

**MÔNICA KRISTINA FOLTRAN MARCON**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA DO BIOSSÓLIDO DA  
UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE LODO (UGL) OURO VERDE**

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO 2014

**MÔNICA KRISTINA FOLTRAN MARCON**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA DO BIODISSÍLIDO DA  
UNIDADE DE GERENCIAMENTO DE LODO (UGL) OURO VERDE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná para obtenção do Título de Mestre em Energia na Agricultura

Orientador: Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO 2014

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362**

M267v Marcon, Mônica K. Foltran  
Viabilidade econômica da utilização agrícola do biossólido da  
Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) Ouro Verde. / Mônica K.  
Foltran Marcon — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.  
50 p.

Orientador: Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do  
Paraná.

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na  
Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.  
Bibliografia.

1. Lodo de esgoto. 2. Biossólido. 3. Transporte. I. Universidade  
Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 628.38

**MÔNICA KRISTINA FOLTRAN MARCON**

**“Viabilidade econômica da utilização agrícola do bio sólido da  
unidade de gerenciamento de lodo (UGL) Ouro Verde”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

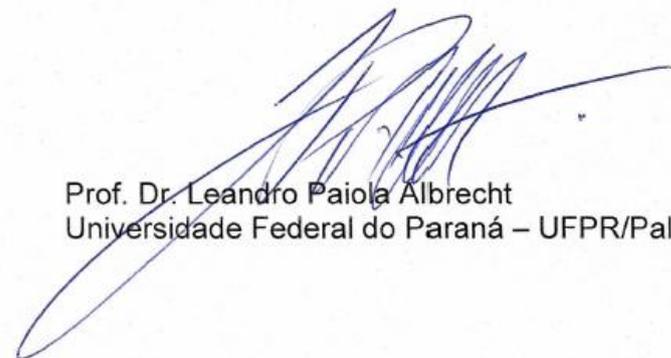
Orientador:



Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Leandro Paiola Albrecht  
Universidade Federal do Paraná – UFPR/Palotina

Cascavel, 17 de fevereiro de 2014.

*A meu filho Heitor Miguel,  
e,  
ao seu irmãozinho que está por vir,  
dedico,*

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Elisandro Pires Frigo, pela orientação, disponibilidade e paciência na determinação do tema da dissertação;

Ao prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, meu co-orientador, que está presente em minha vida desde a formação em engenharia de segurança do trabalho, a quem admiro e respeito pela dedicação prestada aos alunos desde sempre;

Ao prof. Dr. Jair Antonio Siqueira Cruz, a quem conheci como aluna especial e foi o principal incentivador de minha inscrição como aluna regular no programa de mestrado, minha singela gratidão pelo convívio e pelos ensinamentos dados;

À assistente da coordenação Vanderléia Luzia Stockmann Schmidt, pela dedicação ao trabalho e aos alunos;

À Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), representada pelo Gerente Geral/Sudoeste, eng. Renato Mayer Bueno, que permitiu a realização da pesquisa e indicou a UGL Ouro Verde como referência na gestão de lodo;

Ao eng. Vitor Martinez, responsável pela UGL Ouro Verde/SANEPAR, pela paciência e disponibilidade em me atender;

À minha colega e amiga Thaís, que muito me apoiou e auxiliou durante todo o curso, principalmente nos temas relacionados à agronomia;

Aos queridos colegas de mestrado, em particular, à Juliana, Daniela, Ivan, Rovian e Márcio, e a todos os outros, pelo convívio e amizade, que apesar de curto, será suficiente para guardar as boas recordações;

Em especial:

Ao meu esposo, Adriano e ao meu filho Heitor Miguel, pela paciência no decorrer do curso;

Aos meus pais, Pedro e Estela, pelo exemplo de vida e por não terem medido esforços para oportunizar aos filhos o melhor que puderam oferecer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da UGL Ouro Verde	13
Figura 2 – Vista do vertedouro central do reator anaeróbio de lodo fluidizado (RALF) da ETE Ouro Verde e unidade de geração de energia a partir do biogás	14
Figura 3 - Leito de secagem natural do lodo de esgoto da ETE Ouro Verde	15
Figura 4 – Pátio de armazenamento de lodo de esgoto (biossólido) da UGL Ouro Verde	15
Figura 5 – Concentrações de NPK no biossólido produzido na UGL Ouro Verde	24
Figura 6 – Comparação das concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) por lote de biossólido em base seca (em $\text{mg.kg}^{-1}$ ) da UGL Ouro Verde	25
Figura 7 – Regiões brasileiras com viabilidade econômica de utilização do biossólido, considerando o pior e o melhor cenário	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de lodo de esgoto ou produto derivado – agentes patogênicos	8
Tabela 2 – Frequência de monitoramento em função da quantidade de lodo processado	16
Tabela 3 – Frações de mineralização do nitrogênio.	17
Tabela 4 – Concentração das parcelas de nitrogênio por lote de biossólido em base seca (em $\text{mg.kg}^{-1}$ ) da UGL Ouro Verde	21
Tabela 5 – Concentração de nitrogênio disponível para as plantas por lote de biossólido em base seca (em $\text{mg.kg}^{-1}$ ) para aplicação superficial ( $N_{\text{disp/s}}$ ) e aplicação subsuperficial ( $N_{\text{disp/ss}}$ )	22
Tabela 6 – Concentração de pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) por lote de biossólido em base seca (em $\text{mg.kg}^{-1}$ ) da UGL Ouro Verde	22
Tabela 7 – Concentração de óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) por lote de biossólido em base seca (em $\text{mg.kg}^{-1}$ ) da UGL Ouro Verde	23
Tabela 8 - Concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) por lote de biossólido em base seca (em $\text{mg.kg}^{-1}$ ) da UGL Ouro Verde	24
Tabela 9 – Custos (em $\text{R$.t}^{-1}$ ) de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos e de calcário, de novembro/2012 a outubro/2013, no Estado do Paraná	27
Tabela 10 – Custo do nutriente ajustado em $\text{R$.t}^{-1}$ de nitrogenados, fosforados, potássicos e calcário dolomítico, no Estado do Paraná, para o período de novembro/2012 a outubro/2013	27
Tabela 11 – Custo correspondente de nutrientes por tonelada de biossólido em base seca ( $\text{R$.t}^{-1}$ )	28
Tabela 12 – Concentração de nutrientes NPK, Ca e Mg no biossólido em base úmida	29
Tabela 13 – Custos de nutrientes por tonelada de biossólido ( $\text{R$.t}^{-1}$ ) com diferentes teores de umidade	29
Tabela 14 – Comparação de custos totais de nutrientes em cada tonelada de biossólido em base seca e úmida ( $\text{R$.t}^{-1}$ )	30
Tabela 15 - Distância máxima (km) de viabilidade econômica para uso do biossólido da UGL Ouro Verde	30
Tabela 16 – Energia média agregada ao biossólido em base seca da ETE Ouro Verde	32

MARCON, Mônica K. Foltran. M. Sc. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, agosto de 2013. **Viabilidade econômica da utilização agrícola do bio sólido da Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) Ouro Verde.** Professor orientador: Dr. Elisandro Pires Frigo. Professor coorientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

## RESUMO

Devido ao crescimento da demanda mundial na produção de alimentos e culturas energéticas, que estão relacionados diretamente com aumento da utilização de fertilizantes, o emprego de alternativas viáveis de forma econômica e ambiental, vão de encontro ao conceito de sustentabilidade, de modo a evitar o risco de escassez e elevação de preços do produto. O resíduo resultante do tratamento de esgoto sanitário, conhecido como lodo, pode ser utilizado como bio sólido, desde que atendidas às exigências previstas na Resolução CONAMA nº. 375/2006. A reciclagem agrícola do bio sólido, como fertilizante, é permitida para culturas cuja parte comestível não entre em contato com o solo, sendo vedada para olerícolas, tubérculos, raízes e culturas inundadas. A partir de dados da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), foram verificados os relatórios de análises de parâmetros agrônômicos de 10 (dez) lotes de bio sólido, processados na Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) Ouro Verde, no município de Foz do Iguaçu. Para cada lote, foram relacionadas as concentrações dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg inseridos no bio sólido. Partindo do princípio que o bio sólido é doado a agricultores cadastrados na companhia de saneamento, que, no entanto, se responsabilizam pelos custos de transporte e de que esta despesa apenas é vantajosa se for equivalente ao custo de fertilizantes disponíveis no mercado, foi determinado o preço de fertilizantes por lote de bio sólido, de modo a estabelecer a distância máxima que justifica a busca e substituição do fertilizante químico pelo bio sólido. Os principais resultados encontrados permitem concluir que em uma tonelada de bio sólido da UGL Ouro Verde estão inseridos de R\$ 30,83 a R\$ 167,32 de fertilizantes, considerando-se o pior e o melhor cenário, respectivamente. Assim, a distância compensatória de busca do bio sólido para o agricultor variou de 280,24 km a 1521,12 km. A redução do teor de umidade do bio sólido permite que mais nutrientes sejam transportados. A reciclagem agrícola do lodo de esgoto da ETE Ouro Verde permite a redução da dependência de energia fóssil para a produção de fertilizantes químicos NPK em 362,81 MJ.kg<sup>-1</sup>, considerando o bio sólido em base seca.

**Palavras-chave:** lodo de esgoto, bio sólido, transporte.

MARCON, Monica K. Foltran. M. Sc. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, January 2014. **Economic viability of the agricultural use of biosolid from Sludge Management Unit (SMU) Green Gold.** Professor advisor: Dr. Elisandro Pires Frigo. Professor co-advisor: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

## ABSTRACT

Due to the growing global demand for food production and energy crops that are directly related to increased use of fertilizers, the use of viable alternatives for economic and environmental way, go against the concept of sustainability in order to avoid the risk shortages and rising prices of the product. The residue from the treatment of sewage, known as sludge, can be used as provided met the requirements laid down by Resolution CONAMA 375/2006. Agricultural recycling of sewage sludge as a fertilizer, is permitted for crops whose edible portion does not contact with the soil, being forbidden to vegetable crops, tubers, roots and flooded crops. From data Sanitation Company of Paraná (SANEPAR), where found reports of analyzes of agronomic parameters of ten (10) batches of biosolids processed in Sludge Management Unit (SMU) Green Gold, the city of Foz do Iguaçu . For each batch were related concentrations of N, P, K, Ca and Mg entered into biosolids. Assuming that the sludge is donated to registered farmers in the sanitation company, which, however, are responsible for transportation costs and that this expenditure is only advantageous if it is equivalent to the cost of fertilizers available in the market, the price was determined fertilizer per batch of biosolids in order to establish the maximum distance that justifies the search and replacement of chemical fertilizer by biosolids. The main findings conclude that in a ton of biosolids SMU Green Gold are inserted from R\$ 30.83 to R\$ 167.32 fertilizers, considering the worst and the best scenario, respectively. Thus, the compensatory distance search of biosolids to farmers ranged from 280.24 km to 1521.12 km. Reducing the damp content of the biosolids allows more nutrients to be transported. Agricultural recycling of sewage sludge from SMU Gold Green allows the reduction of dependence on fossil fuels for the production of chemical fertilizer NPK at  $362.81 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , considering the sludge on a dry basis.

