilidade energética para a maioria das áreas avaliadas, para as culturas de café e laranja se obtiveram reduções na energia incorporada de 25.551 MJ ha⁻¹ e 15.368 MJ ha⁻¹ respectivamente, demonstrando melhor aproveitamento dos fertilizantes usados. Do mesmo modo se determinou viabilidade econômica em todas as áreas de estudo, por meio dos cenários estabelecidos no modelo. Determinaram-se aumentos de lucro para a cultura de café e laranja até de 1.319 R\$ ha⁻¹ e 1.031 R\$ ha⁻¹ respectivamente, em relação à aplicação convencional ou em taxa fixa. Concluiu-se que a técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável apresentou viabilidade energética e econômica para a maioria das áreas avaliadas.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Agricultura de precisão; Energia; Economia

ABSTRACT

Energy and economic viability of fertilizer application at variable rate

The sustainability of agricultural production systems involves environmental, economic and sociocultural factors. One of the essential components of the agricultural production system is the practice of fertilization. Therefore, the use of fertilizers can contribute to increase the sustainability of agricultural production. Precision Agriculture through the variable rate application of fertilizer allows the use of different doses of inputs according to the requirements of the crop and soil. It may be possible to optimize applications, thereby improving the economic return and environmental conservation. However, there is a need to assess the benefits of this technique. The analysis of energy and economic permit the assessment of the efficacy of this technique, since they determine the availability and energy efficiency of a production system, and profitability for particular conditions of each producer respectively. The aim of the study was to analyze the energy and economic viability of the variable rate application of fertilizers in order to evaluate its effects on crops. An algorithm was established for the calculation carried out in fertilization (soil sampling and fertilizer application). In this way, was analyzed the energy and economic viability through indicators (energy embodiment and profit technical). The model was verified with case studies on coffee and orange crops. It was determined that the variable rate fertilizer application technique presented energy viability for most of the evaluated areas for coffee and orange cultures were obtained reduction in embodied energy of 25,551 MJ ha⁻¹ and 15,368 MJ ha⁻¹ respectively, demonstrating better use of fertilizers used. Likewise, it was determined economic viability in all areas of study through the scenarios set out in the model. They were determined profit increases for coffee and orange cultures up to 1.319 R\$ ha⁻¹ and 1.031 R\$ ha⁻¹, respectively, compared to conventional application or fixed rate. It was concluded that the fertilizer application technique in variable rate showed energy and economic viability for most areas assessed.

Keywords: Sustainability; Precision agriculture; Energy; Economy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Algoritmo da análise da viabilidade energética e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável e taxa fixa (Simbologia adaptada de WINKELMANN; WEIß, 2011).....	32
Figura 2- Algoritmo da análise de energia desenvolvido para calcular a energia incorporada das operações envolvidas na fertilização (Adaptado de ROMANELLI; MILAN, 2010b)	34
Figura 3- Algoritmo da análise econômica desenvolvido para calcular o custo operacional das operações envolvidas na fertilização (Adaptado de ROMANELLI; MILAN, 2010b)	43
Figura 4- Análise de sensibilidade para o cenário alternativo (TV) do indicador energia incorporada (EI) das áreas de estudo da cultura de café	61
Figura 5- Análise de sensibilidade para o cenário alternativo (TV) do indicador energia incorporada (EI) das áreas de estudo da cultura de laranja.....	62
Figura 6- Análise de sensibilidade para o cenário alternativo (TV) do indicador lucro da técnica (L) das áreas de estudo da cultura de café	63
Figura 7- Análise de sensibilidade para o cenário alternativo (TV) do indicador lucro da técnica (L) das áreas de estudo da cultura de laranja	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das áreas da cultura de café (FAULIN, 2010).....	47
Tabela 2 - Descrição das áreas de estudo da cultura de laranja (COLAÇO; MOLIN, 2014) ..	49
Tabela 3 - Especificações técnicas do maquinário usado na amostragem de solo e aplicação de fertilizantes.....	51
Tabela 4 - Viabilidade energética da fertilização para a área 1 da cultura de café	53
Tabela 5 - Viabilidade energética para cada ano de fertilização na área 2 da cultura de café ..	54
Tabela 6 - Viabilidade energética para cada ano de fertilização na área 4 da cultura de café .	54
Tabela 7 - Viabilidade energética da fertilização para a área 5 da cultura de laranja	55
Tabela 8 - Viabilidade energética da fertilização para a área 6 da cultura de laranja	56
Tabela 9 - Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 1 da cultura de café	57
Tabela 11 - Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 4 da cultura de café.	58
Tabela 12 - Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 5 da cultura de laranja	59
Tabela 13 – Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 6 da cultura de laranja	59

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as taxas de crescimento da produção agrícola e da produtividade das culturas do mundo têm diminuído. Isso tem provocado receio de que o mundo não seja capaz de aumentar a produção de alimentos e outros produtos suficientes para assegurar a alimentação adequada da população futura (FAO, 2015). Neste contexto, a prática de fertilização assume lugar de importância, como forma de aumentar a produtividade influenciando no desenvolvimento das culturas. A utilização de fertilizantes envolve aspectos relacionados com as características dos produtos, as condições climáticas, as exigências nutricionais das culturas e as características físico-químicas do solo.

A Agricultura de Precisão (AP) é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa o aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização de efeitos negativos ao ambiente. Dentro de suas técnicas, está a aplicação de fertilizantes em taxa variável, que aplica diferentes doses de insumos de acordo com as exigências da área (planta-solo), com intuito de otimizar os insumos e aumentar a produtividade da unidade.

O aumento da produtividade com base em técnicas social e ambientalmente adequadas, é a melhor opção do agricultor para alcançar um crescimento constante e sustentável. Neste contexto, a análise ambiental e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável assume lugar de destaque, como forma de avaliação da eficácia da técnica.

Uma das metodologias que quantificam os efeitos ambientais é a análise de energia, que determina a demanda, disponibilização de energia e eficiência energética de um sistema e seus fatores de produção. Os efeitos econômicos são determinados por meio da análise econômica, que visa a determinar o lucro da técnica para condições particulares de cada produtor. Portanto, se torna preciso desenvolver uma análise de viabilidade energética e econômica da aplicação em taxa variável de fertilizantes, para avaliar os efeitos dessa técnica. Para tal fim, se estabeleceu um algoritmo com o qual foram calculados indicadores (energia incorporada - EI; lucro da técnica - L) que determinaram a viabilidade energética e econômica da técnica de aplicação em taxa variável de fertilizantes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura de precisão

A agricultura de precisão (AP) foi baseada no princípio do manejo da variabilidade espacial do solo (MULLA; SCHEPERS, 1997). Esta é consequência de interações complexas entre as propriedades físico-químicas do solo e de atividades antropogênicas (CORÁ et al., 2004). A AP é definida como uma prática integral projetada para estudar a variabilidade espacial do solo e otimizar a produção agrícola por meio de informações sobre o cultivo, aplicações de várias técnicas e de práticas de gestão (WHELAN; MCBRATNEY, 2000). Para a AP, as técnicas, a informação e a gestão são elementos-chave para o sucesso do sistema de produção agrícola (ROBERSON, 2000). Nessa prática, realizam-se coletas de dados e processamentos em tempo real dos mesmos para gerar volumes de dados que permitam determinar eficientemente o uso dos recursos agrícolas e melhorem a produtividade e qualidade ambiental do sistema (HARMON et al., 2005).

Essa prática surgiu nas décadas de 1970 e 1980, com a técnica pioneira da aplicação de fertilizantes em taxa variável e se fundamentou em duas operações. A primeira foi a realização de uma amostragem em grade e por meio desta representou-se com maior precisão a distribuição espacial das propriedades químicas do solo. Segundo Gimenez e Zancanaro (2012), uma importante diferença entre a amostragem de solo convencional e a amostragem de solo em grade é a capacidade que tem a amostragem em grade de mensurar e representar a variabilidade por meio de mapas. A segunda operação foi a aplicação de fertilizantes em doses variadas seguindo o mapa de prescrição desenvolvido a partir da amostragem em grade (WHELAN; TAYLOR, 2013).

Na década de 1990, o Sistema de Posicionamento Global NAVSTAR (GPS) foi disponibilizado para uso civil, permitindo o posicionamento na superfície da terra ou próxima a ela de forma rápida e precisa. Dessa forma, foram criados controladores eletrônicos que incorporaram esse sistema e tiveram a capacidade de mensurar a produtividade a partir da medição do fluxo de grãos, a umidade e a largura de trabalho em colhedoras de cereais; esse foi o surgimento do monitor de produtividade. Em 1993, o GPS e o monitor de produtividade estavam plenamente em funcionamento permitindo o mapeamento em escala detalhada da variação da produtividade dentro do campo. A vinculação de dados como a variabilidade de produtividade e a variabilidade espacial do solo marcou o verdadeiro início da AP (WHELAN; TAYLOR, 2013).

Segundo Zhang, Wang e Wang (2002), existem várias fontes de variabilidade que influenciam um sistema de produção agrícola e são elementos-chave para adoção de técnicas de AP:

- variabilidade da produção, analisa a distribuição da produtividade histórica e presente;
- variabilidade do campo, analisa o relevo do terreno (altimetria), declividade, os limites do terreno e suas proximidades;
- variabilidade do solo, analisa os conteúdos de nutrientes no solo (N, P, K, Ca, Mg, C, Fe, Mn, Zn e Cu), as propriedades físicas do solo (textura, densidade, profundidade, resistência mecânica, teor de umidade e condutividade elétrica) e as propriedades químicas do solo como pH, matéria orgânica, salinidade e capacidade de troca catiônica (CTC);
- variabilidade do cultivo, analisa as características fenotípicas do cultivo, exigências nutricionais do cultivo, estresses hídricos, índices de área foliar (IAF), conteúdos de clorofila e qualidade de grãos do cultivo;
- variabilidade dos fatores anômalos, analisa a infestação de plantas invasoras, pragas, doenças e danos provocados pelo vento;
- variabilidade da gestão, analisa a logística das lavouras realizadas no sistema agrícola como o preparo do solo, taxa de semeadura, rotação de cultivos, sistema de irrigação, aplicação de fertilizantes e pesticidas.

Além de analisar as variabilidades que influenciam o sistema de produção agrícola, é importante conhecer os fatores socioeconômicos e tecnológicos externos ao sistema que abrangem a vida do produtor e influencia a versatilidade na adoção de práticas de AP (TEY; BRINDAL, 2012). Os fatores socioeconômicos são todas as características, habilidades e qualidades que o produtor ou pessoal tomador de decisão no sistema possuem; toda nova técnica requer um alto nível de informação, de capital humano e capacitação do pessoal tomador de decisão. Segundo Daberkow e MCbride (1998) são destacados como fatores socioeconômicos a idade do pessoal, tempo de educação formal e de experiência profissional.

Os fatores tecnológicos permitem registrar as informações das práticas agrícolas e determinam potenciais problemas por meio das análises de informações obtidas, também inclui o uso de sistemas de irrigação e computadores (LARSON et al., 2008). Assim, a informática é a parte integrante da AP (ROBERTS et al., 2004).

2.2 Aplicação em taxa variável

A aplicação em taxa variável de fertilizantes é uma técnica habitual em países do primeiro mundo. A técnica foi introduzida nas décadas de 1970 e 1980 no estado de Montana - EUA, mas apresentou um ritmo de adoção lento. Em 2003, o Natural Resources Conservation Service (NRCS) desenvolveu uma iniciativa de conservação no centro-norte de Montana para incentivar aos produtores avaliar a adoção dessa técnica em suas operações. A iniciativa melhorou o uso da água superficial e o estado nutricional das plantas, aplicando a quantidade de nutrientes de acordo com as necessidades da planta em vez de uma média para todo o campo (SCHAEFER, 2007). Existem diferentes tecnologias associadas à aplicação de fertilizantes em taxa variável que podem ser usadas com ou sem um dispositivo Global Navigation Satellite System (GNSS). As principais tecnologias são baseadas em amostragens de solo em grade e sensores.

A aplicação de fertilizantes em taxa variável, baseada na amostragem de solo em grade, ajusta a taxa de aplicação seguindo o mapa resultante da amostragem em grade, também chamado mapa de prescrição. A fertilização usa um receptor GNSS para determinar a posição no campo e um mapa de prescrição com a dose de fertilizante ou corretivo para cada local, enquanto a máquina se desloca pelo campo a dose é alterada. A amostragem de solo em grade pode ser melhorada com a análise de diferentes variáveis de entrada como o tipo de solo, a cor e a textura do solo, o relevo (altimetria), mapas de produtividades anteriores, imagens de sensoriamento remoto e de análises que possam fornecer maior informação específica do cultivo e da área de estudo (GRISSE et al., 2011).

Segundo Grisso et al. (2011) para desenvolver um mapa de prescrição para um local específico, se deve realizar uma amostragem do solo em grade representando as propriedades químicas do solo; com os resultados da análise de solo se deve criar o algoritmo que calcule a dose de fertilizante ou corretivo que exige a cultura; com essa dose é desenhado o mapa de prescrição que controla a taxa de aplicação da máquina aplicadora de fertilizante.

A aplicação de fertilizantes em taxa variável baseada em sensores, tem a capacidade de alterar a taxa de aplicação com nenhum mapeamento prévio ou coleta de dados realizada. O sensor mede as propriedades alvo (usualmente propriedades do solo ou características da cultura) enquanto aplica o fertilizante no local específico. As medições são processadas por mecanismos que regulam a vazão do sistema dosar variando a taxa de aplicação. Esse método não requer necessariamente a utilização de um sistema de posicionamento, ou análise de dados externa antes da realização da fertilização em taxa variável. No entanto, se os dados do sensor

são registrados e georreferenciados por meio do GNSS, a informação pode ser visualizada e usada para planejar operações futuras no local específico (GRISSE et al., 2011).

2.2.1 Sustentabilidade da aplicação em taxa variável

Os efeitos ambientais da intensificação da agricultura levam a eutrofização e diminuição da biodiversidade das áreas regionais e globais desencadeando processos insustentáveis para o ambiente (TILMAN et al., 2001). O significado de “sustentabilidade” foi originalmente usado para se referir a tecnologias agrícolas e industriais que reduziram a degradação ambiental, muitas vezes associada com a atividade econômica (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004). O termo aplicado na agricultura, segundo a American Society of Agronomy (1989) define “Agricultura Sustentável como aquela que em longo prazo, melhora a qualidade ambiental e a qualidade de vida para os agricultores e a sociedade, além de fornecer as necessidades básicas de alimentos e fibras para os humanos e é economicamente viável”.

Inúmeras técnicas e metodologias têm sido aplicadas para tornar os produtos agrícolas mais seguros e reduzir os impactos negativos no ambiente. Esse é o objetivo principal da agricultura sustentável (KROPFF; WALLINGA; LOTZ, 1997; TELLAECHE et al., 2008; ZHANG; WANG; WANG, 2002). Dentro dessas metodologias existe a avaliação de energia que visa estabelecer os fluxos de energia, identificando a demanda total e eficiência, refletida pelo ganho líquido e pela relação saída/entrada (insumos produzidos/utilizados). Nesse processo, todas as entradas e saídas são quantificadas em fluxos de energia. Com a quantificação dessas entradas e saídas calculam-se indicadores que permitem avaliar e monitorar a eficiência do uso de fontes de energia não renováveis e a sustentabilidade do sistema agrícola (BUENO; CAMPOS; CAMPOS, 2000; HETZ et al., 1994, SIQUEIRA; GAMERO; BOLLER, 1999; SILVA; ROMANELLI; REICHARDT, 2010; ROMANELLI; MILAN, 2010a). Entre os indicadores se encontra a energia incorporada (EI), que segundo Patterson (1996) e Stolarski et al. (2014) definem como a relação entre o uso total da energia e sua massa por área produtiva. A importância da análise de energia é fornecer parâmetros necessários para mensurar, interpretar e subsidiar a tomada de decisões (COMITRE, 1995).

Aggarwal (1995) estudou os efeitos do uso de fertilizantes e irrigação na eficiência do uso de energia de culturas (trigo, milho, arroz e feijão-de-corda), avaliando a eficiência da energia na utilização de fertilizantes nitrogenados. Demonstrou que a entrada de energia dos

fertilizantes e irrigação poderia ser consideravelmente reduzidas sem diminuir as produtividades com um manejo criterioso nessas práticas.

Erdal et al. (2007) determinaram o consumo de energia de entrada e saída utilizados na produção de beterraba açucareira, em Tokat, Turquia. Os resultados revelaram que o consumo total de energia na produção de beterraba açucareira foi $39.685 \text{ MJ ha}^{-1}$, da qual 49 % era energia de fertilizantes e 24 % era do óleo diesel. Se determinou que 82 % da energia total de entrada era energia não-renovável. Portanto, surge uma necessidade de realizar e ensinar aos produtores práticas de eficiência energética para estabelecer sistemas de produção sustentáveis, sem perturbar os recursos naturais.

Segundo Colaço et al. (2012), a aplicação de nitrogênio em taxa variável apresentou melhor desempenho em termos de eficiência de uso de energia do que as práticas convencionais para duas áreas de trigo, no Paraná, Brasil. Os resultados demonstraram uma redução de 28% ($1,8 \text{ MJ kg}^{-1}$) para a primeira área e 11 % ($0,6 \text{ MJ kg}^{-1}$) para segunda área na energia incorporada e maiores rentabilidades energéticas de 41 % (0,9) e 12 % (0,3) (Energy Return On Investment - EROI) para cada área respectivamente.

Franco Junior, Milan e Romanelli (2014) determinaram o total de energia demandada para a produção de laranja com diferentes eficiências operacionais. As principais fontes de demanda de energia na produção foram o combustível (39 %), pesticidas (31 %) e fertilizantes (24 %), identificado assim, os insumos que merecem maior atenção na tomada de decisão.

