



CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE DEJETOS BOVINOS E SUÍNOS: AVALIAÇÃO DA DQO E SV/ST DE ACORDO COM O DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL

Raquel Dalla Costa da Rocha – raqueldcr@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos

Via do Conhecimento, Km 01

85503-390 – Pato Branco – Paraná

Antônio Marcos Tubiana da Costa – antonio_de_costa@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos

Resumo: A produção de alimentos agropecuários é fundamental para o crescimento econômico do país e vem sendo exigido seu ciclo sustentável. As pequenas propriedades não completam esse ciclo, pois sua produção é baixa e muitas vezes, somente para consumo. Porém é necessário ações para minimizar os efeitos provocados pelos dejetos quando lançados indevidamente. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a redução de DQO e da SV/ST na codigestão anaeróbia de dejetos bovinos e suínos por meio de um delineamento composto central. Para isso, foram avaliadas como variáveis independentes: fração de sólidos (FS) (2,5 a 10,5%), razão de mistura (RM) (8 a 92%) e tempo do contato (TC) (1,6 a 18,4 dias). As variáveis dependentes apresentaram reduções significativas para a DQO entre 91,81 e 99,69% e razão SV/ST entre 0,54 e 0,86. Os resultados avaliados pela análise de variância (intervalo de confiança de 95%) pode-se observar que houve influência significativa entre as variáveis independentes, para a remoção de DQO, todas as variáveis independentes foram significativas e para a razão SV/ST somente a fração de sólidos. Os intervalos ótimos para o sistema estudado são FS de 2,5 a 6,0%, RM de 8 a 40% e o TP acima de 15 dias. Com isso, observa-se a possibilidade da pequena propriedade apresentar um ciclo de sustentabilidade, em que há produção de um adubo com estabilidade biológica e matéria orgânica que auxilia na retenção de nutrientes no solo conservando o meio ambiente, trazendo lucratividade e criações mais prósperas ao pequeno produtor.

Palavras-chave: Planejamento experimental, Estabilizado, Dejetos, Pequenas propriedades



ANAEROBIC CODIGESTION OF MANURE CATTLE AND SWINE: EVALUATION OF COD AND SV/ST ACCORDING TO CENTRAL COMPOSITE DESIGN

Abstract: *The production of agricultural food is fundamental to economic growth and has been required sustainable cycle. Small proprietary don't complete this cycle, because its production is low and often only for consumption. But it is necessary actions to minimize the effects caused by waste when discarded improperly. This study aimed to evaluate the reduction of COD and SV/ST in anaerobic co-digestion of manure cattle and pig by central composite design. For this, were evaluated as independent variables: solid fraction (SF) (2.5 to 10.5%), mixing ratio (MR) (8 to 92%) and contact time (CT) (1.6 to 18.4 days). The dependent variables showed significant reductions in COD between 91.81 and 99.69% and ratio SV/ST between 0.54 and 0.86. The results evaluated by analysis of variance (95% confidence interval) can be observed that there was significant influence between the independent variables, for the removal of COD, all independent variables were significant and the ration SV/ST only fraction solids. The optimum ranges for the system studied are SF 2.5 to 6.0%, RM from 8 to 40% and CT over 15 days. Thus, there is the possibility of small property presenting a sustainability cycle in which there is production of a fertilizer with the biological stability and organic material which assists in the retention of nutrients in the soil conserving the environment, bringing profitability and most successful designs to small producer.*

Keywords: *Experimental design, Stabilized, Waste, Small proprietary*

1. INTRODUÇÃO

A agricultura familiar no Brasil faz parte da economia nacional principalmente na área leiteira e de embutidos. Contudo, possuem pequenas quantidades de área e limitações de sustentabilidade por apresentarem descartes de poucas quantidades de dejetos se comparado com grandes propriedades rurais.

Um fator muito importante e determinante para conhecer o tipo de dejetos que está sendo gerado, é a alimentação que os animais recebem durante os processos de produção. Os minerais e nutrientes presentes nos dejetos são oriundos dessa alimentação (COSTA, 2014).