**Keywords:** sewage sludge, biosolid, transport.

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Reciclagem agrícola do lodo de esgoto	3
2.1.1 Lodo de esgoto	3
2.1.2 Biossólido	4
2.1.3 Nutrientes no biossólido	5
2.1.4 Metais pesados	8
2.1.5 Culturas aptas ao biossólido	8
2.1.6 Recomendações de transporte	9
2.2 Viabilidade econômica	10
2.3 Energia inserida no biossólido	11
2.2.1 Coeficientes energéticos	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Características da área de estudo	13
3.2 Processo de tratamento do lodo	14
3.3 Dados considerados na caracterização do biossólido	16
3.2 Avaliação econômica	18
3.3 Energia economizada na produção de fertilizantes NPK	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1 Variáveis de interesse agrônomo	21
4.2 Avaliação econômica	26
4.2.1 Custos de fertilizantes e nutrientes do biossólido em base seca	26
4.2.2 Custos de frete	28
4.3 Energia economizada na produção de fertilizantes NPK	32
5. CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções que possam compatibilizar critérios ambientais, econômicos e de sustentabilidade cresceram nos últimos anos, devido à escassez de recursos energéticos e naturais, considerando a forte dependência de fontes não renováveis. Daher (2008) considera que há um desequilíbrio provocado pela produção de bioenergia e a de alimentos, e com o aquecimento na demanda a pressão sobre a produtividade agrícola no campo gerou-se também um dramático desequilíbrio na disponibilidade de fertilizantes e suas matérias-primas, com a elevação dos preços em nível mundial.

Atualmente, os fertilizantes industriais, demandam muita energia fóssil no seu processo de fabricação, influenciando significativamente o aumento do custo energético e ambiental (MENDES JUNIOR, 2011). Em contrapartida, a atividade humana produz resíduos diversos, muitos deles sem a destinação adequada, que poderiam ser reaproveitados de alguma maneira para reduzir esses impactos. Um deles é o esgoto sanitário, em forma de efluente. Após o processo de tratamento, a massa resultante é conhecida pelo nome de lodo de esgoto, que passa a ser um problema ambiental e econômico.

A gestão do destino final dos lodos de esgoto é uma atividade complexa e onerosa. Com o aumento dos custos para sua deposição em aterros sanitários, a aplicação no solo tem-se tornado uma alternativa atrativa para o gerenciamento de lodos de cidades que querem reduzir seus custos e impactos ambientais (SALVADOR, 2006).

Segundo Poggere et al. (2012), a legislação federal define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário, enquanto a legislação estadual, no caso do Estado do Paraná, a complementa, dispondo sobre licenciamento ambiental com condições e padrões ambientais, além de outras providências, para empreendimentos de saneamento.

A Resolução CONAMA n.º 375/2006 considera que o lodo de esgoto sanitário constitui fonte de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas e que sua aplicação no solo pode trazer benefícios à agricultura, bem como, que seu uso é

uma alternativa que apresenta vantagens ambientais quando comparado a outras práticas de destinação final, se enquadrando nos princípios de reutilização de resíduos de forma ambientalmente adequada.

Considerando as normativas vigentes no Brasil, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) desenvolve o Programa de Utilização Agrícola de Lodo de Esgoto, que proporciona a disposição final adequada, melhoria das condições dos solos e o aumento de produtividade das culturas agrícolas, dispondo de Unidades de Gerenciamento de Lodo (UGL) devidamente licenciadas pelo órgão ambiental competente.

Esta prática vai de encontro com os preceitos definidos na Agenda 21, que seria um instrumento de planejamento para a construção de sociedades sustentáveis, em diferentes bases geográficas, conciliando métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica (BRASIL, 2013).

Um dos pontos tratados no documento internacional é a gestão ecologicamente racional dos rejeitos sólidos e questões relacionadas com as matérias fecais, além da promoção do desenvolvimento rural e agrícola sustentável.

Desta forma, considerando a importância da reciclagem agrícola do lodo de esgoto, a partir de uma série histórica de dados da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), foram considerados os parâmetros agrônômicos de dez lotes de bio sólidos processados na Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) Ouro Verde, determinando-se a quantidade e o preço correspondente dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio inseridos no bio sólido, bem como, a distância de viabilidade econômica que justifica a substituição dos fertilizantes químicos pelo uso do bio sólido, considerando os custos de frete arcados pelo agricultor.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Reciclagem agrícola do lodo de esgoto

#### 2.1.1 Lodo de esgoto

Esgoto sanitário é o despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária, sendo que o corpo receptor é qualquer coleção de água natural ou solo que recebe o lançamento de esgoto em seu estágio final (ABNT NBR 9648/1986).

O esgoto coletado é direcionado a uma estação de tratamento de esgoto (ETE), que por definição da ABNT NBR 12209/1992, é o conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, cuja finalidade é reduzir as cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionar a matéria residual resultante do tratamento. Um desses resíduos é conhecido como lodo do esgoto.

Após a utilização da água potável e sua conseqüente transformação em esgoto, as estações de tratamento concentram a poluição remanescente no lodo, antes de devolver à natureza os efluentes tratados. O lodo é, portanto, o último resíduo do ciclo urbano da água (FERNANDES e SILVA, 1996).

De modo geral, no Brasil, as estações de tratamento de efluentes (ETEs) são projetadas para remover sólidos sedimentáveis e matéria orgânica carbonácea, com deficiências na remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo), causadores da deterioração dos recursos hídricos e aceleradores da eutrofização dos corpos d'água receptores dos efluentes (LAMEGO NETO e COSTA, 2011).

Em virtude das dificuldades de dar um destino adequado ao resíduo que permanece após o tratamento dos esgotos, são possibilidades de disposição final a incineração, a deposição em aterros sanitários, a produção de tijolos, a recuperação de solos e o uso em reciclagem agrícola (ARMSTRONG, 2006). A reciclagem, ao permitir utilidade a todo tipo de material descartado que se acumula nos centros urbanos, agrega valor econômico aos subprodutos gerados (QUINTANA, 2006).

### 2.1.2 Biossólido

Segundo Lira, Guedes e Schalch (2008), quando devidamente tratado, o lodo é chamado de biossólido, e é utilizado como fertilizante e condicionador do solo em função da riqueza em nutrientes e matéria orgânica. Os autores citam que esse resíduo pode ser reutilizado para fins agrícolas e/ou florestais, evitando sua deposição em aterros e lixões, geralmente localizados na periferia das grandes cidades, uma vez que o lodo era lá acondicionado ou até mesmo, devolvido aos próprios cursos de água. Acrescentam que, no futuro, o biossólido poderá ser considerado um insumo, gerando um estímulo para o tratamento do esgoto urbano antes de promoverem a eutrofização e poluição dos rios.

Entretanto, o biossólido, quando não encontrada uma alternativa viável do ponto de vista social, econômico e ambiental para sua reciclagem, acumula-se nos pátios das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's), geralmente localizadas em áreas urbanas, ocupando espaço que nem sempre está disponível, com a elevação dos custos operacionais devido ao armazenamento do material, além de provocar a poluição de cursos d'água em virtude da ação da chuva, anulando o efeito inicial pretendido pelo tratamento dos esgotos urbanos (SILVA, RESCK e SHARMA, 2002).

Para Salvador (2006), a reciclagem de lodos de esgoto deve ser realizada de modo correto, proporcionando segurança e eficácia na aplicação dos lodos, enfatizando a necessidade da eliminação de patógenos, a presença ou não de substâncias químicas indesejáveis e a determinação da dose de lodo a ser aplicada nos solos agrícolas. O pesquisador concluiu que lodos de esgoto urbanos devidamente tratados podem atuar como substitutos de corretivos e adubos sintéticos, sendo eficientes no combate à acidez do solo e no fornecimento de nutrientes para o solo em formas aptas para a absorção das plantas. A aplicação de lodo tratado gera elevação do pH do solo tanto em superfície como em profundidade.

No Brasil, todas as práticas relacionadas à reciclagem do lodo de esgoto devem estar fundamentadas de acordo com a Resolução CONAMA n°. 375/2006. Desta forma, os lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, para terem aplicação agrícola, deverão ser submetidos a processo de redução de patógenos e

da atratividade de vetores, de acordo com o definido em seu Anexo I. A caracterização do lodo de esgoto ou produto derivado a ser aplicado deve incluir os aspectos de potencial agrônomo, substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas, indicadores bacteriológicos, agentes patogênicos e estabilidade. Para fins de utilização agrícola, a resolução determina que o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70.

Souza et al. (2009a) relataram sobre a variação das características dos lodos de diferentes locais do país em função da época, do tipo de tratamento e da bacia de drenagem, podendo ocorrer alterações, quando do uso agrícola, nos atributos químicos, físicos e biológicos dos solos.

### **2.1.3 Nutrientes no biossólido**

Especificadamente para a caracterização do potencial agrônomo do lodo de esgoto, deverão ser determinados os parâmetros de carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato e nitrito, pH, potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total, umidade e sólidos voláteis e totais (Resolução CONAMA n<sup>o</sup>. 375/2006).

Segundo Andreoli et al. (2003), do ponto de vista agrícola, o lodo contém teores significativos de matéria orgânica e nutrientes, principalmente nitrogênio (N), fósforo (P) e micronutrientes, atuando como condicionador do solo e fertilizante, podendo atuar como corretivo do solo devido à adição de quantidades significativas de reagentes alcalinos (estabilização química).

A variabilidade nas concentrações de nutrientes no biossólido foi constatada por Silva, Resck e Sharma (2002), indicando que as alterações ocorrem diariamente, dificultando a determinação do seus teores em uma massa de biossólido.

Considerando a variação das concentrações de nutrientes existentes nos lotes de lodo de esgoto, a caracterização, representada por amostragem, é válida

exclusivamente para o lote gerado no período compreendido entre uma amostragem e a subsequente (Resolução CONAMA nº. 375/2006).