Veiga et al. (2015) avaliaram 23 culturas comparando em termos de energia incorporada por unidade funcional. Os resultados registraram que em 17 culturas os fertilizantes apresentaram a maior energia de entrada por área, sendo destaque a cebola ($41,34 \text{ GJ ha}^{-1}$), café ($39,34 \text{ GJ ha}^{-1}$) e banana ($33,25 \text{ GJ ha}^{-1}$). Neste contexto o nitrogênio foi o fertilizante de maior energia, representando 74 % (cebola), 77 % (café) e 93 % (banana) da energia total dos fertilizantes. A soja teve o valor mais baixo, porque não houve uso de nitrogênio como fertilizante.

A maioria de investigações mostraram a importância da fertilização e o uso dos insumos (N-P-K) para os sistemas agrícolas, destacando a avaliação energética como uma ferramenta de tomada de decisão que permite conhecer o efeito da prática com o ambiente. No entanto, ainda se carecem de estudos energéticos sobre a técnica de fertilização, que demonstrem os benefícios e desvantagens para o produtor agrícola.

2.2.2 Importância econômica da aplicação taxa variável

Existem vários estudos focados em estimar a viabilidade econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável. Carr et al. (1991) concluíram para cultura de trigo que as ferramentas auxiliares como: a amostragem de solo, a análise de dados (mapeamento) e os equipamentos não consistiam em maior rentabilidade para a cultura (SWINTON; LOWENBERG-DEBOER, 1998). Bullock, Lowenberg-DeBoer e Swinton (2002) afirmam que vários estudos comparativos entre a taxa variável e taxa fixa de aplicação falham em provar os benefícios da AP por utilizar recomendações agronômicas regionais em vez de curvas de resposta específicas para cada área.

Johnson e Richard (2009) avaliaram a taxa fixa e variável na aplicação de calcário na cana-de-açúcar no estado da Louisiana, EUA. Os resultados demonstraram que nenhuma das taxas de aplicação de calcário melhorou a produtividade, mas a aplicação em taxa fixa aumentou significativamente o pH do solo e diminuição da necessidade de calagem. Boyer et al. (2010), no estudo de quatro anos em Oklahoma, EUA, não conseguiram maior benefício econômico ao utilizar taxa variável de nitrogênio na cultura do trigo.

Por outro lado, Xiang al. (2008) cogitaram benefícios econômicos da AP, sendo a maioria delas relacionadas à utilização da aplicação de fertilizantes em taxa variável para aumentar a eficiência dos mesmos. Babcock e Pautsch (1998), por meio da transferência da técnica (aplicação taxa fixa para variável), demonstraram aumentos modestos nas produtividades dos cultivos de milho (Iowa, EUA), que foram de 3,75 US\$ ha⁻¹ até 18,35 US\$ ha⁻¹.

Estudos realizados por Lambert e Lowenberg-DeBoer (2000) confirmaram a viabilidade econômica da técnica nos EUA com base em 108 casos, mostrando viabilidade de sua adoção. O estudo econômico indicou que 63 % destes casos obtiveram benefícios e resultados positivos pela adoção da técnica, 26 % deram resultados incertos pela variabilidade da gestão dentro das lavouras e 11 % deram resultados negativos.

Na cultura do milho e da soja, Bongiovanni e Lowenberg-DeBoer (2000) estimaram aumento no retorno anual de até 19,55 US\$ ha⁻¹ utilizando taxa variável na aplicação de calcário. Yang, Everitt e Bradford (2001) reportaram aumento da produtividade de sorgo com menor utilização de nitrogênio e fósforo. Também comprovaram que o tratamento de taxa variável teve retornos econômicos positivos em dois anos consecutivos (27 US\$ ha⁻¹ em 1997 e 23 US\$ ha⁻¹ em 1998) comparado com o tratamento de taxa fixa.

Estudos indicaram uma alta rentabilidade e sustentabilidade ambiental usando menor quantidade de nitrogênio na aplicação em taxa variável (KILIAN; HURLEY; MALZER, 2001). Robertson, Lyle e Bowden (2008) obtiveram ganhos desde 5 US\$ ha⁻¹ até 44 US\$ ha⁻¹ em 199 propriedades de cereais no ocidente da Austrália utilizando o manejo localizado de nutrientes. Molin et al. (2010) avaliaram fertilizações em taxa variável para cultura do café; os resultados alcançados foram uma redução de 23 % em adubos fosfatados, aumento de 13 % para os potássicos e aumento na produtividade de 34 % em um primeiro ano de avaliação.

Lopes (2010) comparou a aplicação de fertilizantes e corretivos em taxas variadas com a prática convencional de fertilização em pomares de laranjeira, durante duas safras de produção. As fertilizações em taxa variável resultaram em economia de 230 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 5 kg ha⁻¹ de fósforo e 257 kg ha⁻¹ de potássio, aumentando em mais que o dobro as produtividades nas áreas de estudo, indicando o potencial do uso desta ferramenta.

Os resultados econômicos sugerem que a técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável não pode ser generalizada, e requer um estudo detalhado de cada caso, tanto o processo de tomada de decisões para aplicar os insumos como para a interpretação dos resultados financeiros (MOLIN, 2001). Estudos de análise econômica sobre a adoção da aplicação de fertilizantes em taxa variável no Brasil ainda são incipientes (SILVA et al., 2007). Com tudo, espera-se que desenvolver mais pesquisas que proporcionem informações necessárias ao agricultor para estimular o interesse na técnica e reconhecê-la como uma ferramenta adicional no processo de tomada de decisão.

2.2.3 Importância da agricultura de precisão em culturas perenes (café e laranja)

No Brasil, para as culturas perenes como a laranja (*Citrus sinensis* L.) e o café (*Coffea arabica* L.), os estudos sobre a variabilidade da produção são ainda elementares. Entretanto, as pesquisas estão evoluindo e já é possível obter informações das possíveis causas da variabilidade na produção (FAULIN, 2010).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café e segundo maior consumidor deste produto. Para o ano 2015 sua safra alcançou 2,59 milhões de toneladas de café beneficiado, obtendo uma produção de café arábica de 1,92 milhões de toneladas e 671,4 mil de café conilon, com uma área plantada de 2,25 milhões de hectares e uma produtividade estimada de 1,34 t ha⁻¹ (CONAB, 2015). Em 2015, representou 7 % das exportações do agronegócio brasileiro, ocupando a quinta posição no ranking, com receita de US\$ 6,16 bilhões.

Os principais destinos foram os Estados Unidos, Alemanha, Itália, Japão e Bélgica. Dentro de sua cadeia produtiva é responsável pela geração de mais de oito milhões de empregos no país (BRASIL, 2016).

No tocante a laranja, o Brasil foi responsável por 60 % da produção mundial de suco de laranja e o maior exportador do produto. Sua produção anual em média é de mais de 18 milhões de toneladas de laranja (30 % da safra mundial da fruta) (CONAB, 2015). O principal comprador do suco é a União Europeia e a maior parte das importações mundiais (85 %), é absorvida por apenas três mercados: Estados Unidos, União Europeia e Canadá. Além do suco, são extraídos óleos essenciais e líquidos aromáticos. O bagaço de citros, com alto teor energético, é um subproduto industrial de expressivo valor econômico, para alimentação animal (BRASIL, 2016).

A evolução da cafeicultura e citricultura brasileira tem demonstrado a importância de pesquisas concentradas em diversas áreas e técnicas. Entre as principais técnicas desenvolvidas pelos setores, destacam-se a fertilização como uma prática complementar no conjunto solo-planta-clima (PASSOS, 2012). Segundo Fageria (1998), o custo de fertilizantes contribui, em média, com aproximadamente 30 % do custo total da produção em culturas anuais; a otimização da eficiência nutricional é fundamental para melhorar a produtividade e reduzir o custo de produção.

Rocha e Lamparelli (1998) determinaram que as fertilizações convencionais na cultura de café realizadas pelos produtores implicaram taxas de aplicações excessivas em determinadas áreas do campo e insuficientes em outras. O conhecimento detalhado da variabilidade espacial dos atributos da fertilidade pode otimizar as aplicações localizadas de corretivos e fertilizantes, melhorando dessa forma o controle do sistema de produção agrícola, reduzindo os custos gerados pela aplicação de insumos e a degradação ambiental provocada pelo excesso destes nutrientes.

Faulin (2010) comprovou os benefícios da fertilização em doses variadas ao verificar economias de fertilizantes nitrogenados e potássicos e, ao mesmo tempo, ganho de produtividade em comparação à prática convencional de aplicação para cultura de café. Silva et al. (2007), por meio da caracterização da variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café, apresentaram valores baixos de alcance nos atributos químicos, com exceção dos nutrientes fósforo e potássio, evidenciando a baixa homogeneidade espacial do solo. Também a grande amplitude de variação destes atributos químicos justifica a aplicação diferenciada e localizada de fertilizantes na lavoura cafeeira.

Bragança et al. (2006) encontraram redução na dose de nitrogênio em relação às doses normalmente recomendadas para o cafeeiro Conilon. O potássio não influenciou a produção. O fósforo aumentou a produtividade; no entanto, não foi possível determinar a dose máxima econômica.

Farias et al. (2003) avaliaram a variabilidade espacial de produtividade e tamanho de frutos em pomares de laranja, utilizando geoestatística (mapas de krigagem). Se verificou maior variabilidade para produtividade e tamanho de frutos nas áreas irrigadas do que nas áreas não irrigadas. A variabilidade espacial de pragas e doenças também foi estudada por Maruyama, Barbosa e Toscano (2006) e Leal et al. (2010), com a finalidade de elaborar planos de amostragens e tomada de decisão para o controle da cigarrinha (*Oncometopia faciali*) e do greening (*Huanglongbing*) em pomares de laranja.

Colaço e Molin (2014) demonstraram o potencial da tecnologia em aumentar a produtividade e melhorar parâmetros da fertilidade do solo (reduzir regiões com excesso de nutrientes e aumentar áreas com nível adequado dos elementos), mas constante monitoramento deve ser adotado para que o manejo da fertilidade seja adequado e não comprometa o rendimento da cultura.

Embora tenham obtido resultados positivos para a maioria dos estudos, em relação ao uso da fertilização em taxa variável, no entanto, nota-se a necessidade de aprofundar e acompanhar mais as pesquisas, porque na maioria delas foram conduzidas por apenas dois anos, tempo escasso para revelar os efeitos da fertilização em taxa variável no comportamento da produtividade.

Desse modo, as hipóteses estabelecidas no presente trabalho foram que a aplicação de fertilizantes em taxa variável é uma técnica que visa otimizar insumos em relação ao sistema convencional de aplicação fixa de fertilizantes. Também, é uma técnica que direciona gerar maior lucro em comparação ao sistema convencional de fertilização. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade energética e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável em culturas como a laranja (*Citrus sinensis* L.) e o café (*Coffea arabica* L.).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas: elaboração e verificação do algoritmo por meio de planilha eletrônica baseado em dados de dois estudos de caso (café e laranja); proposição de cenários e análises de sensibilidade para aplicação de fertilizantes em taxa variável.

3.1 Algoritmo

Para determinar a viabilidade energética e econômica da aplicação em taxa fixa e variável de fertilizantes, criou-se um algoritmo com as operações (amostragem e fertilização) necessárias para aplicação (Figura 1). O algoritmo se iniciou (1) com o tipo de fertilização que se pretendia realizar (fixa ou variável - 2). Para a aplicação em taxa fixa se utilizou uma amostragem de solo convencional (3), composta de uma única amostra por área (4). Enquanto para aplicação em taxa variável, se realizou uma amostragem de solo em grade (5), composta de várias amostras georreferenciadas (6) visando a conhecer a variabilidade espacial da área.

Para a realização da amostragem de solo se necessitaram de informações como a capacidade de campo operacional (CcO_{am}), as características do maquinário e a mão-de-obra requerida na operação (o cálculo do item 7 é detalhado na análise de energia números do 4 até 11). O resultado da amostragem de solo convencional foi utilizado na elaboração da prescrição de fertilizantes (8) que calculou uma única taxa de aplicação usando fertilizantes formulados (9). Enquanto os resultados da amostragem de solo em grade (georreferenciada) permitiram a elaboração do mapa de prescrição (10) que calculou as taxas para os fertilizantes (11 - aplicações isoladas de nitrogênio, fósforo, potássio e calcário). O mapa de produtividade (12), forneceu informações de referência para uma próxima amostragem de solo (georreferenciada) e permitiu visualizar a variabilidade da produtividade (13) no cultivo.

Para a realização da fertilização se requereu informações como a capacidade de campo operacional (CcO_{Fer}), as características do maquinário e da mão-de-obra utilizada durante a operação (o cálculo do item 14 é detalhado na análise de energia números do 4 até 11).

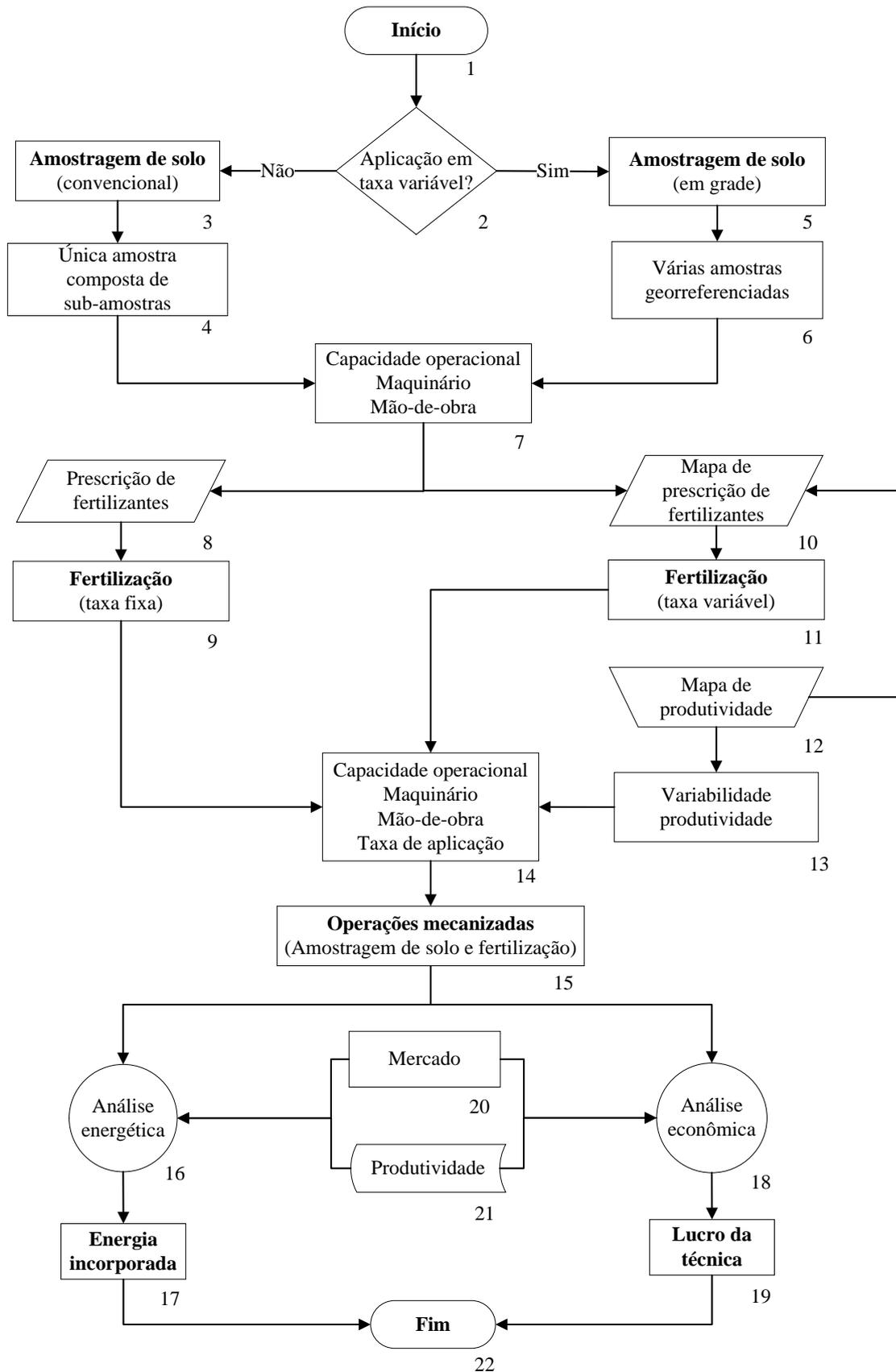


Figura 1- Algoritmo da análise da viabilidade energética e econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável e taxa fixa (Simbologia adaptada de WINKELMANN; WEIß, 2011)

Com as operações mecanizadas (15) se realizou a análise de energia (16), que avaliou a viabilidade ambiental das operações por meio do indicador de energia incorporada (17). E outra análise econômica (18), a qual calculou a viabilidade econômica das operações por meio do indicador lucro da técnica (19). Ambos indicadores necessitaram de informações do mercado (20) e da produtividade (21) para ser calculados; dessa forma, foi finalizado o algoritmo (22).

3.1.1 Algoritmo – Análise de energia

A análise de energia determinou a energia incorporada (EI) das operações (amostragem e fertilização) e dos materiais que intervêm nelas (mão-de-obra, maquinário e insumos) por meio dos fluxos de energia (Figura 2).

O algoritmo (Figura 2) se iniciou (1) com as operações de amostragem de solo (2) e a fertilização (3) requeridas para a aplicação de fertilizantes. Para determinar a energia incorporada dessas operações se requereu informações sobre a mão-de-obra (4), o maquinário (5) e os insumos (6) utilizados em cada operação.