Mesmo considerando a quantidade de resíduo gerado nessas propriedades rurais, os dejetos são altamente poluentes ao ambiente e necessitam de tratamento. Oliveira (2006) e Vivan *et al.* (2010) caracterizaram os dejetos de suínos, o qual apresentou alta carga poluidora devido a quantidade de nutrientes desperdiçados na alimentação, contaminação fecal e desperdícios de água de bebedouros e lavagens das baias que são responsáveis pelo volume gerado. O mesmo foi observado por Romano e Zhang (2007) para bovinos confinados.

A digestão anaeróbia tem sido amplamente estudada como método alternativo para o tratamento de resíduos orgânicos como dejetos de animais. Estes resíduos tem a vantagem de possuir elevado teor orgânico em comparação com substratos tradicionais, o que torna a digestão anaeróbia um método altamente viável para diminuir os custos de tratamento e recuperação de energia renováveis na forma de metano (IZUMI *et al.*, 2010). Além de ser uma tecnologia sustentável, a biodigestão anaeróbia contribui para a gestão integrada entre a agricultura e a pecuária, mesmo em escala reduzida, pois exige baixo consumo de energia na operação, baixo custo inicial (KIM *et al.*, 2006; COSTA, 2014).

De acordo com Alvarez *et al.* (2010), o processo de codigestão é definido como o tratamento anaeróbio de uma mistura de pelo menos dois tipos diferentes de resíduos, com o objetivo



de melhorar a eficiência do processo de digestão. Combinando vários substratos na biomassa (codigestão anaeróbia) pode-se aumentar a carga orgânica e melhorar o desempenho em relação a digestão simples, pois diluir compostos tóxicos ou inibitórios e fornecem macro ou micronutrientes (KHALID *et al.*, 2011; MATA-ALVAREZ *et al.*, 2011).

Em geral, os processos anaeróbios acontecem em estágios. Em um primeiro estágio um grupo de bactérias facultativas convertem os compostos orgânicos em outros compostos, principalmente ácidos orgânicos. Em um segundo estágio, as bactérias denominadas metanogênicas, convertem esses ácidos orgânicos gerados em produtos finais gasosos e um fertilizante estabilizado (biofertilizante) (CHERNICHARO, 1997).

Este biofertilizante apresenta-se em geral sob a forma líquida, e tem uma composição bem complexa de nutrientes, e como principais macronutrientes o nitrogênio e o fósforo, que são essenciais às plantas atuando como fertilizante e também como defensivo agrícola (COSTA, 2014). Se comparado com o fertilizante químico, o biofertilizante apresenta algumas vantagens, como o favorecimento da multiplicação de microrganismos benéficos, que por sua vez propiciam mais vida e saúde ao solo; torna o solo mais poroso, permitindo maior aeração em camadas mais profundas, propiciando um maior desenvolvimento das plantas (IZUMI *et al.*, 2010).

Com o intuito de apresentar um ciclo sustentável em pequenas propriedades, o trabalho teve como objetivo a avaliação da codigestão anaeróbia de dejetos animais (bovinos e suínos) provenientes de um pequeno produtor por meio da redução de demanda química de oxigênio (DQO) e da razão sólidos voláteis e totais de acordo com um delineamento composto central.

2. METODOLOGIA

2.1. Coleta dos resíduos de suíno e bovino

As amostras de dejetos foram coletadas em uma pequena propriedade rural, localizada no Município de Santa Izabel do Oeste, Sudoeste do Paraná. A propriedade possui 20 suínos confinados (bairros de alvenaria) e 40 bovinos em regime semi-intensivo (pastagem e piquetes com silagem e ração). Os efluentes das atividades escoam separadamente por canaletas de alvenaria e tubulações de policloreto de polivinila (PVC) até uma esterqueira descoberta. As amostras de dejetos foram coletadas separadamente em embalagens de polietileno e mantidas refrigeradas (4 °C).