As quantidades de lodo a serem aplicadas e os seus efeitos no sistema solo-planta dependem de diversos fatores, a exemplo da qualidade e composição, do tipo de solo e suas características e da planta cultivada. Algumas dessas informações podem ser extrapoladas a partir de experimentos de vasos, entretanto, resultados mais seguros e conclusivos são obtidos através de experimentos de longa duração e em condições de campo (MARTINS et al., 2003).

Barros et al. (2011) verificaram que a adição do bio-sólido ao solo aumentou os teores dos macronutrientes na parte aérea das plantas e promoveu aumento na quantidade de matéria seca na cultura do milho, de maneira que os teores de elementos traço estiveram abaixo dos limites fitotóxicos, não apresentando sintomas de deficiência ou toxidez nas plantas. Martins et al. (2003) confirmam a possibilidade de uso do lodo de esgoto como fertilizante para a cultura do milho.

Para Lemainski e Silva (2006), o aproveitamento do bio-sólido como fertilizante na cultura da soja é viável em termos agrônômicos e econômicos, sendo, em média, 18% mais eficiente do que o fertilizante mineral como fonte de nutrientes na cultura da soja.

Chiba, Mattiazzo e Oliveira (2008) verificaram que para produção de cana-de-açúcar, utilizando o lodo de esgoto, não é necessária a complementação com N mineral. O experimento indicou efeitos positivos na produção de colmos e não foi constatada a ocorrência de efeitos deletérios nas propriedades tecnológicas do caldo de cana-de-açúcar.

Em outro estudo da cultura de cana de açúcar, Silva et al. (2001) constataram que o lodo de esgoto aumenta a fertilidade do solo pela diminuição da acidez e pelo fornecimento de nutrientes, principalmente de Ca, P, S e Zn.

Ribeirinho et al. (2012) relatam sobre a viabilidade da utilização de lodo de esgoto para a cultura do girassol, que apresentou produtividade equivalente à obtida pela adubação mineral, com teores adequados de macro e micronutrientes na planta, desde que realizada a complementação potássica no lodo. O efeito residual da aplicação sucessiva de lodo de esgoto mostrou ser importante fonte de P para a

cultura, somado ao efeito benéfico da matéria orgânica que, provavelmente, favoreceu a disponibilidade de P.

Na cultura do *Eucalyptus grandis*, a aplicação do bio sólido incrementa o desenvolvimento das árvores e propicia aumento no acúmulo de biomassa epígea (LIRA, GUEDES e SCHALCH, 2008).

Baches et al. (2009) constataram a equivalência de desempenho da adubação química com a de lodo de esgoto, no fechamento de tapetes de grama esmeralda (*Zoysia japonica* Steud).

Segundo Ferreira et al. (2001), há eficiência do lodo de esgoto em disponibilizar P, atuando como um fertilizante fosfatado de liberação lenta e gradativa, evidenciando a potencialidade deste bio sólido em suprir adubações com P, especialmente em culturas perenes.

Andreoli, Pegorini e Castro (2000b) afirmaram que um solo é considerado apto para a reciclagem agrícola quando houver a rápida atividade biológica e a ciclagem de nutrientes, matéria orgânica e outros materiais existentes no lodo, sem oferecer riscos ao ambiente, à saúde e ao potencial produtivo do solo, a exemplo da movimentação dos componentes do lodo por lixiviação ou por escoamento superficial.

De acordo com a Resolução CONAMA n.º 375/2006, considera-se, para o cálculo do nitrogênio disponível, a fração de mineralização (FM), que é a fração do nitrogênio total nos lodos de esgoto ou produto derivado, que, por meio do processo de mineralização, será transformada em nitrogênio inorgânico disponível para as plantas.

#### **2.1.4 Metais pesados**

A presença de metais pesados no esgoto está relacionada com efluentes provenientes, principalmente, de indústrias.

Em estudo conduzido por Andreoli et al. (2003), verificou-se que o uso agrícola de lodos de esgoto caleados em concentrações adequadas de metais

pesados e em doses apropriadas não ofereceram risco de contaminação ao meio ambiente.

Pegorini et al. (2003) estudaram a presença de metais pesados no lodo de esgoto da produzido nas ETE's da SANEPAR. Os resultados obtidos confirmaram a excelente qualidade e o potencial para uso como insumo agrícola e fonte de macro e micronutrientes, sendo que mais de 90% das amostras analisadas apresentaram teores de metais inferiores a 50% dos limites normativos do Instituto Ambiental do Paraná (IAP), da Comunidade Européia (CE) e dos Estados Unidos (EUA).

### 2.1.5 Culturas aptas ao bio sólido

A Resolução CONAMA n.º. 375/2006 proíbe a utilização de qualquer classe de lodo de esgoto ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos, raízes e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo. Basicamente, os lodos são classificados em classe A ou B, conforme a Tabela 1:

**Tabela 1** - Classes de lodo de esgoto ou produto derivado – agentes patogênicos

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes termotolerantes < $10^3$ NMP.g <sup>-1</sup> de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo.g <sup>-1</sup> de ST <i>Salmonella</i> ausência em 10g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF.g <sup>-1</sup> de ST
B	Coliformes termotolerantes < $10^6$ NMP.g <sup>-1</sup> de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo.g <sup>-1</sup> de ST

Fonte: Resolução CONAMA n.º. 375/2006

Onde:

ST: sólidos totais;

NMP: número mais provável;

UFF: unidade formadora de foco;

UFP: unidade formadora de placa.

A normativa brasileira também determina que nos solos que receberam a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado, as pastagens poderão ser implantadas após um período mínimo de 24 meses da última aplicação. Além disso, somente poderão ser cultivadas olerícolas, tubérculos, raízes e demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo, bem como cultivos inundáveis, após um período mínimo de 48 meses da última aplicação. A utilização de lodo de esgoto ou produto derivado enquadrado como Classe B era restritiva ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas. Entretanto, após cinco anos da publicação da norma, somente é permitida a utilização do lodo enquadrado como Classe A.

Cabe à UGL caracterizar o solo agrícola, antes da primeira aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado, observando o constante nos Anexos II e IV da Resolução CONAMA nº. 375/2006, quanto aos parâmetros de fertilidade, sódio trocável, condutividade elétrica e substâncias inorgânicas. O monitoramento dos parâmetros de fertilidade deverá ser realizado a cada 3 (três) anos, ressalvado nos casos de lodo estabilizado pelo método alcalino, cujo monitoramento deverá ser realizado a cada aplicação.

### **2.1.6 Recomendações de transporte**

As recomendações de transporte estão claramente definidas no anexo VII da Resolução CONAMA nº. 375/2006, sob responsabilidade da UGL, de onde se destacam as documentações necessárias para a retirada do biossólido, o modelo de caminhões e acomodação da carga, a indicação de medidas de proteção coletiva e individual, bem como a higienização pessoal, além da responsabilização sobre eventual sinistro.

Quanto à estocagem do lodo de esgoto ou produto derivado na propriedade, a normativa brasileira determina o período máximo de 15 dias, devendo atender aos seguintes critérios: declividade da área de estocagem não superior a 5%; distância mínima de 100 m (cem metros) de poços rasos e residências e de 15 m (quinze metros) de vias de domínio público, drenos interceptadores e divisores de águas

superficiais de jusante, e de trincheiras drenantes, de águas subterrâneas e superficiais. Destaca-se que é proibida a estocagem do lodo de esgoto ou produto derivado diretamente sobre o solo contendo líquidos livres, cuja identificação deverá ser feita pela norma brasileira vigente.

## **2.2 Viabilidade econômica**

A viabilidade econômica para o emprego do biossólido como substituto dos fertilizantes químicos está relacionada com os custos de transporte e, conseqüentemente, a distância.

Para Quintana (2010), o uso do lodo de esgoto na agricultura permite a economia de fertilizantes industriais, o que gera redução de gastos na compra desses insumos e de uso de petróleo na fabricação dos mesmos, pois o custo de transporte do lodo é compensador, se comparado com o quantitativo equivalente de fertilizantes.

Ao considerar a hipótese de envio do lodo de esgoto para aterro sanitário, na comparação do custo de transporte subsidiado pela ETE geradora de resíduos e o custo arcado pelo agricultor, Quintana (2006) observou que, se destinado ao último, o transporte cobriria uma maior distância.

Lemainski e Silva (2006) constataram que o aproveitamento do biossólido como fertilizante na cultura da soja é viável em termos agronômicos e econômicos. A diminuição do teor de umidade implicaria na diminuição de custos de transporte do biossólido, agregando valor ao produto e aumentando o atrativo de uso pelos agricultores.

Entretanto, existe o custo adicional do processo de secagem. Borges et al. (2009) consideram que os elevados tempos em áreas de secagem podem inviabilizar a retirada de umidade do lodo tratado termicamente, portanto, a utilização agrícola do lodo higienizado deve ser feita preferencialmente nas imediações da própria ETE.

Andreoli, Pegorini e Castro (2000a), em estudo preliminar de viabilidade da reciclagem agrícola do lodo em Foz do Iguaçu, previram que a maior dificuldade do programa de reciclagem seria com o transporte, pois a centralização da gestão do lodo em um único sistema acarretaria em duas operações de transporte: uma para concentrar o lodo na unidade central e outra para transportar o resíduo até a propriedade rural. Além disso, com o trajeto em vias urbanas, seriam necessárias medidas cautelosas, estendendo-se além das características do veículo de transporte, para a manutenção de uma equipe de emergência, no caso de acidentes.

Biscaia e Miranda (1996) observaram que o retorno financeiro por unidade monetária de biossólido aplicado no milho foi quatro vezes maior que o retorno do fertilizante mineral, considerando o preço do biossólido como sendo apenas o referente ao custo de transporte. Quintana, Bueno e Melo (2012) concluíram que o valor agregado ao lodo de esgoto é superior ao custo de frete.

### **2.3 Energia inserida no biossólido**

Para Souza et al. (2009b), a crise energética do mundo atual se reflete em vários aspectos da vida humana, a exemplo da utilização irracional das fontes de energia não renováveis, que está contribuindo diretamente para a degradação do meio ambiente e conseqüente diminuição dos recursos naturais, ocasionando, na produção agropecuária, a elevada utilização de máquinas e recursos não renováveis, como combustíveis fósseis e fertilizantes, comprometendo a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Em estudo exploratório realizado por Mendes Junior (2011), foi verificada a dependência de combustíveis provenientes de fontes fósseis de energia nos processos produtivos de obtenção dos fertilizantes nitrogenados, não apenas em sua matéria-prima (amônia), mas também no processo da queima de combustíveis fósseis para a obtenção da uréia, acarretando problemas de ordem ecológica e socioeconômica, ameaçando assim a sustentabilidade.