Na mão-de-obra (4), foram necessários o número de funcionários e a capacidade de campo operacional (7), conforme a operação mecanizada realizada, assim se determinou a demanda de horas de mão-de-obra por área (8). Para determinar a capacidade de campo da amostragem (CcO_{am}) se relacionou a área e tempo total amostrado; o tempo total amostrado foi o número total de amostras pelo tempo unitário da amostra; para determinar esse tempo unitário de amostra se determinou a densidade amostral, a velocidade de deslocamento entre amostras, o tempo de extração da amostra, o número de sub-amostras e o tempo de preparação da sub-amostras. Para calcular a capacidade de campo da fertilização (CcO_{fer}), se requereu informações da largura, velocidade e eficiência do maquinário que se empregou (distribuidor de fertilizante) na operação.

As características referentes ao maquinário (5) massa, vida útil e capacidade de campo da operação foram relacionadas para determinar sua depreciação física (9). O consumo de combustível (10) se calculou para os dois maquinários utilizado nas operações: amostragem de solo – veículo (quadriciclo) e fertilização – distribuidor de fertilizantes. Para o maquinário da amostragem de solo (quadriciclo) se relacionou a capacidade de campo da operação com a potência bruta do motor e o fator de consumo específico, segundo Alvarado (2004), para motores diesel: $0,295 \text{ L kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$, e para motores gasolina: $0,496 \text{ L kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Enquanto para o maquinário da fertilização (distribuidor de fertilizante), se relacionou o consumo horário do

conjunto de máquinas com a potência requerida na tomada de potência (TDP0 e a capacidade de campo da operação. Para os insumos (6) se determinou a taxa de fertilizantes por área (11), segundo a prescrição de fertilizantes.

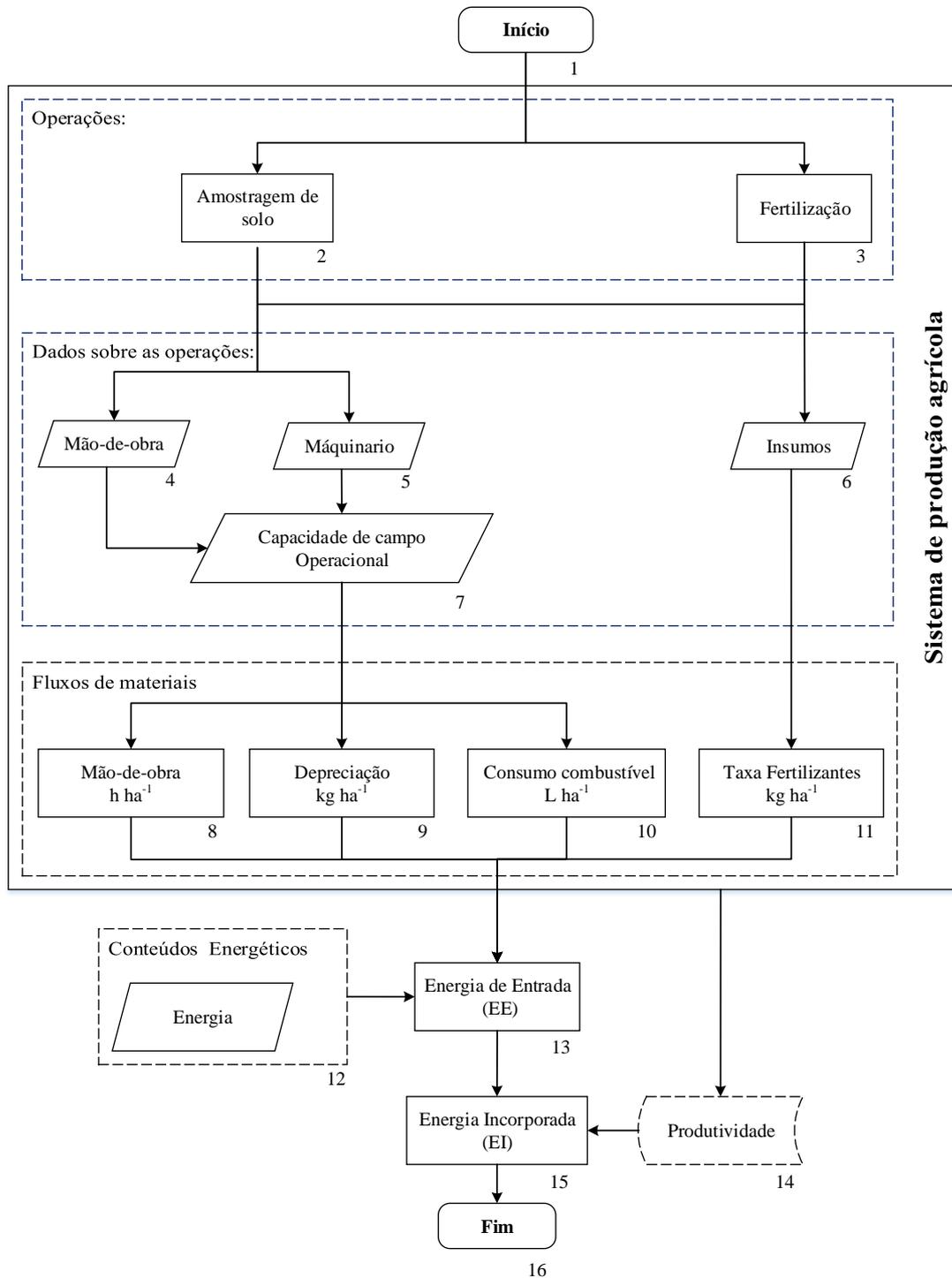


Figura 2- Algoritmo da análise de energia desenvolvido para calcular a energia incorporada das operações envolvidas na fertilização (Adaptado de ROMANELLI; MILAN, 2010b)

Somando cada um dos materiais (mão-de-obra - 8, depreciação - 9, consumo de combustível - 10, taxa de fertilizantes -11) utilizados nas duas operações e multiplicado pelos seus respectivos conteúdos energéticos (12) se calculou a energia de entrada – EE (13). Relacionando-se os fluxos de energia de entrada com a produtividade (14) se determinou a energia incorporada – EI (15) para todo o processo de fertilização. Com o cálculo desse indicador finalizou o algoritmo (16).

O uso dessa metodologia permitiu calcular o gasto energético da fertilização, por meio da energia incorporada (EI). A energia incorporada refere-se à relação entre a energia de entrada de todos os materiais (insumos, maquinário, mão-de-obra) necessários para realizar a fertilização e sua produtividade (Mg ha^{-1}). A energia incorporada indica a relação de biomassa produzida com a energia demandada durante a fertilização. Para calcular a alteração de energia incorporada pela aplicação em taxa variável conforme a eq. (1).

$$\Delta EI = EI_{TV} - EI_{TF} \quad (1)$$

Em que:

ΔEI = Alteração de energia incorporada pela aplicação em taxa variável (MJ Mg^{-1});

EI_{TV} = Energia incorporada da aplicação de fertilizantes em taxa variável (MJ Mg^{-1});

EI_{TF} = Energia incorporada da aplicação de fertilizantes em taxa fixa (MJ Mg^{-1}).

O cálculo da energia incorporada para as aplicações de fertilizantes foi determinado conforme a eq. (2) (ROMANELLI; RAUCCI, 2011).

$$EI = \frac{EE}{Y} \quad (2)$$

Em que:

EI = Energia incorporada (MJ Mg^{-1});

EE = Energia de entrada (MJ ha^{-1});

Y = Produtividade (Mg ha^{-1}), (Anexo A e B).

Para calcular a energia de entrada, se somaram as energias dos materiais (mão-de-obra, maquinário e insumos,) que intervêm em cada operação (amostragem de solo e a fertilização) (ROMANELLI; MILAN, 2010b).

$$EE = E_{MO} + E_{COP} + E_{DM} + E_{NPK} \quad (3)$$

Em que:

EE = Energia de entrada ($MJ ha^{-1}$);

E_{MO} = Energia de mão-de-obra empregada em cada operação ($MJ ha^{-1}$);

E_{COP} = Energia do consumo de combustível por cada operação ($MJ ha^{-1}$);

E_{DM} = Energia da depreciação do maquinário usados em cada operação ($MJ ha^{-1}$);

E_{IN} = Energia dos insumos: nitrogênio, fósforo, potássio e calcário ($MJ ha^{-1}$).

A energia de mão-de-obra foi calculada conforme o trabalho humano aplicado através da mecanização (seja o motorista ou o pessoal de apoio), multiplicado por seu conteúdo energético, conforme a eq. (4). (ROMANELLI; MILAN, 2010b).

$$E_{MO} = \frac{\#Trab}{CcO} \times Cte_{Mo} \quad (4)$$

Em que:

$\#Trab$ = Número de trabalhadores que atuam na operação mecanizada.

Cte_{Mo} = Conteúdo energético de mão-de-obra ($2,2 MJ h^{-1}$), Campos et al. (1998).

A capacidade de campo operacional (CcO) foi determinada a partir das características do maquinário e sua relação com a máquina motriz (velocidade e eficiência) durante a execução da operação, para amostragem de solo foi por meio das eq. (5), (6), (7) e (8) (SPEKKEN et al., 2012).

$$CcO_{am} = \frac{AT_{am}}{TT_{am}} \quad (5)$$

Em que:

CcO_{am} = Capacidade de campo da amostragem de solo ($ha h^{-1}$);

AT_{am} = Área total amostrada (ha), (Anexo A e B);

TT_{am} = Tempo total amostrado (h).

Para calcular o tempo total amostrado foi dado pela eq. (6).

$$TT_{am} = NT_{am} \times \frac{T_{am}}{3600} \quad (6)$$

Em que:

NT_{am} = Número total de amostras (unidade);

T_{am} = Tempo unitário de amostra (s);

3600 = Fator de conversão de segundo para hora.

O número total de amostra foi determinado pela eq. (7).

$$NT_{am} = \frac{AT_{am}}{De_{am}} \quad (7)$$

Em que:

De_{am} = Densidade amostral (ha amostra⁻¹), (Anexo A e B).

O tempo unitário de amostra foi calculado pela eq. (8).

$$T_{am} = \frac{(\sqrt{De_{am} \times 10000} \times V_{desl} + T_{Sam} \times N_{Sam} + TMIE)}{Efc} \quad (8)$$

Em que:

V_{desl} = Velocidade de deslocamento entre amostras (m s⁻¹), (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE, 2011);

T_{Sam} = Tempo para extração de uma sub-amostra (uma tradagem por ex.) e movimentação até o local da próxima (s);

N_{Sam} = Número de sub-amostras que compõe uma amostra completa;

TMIE = Tempo de preparação (mistura sub-amostras, identificação e embalagem) (s);

Efc = Eficiência de campo, representando a fração do tempo efetivamente usada em atividade amostral (decimal);

10000 = Fator de conversão de metros quadrados para hectare.

A raiz quadrada da densidade amostral multiplicada por 10000 dá a distância entre o local de uma amostra até uma amostra mais próxima a ser extraída (m).

Para determinar a CcO da fertilização se realizou por meio da eq. (9) (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE, 2011; ROMANELLI; MILAN, 2010b; MOLIN; MILAN, 2002; WITNEY, 1988).

$$CcO_{Fer} = \frac{V \times L \times Efc}{10} \quad (9)$$

Em que:

CcO_{Fer} = Capacidade de campo da fertilização (ha h⁻¹);

V = Velocidade de trabalho (km h⁻¹), (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE, 2011);

L = Largura de trabalho (m);

Efc = Eficiência operacional (decimal), American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASABE (2011);

10 = Fator de conversão de metros quadrados para hectare.

A energia do consumo de combustível foi estimada para cada operação de acordo com suas exigências. Se determinou com base no consumo horário do maquinário, a CcO, o número de trajetos e o conteúdo energético do combustível, eq. (10). (MOLIN; MILAN, 2002).

$$E_{COP} = \frac{C_{hora} \times \#Apl \times Cte_c}{CcO} \quad (10)$$

Em que:

E_{COP} = Energia do consumo de combustível por cada operação mecanizada ($MJ ha^{-1}$);

$\#Apl$ = Numero de percursos que se realiza na operação mecanizada (Anexo A e B);

Cte_c = Conteúdo energético do combustível: diesel ($45,7 MJ L^{-1}$), Boustead e Hancock (1979) e gasolina ($42,4 MJ L^{-1}$), ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA (2016).

C_{hora} = Consumo horário ($L h^{-1}$).

Se determinou o consumo horário para os dois maquinários utilizado nas operações: amostragem de solo – veículo (quadriciclo) e fertilização – distribuidor de fertilizantes. Para operação amostragem de solo se utilizou a eq. (11) segundo Alvarado (2004).

$$C_{hora} = FC \times PB_{MOTOR} \times GE \quad (11)$$

Em que:

FC = Fator de consumo específico (motores: diesel $0,295 L kW^{-1} h^{-1}$, gasolina $0,496 L kW^{-1} h^{-1}$), Alvarado (2004);

PB_{MOTOR} = Potência bruta do motor (kW);

GE = Grau de esforço da operação (decimal).

Para operação de fertilização se calculou por meio da eq. (12).

$$C_{hora} = PR_{TDP} \times CE \quad (12)$$

Em que:

PR_{TDP} = Potência requerida na TDP (kW).

CE = Consumo específico ($L kW^{-1} h^{-1}$).

Para calcular a potência requerida na TDP que tracionou a máquina foi necessário conhecer a força demandada pela máquina, a velocidade de trabalho e o fator de transmissão de potência pelo rodado, além da textura do solo como se apresentou na eq. (13) e (14) (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE, 2011).

$$PR_{TDP} = \frac{D \times V}{CTr \times 3600} \quad (13)$$

Em que:

D = Força requerida pela máquina (N);

V = Velocidade de trabalho (km h⁻¹);

CTr = Fator de transmissão de potência pelo rodado (decimal);

3600 = Fator de conversão de segundo para hora.

$$D = Fi\{A + B(V) + C(V)^2\}LT \quad (14)$$

Em que:

F = Fator adimensional para ajuste do parâmetro textura do solo;

i = 1 para textura fina, 2 para média e 3 para grossa;

A, B e C = Parâmetros específicos da máquina;

T = Profundidade para equipamentos de preparo de solo (cm) ou 1 adimensional para equipamentos que não operem em profundidade.

Para a determinação do consumo horário (CE) do maquinário tracionado se aplicou o modelo proposto por Milan (1992), que determinou fatores fixos para o consumo e uma razão do uso de potência disponível na TDP como se indicou na eq. (15).

$$CE = 0,288 + \frac{0,0847}{RUP_{TDP}} \quad (15)$$

Em que:

RUP_{TDP} = Razão de uso de potência disponível na TDP (decimal).

A razão do uso de potência disponível na TDP, se determinou a partir da relação entre a potência requerida pela máquina e a disponibilizada pelo trator na TDP, conforme na eq. (16).

$$RUP_{TDP} = \frac{PR_{TDP}}{PD_{TDP}} \quad (16)$$

Em que:

PD_{TDP} = Potência disponível na TDP (kW).

A potência disponível na tomada de potência (TDP) do trator teve relação direta com a potência do motor do mesmo, sendo assim determinada por meio da multiplicação do fator fixado apresentado na eq. (17) (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE, 2011).

$$PD_{TDP} = PB_{MOTOR} \times 0,83 \quad (17)$$

Para calcular a energia da depreciação física do maquinário utilizado nas operações, se relacionou a massa e vida útil do maquinário com a capacidade de campo operacional, multiplicado por seu conteúdo energético, como se apresentou na eq. (18) (ROMANELLI; MILAN, 2010b).

$$E_{DM} = \frac{m_{maq}}{VuH_{maq} \times CcO} \times Cte_{Maq} \quad (18)$$

Em que:

E_{DM} = Energia da depreciação do maquinário requerido em cada operação ($MJ ha^{-1}$);

m_{maq} = Massa do maquinário (kg);

VuH_{maq} = Vida útil do maquinário (h), American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASABE (2011);

Cte_{maq} = Conteúdo energético da depreciação maquinário ($68,9 MJ kg^{-1}$), Ulbanere e Ferreira (1989).

A energia dos insumos (nitrogênio, fósforo, potássio e calcário) foi calculada por meio da soma das taxas de aplicação e a multiplicação de seus respectivos conteúdos energéticos apresentado na eq. (19).

$$E_{IN} = Q_{IN} \times Cte_{IN} \quad (19)$$

Em que:

E_{IN} = Energia dos insumos: nitrogênio, fósforo, potássio e calcário ($MJ ha^{-1}$).

Q_{IN} = Quantidade de insumo para aplicar ($kg ha^{-1}$);

Cte_{IN} = Conteúdo energético dos insumos: nitrogênio ($74,0 MJ kg^{-1}$), fósforo ($12,5 MJ kg^{-1}$), potássio ($6,7 MJ kg^{-1}$), e calcário ($1,7 MJ kg^{-1}$); Pellizzi (1992).