2.2. Análises Físico-químicas e Microbiológicas

As análises físicas químicas e microbiológicas avaliadas dos resíduos de suíno, bovino e das frações mássicas de mistura (25% suíno:75% bovino, 50% suíno:50% bovino e 75% suíno:25% bovino) foram realizadas conforme metodologias propostas por *American Health Association Methods* (2005) para pH, sólidos totais (ST), fixos (SF) e voláteis (SV), DQO total (DQO), nitrogênio total (NT), acidez volátil (AV) e alcalinidade (AL) e fósforo total (P). Os parâmetros de caracterização foram submetidos ao teste de *Tukey* a 5% de probabilidade para comparação das biomassas estudadas.

2.3. Planejamento experimental

Para avaliação da influência das variáveis independentes (fração de sólidos, razão de mistura e tempo de codigestão anaeróbia) nas variáveis dependentes demanda química de oxigênio total (DQO) e razão sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST), foi empregado um planejamento experimental fatorial completo 2^3 incluindo 6 pontos axiais e 6 repetições no ponto central totalizando 20 ensaios (Tabela 1). A avaliação das variáveis respostas foi realizada pelas metodologias de *American Health Association Methods* (2005).

Tabela 1 - Níveis das variáveis independentes para o planejamento fatorial 2^3 para o estudo do processo de codigestão anaeróbia.

Variáveis	Símbolo	Nível				
		-1,68	-1,00	0	1,00	1,68
Fração de sólidos (%)	FS	2,5	4,1	6,5	8,9	10,5
Razão de mistura (%)	RM	8,0	25,0	50,0	75,0	92,0
Tempo de codigestão (dia)	TC	1,6	5,0	10,0	15,0	18,4

Os ensaios para avaliação (Figura 1) do processo de codigestão anaeróbia da mistura de resíduos de suínos e bovinos foram conduzidos em frascos de vidro (200 mL), com volume útil de 120 mL hermeticamente fechados e acoplados a um gasômetro para a coleta de biogás produzido, conforme metodologia adaptada de Risk (2008). O processo foi em regime batelada com temperatura controlada (28 °C) e sem agitação em uma incubadora de bancada.



Figura 1 – Ensaio do processo de codigestão anaeróbia conforme planejamento experimental.

Análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar a qualidade e o ajuste dos modelos matemáticos gerados. Os resultados experimentais foram avaliados e as superfícies foram geradas por meio de Metodologia de Superfície de Resposta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização dos resíduos e das frações de mistura

As caracterizações dos resíduos de suíno, bovino e as frações mássicas das misturas estudadas revelaram que os mesmos possuem elevadas cargas poluidoras, podendo causar danos aos ecossistemas caso forem descartados sem tratamento. É essencial a prevenção do contato direto destes resíduos animais no ambiente principalmente devido à contaminação com nitrogênio, fósforo, materiais orgânicos e outros elementos tóxicos.

A avaliação das amostras foi realizada em triplicata e no exposto (Tabela 2) encontram-se as médias dos resultados com o respectivo desvio padrão.

Tabela 2 – Resultados da caracterização físico-químicas e microbiológicas dos resíduos de suíno e bovino e as frações de misturas, 75% bovino:25% suíno (75B25S), 50% bovino:50% suíno (50B50S) e 25% bovino:75% suíno (25B75S).