Em estudo do aproveitamento do biossólido proveniente de uma ETE com tratamento anaeróbio, Quintana (2010) relata que os índices energéticos adotados para os macronutrientes, consideram os custos energéticos para produção desses fertilizantes. Dessa forma, pode-se afirmar que essa massa de lodo de esgoto permite a economia de 81304,62 MJ de energia de origem fóssil, que seriam necessárias na produção de N, P e K.

A tendência crescente dos preços de energia demanda estudos sobre a viabilidade técnico-econômica de fontes alternativas de energia, além das questões de ordem ambiental (CERVI, 2009).

### **2.2.1 Coeficientes energéticos**

Na determinação do coeficiente energético do lodo gerado na ETE de Uberlândia, Silva (2011) encontrou o poder calorífico superior de  $16,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , valor este que confere equivalência ao poder calorífico da madeira úmida. O material também apresentou quase que sua totalidade em carbono orgânico total frente ao seu conteúdo de carbono total.

Domínguez et al. (2004) comparam a equivalência do poder calorífico do lodo de esgoto seco a alguns combustíveis convencionais ou não, a exemplo do carvão, papel, madeira ou licor negro.

O lodo de esgoto se mostrou viável na utilização como fonte renovável de energia, devido ao valor expressivo do poder calorífico, da ordem de  $17,70 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , com a possibilidade de utilizar as cinzas deste lodo em novas composições cerâmicas e na agricultura (MORAIS et al., 2009).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Características da área de estudo

A Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) Ouro Verde, está localizada à rua Idalina Correa Gradela, s/n, no município de Foz do Iguaçu, Paraná, com coordenadas geográficas S 25°33'36" W 54° 34'48". É mantida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). O local integra o complexo da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Ouro Verde, conforme localização da Figura 1.



**Figura 1** – Localização da UGL Ouro Verde.  
Fonte: Adaptado de Google Maps (2013).

O material processado na UGL é predominantemente doméstico e proveniente de ETE's pertencentes à Unidade Regional de Foz do Iguaçu (URFI), todas com sistema de tratamento biológico, através de reator anaeróbio de lodo fluidizado (RALF) ou de reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA ou UASB). Contribuem para a UGL os lodos provenientes de: ETE Ouro Verde, ETE Beira Rio, ETE Jupira, ETE Três Lagoas, ETE Iate Clube, ETE São Miguel do Iguaçu, ETE Itaipulândia, ETE Medianeira e ETE Santa Terezinha de Itaipu.

O biossólido da UGL Ouro Verde foi destinado gratuitamente a produtores rurais cadastrados na SANEPAR, que também receberam a recomendação agrônômica para o plantio e acompanhamento técnico do Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER). Cabe aos agricultores se responsabilizarem pelos custos referentes ao transporte do biossólido da UGL até a propriedade rural. As principais culturas que receberam o biossólido foram trigo, milho, soja e feijão.

Na ETE Ouro Verde também está localizado o projeto piloto de geração de energia. Como resultados da digestão anaeróbia do esgoto doméstico são produzidos anualmente cerca de 18000 m<sup>3</sup> de gás metano, utilizado como energia. O sistema de aproveitamento energético da ETE Ouro Verde é constituído de coleta, filtração e armazenamento do biogás e de geração e conversão de energia térmica em elétrica, com cerca de 16000 kWh.ano<sup>-1</sup>.

A Figura 2 demonstra parte da ETE Ouro Verde.



**Figura 2** – Vista do vertedouro central do reator anaeróbio de lodo fluidizado (RALF) da ETE Ouro Verde e unidade de geração de energia a partir do biogás.

### 3.2 Processo de tratamento do lodo

O desaguamento do lodo de esgoto das ETE's que integram a UGL Ouro Verde é realizado em leito de secagem natural. A higienização é feita utilizando-se o

processo de estabilização alcalina prolongada, que consiste na adição de cal virgem ou hidratada com misturador móvel a 30% dos sólidos totais e armazenamento pelo período mínimo de 30 dias, atendendo a procedimentos internos da SANEPAR. Após este período, o material é amostrado para análise laboratorial, em atendimento às exigências vigentes para o uso do biossólido. Os leitos de secagem e local de armazenamento podem ser visualizados nas Figuras 3 e 4.



**Figura 3** - Leito de secagem natural do lodo de esgoto da ETE Ouro Verde.



**Figura 4** – Pátio de armazenamento de lodo de esgoto (biossólido) da UGL Ouro Verde.

### 3.3 Dados considerados na caracterização do biossólido

Para este estudo, foram analisados os históricos dos relatórios de caracterização do lodo de esgoto para reciclagem agrícola.

Tomou-se o cuidado em considerar apenas os dados consistentes relacionados aos nutrientes, com os parâmetros agronômicos do biossólido em base seca, contendo as parcelas constituintes por nitrogênio, fósforo e potássio (NPK). Também foram consideradas as parcelas de cálcio e magnésio, devido à adição de cal no processo de alcalinização prolongada, sendo que as respectivas concentrações foram relacionadas ao calcário.

Nos relatórios constavam dados de amostras de 10 (dez) lotes de biossólidos, compreendendo o período de 2002 a 2012, que foram numerados em algarismos romanos. Os procedimentos de amostragem e análise laboratorial passaram a atender, a partir de 2009, a Resolução SEMA/PR n°. 021/2009 e Resolução CONAMA n°. 375/2006. Para os períodos anteriores, não consta a definição da metodologia aplicada para a mensuração dos nutrientes nos relatórios. A frequência de monitoramento da qualidade do biossólido produzido na UGL, que acabou por influenciar no número de dados avaliados, está especificada na Tabela 2.

**Tabela 2** – Frequência de monitoramento em função da quantidade de lodo processado

Quantidade de lodo de esgoto ou produto derivado destinado para aplicação na agricultura em t.ano <sup>-1</sup> (base seca)	Frequência de monitoramento
Até 60	Anual, preferencialmente anterior ao período de maior demanda pelo lodo de esgoto ou produto derivado
De 60 a 240	Semestral, preferencialmente anterior aos períodos de maior demanda pelo lodo de esgoto ou produto derivado
De 240 a 1500	Trimestral
De 1500 a 15000	Bimestral
Acima de 15000	Mensal

Fonte: Resolução CONAMA n°. 375/2006, artigo 10

Na determinação dos parâmetros agronômicos, foi realizado o ajuste de cálculo dos dados iniciais, em função do nitrogênio disponível ( $N_{disp}$ ) para as plantas,

extrapolado também para os dados anteriores a 2009. Assim, foram consideradas as seguintes relações, conforme Resolução CONAMA nº. 375/2006, dadas nas eq. 1 e 2:

- Cálculo do nitrogênio disponível para aplicação superficial:

$$N_{\text{disp}/s} = \frac{FM(N_{\text{KJ}} - N_{\text{NH}_3})}{100} + 0,5(N_{\text{NH}_3}) + (N_{\text{NO}_3} + N_{\text{NO}_2}) \quad \text{eq. 1}$$

- Cálculo do nitrogênio disponível para aplicação subsuperficial:

$$N_{\text{disp}/ss} = \frac{FM(N_{\text{KJ}} - N_{\text{NH}_3})}{100} + (N_{\text{NO}_3} + N_{\text{NO}_2}) \quad \text{eq. 2}$$

Onde:

$N_{\text{disp}/s}$ : Nitrogênio disponível para aplicação superficial ( $\text{mg.kg}^{-1}$ );

$N_{\text{disp}/ss}$ : nitrogênio disponível para aplicação subsuperficial ( $\text{mg.kg}^{-1}$ );

FM: fração de mineralização do nitrogênio (%);

$N_{\text{KJ}}$ : nitrogênio Kjeldahl (nitrogênio orgânico total + nitrogênio amoniacal) ( $\text{mg.kg}^{-1}$ );

$N_{\text{NH}_3}$ : nitrogênio amoniacal ( $\text{mg.kg}^{-1}$ );

$N_{\text{NO}_3}$ : nitrogênio nitrato ( $\text{mg.kg}^{-1}$ );

$N_{\text{NO}_2}$ : nitrogênio nitrito ( $\text{mg.kg}^{-1}$ );

A fração de mineralização (FM) é determinada conforme o tipo de digestão do lodo, de acordo com a Tabela 3.

**Tabela 3** – Frações de mineralização do nitrogênio

Material	Fração de Mineralização (FM)
Lodo de esgoto não digerido	40%
Lodo de esgoto digerido aerobicamente	30%
Lodo de esgoto digerido anaerobicamente	20%
Lodo de esgoto compostado	10%

Fonte: Resolução CONAMA 375/2006

Os demais parâmetros, referentes ao fósforo, potássio, cálcio e magnésio, não necessitaram de ajuste de cálculo, sendo considerados os valores originais dos relatórios de análises laboratoriais do acervo da Sanepar.

A partir da concentração de nutrientes contidas no biossólido, foi possível estabelecer a equivalência de fertilizantes químicos e calcário dolomítico inseridos isoladamente em cada lote, considerando, a princípio, a base seca, de modo a estabelecer o melhor e pior cenário.

Na análise estatística dos dados, utilizou-se o *software* Assistat como ferramenta de cálculo, determinando-se a média, máximo e mínimo, o desvio padrão e coeficiente de variação. Adotou-se o método de Kolmogorov-Smirnov para o teste de normalidade.

### **3.2 Avaliação econômica**

A partir da concentração de nutrientes por lote avaliado, foi possível determinar o valor de mercado correspondente aos fertilizantes químicos inseridos em uma tonelada de biossólido.

Os custos por tonelada dos fertilizantes industrializados foram extraídos dos dados disponibilizados no sítio da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), referentes ao período de novembro de 2012 a outubro de 2013, por serem os dados mais recentes até a data de elaboração deste trabalho. Para fins de cálculo, considerou-se o preço médio praticado no período. Por não se tratarem de compostos puros, os dados foram ajustados em função dos teores de nitrogenados, fosfatados e potássicos em cada produto comercializado. Quanto ao cálcio, na comparação direta, optou-se pela escolha do calcário dolomítico em vez do calcítico, devido à maior concentração de magnésio, uma vez que nas análises do biossólido, este nutriente apresentou-se de forma significativa. A concentração correspondente de fertilizantes, em percentual, foi baseada nos produtos disponíveis no mercado.