3.1.2 Algoritmo – Análise econômica

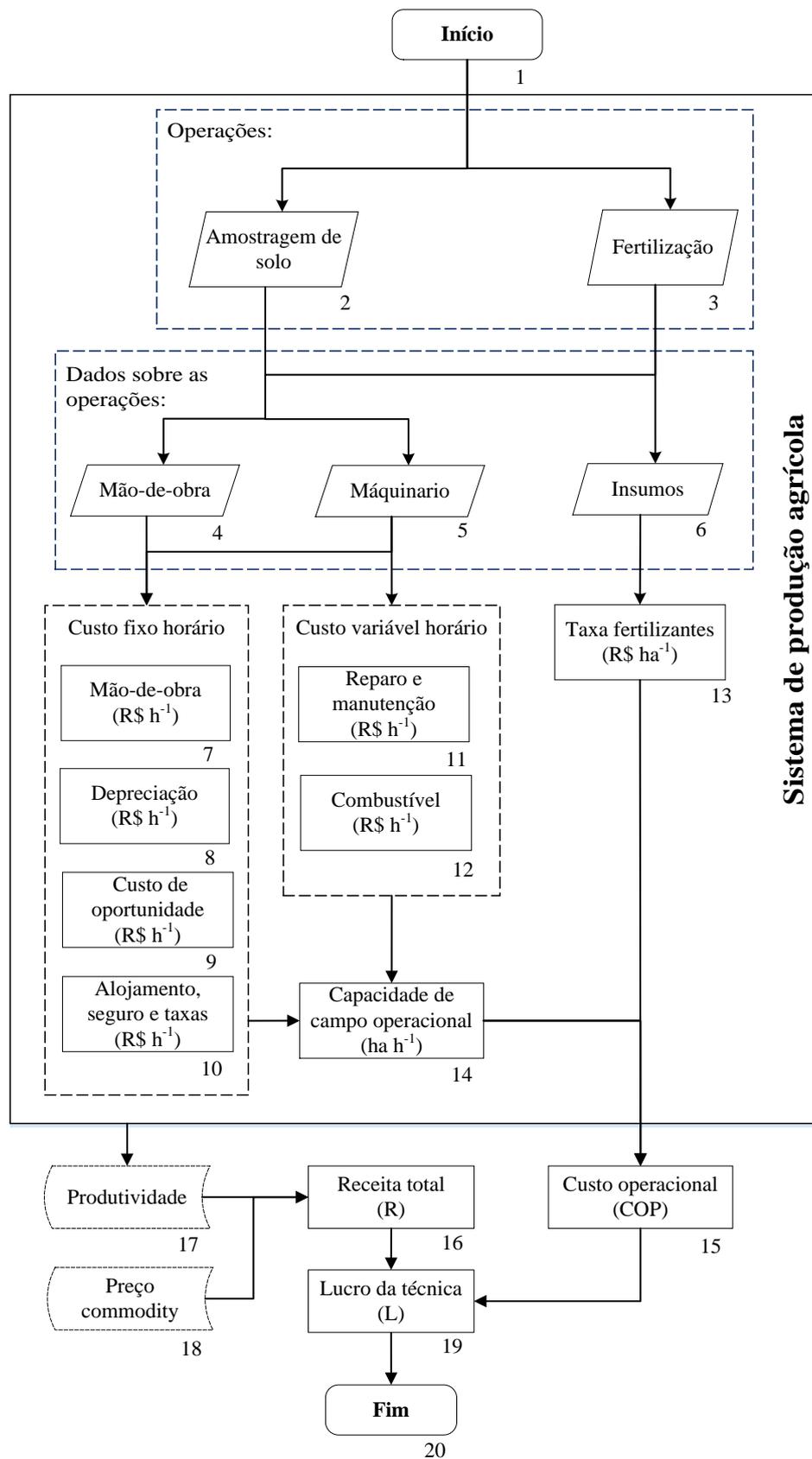
A análise econômica determinou o lucro e custo operacional da técnica de aplicação de fertilizantes. O algoritmo para determinar a viabilidade econômica (Figura 3) se iniciou (1) com as operações requeridas para aplicação de fertilizantes: amostragem de solo (2) e fertilização (3). Para calcular o lucro dessas operações foi necessário determinar os custos operacionais dos componentes envolvidos nas operações: mão-de-obra (4), maquinário (5) e insumos (6).

Para calcular o custo da mão-de-obra utilizada em cada operação se determinou a partir do salário e carga horária mensal do trabalhador, assim como o número de trabalhadores envolvidos na operação, deste modo se calculou o custo de mão-de-obra por hora trabalhada (7). Os custos referentes ao maquinário foram a depreciação (8), que representa a perda de valor do mesmo, devido ao tempo de uso; se determinou relacionando seu valor inicial, valor final, vida útil e número de horas trabalhadas no ano pelo maquinário. Outros custos a considerar foram a taxa de juros ou custo de oportunidade (9) sobre o capital investido, se determinou em relação ao valor inicial, valor final e número de horas trabalhadas no ano pelo maquinário multiplicado por uma taxa de juros (i) fixada pela entidade financeira (BANCO CENTRAL DO BRASIL - BCB, 2016); a taxa de alojamento, seguro e taxas (10), para cobrir os gastos do galpão, se calculou em referência ao Fator de Alojamento, Seguros e Taxas (FAST) e ao número de horas trabalhadas no ano pelo maquinário. Somando-se todos os custos de mão-de-obra (7), depreciação (8), custo de oportunidade (9), alojamento, seguro e taxas (10), obteve-se o custo fixo horário.

Também se determinou os custos variáveis horários como foram os custos do reparo, manutenção (11) e o combustível (12) do maquinário. Para determinar o reparo e manutenção se baseou no Fator de Reparo, Manutenção (FRM) e na vida útil estimada segundo a American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASABE (2011). Enquanto o custo do combustível foi relacionado com o preço do combustível (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP, 2015) e o consumo horário do maquinário calculado nas equações 10 até 16.

Os insumos (6) se referiram às taxas de aplicação de fertilizantes indicadas pela prescrição, que foram multiplicadas por seus respectivos preços (INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA - IEA, 2015) para determinar o custo das taxas de fertilizante por área (13). A soma dos custos fixos e variáveis horários relacionados com a capacidade de campo (14) de cada operação determinaram o custo operacional; para calcular os custos operacionais totais (15) se adicionou os custos das taxas de fertilizante por área.

Para determinar o lucro da técnica (19) se calculou a receita total (16) e subtraiu o custo operacional. A receita foi calculada em relação à produtividade (17) do sistema de produção e ao preço da commodity (18) no mercado (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA, 2016). Com o cálculo desse indicador finalizou o algoritmo (20).



Produtividade

17

Receita total (R)

16

Custo operacional (COP)

15

Preço commodity

18

Lucro da técnica (L)

19

Figura 3- Algoritmo da análise econômica desenvolvido para calcular o custo operacional das operações envolvidas na fertilização (Adaptado de ROMANELLI; MILAN, 2010b)

Segundo Marion (2009), o lucro é considerado como a receita total menos todos os custos de oportunidade da produção dos bens e serviços vendidos (no caso o custo operacional). Para calcular a alteração do lucro pela aplicação em taxa variável conforme à eq. (20)

$$\Delta L = L_{TV} - L_{TF} \quad (20)$$

Em que:

ΔL = Alteração do lucro pela aplicação em taxa variável (R\$ ha⁻¹);

L_{TV} = Lucro da aplicação de fertilizantes em taxa variável (R\$ ha⁻¹);

L_{TF} = Lucro da aplicação de fertilizantes em taxa fixa (R\$ ha⁻¹).

O cálculo do lucro para as aplicações de fertilizantes foi determinado conforme a eq. (21)

$$L = R - COP \quad (21)$$

Em que:

L = Lucro da técnica (R\$ ha⁻¹);

R = Receita total (R\$ ha⁻¹);

COP = Custo operacional (R\$ ha⁻¹).

A receita total é considerada como o preço pago ao produtor pela commodity no mercado (anexo F) relacionada com a produtividade (anexo A e B).

$$R = Y \times P_{\$} \quad (22)$$

Em que:

Y = Produtividade (Mg ha⁻¹);

$P_{\$}$ = Preço pago ao produtor pela commodity no mercado (R\$ Mg⁻¹), Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA (2016).

O custo operacional foi o produto de todos os custos demandados em todas operações. Determina a relação entre o custo horário do equipamento ou conjunto e sua capacidade de trabalho. Por meio dele, podem-se realizar comparações entre diferentes sistemas mecanizados. O custo operacional foi fornecido pela eq. (23) (WITNEY, 1988).

$$COP = \frac{CH}{CCO} + C_{IN} \quad (23)$$

Em que:

COP = Custo operacional (R\$ ha⁻¹);

CH = Custo horário (R\$ h⁻¹);

CcO = Capacidade de campo operacional (ha h⁻¹);

C_{IN} = Custo da taxa de fertilizantes (R\$ ha⁻¹).

O custo horário do maquinário e equipamentos foi conforme à eq. (24) (MARION, 2009).

$$CH = CFH + CVH \quad (24)$$

Em que:

CFH = Custo fixo horário (R\$ h⁻¹);

CFV = Custo fixo variável (R\$ h⁻¹).

Os custos fixos horários do maquinário e equipamentos é determinado a partir da mão-de-obra, depreciação, custo de oportunidade, alojamento, seguro e taxas, eq. (25) e (26) (MOLIN; MILAN, 2002). Para os custos referentes à mão-de-obra, maquinário e taxas se utilizou o banco de dados do Instituto de Economia Agrícola - IEA (2015) e do Banco Central do Brasil - BCB (2016) (anexo C e D).

$$CFH = C_{MO} + \frac{\left\{ \overset{\text{Depreciação}}{VI} \times \left[\left(\frac{1 - VF}{VUA} \right) + \left(\frac{1 + VF}{2} \times i \right) + \overset{\text{Custo de oportunidade}}{\text{Alojamento, seguros e taxas}} \right] + \text{FAST} \right\}}{NHTA} \quad (25)$$

Em que:

CMO = Custo de mão-de-obra horário da operação (R\$ h⁻¹);

VI = Valor inicial do maquinário (R\$), Instituto de Economia Agrícola - IEA (2015);

VF = Valor final do maquinário (decimal em relação ao valor inicial);

VUA = Vida útil do maquinário (ano), American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASABE (2011);

NHTA = Número de horas trabalhadas no ano pelo maquinário (h ano⁻¹);

i = Taxa de juros (decimal), Banco Central do Brasil - BCB (2016);

FAST = Fator de alojamento, seguros e taxas (decimal), Molin e Milan (2002).

O custo de mão-de-obra horário (C_{MO}), se estimou com base o salário e carga horário mensal do trabalhador pela operação realizada, eq. (26). No caso do modelo se usaram dados

fornecidos pelo Ministério do Trabalho e Emprego - MTE (2015) e Instituto de Economia Agrícola - IEA (2015) (anexo C).

$$C_{MO} = \left(\frac{\text{Salário}}{C_{mh}} \right) \times \#Trab \quad (26)$$

Em que:

Salário = Renumeração econômica do serviço executado (R\$ mês⁻¹);

C_{mh} = Carga mensal horaria (mês h⁻¹), segundo Ministério do Trabalho e Emprego – MTE (2015) 220 horas mês.

Os custos variáveis horário do maquinário e equipamentos representa as despesas de combustível, reparos e manutenção das mesmas eq. (27). No caso do modelo se usaram dados fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (2015) (anexo E).

$$CVH = (C_{hora} \times P_C) + \left(\frac{\text{Combustível} \quad \text{Reparos e manutenção}}{\text{VI} \times \text{FRM}} \right) \quad (27)$$

Em que:

P_C = Preço do combustível (R\$ L⁻¹), Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocombustíveis - ANP (2015).

FRM = Fator de reparos e manutenção da máquina ou equipamento (decimal);

VUHe = Vida útil estimada da máquina ou equipamento (h), American Society of Agricultural and Biological Engineers - ASABE (2011).

Os custos dos fertilizantes se calcularam com base no tipo de fertilização (taxa de aplicação variável ou fixa). Para a aplicação variável seu custo de insumos foi calculado por meio das quantidades de fertilizantes sugeridas pela amostragem georreferenciada de solo e seu preço fornecido pelo Instituto de Economia Agrícola - IEA (2015) (anexo C) eq. (28).

$$C_{IN} = Q_{IN} \times P_{IN} \quad (28)$$

Em que:

Q_{IN} = Quantidade de insumo ou fertilizante formulado para aplicar (kg ha⁻¹);

P_{IN} = Preço do insumo ou fertilizante formulado (R\$ kg⁻¹), Instituto de Economia Agrícola - IEA (2015).

3.2 Verificação do algoritmo (estudos de caso)

O algoritmo foi validado com dados de dois estudos que avaliaram os efeitos da aplicação em taxa variável (TV) de fertilizantes e corretivos na produtividade das culturas de café e laranja, em contraste à aplicação convencional (TF). Os dois estudos foram selecionados para fornecer o banco de dados e para serem referência na comparação dos resultados obtidos por meio do modelo.

3.2.1 Estudo caso de café

Faulin (2010) selecionou quatro áreas comerciais cultivadas com a espécie *Coffea arabica* L., compreendendo um período de quatro safras agrícolas, entre 2004/05 até 2007/08, para a área 1 localizada no município de Gália, SP, e três safras agrícolas, 2005/06 até 2007/08, para as áreas 2, 3 e 4 localizadas no município de Patrocínio, MG (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição das áreas da cultura de café (FAULIN, 2010)

Área	Município, UF	Superfície (ha)	Espaçamento (m)
1	Gália, SP	8,6	3,9
2	Patrocínio, MG	5,9	4,2
3	Patrocínio, MG	6,3	4,2
4	Patrocínio, MG	4,6	4,0

Faulin (2010) estabeleceu dentro de cada área dois tratamentos. Na primeira fileira estabeleceu-se o tratamento denominado TF (testemunha), onde cada fertilização foi feita utilizando uma única dose de nitrogênio, fósforo e potássio para cada área. Na seguinte fileira instaurou-se o tratamento denominado TV. As fertilizações dos outros nutrientes importantes para a cultura do café e os tratos culturais foram executadas de forma idêntica para ambos os tratamentos.

Previamente à fertilização, foram realizadas amostragens de solos, dispostos em uma grade com pontos equidistantes. Para a fertilidade do solo foram retiradas amostras na camada de 0 a 0,2 m com trados do tipo holandês e helicoidal. A densidade amostral nas áreas, para cada safra, é descrita no anexo A. Cada amostra foi georreferenciada de forma distinta para os tratamentos, com exceção das amostras foliares, onde utilizou-se para o tratamento TF o mesmo procedimento do tratamento TV.

Para as amostras de solo, no tratamento TF procurou-se respeitar a metodologia empregada nas fazendas, onde sub-amostras foram coletadas no centro das entrelinhas ao longo da área, compondo uma única amostra composta por área. No tratamento TV, cada amostra foi composta por nove sub-amostras, distanciadas paralelamente à fileira de plantas em 0,6 m e agrupadas num intervalo de aproximadamente 1,0 m. As amostras de solo foram encaminhadas para laboratórios de análises certificados (FAULIN, 2010).

Para aplicações dos fertilizantes, se empregou uma adubadora de arrasto com dosador volumétrico de duas esteiras independentes com comportas ajustáveis acionadas hidráulicamente e comandadas por um computador conectado a um receptor de GNSS, tracionada por um trator de 31,7 kW. Devido à sua construção, com dois mecanismos dosadores e distribuição lateral independente, pôde-se configurar o lado esquerdo da máquina para aplicar uma dose fixa e o lado direito para aplicar doses variadas, comandadas pelo mapa de aplicação previamente definido e carregado no computador do equipamento. O mapa de aplicação fornece ao equipamento informações das doses a serem aplicadas e suas localizações geográficas (FAULIN, 2010).

Na área 1, a fertilização foi parcelada em seis doses de nitrogênio, duas de potássio e uma de fósforo (anexo A). Nessas adubações foram utilizados os fertilizantes Nitrato de Amônia como fonte de N, o Superfosfato Simples como fonte de P_2O_5 e o cloreto de potássio como fonte de K_2O . Nas áreas 2, 3 e 4, as fertilizações foram parceladas em três vezes para o nitrogênio, duas para o potássio e uma única aplicação para o fósforo (anexo A). Nas fertilizações utilizaram-se as mesmas fontes de nutrientes que na área 1.

A área 3 foi excluída do modelo, porque se registraram produtividades baixas (anexo A) nas safras 2005/06 e 2006/07 devido a uma perda considerável entre o número de pontos amostrados, em função da perda parcial dos dados no monitor de colheita durante o processo de colheita. Estes registros perdidos puderam diminuir a confiabilidade das estimativas da produtividade dessa área (FAULIN, 2010).

A colheita foi realizada para cada tratamento individualmente, colheu-se na mesma hora do dia para proporcionar as mesmas condições aos tratamentos. Utilizou-se uma colhedora autopropelida marca Jacto, modelo K3 (Máquinas Agrícolas Jacto S.A), equipada com um monitor de colheita volumétrico, descrito por Sartori et al. (2002), o qual mensura a produtividade em volume e área dos frutos colhidos (Anexo A).

3.2.2 Estudo caso de laranja

Colaço e Molin (2014) escolheram duas áreas experimentais localizadas em uma fazenda comercial. A área 5 foi implantada em 2003, enquanto a área 6 foi implantada em 2004 compreendendo um período de quatro safras agrícolas, entre 2008/09 até 2011/12 (Tabela 2).

Tabela 2 - Descrição das áreas de estudo da cultura de laranja (COLAÇO; MOLIN, 2014)

Área	Município, UF	Superfície (ha)	Espaçamento (m)
5	Botucatu, SP	25,7	6,8
6	Botucatu, SP	25,7	7,5

Da mesma forma que no estudo do Faulin (2010), Colaço e Molin (2014) estabeleceram dois tratamentos (TV e TF) para testar se o tratamento TV de nitrogênio, fósforo e potássio, proporciona um aumento na produtividade dos pomares. Tais tratamentos foram intercalados a cada par de fileiras de plantas, um par de fileiras com TV seguido por outro com TF.

Precedente às fertilizações foram realizadas amostragens georreferenciadas de solo entre os meses de março e abril. As amostras de solo no tratamento TF foram realizadas seguindo os princípios de manejo empregados na fazenda, em cada talhão foi colhida uma amostra de solo, a partir de 25 sub-amostras coletada aleatoriamente nas faixas TF ao longo de todo o talhão (Anexo B).

Para o tratamento TV utilizou-se uma grade amostral de aproximadamente duas amostras por hectare (Anexo B). Em cada ponto da grade amostral foram retiradas duas amostras de solo compostas por seis sub-amostras cada (0,2 m de profundidade). Os mapas de fertilidade do solo foram realizados durante cinco anos (de 2008 a 2012), permitindo avaliar a eficiência da fertilização anterior em manter níveis adequados dos elementos no solo (COLAÇO; MOLIN, 2014).