Análise	Biomassa				
	Bovino	Suíno	75B25S	50B50S	25B75S
ST (%)	12,50 ^a ± 0,30	11,85 ^a ± 0,07	10,65 ^b ± 0,24	11,80 ^a ± 0,52	11,87 ^a ± 0,04
SF (%)	1,73 ^{a,b} ± 0,34	2,39 ^c ± 0,25	1,63 ^a ± 0,03	2,30 ^{b,c} ± 0,25	2,12 ^{a,b,c} ± 0,05
SV (%)	10,80 ^a ± 0,12	9,47 ^{b,c} ± 0,20	9,02 ^b ± 0,22	9,49 ^{b,c} ± 0,28	9,76 ^c ± 0,02
pH	6,46 ^a ± 0,10	6,64 ^a ± 0,01	6,51 ^a ± 0,05	6,47 ^a ± 0,09	6,50 ^a ± 0,12
DQO (g O ₂ .L ⁻¹)	60,52 ^a ± 0,66	35,14 ^b ± 1,46	98,69 ^c ± 8,56	105,67 ^{c,d} ± 1,76	112,96 ^d ± 7,24
NT (g.Kg ⁻¹)	20,50 ^a ± 1,62	33,60 ^b ± 2,80	21,87 ^a ± 2,95	28,93 ^b ± 1,62	28,93 ^b ± 1,65
AV/AL	0,40 ^a ± 0,17	0,89 ^a ± 0,83	1,06 ^a ± 0,50	0,95 ^a ± 0,42	0,97 ^a ± 0,33
P (g.Kg ⁻¹)	3,39 ^a ± 0,05	14,55 ^b ± 0,59	7,28 ^c ± 1,06	11,41 ^d ± 0,44	16,02 ^b ± 1,74

Avaliando a série de sólidos (fixos, voláteis e totais) é possível observar uma similaridade nos valores entre alguns resultados. Para sólidos totais, a mistura 75B25S não se assemelhou as demais biomassas, conforme a aplicação do teste de *Tukey*. O mesmo não se observou para os sólidos voláteis e fixos. Para os sólidos fixos, as misturas 75B25S e 25B75S foram similares entre si e ao resíduo bovino, a mistura 50B50S possui semelhante com a mistura 25B75S e o resíduo de bovino. O mesmo se observou entre essas duas misturas e o resíduo de suíno. O resíduo de bovino não possui similaridade nos resultados do resíduo de suíno e das misturas considerando os valores de sólidos voláteis. Houve semelhança entre as misturas 75B25S e 50B50S com o resíduo de suíno e entre as misturas 50B50S e 25B75S com o resíduo de suíno. Nos valores das séries de sólidos, observa-se que a maioria dos sólidos presentes é volátil, o que se considera material que pode ser assimilado pelas bactérias do processo anaeróbio.

Esse parâmetro apresenta grande variação na caracterização destes resíduos, pois podem apresentar quantidades diferentes de água proveniente de bebedouro e da limpeza, ocorrendo assim, a diluição dos poluentes. Os valores médios das séries de sólidos dos resultados para os resíduos de suíno (ST:11,85%; SF: 2,39%; SV: 9,47%) estão dentro dos valores obtidos nos estudos de Souza *et al.* (2009), em que estudou 12 granjas diferentes e obteve faixas de 2,41 a 13,50% para sólidos totais, 0,60 a 2,76% para fixos e voláteis, 1,81 a 10,76%.

Como os resíduos de suíno, os bovinos também possuem variações em suas composições. O resíduo estudado apresentou valores médios de sólidos totais de 12,50%, fixos de 1,73% e 10,80% de sólidos voláteis. Na literatura, observa-se valores distintos em estudos, como de Barros *et al.* (2009), que apresentou resultados para resíduo bovino de 8,83% de sólidos totais, 1,49% de fixos e 7,34% de voláteis, e de Machado (2011) com resultados de 17,80% de ST, 14,22% de SV e 3,58% de SF.

Os resíduos e misturas apresentaram similaridade nos valores de pH, sendo que, para os resíduos de bovino e suíno, 6,46 e 6,64, respectivamente, se apresentaram próximos a valores encontrados nas caracterizações de resíduos de bovinos (6,08 a 7,6) nos estudos de Abubaker *et al.*



(2013) e Saady e Massé (2016), e em estudos para suínos (6,3 a 7,0) de Sousa *et al.* (2014) e Rodrigues *et al.* (2010). Para a maioria dos processos que envolvem anaerobiose, o pH ótimo de crescimento das bactérias se localiza entre 6,5 e 7,5. Porém, as variações máximas e mínimas, para a maioria delas estão entre 4,0 e 9,0 (CAMPOS *et al.*, 2006).