Assim, multiplicando-se os valores referentes aos custos por tonelada de fertilizantes químicos pelas concentrações de nutrientes contidas nos lotes avaliados,

obtiveram-se os custos de nutrientes inseridos em uma tonelada de bioestabilizado em base seca.

Para a substituição de fertilizantes químicos pelo bioestabilizado, Silva, Resck e Scharma (2002), calcularam a distância máxima eficiente de transporte do lodo de esgoto, partindo do suposto de que existe a vantagem de uso pelo agricultor, quando o valor total dos nutrientes contidos numa massa definida do material seja igual ou superior ao custo do frete para o transporte entre a ETE geradora e o local de aplicação. Partindo deste princípio, a distância de viabilidade econômica para o transporte foi calculada através da eq 4.

$$d \leq \frac{CN}{CT} \quad \text{eq. 4}$$

Onde:

d: distância em quilômetros (km);

CN: custo dos nutrientes inseridos em 1 tonelada de bioestabilizado (R\$.t<sup>-1</sup>);

CT: custo do transporte em por tonelada – quilometro (R\$.t<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>).

Considerando que o custo de transporte é influenciado diretamente pela capacidade de carga do veículo, em volume e massa, foi necessário estabelecer a relação entre a umidade do material e a capacidade de transporte, considerando que os relatórios de análise do bioestabilizado estudados continham os teores de umidade do material *in natura*. Desta forma, quanto menor o teor de umidade, maior a concentração de nutrientes, uma vez que as análises foram realizadas em base seca. Há de se destacar que também ocorre variação no volume, sendo também um fator determinante nos custos do frete, de acordo com os limites de cargas do veículo utilizado. Lima (2009) observou que com a perda de umidade, ocorre uma diminuição considerável do volume inicial de lodo, independentemente de ter passado ou não pelo digestor e da adição de cal. No entanto, esta redução não foi avaliada no presente trabalho, devido à falta de dados quanto à massa específica do bioestabilizado por lote.

Desta forma, foi recalculada a concentração de nutrientes nos lotes de biossólido considerando a umidade *in natura*, que é a condição válida para o transporte.

O custo do frete foi extraído do Anuário 2012 do Sistema de Informações de Fretes (SIFRECA), da Universidade de São Paulo, publicado no mês de janeiro/2013, por expressarem valores comumente utilizados no cálculo do frete nacional, em função da tonelada transportada e quilometro rodado e por ser a última publicação disponível até o presente trabalho.

Aplicando a eq. 4, foi determinada a distância máxima de viabilidade econômica no emprego do biossólido, simulada para os cenários de concentração de nutrientes de cada lote. Foram também exemplificados os municípios que apresentaram tal viabilidade.

### **3.3 Energia economizada na produção de fertilizantes NPK**

Através de coeficientes energéticos pré-definidos por Teixeira et. al. (2005), foi determinada a energia média que deixou de ser empregada, e portanto, economizada, para a produção de fertilizantes químicos NPK, considerando as concentrações em base seca de biossólido.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Variáveis de interesse agrônômico

Avaliando-se isoladamente os fertilizantes inseridos no bio sólido, foram avaliados os dados de relatórios referentes às concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

As concentrações de nitrogenados inseridos no bio sólido estão retratadas na Tabela 4.

**Tabela 4** – Concentração das parcelas de nitrogênio por lote de bio sólido em base seca (em mg.kg<sup>-1</sup>) da UGL Ouro Verde

Lote	Amostragem	N <sub>T-Kjeldahl</sub>	N <sub>amoniacal</sub>	N <sub>nitrito</sub>	N <sub>nitrito</sub>
I	jul/02	9100			
II	abr/03	15000			
II	fev/05	15200			
IV	set/05	13700			
V	mai/06	17100			
VI	mar/07	16100			
VII	mar/09	11080	666	16	0
VIII	ago/10	11250	2900	1546	0
IX	jul/11	20700	7300	1890	0
X	abr/12	18850	3678	0	0
<i>Média</i>		<i>14808</i>	<i>3635,88</i>	<i>863</i>	<i>0</i>
<i>Desv. Padrão</i>		<i>3629,09</i>	<i>2756,16</i>	<i>997,229</i>	<i>0</i>
<i>Coef. Variação</i>		<i>24,5076</i>	<i>75,8045</i>	<i>115,554</i>	<i>0</i>
<i>Mínimo</i>		<i>9100</i>	<i>666</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Máximo</i>		<i>20700</i>	<i>7300</i>	<i>1890</i>	<i>0</i>

Fonte: Relatórios de análises da SANEPAR.

Analisando a Tabela 4, os dados apresentaram normalidade segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov, com  $p_{\text{valor}} > 0,15$ . No entanto, há grande dispersão quanto à concentração de nitrogênio, especialmente das parcelas amoniacal e nitrito. Não houve a presença de nitritos no material avaliado, ou este se manteve abaixo dos níveis de detecção do teste laboratorial utilizado.

Observou-se que apenas a partir do ano de 2009 foram analisadas, em separado, as parcelas relativas ao nitrogênio, indo de encontro com a publicação da Resolução SEMA/PR 021/2009, que regulamenta a utilização do lodo para fins agrícolas no Estado do Paraná. Esta avaliação é relevante para o cálculo do

nitrogênio disponível para as plantas, através das Equações 1 e 2, na aplicação superficial e subsuperficial, respectivamente. Para os lotes I a VI, analisados anteriormente a 2009, em que não foram avaliadas as parcelas de nitrogênio amoniacal, nitratos e nitritos, foi considerado para efeitos de cálculo, apenas o  $N_{\text{Kjeldahl}}$  multiplicado pelo fator de mineralização da Tabela 3, que foi de 20%, uma vez que o lodo foi digerido anaerobiamente. Os resultados estão expressos na Tabela 5.

**Tabela 5** – Concentração de nitrogênio disponível para as plantas por lote de biossólido em base seca (em  $\text{mg.kg}^{-1}$ ) para aplicação superficial ( $N_{\text{disp/s}}$ ) e aplicação subsuperficial ( $N_{\text{disp/ss}}$ )

Lote	$N_{\text{disp/s}}$	$N_{\text{disp/ss}}$
I	1820	1820
II	3000	3000
III	3040	3040
IV	2740	2740
V	3420	3420
VI	3220	3220
VII	2432	2099
VIII	4666	3216
IX	8220	4570
X	4873	3035
<i>Média</i>	<i>5047,78</i>	<i>2098,80</i>
<i>Desv. Padrão</i>	<i>2386,25</i>	<i>1018,76</i>
<i>Coef. Variação</i>	<i>47,27</i>	<i>48,54</i>
<i>Mínimo</i>	<i>1820</i>	<i>1820</i>
<i>Máximo</i>	<i>8220</i>	<i>4570</i>

Os dados relativos aos fosfatados, na forma de pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) constam na Tabela 6, sendo desnecessário qualquer cálculo adicional para a determinação da concentração deste nutriente.

**Tabela 6** – Concentração de pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) por lote de biossólido em base seca (em  $\text{mg.kg}^{-1}$ ) da UGL Ouro Verde

Lote	Amostragem	$\text{P}_2\text{O}_5$
I	jul/02	4400
II	abr/03	2300
II	fev/05	6900
IV	set/05	6900
V	mai/06	2100
VI	mar/07	7800
VII	mar/09	5728

**Tabela 6** – Continuação

Lote	Amostragem	P2O5
VIII	ago/10	4526
IX	jul/11	5298
X	abr/12	2276
<i>Média</i>		4822,82
<i>Desv. Padrão</i>		2083,53
<i>Coef. Variação</i>		43,20
<i>Mínimo</i>		2100
<i>Máximo</i>		7800

Fonte: Relatórios de análises da SANEPAR.

Os dados apresentados na Tabela 6 apresentaram normalidade segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov, com  $p_{\text{valor}} > 0,15$ , apesar de apresentarem um coeficiente de variação elevado.

Na Tabela 7 estão relacionadas as concentrações de potássicos, na forma de óxido de potássio ( $K_2O$ ), sem a necessidade de ajuste de cálculo.

**Tabela 7** – Concentração de óxido de potássio ( $K_2O$ ) por lote de biossólido em base seca (em  $mg.kg^{-1}$ ) da UGL Ouro Verde

Lote	Amostragem	$K_2O$
I	jul/02	450
II	abr/03	400
II	fev/05	626
IV	set/05	2400
V	mai/06	280
VI	mar/07	612
VII	mar/09	755
VIII	ago/10	410
IX	jul/11	940
X	abr/12	1600
<i>Média</i>		847,292
<i>Desv. Padrão</i>		664,1544
<i>Coef. Variação</i>		78,38554
<i>Mínimo</i>		280
<i>Máximo</i>		2400

Fonte: Relatórios de análises da SANEPAR.

Os dados da Tabela 7 apresentaram normalidade, com  $p_{\text{valor}} > 0,05$ , para o teste de Kolmogorov-Smirnov. No entanto, especificadamente para este caso, quando aplicados outros testes estatísticos, a exemplo de Anderson-Darling ou Cramér-Von Mises, não há normalidade ( $p_{\text{valor}} < 0,025$ ). Observa-se também que o

coeficiente de variação foi superior aos dados referentes aos nitrogenados e fosfatados, o que indica ser o fertilizante mais sensível em termos de alterações de concentração na massa seca do bio sólido.

Apesar disso, é possível estabelecer uma concentração mínima e máxima de nutrientes que o bio sólido apresentou desde o ano de 2002, conforme as Tabelas 5, 6 e 7, bem como, a média aritmética. A Figura 5 representa a variação das concentrações de NPK em massa seca do bio sólido disponibilizado aos agricultores.