As fertilizações para o tratamento TF foram realizadas pelo corpo técnico da fazenda, a partir da amostragem de solo e estimativa da produtividade, as aplicações foram divididas em três parcelas, utilizando fertilizantes formulados como fonte de N, P e K e uma máquina adubadora de arrasto com mecanismo dosador volumétrico e distribuidor centrífugo.

Para o tratamento TV foram calculadas a partir dos mapas de fertilidade do solo e dos mapas de produtividade esperada (anexo B). Empregou-se o protótipo de uma máquina adubadora de arrasto, com mecanismo dosador volumétrico e mecanismo distribuidor pneumático, equipada com um monitor para leitura do mapa de recomendação, um receptor GNSS e um controlador hidráulico de vazão, que propicia a aplicação em doses variadas

alterando a velocidade da esteira transportadora e altura da comporta dosadora. Nas áreas 5 e 6 as fertilizações do tratamento TV de N e K foram divididas em três parcelas (anexo B), na proporção de 40, 30 e 30 % da dose total, respectivamente. Para as aplicações de P foram sempre realizadas em uma única operação em outubro. Como fonte de N, P e K foram utilizadas o nitrato de amônio, o superfosfato simples e o cloreto de potássio, respectivamente.

3.3 Cenário

Com base nos algoritmos apresentados, o modelo em planilha eletrônica MS ExcelTM¹ foi desenvolvido. No modelo se determinou como cenário base a fertilização em taxa fixa (TF), como cenário alternativo a aplicação em taxa variável (TV) e como cenário modificado a aplicação simultânea de dois fertilizantes em taxa variável (TV-Maq2). Os dados básicos utilizados para os cenários constam nos anexos A e B.

Os cenários foram analisados por área (Tabela 1 e 2); cada local apresentou uma variabilidade espacial diferente e requereu um manejo diferenciado durante os períodos avaliados. Para as áreas de café, se calculou a viabilidade energética e econômica por biênios; a bienalidade de produtividade se caracteriza pela variação de anos com alta e baixa produtividade. Essa alternância bienal de produção é própria da natureza fisiológica do cafeeiro, que necessita vegetar em um ano para produzir bem no ano seguinte (CARVALHO et al., 2004). Enquanto para as áreas de laranja, se determinou a viabilidade energética e econômica pela média de todos anos avaliados.

3.3.1 Cenário base

Para o cenário base (TF) se adotou a metodologia de amostragem de solo convencional, baseou-se em uma única amostra em cada área para representar a fertilidade do solo. Mesmo sendo composta por sub-amostras (anexo A e B), essas foram coletadas aleatoriamente dentro do campo. Na simulação da operação se utilizou um amostrador hidráulico automatizado montado no quadriciclo (Tabela 3).

¹ A indicação não significa recomendação de uso pelo autor.

Na simulação deste cenário se utilizaram fertilizantes formulados N-P-K; ao se utilizar esse tipo de fertilizante foi necessário o arredondamento das doses de recomendação, em alguns casos não atendeu exatamente a dose prescrita. Dessa forma, a proporção de nutrientes demandada em cada área pode não ser fornecida pelas concentrações que oferece o formulado N-P-K (anexo C). Na simulação da aplicação se utilizou um conjunto de maquinário – trator e distribuidor de adubo (Tabela 3).

Tabela 3 - Especificações técnicas do maquinário usado na amostragem de solo e aplicação de fertilizantes

Características	Amostragem de solo		Aplicação de fertilizantes	
	Amostrador - Quadriciclo ¹	Trator ²	Distribuidor de adubo ³	
			Taxa fixa	Taxa variável
Largura de trabalho (m)	-	-	10	10
Massa (kg)	263	5100	1420	1080
Potência (kW)	20	56	-	-
Reservatórios para insumos	-	-	1	1 ou 2

¹ FALKER (2015);²JOHN DEERE (2015);³KAMAQ (2015).

3.3.2 Cenário alternativo

Para o cenário alternativo (TV) a metodologia de amostragem de solo em grade foi adotada com amostras georreferenciadas (anexo A e B) para gerar o mapa de prescrição com os atributos do solo. Na simulação da operação se utilizou um amostrador hidráulico automatizado montado no quadriciclo (Tabela 3). Para as aplicações em doses variadas foram utilizadas fontes de fertilizantes simples (N, P e K) aplicados isoladamente (anexo A e B). Na simulação da aplicação se utilizou um conjunto de maquinário – trator e distribuidor de adubo com um compartimento para insumo (Tabela 3).

3.3.3 Cenário modificado

O cenário modificado (TV-Maq2) se elaborou como uma opção ao cenário alternativo (TV). Surgiu pelo desenvolvimento de novas tendências no mercado que produziram equipamentos versáteis como foi o distribuidor de adubo, sua novidade encontrou-se no sistema de dois reservatórios (caçambas) individuais, o que proporcionaram a realização de dosagem independente de dois insumos diferentes, com a distribuição simultânea dos mesmos (Tabela

3). O cenário modificado (TV-Maq2) adotou as mesmas metodologias do que cenário alternativo na amostragem de solo em grade e na aplicação de fertilizantes usou-se o distribuidor de adubo com dois reservatórios, implicitamente esse cenário alterou o consumo de combustível e gerenciamento da operação.

3.4 Análise de sensibilidade

Para identificar as variáveis que mais influenciam no sistema de produção utilizou-se a análise de sensibilidade. Foram selecionadas variáveis consideradas críticas e os seus valores alterados em um percentual fixo (-10 %), verificando-se assim os efeitos nos indicadores de energia incorporada (EI) e lucro da técnica (L). Essa técnica foi proposta por Noronha (1981) e foi utilizada na determinação de fluxo de materiais por meio do gerenciamento de máquinas agrícolas por Romanelli e Milan (2010a).

As variáveis selecionadas foram: eficiência operacional (Efc), massa do maquinário (Mmaq), potência do maquinário (Pot), preço do combustível (Pcom), preço do nitrogênio (Pn); preço do potássio, fósforo e calcário (Pins); preço pago ao produtor pela commodity no mercado (Pp); taxa de juros (Tj), valor inicial do maquinário (VImaq) e vida útil do maquinário (VuHmaq).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de energia

Os resultados da análise de energia determinaram para todas as áreas da cultura de café viabilidade energética (Tabela 4, 5 e 6). Para área 1 no biênio 2, o cenário modificado reduziu em 958 MJ Mg⁻¹ em comparação ao cenário base (Tabela 4). Na área 2 no biênio 1, o cenário alternativo utilizou 180.223 MJ Mg⁻¹ menos do que o cenário base (Tabela 5). A área 4 do cafeeiro foi a única área onde a bienalidade da produtividade foi diferente das demais, com histórico de maiores produtividades em anos ímpares (FAULIN, 2010). Os resultados da análise de energia determinaram que o cenário modificado utilizou 15.520 MJ Mg⁻¹ menos do que o cenário base (Tabela 6). No biênio 2, a dose de nitrogênio aplicada em taxa variável foi menor do que a aplicação em taxa fixa para ambas áreas (anexo A). Além de registrar maiores produtividades, dessa forma a aplicação em taxa variável usou menor energia incorporada das áreas. Segundo Malavolta (2000) o nitrogênio é altamente exigido pelo cafeeiro e, se adubado adequadamente, promove o crescimento rápido com folhas novas e verdes brilhantes.

Tabela 4 - Viabilidade energética da fertilização para a área 1 da cultura de café

Época	Cenário	Indicadores							
		EE (MJ ha ⁻¹)					Y (Mg ha ⁻¹)	ΔY (Mg ha ⁻¹)	ΔEI (MJ Mg ⁻¹)
		Am.	Ins.	Maq.	Total	Δ Total			
2004/05	Base	31	24.169	1.747	25.948		1,02		
	Alternativo	83	24.264	3.156	27.503	1.556	0,97	-0,06	-28.286
	Modificado	83	24.264	2.089	26.436	489			-8.884
2005/06	Base	31	24.060	2.096	26.187		2,35		
	Alternativo	71	24.146	3.156	27.373	1.186	2,53	0,18	6.627
	Modificado	71	24.146	2.089	26.306	119			665
2006/07	Base	31	24.790	1.747	26.568		0,31		
	Alternativo	37	24.213	3.156	27.406	838	0,29	-0,02	-38.090
	Modificado	37	24.213	2.089	26.339	-229			10.415
2007/08	Base	31	13.417	1.048	14.496		2,45		
	Alternativo	37	12.565	3.156	15.759	1.263	2,50	0,06	22.153
	Modificado	37	12.565	2.089	14.691	196			3.432
Biênio 1 2004/06	Base	31	24.115	1.922	26.067		1,69		
	Alternativo	77	24.205	3.156	27.438	1.371	1,75	0,06	22.112
	Modificado	77	24.205	2.089	26.371	304			4.901
Biênio 2 2006/08	Base	31	19.103	1.398	20.532		1,38		
	Alternativo	37	18.389	3.156	21.582	1.050	1,40	0,02	60.020
	Modificado	37	18.389	2.089	20.515	-17			-958

Tabela 5 - Viabilidade energética para cada ano de fertilização na área 2 da cultura de café

Época	Cenário	Indicadores							
		EE (MJ ha ⁻¹)					Y (Mg ha ⁻¹)	ΔY (Mg ha ⁻¹)	ΔEI (MJ Mg ⁻¹)
		Am.	Ins.	Maq.	Total	Δ Total			
2005/06	Base	43	18.872	1.048	19.963		4,13		
	Alternativo	56	19.016	2.104	21.177	1.213	4,12	-0,01	-93.315
	Modificado	56	19.016	1.254	20.326	362			-27.877
2006/07	Base	43	20.019	1.398	21.460		0,06		
	Alternativo	31	20.094	2.104	22.229	769	0,07	0,00	384.675
	Modificado	31	20.094	1.254	21.379	-81			-40.672
2007/08	Base	43	34.160	1.398	35.600		1,58		
	Alternativo	31	32.742	2.104	34.878	-723	1,40	-0,19	3.865
	Modificado	31	32.742	1.254	34.027	-1.573			8.414
Biênio 1 2005/07	Base	43	19.446	1.223	20.712		2,10		
	Alternativo	44	19.555	2.104	21.703	991	2,09	-0,01	-180.223
	Modificado	44	19.555	1.254	20.852	141			-25.551
Biênio 2 2006/08	Base	43	27.090	1.398	28.530		0,82		
	Alternativo	31	26.418	2.104	28.553	23	0,73	-0,09	-252
	Modificado	31	26.418	1.254	27.703	-827			8.945

Tabela 6 - Viabilidade energética para cada ano de fertilização na área 4 da cultura de café

Época	Cenário	Indicadores							
		EE (MJ ha ⁻¹)					Y (Mg ha ⁻¹)	ΔY (Mg ha ⁻¹)	ΔEI (MJ Mg ⁻¹)
		Am	Ins.	Maq.	Total	Δ Total			
2005/06	Base	53	25.260	1.398	26.710		1,45		
	Alternativo	53	26.164	2.104	28.322	1.611	1,72	0,27	5.990
	Modificado	53	26.164	1.254	27.471	761			2.827
2006/07	Base	53	28.277	1.398	29.727		2,83		
	Alternativo	30	28.198	2.104	30.332	604	2,82	-0,01	-60.431
	Modificado	30	28.198	1.254	29.481	-246			24.638
2007/08	Base	53	22.438	1.398	23.889		0,68		
	Alternativo	30	22.200	2.104	24.334	445	0,73	0,05	8.562
	Modificado	30	22.200	1.254	23.483	-405			-7.798
Biênio 1 2005/07	Base	53	26.768	1.398	28.219		2,14		
	Alternativo	42	27.181	2.104	29.327	1.108	2,27	0,13	8.554
	Modificado	42	27.181	1.254	28.476	257			1.985
Biênio 2 2006/08	Base	53	25.357	1.398	26.808		1,76		
	Alternativo	30	25.199	2.104	27.333	525	1,78	0,02	24.989
	Modificado	30	25.199	1.254	26.482	-326			-15.520

Am.= Amostragem de solo; Ins.=Insumos (N-P-K); Maq. = Maquinário; EE= Energia de entrada; ΔTotal= Diferencia de energia de entrada da técnica; Y= Produtividade; ΔY= Diferencia de produtividade da técnica; ΔEI= Energia incorporada da técnica.

Para a cultura de laranja, as áreas 5 e 6 apresentaram aumentos das produtividades ao longo dos anos, concordante com o crescimento das copas e capacidade produtiva do pomar de laranjeira (COLAÇO; MOLIN, 2014). Para área 5 não houve viabilidade energética, o cenário base registrou produtividade maior aos cenários de aplicação em taxa variável, essa diferença de produtividade (ΔY) aumentou a energia incorporada dos cenários alternativo (15.530 MJ Mg⁻¹) e modificado (21.151 MJ Mg⁻¹) (Tabela 7).

Os resultados da análise de energia determinaram viabilidade energética para área 6 durante os quatro anos avaliados. Os cenários com viabilidade energética foram os cenários de aplicação em taxa variável, o cenário alternativo registrou 12.665 MJ Mg⁻¹ menos do que o cenário base. Também o cenário modificado diminuiu em 15.368 MJ Mg⁻¹ a energia incorporada em comparação com cenário base. Ambos cenários utilizaram 35 % menos de energia de entrada nos insumos em relação ao sistema convencional de fertilização (Tabela 8).

Tabela 7 - Viabilidade energética da fertilização para a área 5 da cultura de laranja

Época	Cenário	Indicadores							
		EE (MJ ha ⁻¹)				Δ Total	Y (Mg ha ⁻¹)	ΔY (Mg ha ⁻¹)	ΔEI (MJ Mg ⁻¹)
Am.	Ins.	Maq.	Total						
2008/09	Base	13	13.170	1.747	14.929		42,88		
	Alternativo	145	12.942	2.806	15.893	964	41,85	-1,04	-931
	Modificado	145	12.942	1.671	14.759	-170			164
2009/10	Base	13	31.341	1.747	33.101		26,95		
	Alternativo	145	18.017	2.806	20.968	-12.133	27,83	0,88	-13.730
	Modificado	145	18.017	1.671	19.834	-13.267			-15.014
2010/11	Base	13	13.078	1.747	14.837		53,22		
	Alternativo	145	9.410	2.806	12.362	-2.476	52,80	-0,41	5.974
	Modificado	145	9.410	1.671	11.227	-3.610			8.711
2011/12	Base	13	18.480	1.747	20.240		66,74		
	Alternativo	145	18.396	2.806	21.347	1.108	66,50	-0,24	-4.599
	Modificado	145	18.396	1.671	20.213	-27			111
Média 2008/12	Base	13	19.017	1.747	20.777		47,45		
	Alternativo	145	14.692	2.806	17.643	-3.134	47,25	-0,20	15.530
	Modificado	145	14.692	1.671	16.508	-4.268			21.151

Am.= Amostragem de solo; Ins.=Insumos (N-P-K); Maq. = Maquinário; EE= Energia de entrada; Δ Total= Diferencia de energia de entrada da técnica; Y= Produtividade; ΔY = Diferencia de produtividade da técnica; ΔEI = Energia incorporada da técnica.

Tabela 8 - Viabilidade energética da fertilização para a área 6 da cultura de laranja

Época	Cenário	Indicadores							
		EE (MJ ha ⁻¹)					Y (Mg ha ⁻¹)	ΔY (Mg ha ⁻¹)	ΔEI (MJ Mg ⁻¹)
		Am.	Ins.	Maq.	Total	Δ Total			
2008/09	Base	13	10.811	1.747	12.571		34,17		
	Alternativo	145	10.767	2.806	13.718	1.147	33,56	-0,61	-1.886
	Modificado	145	10.767	1.671	12.584	13			-21
2009/10	Base	13	30.391	1.747	32.151		27,46		
	Alternativo	145	12.420	2.806	15.371	-16.780	27,75	0,29	-58.374
	Modificado	145	12.420	1.671	14.237	-17.914			-62.320
2010/11	Base	13	13.826	1.747	15.586		52,57		
	Alternativo	145	10.390	2.806	13.341	-2.245	52,85	0,27	-8.192
	Modificado	145	10.390	1.671	12.207	-3.379			-12.330
2011/12	Base	13	19.561	1.747	21.320		57,79		
	Alternativo	145	14.990	2.806	17.941	-3.380	59,51	1,73	-1.959
	Modificado	145	14.990	1.671	16.806	-4.514			-2.617
Média 2008/12	Base	13	18.647	1.747	20.407		43,00		
	Alternativo	145	12.142	2.806	15.093	-5.314	43,42	0,42	-12.665
	Modificado	145	12.142	1.671	13.958	-6.449			-15.368

Am.= Amostragem de solo; Ins.=Insumos (N-P-K); Maq. = Maquinário; EE= Energia de entrada; ΔTotal= Diferencia de energia de entrada da técnica; Y= Produtividade; ΔY= Diferencia de produtividade da técnica; ΔEI= Energia incorporada da técnica.

4.2 Análise econômica

Os resultados da análise econômica determinaram viabilidade da técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável para as três áreas da cultura de café (Tabela 9, 10 e 11). O lucro da técnica se baseou nos custos operacionais da amostragem, insumos e maquinário. O custo com maior destaque foi o custo operacional dos insumos, em todas as áreas os cenários de aplicação em taxa variável geraram mais do 100 % de economia em relação ao cenário base, demonstrando a otimização dos recursos. Entretanto o cenário base mostrou economia no custo operacional do maquinário do que os demais cenários de aplicação em taxa variável, mas sua participação dentro dos custos operacionais não foi superior ao 20 % (Tabela 9, 10 e 11).

O maior aumento de lucro da técnica foi registrado na área 4 para biênio 1; o cenário alternativo (TV) e modificado (TV-Maq2) tiveram 1.655 e 1.708 R\$ ha⁻¹ de aumento de lucro da técnica, respectivamente (Tabela 11).