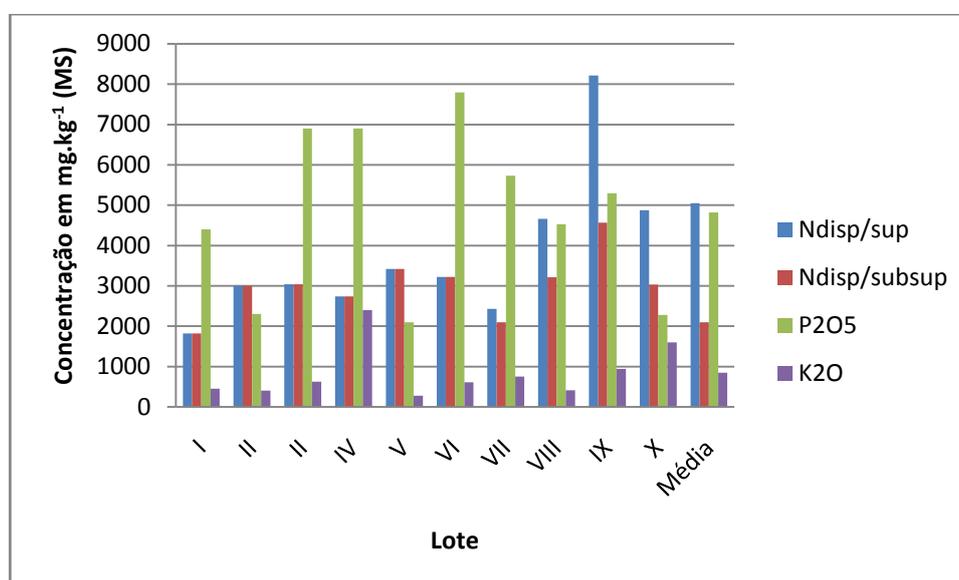


Figura 5 – Concentrações de NPK no bio sólido produzido na UGL Ouro Verde.

Além de nutrientes do grupo NPK, também se destaca a presença de cálcio, cuja grande concentração é justificada pela estabilização alcalina prolongada. Também foi identificada a presença do magnésio. Assim, o bio sólido também pode atuar como corretivo do pH do solo, na substituição do calcário. As concentrações encontram-se na Tabela 8.

**Tabela 8** - Concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) por lote de bio sólido em base seca (em mg.kg<sup>-1</sup>) da UGL Ouro Verde

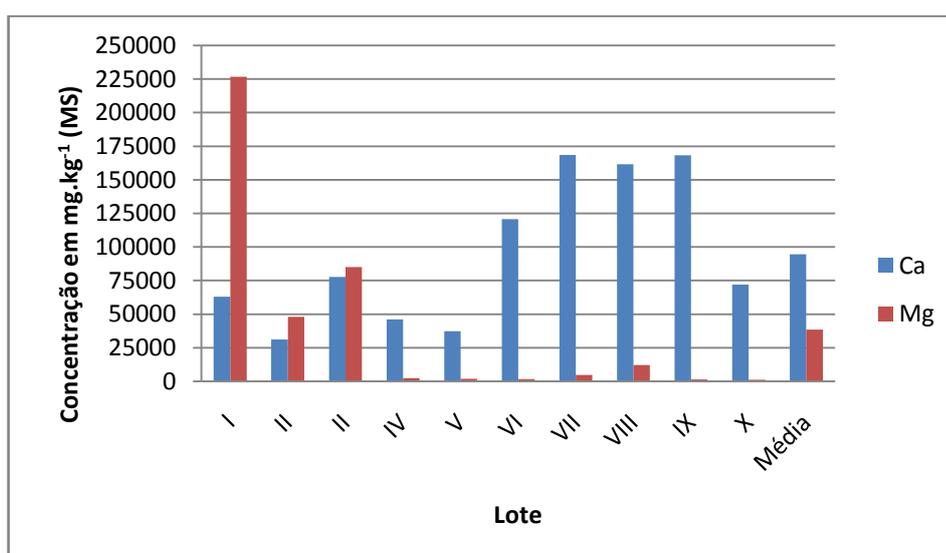
Lote	Ca	Mg
I	63000	226700
II	31030	48000
II	77600	85100

Tabela 8 – Continuação

Lote	Ca	Mg
IV	46000	2300
V	37241	1800
VI	120700	1600
VII	168600	4798
VIII	161700	12075
IX	168300	1450
X	72000	1250
<i>Média</i>	<i>94617</i>	<i>38507</i>
<i>Desv. Padrão</i>	<i>55360,22</i>	<i>71720,41</i>
<i>Coef. Variação</i>	<i>58,5097</i>	<i>186,25147</i>
<i>Mínimo</i>	<i>31030</i>	<i>1250</i>
<i>Máximo</i>	<i>168600</i>	<i>226700</i>

Fonte: Relatórios de análises da SANEPAR.

Os dados da Tabela 8 apresentaram normalidade para a coluna referente ao cálcio, com  $p_{\text{valor}} > 0,15$ , para o teste de Kolmogorov-Smirnov. Porém, o coeficiente de variação ainda permanece alto. Este fato pode ser pela adição de cal virgem ou hidratada, em diferentes proporções que variam de acordo com a relação de sólidos totais, conforme o lote individualizado. No entanto, para o mesmo teste, os dados da coluna magnésio não apresentaram normalidade, com  $p_{\text{valor}} < 0,01$ . De modo geral, existe grande variação nas concentrações destes nutrientes nos diferentes lotes de biossólidos, como podem ser visualizados na Figura 6.



**Figura 6** – Comparação das concentrações de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) por lote de biossólido em base seca (em mg.kg<sup>-1</sup>) da UGL Ouro Verde.

De modo geral, não há como estabelecer um padrão de comportamento nas concentrações de macronutrientes no biossólido. Isto porque ocorrem variações diárias na composição do lodo de esgoto. Essa peculiaridade vai de encontro aos resultados obtidos por Silva, Resck e Sharma (2002), na análise da viabilidade da reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Distrito Federal, que observaram que a variabilidade, maior para os macronutrientes (Ca, N, P, K, Mg e S) e menor para os micronutrientes e metais pesados, determina a necessidade de ajuste no cálculo das quantidades do material a cada aplicação. Assim, devido a esta variabilidade, reforça-se a exigência estabelecida pelo CONAMA na Tabela 2, na avaliação individualizada por lote ou de acordo com o tempo de monitoramento em função da quantidade de lodo processado na UGL, para a elaboração, enfim, do projeto agronômico.

## **4.2 Avaliação econômica**

### **4.2.1 Custos de fertilizantes e nutrientes do biossólido em base seca**

No último ano, os preços de fertilizantes oscilaram devido a interferências do mercado internacional, pela forte dependência da importação destes produtos. Dados da Associação Nacional para a Difusão de Adubos (ANDA, 2013) indicam que houve redução de 3,9% na produção nacional de fertilizantes no período de janeiro a novembro de 2013, se comparado com 2012, reduzindo de 8952 mil toneladas para 8601 toneladas. A queda do preço para os fertilizantes nitrogenados foi de 6,1%, para os fosfatados de 3,7% e para os potássicos de 8,8%. Quanto às importações, para o mesmo período, entraram no país 20146 toneladas de fertilizantes intermediários, com incremento de 11,7% em relação ao mesmo período de 2012. Os fertilizantes nitrogenados evoluíram em 16,5%, os fosfatados em 22,9% e os potássicos em 5,2%. O Porto de Paranaguá (PR) é o principal terminal receptor de fertilizantes no Brasil, concentrando 39,2% do total importado por todos os portos, no total de 7899 mil toneladas de fertilizante, com aumento de 4,7% em relação ao mesmo período em 2012.

Os custos por tonelada dos fertilizantes industrializados estão relacionados na Tabela 9 e a variação é visualizada na Figura 7.

**Tabela 9** – Custos (em R\$.t<sup>-1</sup>) de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos e de calcário, de novembro/2012 a outubro/2013, no Estado do Paraná

Mês/Ano	Nitrato de amônio	Superfosfato simples	Cloreto de potássio	Calcário dolomítico
nov/12	998,00	956,33	1517,96	101,10
dez/12	998,00	973,00	1517,96	104,11
jan/13	998,00	953,00	1498,21	102,36
fev/13	1064,02	943,00	1412,60	102,36
mar/13	1105,24	886,67	1397,10	104,72
abr/13	1105,25	882,98	1381,88	104,84
mai/13	1115,85	909,64	1328,44	104,25
jun/13	1125,00	898,33	1306,60	118,60
jul/13	1138,67	871,93	1323,20	118,59
ago/13	1180,00	909,96	1394,38	123,59
set/13	1039,46	904,88	1386,07	125,85
out/13	1039,46	911,55	1326,46	126,10
Média	1075,58	916,77	1399,24	111,37

Fonte: CONAB (2013).

Para fins de cálculo, considerou-se o preço médio praticado no período de novembro/2012 a outubro/2013. Por não se tratarem de compostos puros, os dados foram ajustados em função dos teores de nitrogenados, fosfatados e potássicos em cada produto comercializado (concentração em percentual dos produtos disponíveis no mercado). Optou-se pela escolha do calcário dolomítico devido à presença do óxido de magnésio, que foi identificado na análise do biossólido. Os dados estão dispostos na Tabela 10.

**Tabela 10** – Custo do nutriente ajustado em R\$.t<sup>-1</sup> de nitrogenados, fosforados, potássicos e calcário dolomítico, no Estado do Paraná, para o período de novembro/2012 a outubro/2013

Produto	Custo médio do produto (R\$.t <sup>-1</sup> )	Teor nutriente (%)	Custo nutriente ajustado (R\$.t <sup>-1</sup> )
Nitrato de amônio	1075,58	34,00	3163,47
Superfosfato simples	916,77	18,00	5093,18
Cloreto de potássio	1399,24	60,00	2332,06
Calcário dolomítico	111,37		
CaO		30,40	366,36
MgO		21,95	507,39

Para os cálculos de viabilidade econômica, foram considerados os dados de concentrações de nutrientes das Tabelas 5, 6, 7 e 8, que relacionados com a média da Tabela 10, resultou no custo correspondente de nutrientes inseridos no biossólido, conforme Tabela 11:

**Tabela 11** – Custo correspondente de nutrientes por tonelada de biossólido em base seca (R\$.t<sup>-1</sup>)

Lote	N <sub>disp/s</sub>	N <sub>disp/ss</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg
I	5,76	5,76	22,41	1,05	23,08	115,03
II	9,49	9,49	11,71	0,93	11,37	24,35
II	9,62	9,62	35,14	1,46	28,43	43,18
IV	8,67	8,67	35,14	5,60	16,85	1,17
V	10,82	10,82	10,70	0,65	13,64	0,91
VI	10,19	10,19	39,73	1,43	44,22	0,81
VII	7,69	6,64	29,17	1,76	61,77	2,43
VIII	14,76	10,17	23,05	0,96	59,24	6,13
IX	26,00	14,46	26,98	2,19	61,66	0,74
X	15,42	9,60	11,59	3,73	26,38	0,63
<i>Média</i>	<i>15,97</i>	<i>6,64</i>	<i>24,56</i>	<i>1,98</i>	<i>34,66</i>	<i>19,54</i>
<i>Mínima</i>	<i>5,76</i>	<i>5,76</i>	<i>10,70</i>	<i>0,65</i>	<i>11,37</i>	<i>0,63</i>
<i>Máxima</i>	<i>26,00</i>	<i>14,46</i>	<i>39,73</i>	<i>5,60</i>	<i>61,77</i>	<i>115,03</i>

#### 4.2.2 Custos de frete

Um dos fatores determinantes do custo do frete é o teor de umidade do material transportado, sendo que no estudo em questão, a relação entre os dois parâmetros é diretamente proporcional, não agregando valor ao biossólido.