Tabela 9 - Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 1 da cultura de café

Época	Cenário	Indicadores										
		COP (R\$ ha ⁻¹)					Y	ΔY	P _s (R\$ Mg ⁻¹)	R	ΔR	ΔL
		Am.	Ins.	Maq.	Total	Δ Total	Mg ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹		R\$ ha ⁻¹		
2004/05	Base	5	1.685	116	1.805		1,02			4.786		
	Alternativo	22	541	208	771	-1.035	0,97	-0,06	4.683	4.528	-258	777
	Modificado	22	541	141	703	-1.102						844
2005/06	Base	5	1.534	143	1.683		2,35			9.778		
	Alternativo	19	519	215	754	-929	2,53	0,18	4.163	10.523	745	1.674
	Modificado	19	519	156	695	-988						1.733
2006/07	Base	6	1.451	134	1.591		0,31			1.307		
	Alternativo	10	406	241	657	-933	0,29	-0,02	4.204	1.215	-92	841
	Modificado	10	406	174	590	-1.000						908
2007/08	Base	6	1.101	80	1.186		2,45			10.720		
	Alternativo	10	385	239	634	-552	2,50	0,06	4.381	10.970	250	802
	Modificado	10	385	171	567	-619						869
Biênio 1 2004/06	Base	5	1.610	130	1.744		1,69			7.455		
	Alternativo	20	530	212	762	-982	1,75	0,06	4.423	7.729	274	1.256
	Modificado	20	530	148	699	-1.045						1.319
Biênio 2 2006/08	Base	6	1.276	107	1.388		1,38			5.769		
	Alternativo	10	395	240	646	-743	1,40	0,02	4.183	5.842	73	816
	Modificado	10	395	173	579	-810						883

Tabela 10 - Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 2 da cultura de café

Época	Cenário	Indicadores										
		COP (R\$ ha ⁻¹)					Y	ΔY	P _s (R\$ Mg ⁻¹)	R	ΔR	ΔL
		Am.	Ins.	Maq.	Total	Δ Total	Mg ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹		R\$ ha ⁻¹		
2005/06	Base	7	1.599	72	1.678		4,13			17.209		
	Alternativo	15	535	143	693	-985	4,12	-0,01	4.163	17.155	-54	931
	Modificado	15	535	94	643	-1.035						981
2006/07	Base	8	1.235	107	1.350		0,06			265		
	Alternativo	8	443	161	612	-739	0,07	0,01	4.204	273	8	747
	Modificado	8	443	105	555	-795						803
2007/08	Base	8	2.482	106	2.596		1,58			6.935		
	Alternativo	8	804	159	972	-1.624	1,40	-0,19	4.381	6.116	-819	805
	Modificado	8	804	103	916	-1.681						861
Biênio 1 2005/07	Base	8	2.041	89	2.137		2,86			11.958		
	Alternativo	12	669	151	832	-1.305	2,76	-0,10	4.183	11.539	-418	887
	Modificado	12	669	98	779	-1.358						940
Biênio 2 2006/08	Base	8	1.858	107	1.973		0,82			3.533		
	Alternativo	8	623	160	792	-1.181	0,73	-0,09	4.292	3.136	-397	784
	Modificado	8	623	104	735	-1.238						841

Tabela 11 - Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 4 da cultura de café.

Época	Cenário	Indicadores										
		COP (R\$ ha ⁻¹)					Y	ΔY	P _s (R\$ Mg ⁻¹)	R	ΔR	ΔL
		Am.	Ins.	Maq.	Total	Δ Total	Mg ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹		R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹
2005/06	Base	9	1.648	96	1.753		1,45			6.028		
	Alternativo	14	578	143	736	-1.017	1,72	0,27	4.163	7.147	1.120	2.137
	Modificado	14	578	94	686	-1.067						2.187
2006/07	Base	10	1.904	107	2.021		2,83			11.888		
	Alternativo	8	642	161	811	-1.210	2,82	-0,01	4.204	11.846	-42	1.168
	Modificado	8	642	105	755	-1.266						1.224
2007/08	Base	10	1.516	106	1.632		0,68			2.988		
	Alternativo	8	501	159	668	-964	0,73	0,05	4.381	3.216	228	1.192
	Modificado	8	501	103	612	-1.020						1.248
Biênio 1 2005/07	Base	10	1.776	101	1.887		2,14			8.944		
	Alternativo	11	610	152	773	-1.114	2,27	0,13	4.183	9.485	542	1.655
	Modificado	11	610	99	720	-1.167						1.708
Biênio 2 2006/08	Base	10	1.710	107	1.827		1,76			7.533		
	Alternativo	8	571	160	739	-1.087	1,78	0,02	4.292	7.623	90	1.177
	Modificado	8	571	104	683	-1.143						1.234

Am.= Amostragem de solo; Ins.=Insumos (N-P-K); Maq. = Maquinário; COP= Custo operacional; Δ Total= Diferencia do custo operacional da técnica; Y= Produtividade; ΔY = Diferencia de produtividade da técnica; P_s=Preço pago ao produtor pela commodity no mercado; R= Receita; ΔR = Diferencia de receita da técnica; ΔL = Lucro da técnica.

Resultados similares se obtiveram para as áreas da cultura de laranja, a análise econômica determinou viabilidade da técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável para as duas áreas da cultura de laranja (Tabela 12 e 13). A área 5 registrou o maior aumento de lucro da técnica, o cenário alternativo (TV) e modificado (TV-Maq2) tiveram em média 924 e 1.004 R\$ ha⁻¹ de aumento de lucro da técnica, respectivamente (Tabela 12). O custo mais sobressaliente foi o custo operacional dos insumos, nas duas áreas os cenários de aplicação em taxa variável determinaram entorno de 130 % de economia em relação ao cenário base, demonstrando a rentabilidade da aplicação em taxa variável nessas áreas. Por outra parte o cenário base demonstrou economia no custo operacional da amostragem de solo e o maquinário em comparação aos cenários de aplicação em taxa variável, mas não foram custos de destaque (Tabela 12 e 13).

Tabela 12 - Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 5 da cultura de laranja

Época	Cenário	Indicadores										
		COP (R\$ ha ⁻¹)					Y	ΔY	P _s (R\$ Mg ⁻¹)	R	ΔR	ΔL
		Am.	Ins.	Maq.	Total	$\Delta Total$	Mg ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹		R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹
2008/09	Base	2	1.574	142	1.718		42,88			5.559		
	Alternativo	58	421	228	706	-1.012	41,85	-1,04	130	5.425	-134	878
	Modificado	58	421	142	620	-1.098						963
2009/10	Base	2	2.365	132	2.499		26,95			8.520		
	Alternativo	54	600	211	865	-1.634	27,83	0,88	316	8.799	279	1.913
	Modificado	54	600	134	788	-1.711						1.990
2010/11	Base	2	1.359	138	1.499		53,22			6.586		
	Alternativo	57	377	220	654	-844	52,80	-0,41	124	6.535	-51	793
	Modificado	57	377	141	575	-924						873
2011/12	Base	2	1.234	139	1.375		66,74			5.506		
	Alternativo	59	647	222	927	-448	66,50	-0,24	82	5.486	-20	428
	Modificado	59	647	145	851	-524						504
Média	Base	2	1.633	137	1.773		47,45			7.734		
	Alternativo	57	511	220	788	-984	47,25	-0,20	163	7.702	-33	952
	Modificado	57	511	140	708	-1.064						1.031

Tabela 13 – Viabilidade econômica para cada ano de fertilização na área 6 da cultura de laranja

Época	Cenário	Indicadores										
		COP (R\$ ha ⁻¹)					Y	ΔY	P _s (R\$ Mg ⁻¹)	R	ΔR	ΔL
		Am.	Ins.	Maq.	Total	$\Delta Total$	Mg ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹		R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ ha ⁻¹
2008/09	Base	2	1.510	142	1.654		34,17			4.429		
	Alternativo	58	368	228	653	-1.001	33,56	-0,61	130	4.350	-79	922
	Modificado	58	368	142	568	-1.087						1.008
2009/10	Base	2	2.260	132	2.394		27,46			8.682		
	Alternativo	54	448	211	712	-1.682	27,75	0,29	316	8.772	91	1.772
	Modificado	54	448	134	636	-1.758						1.849
2010/11	Base	2	759	138	898		52,57			6.506		
	Alternativo	57	410	220	687	-212	52,85	0,27	124	6.540	34	246
	Modificado	57	410	141	607	-291						325
2011/12	Base	2	1.246	139	1.387		57,79			4.767		
	Alternativo	59	503	222	783	-603	59,51	1,73	82	4.909	142	746
	Modificado	59	503	145	707	-680						822
Média	Base	2	1.444	137	1.583		43,00			7.009		
	Alternativo	57	432	220	709	-874	43,42	0,42	163	7.077	68	943
	Modificado	57	432	140	629	-954						1.022

Am.= Amostragem de solo; Ins.=Insumos (N-P-K-Calcário); Maq. = Maquinário; COP= Custo operacional; $\Delta Total$ = Diferença do custo operacional da técnica; Y= Produtividade; ΔY = Diferencia de produtividade da técnica; P_S=Preço pago ao produtor pela commodity no mercado; R= Receita; ΔR = Diferencia de receita da técnica; ΔL = Lucro da técnica.

4.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade quantificou o grau em que as variações (-10 %) das variáveis selecionadas afetariam a viabilidade energética e econômica da fertilização em taxa variável (cenário alternativo – TV), utilizando-se os indicadores de energia incorporada (EI) e lucro da técnica (L) como medida. As variáveis selecionadas se compararam com o cenário base (TF) para cada uma das áreas de estudo.

Os resultados da análise de sensibilidade para o indicador energia incorporada determinou que as variáveis que se destacaram foram a eficiência operacional (Efc) e a potência do maquinário (Pot) para todas áreas de estudo (Figura 4 e 5). Reduzir em 10 % a eficiência operacional aumentou a energia incorporada por encima de 0,4 % para todas as áreas da cultura de café (Figura 4), enquanto para as áreas da cultura de laranja foi por encima de 0,8 % (Figura 5). Por outra parte, diminuir em 10 % a potência do maquinário desceu a energia incorporada em 0,6 % para todas as áreas da cultura de café (Figura 4), mesmo comportamento se observou para as áreas da cultura de laranja foi por abaixo de 1,6 % (Figura 5).

As demais variáveis, como a massa do maquinário (Mmaq) e a vida útil do maquinário (VuHmaq) não modificaram consideravelmente o indicador de energia incorporada. Consequentemente, esses não são fatores que mereceriam destaque ao se buscar a melhoria da viabilidade energética da técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável (Figura 4 e 5).

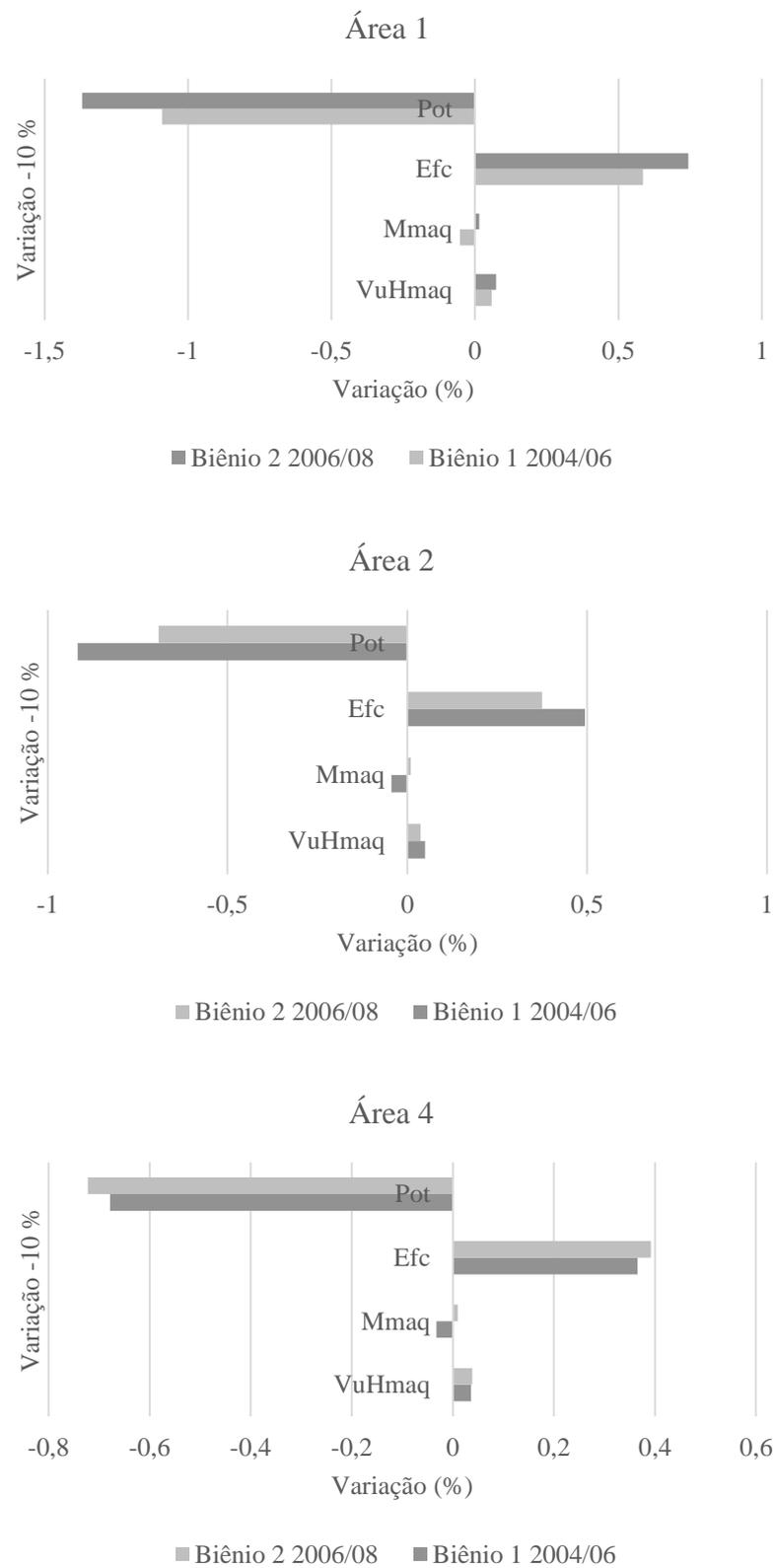


Figura 4- Análise de sensibilidade para o cenário alternativo (TV) do indicador energia incorporada (EI) das áreas de estudo da cultura de café

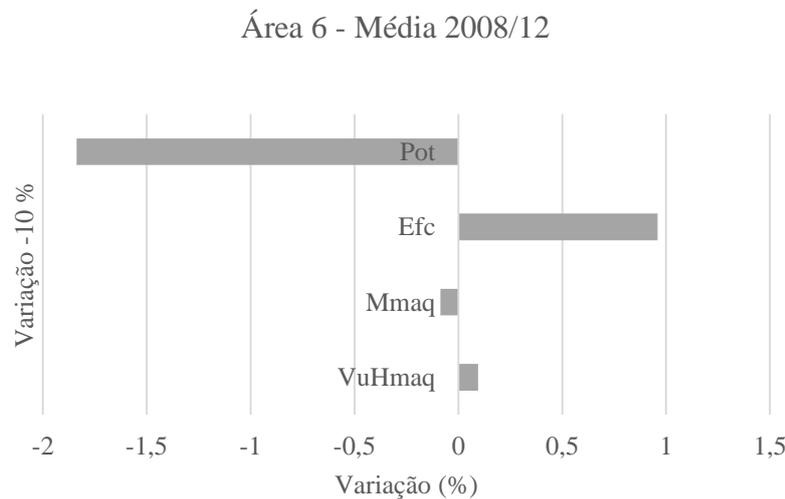
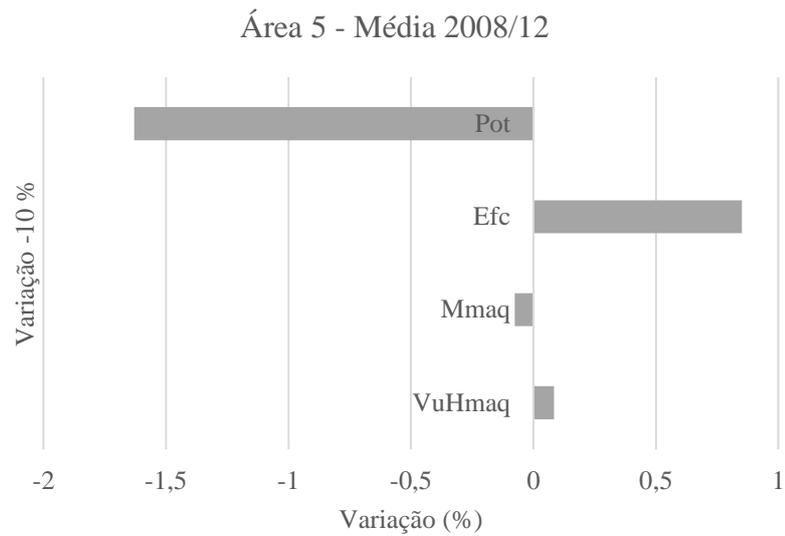


Figura 5- Análise de sensibilidade para o cenário alternativo (TV) do indicador energia incorporada (EI) das áreas de estudo da cultura de laranja

O resultado da análise de sensibilidade para o indicador lucro da técnica determinou que a variável com destaque foi o preço pago ao produtor pela commodity no mercado (Pp) para todas áreas de estudo (Figura 6 e 7). Reduzir em 10 % o preço da commodity diminui o lucro da técnica por abaixo de 10 % para todas áreas de estudo (Figura 6 e 7). Mesma tendência apresentou a variável eficiência operacional (Efc), a variável foi diminuída em 10 % seu efeito foi reduzir o lucro da técnica em 0,5 % (Figura 6 e 7). As demais variáveis preço do combustível (Pcom), preço do nitrogênio (Pn), preço do potássio, fósforo e calcário (Pins), taxa de juros (Tj) e valor inicial do maquinário (VImaq) aumentaram o lucro da técnica em 1 %, são variáveis que mereceriam importância ao se buscar melhoria da viabilidade econômica da aplicação de fertilizantes em taxa variável para todas as áreas de estudo (Figura 6 e 7).