Para Vesilind e Hsu (1997), a água no lodo de esgoto pode se apresentar sob quatro formas, sendo elas livre, adsorvida, capilar e celular. Para a primeira forma, a parcela pode ser separada pelo simples processo de gravidade. Para as demais, existe a necessidade de forças mecânicas ou de uma mudança do estado de agregação da água, a exemplo de evaporação ou congelamento.

Como nas amostras analisadas a umidade a 0% ocorreu apenas em condições de laboratório, devido ao processo de secagem em estufa para a determinação de massa seca, existiu uma variação considerável na umidade, que nos dados analisados, foi de 12,22 a 46,14%, na condição drenagem em leito natural. Logo, para cada tonelada de biossólido úmido transportado, serão

transportados de 122,20 a 461,40 kg de água. Esta relação também influencia na concentração de nutrientes por tonelada de bioossólido, que será, portanto, minimizada, como observado nos cálculos da Tabela 12.

**Tabela 12** – Concentração de nutrientes NPK, Ca e Mg no bioossólido em base úmida

Lote	Umidade %	Água (kg)	Bioossólido MS (kg)	N (mg.kg <sup>-1</sup> )	P (mg.kg <sup>-1</sup> )	K (mg.kg <sup>-1</sup> )	Ca (mg.kg <sup>-1</sup> )	Mg (mg.kg <sup>-1</sup> )
I	26,32	263,2	736,8	1341	3242	332	46418	167033
II	25,18	251,8	748,2	2245	1721	299	23217	35914
II	13,70	137	863	2624	5955	540	66969	73441
IV	21,60	216	784	2148	5410	1882	36064	1803
V	16,06	160,6	839,4	2871	1763	235	31260	1511
VI	23,80	238	762	2454	5944	466	91973	1219
VII	38,50	385	615	1496	3523	464	103689	2951
VIII	46,14	461,4	538,6	2513	2438	221	87092	6504
IX	32,46	324,6	675,4	5552	3578	635	113670	979
X	12,22	122,2	877,8	4278	1998	1404	63202	1097
<b>Média</b>	25,60	256,98	744,02	2752	3557	648	66355	29245
<b>Mínima</b>	12,22	122,20	538,60	1341	1721	221	23217	979
<b>Máxima</b>	46,14	461,40	877,80	5552	5955	1882	113670	167033

Em conseqüência, o valor correspondente de nutrientes inseridos no bioossólido úmido diminuiu, como observado na Tabela 13. A Tabela 14 considera o somatório total dos nutrientes, comparando os custos em base seca e em base úmida. Para estes cálculos, foi considerada apenas a parcela de nitrogênio disponível para aplicação superficial.

**Tabela 13** – Custos de nutrientes por tonelada de bioossólido (R\$.t<sup>-1</sup>) com diferentes teores de umidade

Lote	Umidade(%)	N (R\$.t <sup>-1</sup> )	P (R\$.t <sup>-1</sup> )	K (R\$.t <sup>-1</sup> )	Ca (R\$.t <sup>-1</sup> )	Mg (R\$.t <sup>-1</sup> )
I	26,32	4,24	16,51	0,77	17,01	84,75
II	25,18	7,10	8,76	0,70	8,51	18,22
II	13,70	8,30	30,33	1,26	24,53	37,26
IV	21,60	6,80	27,55	4,39	13,21	0,91
V	16,06	9,08	8,98	0,55	11,45	0,77
VI	23,80	7,76	30,27	1,09	33,70	0,62
VII	38,50	4,73	17,94	1,08	37,99	1,50
VIII	46,14	7,95	12,42	0,51	31,91	3,30
IX	32,46	17,56	18,23	1,48	41,64	0,50
X	12,22	13,53	10,18	3,28	23,15	0,56
<b>Média</b>	25,60	8,71	18,12	1,51	24,31	14,84
<b>Máxima</b>	12,22	4,24	8,76	0,51	8,51	0,50
<b>Mínima</b>	46,14	17,56	30,33	4,39	41,64	84,75

**Tabela 14** – Comparação de custos totais de nutrientes em cada tonelada de biossólido em base seca e úmida (R\$.t<sup>-1</sup>)

<b>Lote</b>	<b>Base Seca</b>	<b>Base Úmida</b>	<b>Diferença</b>
I	167,32	123,28	44,04
II	57,86	43,29	14,57
II	117,83	101,69	16,14
IV	67,43	52,86	14,56
V	36,72	30,83	5,90
VI	96,37	73,44	22,94
VII	102,83	63,24	39,59
VIII	104,14	56,09	48,05
IX	117,57	79,41	38,16
X	57,75	50,69	7,06
<b>Médio</b>	<b>92,58</b>	<b>67,48</b>	<b>25,10</b>
<b>Mínimo</b>	<b>36,72</b>	<b>30,83</b>	<b>5,90</b>
<b>Máximo</b>	<b>167,32</b>	<b>123,28</b>	<b>48,05</b>

De acordo com a Tabela 14, em uma tonelada de biossólido estão inseridos de R\$ 30,83 a R\$ 167,32 de nutrientes, considerando-se o pior e o melhor cenário, respectivamente. A diferença entre base seca e úmida foi de até R\$ 48,05, o que demonstra a vantagem na redução da umidade.

Segundo Anuário do SIFRECA (2012), o custo médio do frete nacional para o transporte de fertilizantes a granel foi de R\$ 0,1091.t<sup>-1</sup>.km<sup>-1</sup>. Aplicando a eq. 1, a distância máxima de viabilidade econômica para o uso do biossólido foi simulada na Tabela 15.

**Tabela 15** - Distância máxima (km) de viabilidade econômica para uso do biossólido da UGL Ouro Verde

<b>Lote</b>	<b>d (km)</b>	
	<b>Base Seca</b>	<b>Base Úmida</b>
I	1521,12	1120,76
II	526,00	393,56
II	1071,17	924,42
IV	612,98	480,57
V	333,86	280,24
VI	876,11	667,59
VII	934,82	574,91
VIII	946,69	509,89
IX	1068,86	721,91
X	525,02	460,86
<b>Médio</b>	<b>841,66</b>	<b>613,47</b>
<b>Mínimo</b>	<b>333,86</b>	<b>280,24</b>
<b>Máximo</b>	<b>1521,12</b>	<b>1120,76</b>

Como já esperado, verificou-se que quanto menor o teor de água, maior a distância de viabilidade econômica para o agricultor utilizar o biofósforo, que no caso deste estudo, foi de 1521,12 km. Apesar disso, mesmo para o pior cenário, considerando as concentrações de nutrientes e teor de umidade, a distância foi de 280,24 km. Isso demonstra que, quanto menor a distância da UGL para a propriedade rural, maior será o ganho para o agricultor. Assim, no caso de uma propriedade situada a 100 km da UGL, para transportar 10 t de biofósforo, o custo de frete seria de R\$109,10. Considerando o valor médio dos custos de nutrientes da Tabela 14, 10 t de nutrientes correspondem a R\$ 925,80 para o biofósforo em base seca e a R\$ 674,80, para o biofósforo em base úmida. Assim, o agricultor ainda teria um lucro de R\$ 816,70 ou R\$ 565,70, respectivamente, que poderiam ser utilizados para o custeio de outras despesas.

Com relação aos municípios com viabilidade de receberem o biofósforo, em função da distância a partir de Foz do Iguaçu, destacam-se Cascavel (140 km), Guaíba (230 km) e Laranjeiras do Sul (278 km). Levando-se em consideração o melhor cenário, são viáveis os Estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo e Mato Grosso do Sul, ressalvados os custos referentes a tarifas de pedágio, quando pertinentes, com representação dada na Figura 8.



**Figura 7** – Regiões brasileiras com viabilidade econômica de utilização do biofósforo, considerando o pior e o melhor cenário.  
Fonte: Adaptado de IBGE (2013).

Quintana (2006) observou, em estudo de viabilidade econômica, que é compensadora a busca do biossólido, em base seca, até 2730 km de distância entre a ETE e a propriedade rural, com os custos arcados pelo agricultor. No entanto, a autora considera apenas os custos referentes ao NPK. Há de se destacar que, no presente estudo, foram considerados os teores de cálcio e magnésio do biossólido estabilizado, devido ao processo de alcalinização prolongada, adotado pela SANEPAR, com a adição de cal virgem ou hidratada ao lodo de esgoto.

Outro fato que diferencia o presente trabalho é a consideração do nitrogênio disponível para as plantas, conforme critério definido na Resolução CONAMA n°. 375/2006, com concentração reduzida drasticamente em relação ao nitrogênio total, com grande influência da fração de mineralização prevista para o lodo digerido anaerobiamente (20%).

#### 4.3 Energia economizada na produção de fertilizantes NPK

Teixeira et. al. (2005) estimaram a energia média agregada ao fertilizante nitrogenado em  $59,46 \text{ MJ kg}^{-1}$ , para os fosfatados em  $11,96 \text{ MJ kg}^{-1}$  e para os potássicos em  $5,89 \text{ MJ kg}^{-1}$ .

A partir destes coeficientes, foi elaborada a Tabela 16, que relaciona as concentrações médias de NPK no biossólido em base seca das Tabelas 5, 6 e 7 com o valor resultante de energia correspondente a estes fertilizantes.

**Tabela 16** – Energia média agregada ao biossólido em base seca da ETE Ouro Verde

	N	P	K	Total
Conc. média de NPK no biossólido ( $\text{g.kg}^{-1}$ )	5,04778	4,82282	0,847292	
Energia agregada ao nutriente ( $\text{MJ.g}^{-1}$ )	0,05946	0,01196	0,00589	
Energia agregada ao biossólido ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ )	300,14	57,68	4,99	362,81

Observa-se que o maior coeficiente energético para a obtenção do fertilizante químico é referente ao nitrogênio, correspondendo a  $300,14 \text{ MJ.kg}^{-1}$  de biossólido. A energia economizada com fósforo e potássio correspondem a  $57,68$  e  $4,99 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ,

respectivamente. No total, são economizados 362,81 MJ de energia que seriam utilizadas para a produção de NPK, considerando um quilograma de biossólido da ETE Ouro Verde.