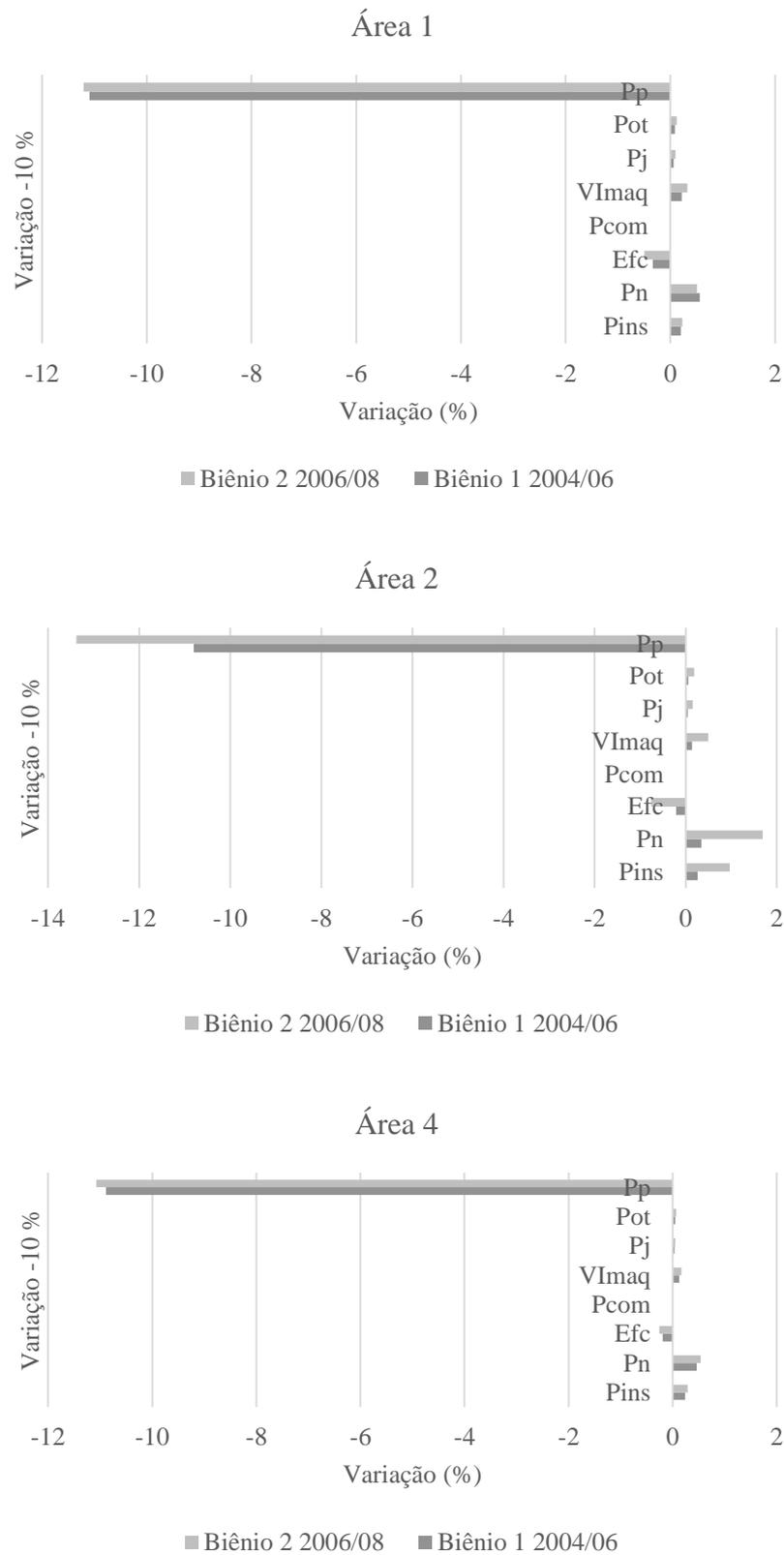


Figura 6- Análise de sensibilidade para o cenário alternativo (TV) do indicador lucro da técnica (L) das áreas de estudo da cultura de café

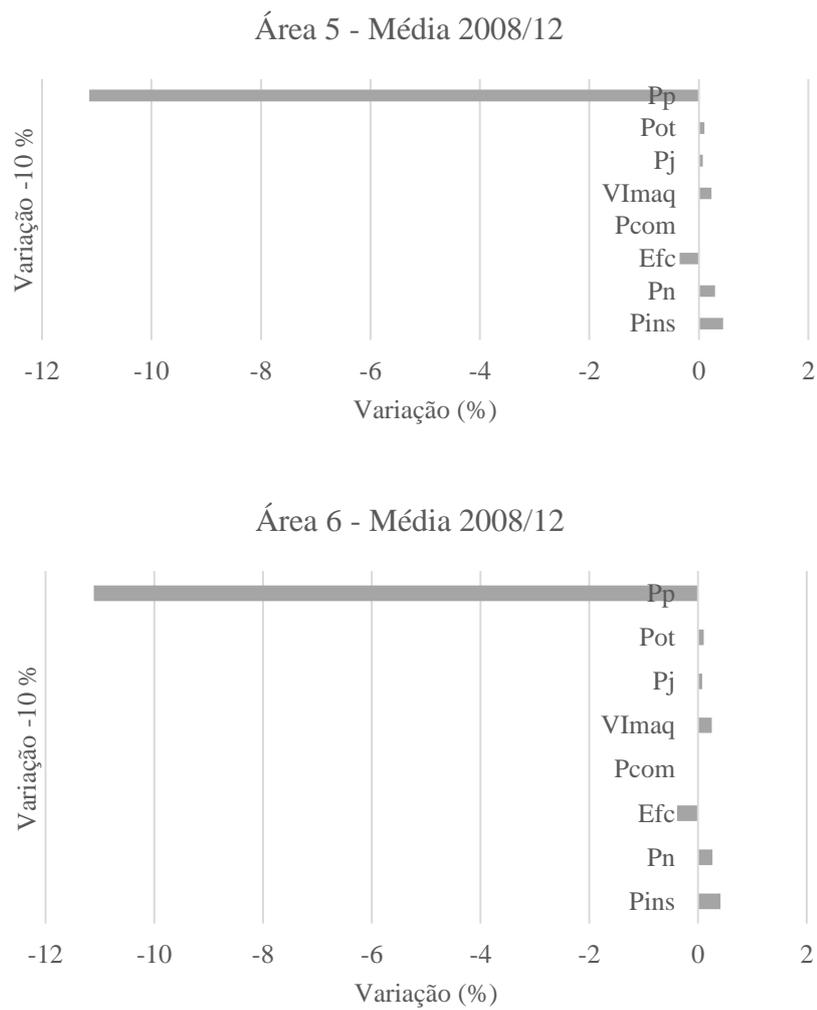


Figura 7- Análise de sensibilidade para o cenário alternativo (TV) do indicador lucro da técnica (L) das áreas de estudo da cultura de laranja

5 CONCLUSÕES

A técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável apresentou viabilidade energética para a maioria das áreas de estudo por meio do cenário modificado (TV-Maq2), este melhorou o gerenciamento nas operações por meio da utilização do maquinário com um sistema de dois reservatórios individuais, que proporcionaram a realização de dosagem independente de dois insumos diferentes, com a distribuição simultânea dos mesmos (redução no número de trajetos), e otimizou o uso de insumos, pois determinou menor energia incorporada em relação ao cenário base (TF). Para a área 5 da cultura de laranja, o cenário base (TF) demonstrou viabilidade energética em relação aos cenários de aplicação em taxa variável. No fluxo de energia da aplicação em taxa variável, os insumos e especialmente o nitrogênio foi o principal determinante da energia, se observou para todas áreas estudadas.

O modelo determinou que a técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável apresentou viabilidade econômica para todas as áreas de estudo, por meio do cenário modificado (TV-Maq2), se determinaram aumentos de lucro até 1.708 R\$ ha⁻¹ (área 4) para a cultura de café, e para a cultura de laranja o aumento de lucro foi até 1.031 R\$ ha⁻¹ (área 5) em relação à aplicação em taxa fixa ou convencional.

A análise de sensibilidade indicou que as variáveis selecionadas eficiência operacional (Efe), potência do maquinário (Pot) e o preço pago ao produtor pela commodity no mercado (Pp), são variáveis chave que merecem ser estudadas ao se adotar a técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável. Entretanto houve outras variáveis que alteraram os indicadores uma menor porcentagem, mas tiveram resultados promissórios como o preço do combustível (Pcom), preço do nitrogênio (Pn), preço do potássio, fósforo e calcário (Pins), taxa de juros (Tj) e valor inicial do maquinário (VImaq).

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Sistema de levantamento de preço**. 2015. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/preco/>>. Acesso em: 18 jun. 2015.
- AGGARWAL, G.C. Fertilizer and irrigation management for energy conservation in crop production. **Energy**, Ludhiana, v. 20, n. 8, p. 771-776, 1995.
- ALVARADO, C.A. **Maquinaria y mecanización agrícola**. San José: EUNED, 2004. 529p.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY. Decision reached on sustainable agriculture. **Agronomy News**, Madison, n. 1, p. 15, 1989.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ASAE D497.7: agricultural machinery management data. In: _____. **ASABE standards 2011**. St. Joseph, 2011. p. 1-9.
- ARÊDES, A.F.; PEREIRA, M.W.G. Análise econômica da produção de café arábica: um estudo de caso com simulações de Monte Carlo para sistemas de baixa e alta produtividade. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 38, n. 4, p. 19-30, 2008.
- BABCOCK, B.A.; PAUTSCH, G.R. Moving from uniform to variable fertilizer rates on Iowa corn: effects on rates and returns. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, Ames, v. 23, n. 2, p. 385-400, 1998.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. Sistema Gerenciador de Séries Temporais. **Indicadores de crédito**: taxa média de juros das operações de crédito rural para pessoas jurídicas. 2016. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/sgspub/localizarseries/localizarSeries.do?method=prepararTelaLocalizarSeries>>. Acesso em: 23 mar. 2016.
- BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER J. Precision Agriculture and Sustainability. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 5, p. 359–387, 2004.
- _____. Economics of variable rate lime in Indiana. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 2, p. 55-70, 2000.
- BOUSTEAD, I.; HANCOCK, G.F. **Handbook of industrial energy analysis**. New York: Halsted Press, 1979. 422p.
- BRAGANÇA, H.M.; BARROS, E.S.; GUARÇONI, A.M.; PEREIRA, L. S.; LANI, A.; VOLPI, P.S. Response of conilon coffee (*Coffea canephora* Pierre ex Froehn.) plants to NPK application in condensed planting system. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 67-75, 2009.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Mercado interno, exportações e importações do Brasil**. 2015. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal>>. Acesso em: 13 mar. 2016.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. **Legislação para trabalhadores rurais**. 2015. Disponível em: <<http://portal.mte.gov.br/legislacao/>>. Acesso em: 13 mar. 2015.

BUENO, O.C.; CAMPOS, A.T.; CAMPOS, A.T. Balanço de energia e contabilização da radiação global: simulação e comparativo. In: AVANCES EN INGENIERÍA AGRÍCOLA, 2000, Buenos Aires. **Resumen...** Buenos Aires: Facultad de Agronomía, 2000. p. 477-482.

BULLOCK, D.S.; LOWENBERG-DEBOER, JESS; SWINTON, S.M. Adding value to spatially managed inputs by understanding site-specific yield response. **Agricultural Economics**, Prague, v. 27, p. 233-245, 2002.

BOUSTEAD, I.; HANCOCK, G.F. **Handbook of industrial energy analysis**. New York: Halsted Press, 1979. 422p.

CAMPOS, A.T.; FERREIRA, W.A.; YAMAGUACHI, L.C.T.; RESENDE, H.; ALEMIDA, F.M. Economic and energy balances of maize silage for dairy cattle. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 9, p. 1-20, 1998.

CARR, P.M.; CARLSON, G.R.; JACOBSON, J.S.; NIELSON, G.A.; SKOGLEY, E.O. Farming soils, not fields: a strategy for increasing fertilizer profitability. **Journal of Production Agriculture**, Bozeman, v. 4, p. 57-67, 1991.

CARVALHO, L.G.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; ALVES, H.M.R. A regression model to predict coffee productivity in Southern Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 204-211, 2004.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Indicadores de preços**. 2015. Disponível em: <<http://cepea.esalq.usp.br/indicador/>>. Acesso em: 10 fev. 2016.

COLAÇO, A. F.; MOLIN, J. P. A five year study of variable rate fertilization in citrus. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 12., 2014, Sacramento. **Proceedings...** Sacramento, 2014.

COLAÇO, A.F.; POVH, F.P.; MOLIN, J.P.; ROMANELLI, T.L. Energy assessment for variable rate nitrogen application. **CIGR Journal**, Gainesville, v. 14, n. 3, p. 85-90, 2012.

COMITRE, V. A questão energética e o padrão tecnológico da agricultura brasileira. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 25, n. 12, p. 29-35, 1995.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Café Safra 2015**. Brasília, 2015. 21 p. (Primeira Estimativa, janeiro/2015).

_____. **Detalhamento de itens que compõem o custo de produção**: comparações entre as metodologias da CONAB e do CEPEA. 2015. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_05_06_09_28_28_comparacao_metodologias_conab_cepea_versao_abr15_publica_290415.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2015.

CORÁ, J.E.; ARAUJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERBALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

DABERKOW, S.G.; MCBRIDE, W.D. Socioeconomic profiles of early adopters of precision agriculture technologies. **Agribusiness**, Washington, v.16, n. 2, p.151–168, 1998.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Gasoline & the environment**. Disponível em: <http://www.eia.gov/Energyexplained/index.cfm?page=gasoline_home>. Acesso em: 26 maio 2016.

ERDAL, G.; ESENGÜN, K.; ERDAL, H.; GÜNDÜZ, O. Energy use and economic analysis of sugar beet production in Tokat province of Turke. **Energy**, Tokat, v. 32, p. 35–41, 2007.

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

FAO. **El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo**. Cumplimiento de los objetivos internacionales para 2015 en relación con el hambre: balance de los desiguales progresos. Rome, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4646s.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2016.

FARIAS, P.R.S.; NOCITI, L.A.S.; BARBOSA, J.C.; PERECIN, D. Agricultura de Precisão: Mapeamento da produtividade em pomares cítricos usando geoestatística. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 235-241, 2003.

FAULIN, G.C. **Influência da adubação em doses variadas na produtividade e no estado nutricional da cultura do café (*Coffea arabica* L.)** 2010. 104p. Teses (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

FERREIRA, J.Â. **Custos industriais: uma ênfase gerencial**. São Paulo: Ed STS, 2007. 172p.

FRANCO JUNIOR, N.C; MILAN, M.; ROMANELLI, T.L. Energy demand in citrus production under varied operational efficiency values. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 746-754, 2014.

GIMENEZ, L.M.; ZANCANARO, L. Monitoramento da fertilidade de solo com a técnica da amostragem em grade. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 138, p. 19-25, jun. 2012.

GRISSE, R.B.; ALLEY, M.; THOMASON, W.; HOLSHOUSER, D.; ROBERSON, G.T. **Precision farming tools: variable-rate application**. Virginia Polytechnic Institute and State University, Communications and Marketing, College of Agriculture and Life Sciences, 2011. (Publication, 442-505). Disponível em: <https://pubs.ext.vt.edu/442/442-505/442-505_PDF.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2016.

GUIMARÃES, R.J.; SCALCO, M.S.; COLOMBO, A.; ASSIS, G.A.; CARVALHO, G.R.; ALEXANDRE, L.P.B. Adubação para primeiro ano pós plantio (N e K₂O) de cafeeiros fertirrigados na região sul de Minas Gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, p. 137-147, 2010.

HARMON, T.; KVIEN, C.; MULLA, D.; HOGGENBOOM, G.; JUDY, J.; HOOK, J. Precision agriculture scenario. In: ARZBERGER, P. (Ed.). **NSF workshop on sensors for environmental observatories**. Baltimore: World Technical Evaluation Center, 2005. p. 80-89.

HETZ, E.J.; VILLEGAS, H.B.; RIQUELME, J.S.; CELIS, J.H. Utilización de energía en la producción de raps, bajo cuatro sistemas de labranza, en la Provincia de Ñuble. **Agro Sur**, Valdivia, v. 22, n. 1, p. 1-6, 1994.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Preços de insumos e salários rurais**. 2015. Disponível em: >http://ciagri.iea.sp.gov.br/nial/precorsalarios.aspx?cod_tipo=6&cod_sis=13>. Acesso em: 26 jun. 2015.

JOHNSON, R.M.; RICHARD, E.P. Variable-rate lime application in Louisiana sugarcane production systems. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 11, n. 5, p. 464-474, 2009.

KILIAN, B.; HURLEY, T.M.; MALZER, G. Economic aspects of precision agriculture: an economic assessment of different site-specific N-fertilization approaches. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001 Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: Agro Montpellier, 2001. p. 521-532.

KOMANDER MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. **Adubadeiras**. 2015. Disponível em: <<http://www.kamaq.com.br/adubadeiras.php>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

KROPFF, M.J.; WALLINGA J.; LOTZ, L.A.P. Modelling for precision weed management. In: LAKE, J.V.; BOCK, G.R.; GOODE, J.A. (Ed.). **Precision agriculture: spatial and temporal variability of environmental quality**. Chichester: Wiley, 1997. p. 182-204.