Assim, é possível afirmar que a reciclagem agrícola do lodo de esgoto é interessante do ponto de vista energético, considerando a forte dependência de energia fóssil para a produção de fertilizantes químicos, reduzindo, portanto, os impactos ambientais.

Outro fator a considerar-se foi a energia relacionada ao transporte. Portanto, a redução do teor de umidade do material transportado não se vincula somente a um limitante econômico, mas também, na diminuição dos custos energéticos envolvidos no transporte de grandes massas e volumes, ainda fortemente dependentes de combustíveis de origem fóssil.

## 5. CONCLUSÕES

O bio sólido processado na UGL Ouro Verde apresenta viabilidade econômica para uso na agricultura.

Em uma tonelada de bio sólido da UGL Ouro Verde estão inseridos de R\$ 30,83 a R\$ 167,32 de fertilizantes, considerando-se o pior e o melhor cenário, respectivamente.

No pior cenário, a distância compensatória de busca do bio sólido para o agricultor foi de 280,24 km e para o melhor, foi de 1521,12 km.

A redução dos teores de umidade do bio sólido permite que mais nutrientes sejam transportados, reduzindo os custos para o agricultor. Desta forma, sugerem-se estudos futuros em tecnologias voltadas para a redução da umidade, de onde destacamos o aproveitamento do biogás produzido nas ETE's, que pode ser utilizado em secadores térmicos.

A reciclagem agrícola do lodo de esgoto da ETE Ouro Verde permite a redução da dependência de energia fóssil para a produção de fertilizantes químicos NPK em  $362,81 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , considerando o bio sólido em base seca, bem como, proporciona a disponibilidade de nutrientes, de forma renovável como subproduto dos resíduos humanos, tendo em vista a previsão de escassez das reservas de fertilizantes em função do crescimento da demanda mundial na produção de alimentos ou bioenergia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; CASTRO, L. A. R.. **Estudo preliminar da viabilidade do uso do lodo de esgoto para fins agrícolas no município de Foz do Iguaçu.** In Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, 2000a.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; CASTRO, L. A. R.. **Diagnóstico do potencial dos solos da região de Maringá para disposição final do lodo gerado pelos sistemas de tratamento de esgoto do município.** In Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental Anais ABES/APRH. V. 1, p. 403-419. Porto Seguro, 2000b.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; PEGORINI, E. S.; SOUZA, M. L. P.. **Efeito da aplicação de lodo de esgoto nos teores de metais pesados de solos, folhas e grão de milho.** Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto, 2003.

ARMSTRONG, D. L. P.. **Lodo de esgoto alcalinizado como fonte de nitrogênio no desenvolvimento inicial da cultura de arroz.** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo. Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2006.

ASSISTAT (*software*). Disponível em <http://www.assistat.com/>. Acessado em 12/12/2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA. **Mercado de fertilizantes – janeiro/novembro 2013.** Disponível em <http://www.anda.org.br/estatistica/comentarios.pdf>, acessado em 20/12/2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9648 - Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário – Procedimento.** São Paulo, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12209 - Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário – Procedimento.** São Paulo, 1992.

BACKES, C.; BÜLL, L. T.; GODOY, L. J. G.; BÔAS, R. L. V.; LIMA, C. P.; PIRES, E. C.. Uso de lodo de esgoto na produção de tapetes de grama esmeralda. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 1045-1050, jul, 2009.

BARROS, I.T.; ANDREOLI, C. V.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.. Avaliação agrônômica de bio sólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.15, n.6, p.630–638, 2011.

BISCAIA, R.C.M. & MIRANDA, G.M. Uso do lodo de esgoto calado na produção de milho. **Sanare**, 5:86-89, 1996.

BORGES, E. S. M.; GODINHO, V. M.; BEJAR, D. O.; CHERNICHARO, C. A. L.. Tratamento térmico de lodo anaeróbio com utilização do biogás gerado em reatores UASB: avaliação da autossustentabilidade do sistema e do efeito sobre a higienização e a desidratação do lodo. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 14, n. 3; jul/set 2009, 337-346.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21>, acessado em 12/07/2013).

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA nº. 375/2006**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>, acessado em 12/07/2013.

CERVI, R. G.. **Avaliação econômica do aproveitamento do biogás e biofertilizante produzido por biodigestão anaeróbia: estudo de caso em unidade biointegrada**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura. Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu-SP, 2009.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C.. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto. I – Disponibilidade de nitrogênio no solo e componentes de produção. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:643-652, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Consulta de preços – insumos agropecuários (2013)**. Disponível em: <http://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do;jsessionid=A25DFCD3F711AF054FD7B36FFB33151E?method=acaoListarConsulta>. Acessado em 20/12/2013.

DAHER, E.. Uma crise de demanda. **Revista DBO Agrotecnologia**, p. 27, abril/maio 2008.

DOMÍNGUEZ, A., MENÉNDEZ, J.A., INGUANZO, M., PIS, J.J. Sewage sludge drying microwave energy and characterization by IRTF. **Afinidad**, Oviedo, 61(512), p.280-285, 2004.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P.. **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Universidade Estadual de Londrina – UEL. Edital 01/1996.

FERREIRA, C. F.; ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; CARNEIRO, C.; SOUZA, M. L. P. **Efeito de diferentes dosagens de lodo de esgoto e fertilização sobre a disponibilidade de fósforo no solo**. Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, Londrina, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Mapa Político do Brasil**. Disponível em:  
[http://7a12.ibge.gov.br/images/7a12/mapas/Brasil/brasil\\_grandes\\_regioes.pdf](http://7a12.ibge.gov.br/images/7a12/mapas/Brasil/brasil_grandes_regioes.pdf).  
Acessado em 23/12/2013.

LAMEGO NETO, L. G.; COSTA, R. H. R. Tratamento de esgoto sanitário em reator híbrido em bateladas sequenciais: eficiência e estabilidade na remoção de matéria orgânica e nutrientes (N, P). **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, Dec. 2011. Disponível em  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522011000400013&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522011000400013&lng=en&nrm=iso). Acessado em 27 Jan. 2014.

LEMAINSKI, J.; SILVA, J. E.. Avaliação agronômica e econômica da aplicação de biossólido na produção de soja. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.41, n.10, p.1477-1484, out. 2006.

LIMA, M. R. P.. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto**. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica, 284 p. São Paulo, 2009.

LIRA, A. C.; GUEDES, M. C.; SCHALCH, V. Reciclagem de lodo de esgoto em plantação de eucalipto: carbono e nitrogênio. **Eng. sanit. ambient.**, Vol.13 - Nº 2 - abr/jun 2008, 207-216.

MARTINS, A. L. C.; BATAGLIA, O. C.; CAMARGO, O. A.; CANTARELLA, H.. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn e Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **R. Bras. Ci. Solo**, 27: 563-574, 2003.

MENDES JUNIOR, A. A.. **Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na uréia**. Dissertação

(mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura. Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Botucatu-SP, 2011.

MORAIS, L. C.; DWECK, J.; CAMPOS, V.; TOLEDO, A. C. T.; BÜCHLER, P.. **Características e reaproveitamento do lodo de esgoto para fins cerâmicos e fonte alternativa de energia.** 32ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Fortaleza, CE, 2009.

PARANÁ. Secretaria Estadual de Meio Ambiente. **Resolução SEMA/PR nº. 021/2009.**

PEGORINI, E. S.; FRANÇA, M.; ANDREOLI, C. V.; FOWLER, R. B.. **Avaliação do potencial de disseminação de metais pesados através da reciclagem agrícola de biossólidos no Paraná: quantificação dos elementos em lodos.** Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto, 2003.

POGGERE, C. G.; SERRAT, B. M.; MOTTA, A. C. V.; BITTENCOURT, S.; DALPISOL, M.; ANDREOLI, C. V.. Lodos de esgoto alcalinizados em solos do estado do Paraná: taxa de aplicação máxima anual e comparação entre métodos para recomendação agrícola. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.17 n.4, p. 429-438, out/dez 2012.

QUINTANA, N. R. G.. **Análise econômica da aplicação do biossólido na agricultura.** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura. Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Botucatu-SP, 2006.

QUINTANA, N. R. G.. **Análise energética da produção, carregamento e transporte de lodo de esgoto.** Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura. Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Botucatu-SP, 2010.

QUINTANA, N. R. G.; BUENO, O. C.; MELO, W. J.. Custo de transporte do lodo de esgoto para viabilidade no uso agrícola. **Energ. Agric.**, Botucatu, vol. 27, n.3, julho-setembro, 2012, p.90-96.

RIBEIRINHO, V. S.; MELO, W. J.; SILVA, D. H.; FIGUEIREDO, L. A.; MELO, G. M. P.. Fertilidade do solo, estado nutricional e produtividade de girasso, em função da aplicação de lodo de esgoto. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 166-173, abr./jun. 2012.

SALVADOR, J. T.. **Reciclagem agrícola de lodo de esgoto tratado no Paraná pelo processo N-Viro: efeitos em solos, plantas, águas de percolação e a possibilidade da alteração de sua relação Ca:Mg.** Tese (doutorado). Programa de

Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal. Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2006.

SILVA, J. O.. **Caracterização do potencial energético e estudo físico-químico do lodo da estação de tratamento de esgoto do DMAE – Uberlândia - MG.**

Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 2011.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; BERNARDES, E. M.. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 36, n. 5, p. 831-840, maio 2001.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D.. Alternativa agronômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. II - Aspectos qualitativos, econômicos e práticos de seu uso. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:497-503, 2002.

SOUZA, C. A. DE; REIS JUNIOR, F. B. DOS; MENDES, I. DE C.; LEMAINSKI, J.; SILVA, J. E. DA. Lodo de esgoto em atributos biológicos do solo e na nodulação e produção de soja. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.44, n.10, p.1319-1327, out. 2009a.

SOUZA, C. V.; CAMPOS, A. T.; BUENO, O. C.; SILVA, E. B.. Análise energética em sistema de produção de suínos com aproveitamento dos dejetos como biofertilizante em pastagem. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.29, n.4, p.547-557, out./dez. 2009b.

TEIXEIRA, C. A., LACERDA FILHO, A. F. de; PEREIRA, S.; SOUZA, L. H. de; RUSSO, J. R.. Balanço energético de uma cultura de tomate. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande , v. 9, n. 3, Set. 2005 .

SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE FRETES - SIFRECA. **Anuário 2012**. Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://esalqlog.esalq.usp.br/files/biblioteca/606.pdf>, acessado em 20/12/2013.

VESILIND, P. A.; HSU, C. C.. Limits of sludge dewaterability. **Water Science & Technology**, Oxford, v.36, n.11, p.87-91, 1997.