LARSON, J.A.; ROBERTS, R.K.; ENGLISH, B.C.; LARKIN, S.L.; MARRA, M.C.; MARTIN, S.W. Factors affecting farmer adoption of remotely sensed imagery for precision management in cotton production. **Precision Agriculture**, Knoxville, v. 9, n. 4, p. 195-208, 2008.

LAMBERT, D.; LOWENBERG-DEBOER, J. **Precision agriculture profitability review**. Purdue University, School of Agriculture, Site-specific Management Center, 2000. Disponível em: <<https://scholar.google.com/scholar?oi=bibs&cluster=4547687828410462670&btnI=1&hl=es>>. Acesso em: 09 jan. 2016.

LEAL, R.M.; BARBOSA, J.C.; COSTA, M.G.; BELASQUE JR., J.; YAMAMOTO, P.T.; DRAGONE, J. Distribuição espacial de *huanglongbing* (greening) em citros utilizando a geoestatística. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 32, n. 3, p. 808-818, 2010.

LOPES, F.A. **Adubação em doses variadas em citros**. 2010. 79p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, 1986. cap. 2. p. 165-274.

_____. Adubação modular do cafeeiro. In: SIMPOSIO LATINO AMERICANO DE CAFEICULTURA, 21., 2000, San Jose. **Memorias...** San Jose: ICAFE & PROMECAFE, 2000. p. 9-24.

MARION, J.C. **Contabilidade empresarial**. 15. ed. São Paulo: Atlas, 2009. 121p.

MARUYAMA, W.I.; BARBOSA, J.C.; TOSCANO, L.C. Distribuição espacial de *Oncometopia facialis* (Signoret) (Hemiptera: Cicadellidae) em pomar cítrico. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 35, n. 1, p. 93-100, 2006.

MILAN, M. **Improving operational management of harvest, transport and mechanization for sugar-cane in Brazil**. 1992. 226p. Thesis (PhD in Agricultural Engineering) – Silsoe College, Crainfield Institute de Technology, Silsoe, 1992.

_____. **Gestão sistêmica e planejamento de máquinas agrícolas**. 2004. 100p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

MOLIN, J.P.; MILAN, M. Trator-implemento: dimensionamento, capacidade operacional e custo. In: GONÇALVES, J. L.; STAPE, J. L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 409-436.

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**, Maringa, v. 32, n. 4, p. 569-575, 2010.

MULLA, D.J.; SCHEPERS, J.S. Key process and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F.J.; SADLER, E.J. **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1997. p. 1-18.

NORONHA, J.F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica**. São Paulo: Atlas, 1981. 274p.

PASSOS, O.S. 50 anos de P&D em citros no Nordeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 22., 2012, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: SBF, 2012. 1 CD-ROM.

PATTERSON, M.G. What is energy efficiency? Concepts, issues and methodological issues. **Energy Policy**, Palmerston North, v. 24, n.5, p. 377-390, 1996.

PELLIZZI, G. Use of energy and labour in Italian agriculture. **Journal of Agricultural and Engineering Research**, Milan, v. 53, p. 111-119, 1992.

QUAGGIO, J.A.; MATTOS JR, D.; CANTARELLA, H.; ALMEIDA, E.L.E.; CARDOSO, S. A.B. Lemon yield and fruit quality affected by NPK fertilization. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 96, p. 151-162, 2002.

ROBERSON, G. Precision agriculture technology for horticultural crop production. **HortTechnology**, Raleigh, v. 10. n. 3, p. 448-451, 2000.

ROBERTS, R.K.; ENGLISH, B.C.; LARSON, J.A.; COCHRAN, R.L.; GOODMAN, W.R.; LARKIN, S.L. Adoption of site-specific information and variable-rate technologies in cotton precision farming. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, Knoxville, v. 36, n. 1, p. 143–158, 2004.

ROBERTSON, M.J.; LYLE, G.; BOWDEN, J.W. Within-field variability of wheat yield and economic implications for spatially variable nutrient management. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 105, p. 211-220, 2008.

ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Geoprocessamento. In: SILVA, F.M. **Mecanização e agricultura de precisão**. Poços de Caldas: UFV, 1998. cap. 1, p. 1-3.

ROMANELLI, T.L.; MILAN, M. Energy performance of a production system of eucalyptus. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 896-903, 2010a.

_____. Material flow determination through agricultural machinery management. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 375-383, 2010b.

ROMANELLI, T.L.; RAUCCI, G.S. Biomassa de pastagens para a produção de energia. In: PEDREIRA, C.G.S.; MOURA, J.C.; FARIA, V.P. (Ed.). **A empresa pecuária baseada em pastagens**. Piracicaba: FEALQ, 2011. p. 159-187.

SALLA, D.A.; FURLANETO, F.P.B.; CABELLO, C.; KANTHACK, R.A.D. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 444-448, 2010.

SCHAEFER, G.M. **Variable-rate application of fertilizer**. Washington: USDA, Natural Resources Conservation Service, 2007. (Economics Technical Note, MT-8). Disponível em: <http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs144p2_053935.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2016.

SILVA, A.N.; ROMANELLI, T.L.; REICHARDT, K. Energy flow in castor bean (*Ricinus communis* L.) production systems. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 67, n. 6, p. 737-742, 2010.

SILVA, C.B.; LEITE, R.S.M.; PINTO, F.A.C.; MÜLLER, C.A.S.; MOURA, A.D. The economic feasibility of precision agriculture in Mato Grosso do Sul State, Brazil: a case study. **Precision Agriculture**, Viçosa, v. 8, p. 255–265, 2007.

SILVA, F.M.; SOUZA, Z.M.; FIGUEIREDO, C.A.P.; MARQUES, J. J.; MACHADO, R.V. Variabilidade espacial de atributos químicos e de produtividade na cultura do café. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 401-407, 2007.

SIQUEIRA, R.; GAMERO, C.A.; BOLLER, W. Balanço de energia na implantação e manejo de plantas de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 80-89, 1999.

SPEKKEN, M.; AVANCINI, Y.; ANSELMINI, A.; MOLIN, J. Estimando tempo e custo operacional de amostragens em grade. **Revista Engenharia Agrícola**, Piracicaba, v. 1. p. 1-6,

2012. Apresentado no CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 5., 2012, Ribeirão Preto.

SWINTON, S.M.; LOWENBERG-DEBOER, J. Evaluating the profitability of site-specific farming. **Journal of Production Agriculture**, Michigan, v. 11, p. 439–446, 1998.

STOLARSKI, M.J.; KRZYŻANIAK, M.; TWORKOWSKI, J.; SZCZUKOWSKI, S.; GOŁASZEWSKI, J. Energy intensity and energy ratio in producing willow chips as feedstock for an integrated biorefinery. **Biosystems Engineering**, Olsztyn, v. 123, p. 19–28, 2014.

TALLAKSEN, J.; BAUER, F.; HULTEBERG, C.; REESE, M.; AHLGREN, S. Nitrogen fertilizers manufactured using wind power: greenhouse gas and energy balance of community-scale ammonia production. **Journal of Cleaner Production**, Morris, v.107, p. 626- 635, 2015.

TELLAECHE, A.; BURGOSARTIZZU, X.P.; PAJARES, G.; RIBEIRO, A.; QUINTANILLA, C.F. A new vision-based approach to differential spraying in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Madrid, v. 60, p. 144-155, 2008.

TEY, Y.S.; BRINDAL M. Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications. **Precision Agriculture**, Adelaide, v. 3, p. 713–730, 2012.

TILMAN, D.; FARGIONE, J.; WOLFF, B.; D’ANTONIO, C.; DOBSON, A.; HORWARTH, R.; SCHINDLER, D.; SCHLESINGER, W.H.; SIMBERLOFF, D.; SWACKHAMER, D. Forecasting agriculturally driven global environmental change. **Science**, Washington, v. 292, p. 281–284, 2001.

ULBANERE, R.C.; FERREIRA, W.A. Energy balance in corn production in the São Paulo State, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 4, p. 35-42, 1989.

VEIGA, J.P.S.; ROMANELLI, T.L; GIMENEZ, L.M.; PATRIZIA BUSATO, P.; MILAN, M. Energy embodiment in Brazilian agriculture: an overview of 23 crops. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n. 6, p. 471-477, 2015.

WHELAN, B.M.; MCBRATNEY, A.B. The “null hypothesis” of precision agriculture management. **Precision Agriculture**, Secaucus, v. 2, p. 265-279, 2000.

WHELAN, B.M.; TAYLOR, J. **Precision agriculture for grain production systems**. Collingwood; Melbourne: CSIRO Publ., 2013. 28p.

WINKELMANN, A; WEIß, B. Automatic identification of structural process weaknesses in flow chart diagrams. **Business Process Management Journal**, Coblença, v. 17, n. 5, p. 787-807, 2011.

WITNEY, B.D. **Choosing and using farm machines**. Edinburgh: Land Technology, 1988. 412p.

XIANG, Y.; JI-YUN, J.; PING, H.; MING-ZAO, L. Recent advances on the technologies to increase fertilizer use efficiency. **Agricultural Sciences in China**, Oxford, v. 7, n. 4, p. 469-479, 2008.

YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M. Comparisons of uniform and variable rate nitrogen and phosphorus fertilizer applications for grain sorghum. **Transactions of the ASABE**, St Joseph, v. 44, n. 2, p. 201-209, 2001.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture: a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, Manhattan, v. 36, p. 113-132, 2002.

ANEXOS

Anexo A - Dados básicos do sistema de produção da cultura de café utilizados no modelo elaborado

Área	Ano	Tratamento	Densidade amostral	Taxa de aplicação			Produtividade	Nº de aplicação			
			(Pontos ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)			(Mg ha ⁻¹)	(Nº vezes ha ⁻¹)			
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
1	2004/05	TV	0,7	307,2	42,8	148	0,9	5	1	2	
		TF	*	307,2	40	139,2	1	3	1	1	
	2005/06	TV	0,6	307,2	33,5	147,9	2,5	6	1	2	
		TF	*	307,2	31,3	139,2	2,3	4	1	1	
	2006/07	TV	0,3	320,6	0	72,9	0,2	5	1	2	
		TF	*	328,7	0	69,6	0,3	3	1	1	
	2007/08	TV	0,3	140,8	24,3	274,6	2,5	2	1	2	
		TF	*	153,1	30	255,1	2,4	1	1	1	
	2	2005/06	TV	0,5	220	12,1	385,6	4,1	3	0	2
			TF	*	220	0	386,9	4,1	2	0	1
2006/07		TV	0,2	245,3	5,3	279,9	0,1	3	1	2	
		TF	*	245,2	0	279,8	0,1	2	1	1	
2007/08		TV	0,2	401,9	8,1	432,8	1,4	3	1	2	
		TF	*	418,7	10	455,2	1	2	1	1	
3		2005/06	TV	0,4	220	0	241,5	0,2	3	1	2
			TF	*	220	0	238,6	0,2	2	1	1
		2006/07	TV	0,2	350,9	3,4	455,3	0,1	3	1	2
			TF	*	362,7	0	475,5	0,1	2	1	1
	2007/08	TV	0,2	188,5	9,7	133,7	1,9	3	1	2	
		TF	*	186,3	12,2	145,2	1,9	2	1	1	
	4	2005/06	TV	0,4	330	55,5	155,9	1,7	3	1	2
			TF	*	330	0	125,3	1,4	2	1	1
		2006/07	TV	0,2	340	13,7	427,6	2,8	3	1	2
			TF	*	340	18	431,3	2,8	2	1	1
2007/08		TV	0,2	280	7,1	207,5	0,7	3	1	2	
		TF	*	278	8,6	262,3	0,6	2	1	1	

* Tratamento de taxa fixa (TF) se coletou uma única amostra composta para toda a área

Fonte: Faulin (2010)

Anexo B - Dados básicos do sistema de produção da cultura de laranja utilizados no modelo elaborado

Área	Ano	Tratamento	Densidade amostral (Pontos ha ⁻¹)	Taxa de aplicação (kg ha ⁻¹)				Produtividade (Mg ha ⁻¹)	Nº de aplicação (Nº vezes ha ⁻¹)			
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Calcário		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Calcário
5	2008/09	TV	2	130	50	31	1459	42	3	1	3	1
		TF	*	130	88	132	918	43	2	1	1	1
	2009/10	TV	2	181	119	68	1556	28	3	1	3	1
		TF	*	356	84	251	1315	27	2	1	1	1
	2010/11	TV	2	61	95	156	1556	53	3	1	3	1
		TF	*	115	140	168	1004	53	2	1	1	1
	2011/12	TV	2	179	101	119	1829	67	3	1	3	1
		TF	*	201	78	177	837	67	2	1	1	1
6	2008/09	TV	2	90	38	47	1946	34	3	1	3	1
		TF	*	90	83	125	1335	34	2	1	1	1
	2009/10	TV	2	122	87	87	1012	28	3	1	3	1
		TF	*	337	77	211	1798	27	2	1	1	1
	2010/11	TV	2	62	106	149	2023	53	3	1	3	1
		TF	*	117	49	135	2148	53	2	1	1	1
	2011/12	TV	2	179	42	179	0	60	3	1	3	1
		TF	*	199	101	199	1323	58	2	1	1	1

* Tratamento de taxa fixa (TF) se coletou uma única amostra composta para toda a área.

Fonte: Colaço e Molin (2014)

Anexo C - Preços médios anuais pagos pela agricultura utilizados no modelo elaborado

(continua)

Produto	Unidade	Ano							
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Mão-de-obra									
Salário	R\$ Mês ⁻¹	425	475	512	600	675	735	800	885
Maquinário									
Amostrador – Quadriciclo (20 kW)	R\$ un ⁻¹	20.292	20.710	22.766	23.340	23.263	21.305	22.700	23.206
Análise da fertilidade do solo	R\$ un ⁻¹	18,62	18,52	20,36	20,87	20,8	19,05	20,3	20,75
Distribuidor de adubo taxa fixa	R\$ un ⁻¹	74.982	76.526	84.124	86.245	85.960	78.725	83.880	85.751
Distribuidor de adubo taxa variável	R\$ un ⁻¹	101.729	103.824	114.133	117.010	116.624	106.808	113.801	116.340
Trator de roda 52 a 60 kW	R\$ un ⁻¹	79.834	81.445	88.802	90.985	90.683	82.349	87.410	89.317
Insumos									
Calcário	R\$ Mg ⁻¹	33	33	31	31	44	41	43	56
Cloreto de potássio	R\$ Mg ⁻¹	1.095	1.135	997	1.084	1.888	2.111	1.388	1.602
Superfosfato simples	R\$ Mg ⁻¹	678	630	565	651	1.136	757	645	863
Ureia	R\$ Mg ⁻¹	1.281	1.264	1137	1.279	1.747	1.289	1.258	1.567

Anexo C - Preços médios anuais pagos pela agricultura utilizados no modelo elaborado.

(conclusão)

Formulado ¹ N-P-K	Unidade	Ano								
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
02-30-10	R\$ Mg ⁻¹	995	833	744	1.010	1.852	1.098	873	1.093	
03-15-15	R\$ Mg ⁻¹	846	720	636	830	1.451	957	720	867	
04-14-08	R\$ Mg ⁻¹	825	750	693	799	1.301	1.005	901	1.067	
04-20-20	R\$ Mg ⁻¹	1.029	984	892	964	1.767	1.145	883	1.048	
04-30-10	R\$ Mg ⁻¹	1.068	969	874	1.045	1.883	1.116	1.085	1.182	
04-30-16	R\$ Mg ⁻¹	1.069	921	822	1.094	2.086	1.201	986	1.205	
05-25-25	R\$ Mg ⁻¹	1.088	963	856	1.107	2.102	1.357	1.031	1.233	
10-10-10	R\$ Mg ⁻¹	908	861	796	883	1.386	1.112	990	1.182	
12-06-12	R\$ Mg ⁻¹	897	814	729	824	1.325	1.019	829	983	
14-07-28	R\$ Mg ⁻¹	1.065	1.018	906	1.006	1.710	1.488	1.093	1.324	
19-10-19	R\$ Mg ⁻¹	1.042	949	839	1.036	1.747	1.232	939	1.120	
20-05-20	R\$ Mg ⁻¹	1.139	1.120	1040	1.111	1.705	1.538	1.279	1.475	

¹ Concentrações do produto

Fonte: Instituto de Economia Agrícola - IEA (2015)

Anexo D - Taxa média de juros das operações de crédito rural para pessoas jurídicas utilizados no modelo elaborado

Crédito	Unidade	Ano								
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Crédito rural total ¹	% a.a.	6,9	7,3	8,5	7,4	9,1	8,5	8,7	8,1	

¹ Crédito rural total inclui taxas de mercado y reguladas

Fonte: Banco Central do Brasil - BCB (2016)

Anexo E - Preços médios anuais pagos pela agricultura utilizados no modelo elaborado

Produto	Unidade	Ano								
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Combustível										
Diesel	R\$ l ⁻¹	1,64	1,79	1,88	1,88	2,06	2,05	2,00	2,02	
Gasolina	R\$ l ⁻¹	1,90	2,37	2,56	2,51	2,50	2,51	2,56	2,74	

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocombustíveis - ANP (2015)

Anexo F - Preços médios anuais pagos ao produtor utilizados no modelo elaborado

Produto	Unidade	Ano								
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Preço pago ao produtor de café ¹	R\$ sc ⁻¹	217,18	280,97	249,76	252,22	260,09	262,86	311,02	494,68	390,81
	R\$ Mg ⁻¹	3.619,73	4.682,85	4.162,73	4.203,72	4.334,83	4.380,98	5.183,66	8.244,67	6.513,43
Preço pago ao produtor de laranja ²	R\$ cx ⁻¹	6,32	7,77	10,31	11,2	9,78	5,29	12,9	5,05	3,37
	R\$ Mg ⁻¹	154,78	190,34	252,72	274,55	239,67	129,64	316,16	123,75	82,5

¹ sc: saca de 60 kg; ²cx: caixa de 40,8 kg.

Fonte: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA (2016)