A DQO no substrato relaciona a quantidade de matéria orgânica presente, a qual é usada pelos microrganismos como fonte de energia para síntese. Esse parâmetro para os resíduos puros não apresentou semelhança. Houve uma similaridade entre as misturas 75B25S e 50B50S (98,69 e 105,67 g O₂.L⁻¹, respectivamente) e entre 50B50S e 25B75S (105,67 e 112,96 g O₂.L⁻¹, respectivamente) quando aplicado o teste de *Tukey*.

Os valores de DQO para resíduo bovino na literatura possui uma ampla faixa, 29,6 (JENSEN *et al.*, 2016) a 60,9 g O₂.L⁻¹ (EL MASHAD *et al.*, 2004). O resultado determinado na amostra deste resíduo (60,52 g O₂.L⁻¹) apresentou-se dentro desta faixa. O mesmo ocorreu para o resíduo de suíno (35,14 g O₂.L⁻¹), o qual apresenta valores diferentes em demais estudos 6,76 g O₂.L⁻¹ (SOUSA *et al.*, 2014), 23,8 g O₂.L⁻¹ (SOARES *et al.*, 2010) e 112,8 g O₂.L⁻¹ (SOUZA *et al.*, 2009).

Outra fonte nutricional importante para os microrganismos no processo de codigestão anaeróbia é o nitrogênio total (NT), o qual apresentou semelhança entre o resíduo puro bovino (20,50 g.Kg⁻¹) e a mistura com maior quantidade de resíduo bovino, 75B25S (21,87 g.Kg⁻¹) e entre o resíduo puro suíno (33,60 g.Kg⁻¹) e as misturas 50B50S (28,93 g.Kg⁻¹) e 25B75S (28,93 g.Kg⁻¹).

A quantidade de nitrogênio presente nos resíduos, como outros macros e micronutrientes, está associado à nutrição alimentar do animal (OLIVEIRA *et al.*, 2006), dessa forma, também há para esse parâmetro, uma ampla faixa de valores, como nos estudos de Souza *et al.* (2009) que apresenta a caracterização de resíduos suínos em diferentes granjas (3,3 a 10,3 g.Kg⁻¹) e de Song *et al.* (2014) com valor de nitrogênio total de 33,69 g.Kg⁻¹. Higashikawa *et al.* (2010) e Eckhardt *et al.* (2016) para resíduo bovino, apresentaram valores de 20 e 22,2 g.Kg⁻¹, respectivamente.

Um parâmetro importante para o processo de codigestão anaeróbia é a relação entre a acidez volátil e a alcalinidade total. Para que o processo ocorra com maior eficiência, a relação AV/AL deverá ser em torno de 0,5, favorecendo o equilíbrio dinâmico no sistema (LEITE *et al.*, 2004). Aplicando o teste de *Tukey*, os valores de AV/AL foram semelhantes entre si. Há uma tendência ácida na caracterização dos resíduos e das misturas, possivelmente relacionado ao processo de acidificação na canaleta e na tubulação de coleta.

A quantidade de fósforo total foi avaliada para todos os resíduos e as misturas, e apresentou semelhança somente entre o resíduo suíno e a mistura 25B75S, os demais valores não demonstraram similaridade.

Como o parâmetro nitrogênio, a quantidade de fósforo encontrada nos resíduos, é proveniente da alimentação nutricional dos animais, podendo dessa forma, apresentar variações de valores, devido à sazonalidade. Os valores médios de fósforo total para os resíduos de bovino (3,39 g.Kg⁻¹) e suíno (14,55 g.Kg⁻¹) estão próximos aos valores encontrado na literatura, 4,80 g.Kg⁻¹ (CASSOL *et al.*, 2001) para esterco bovino e 14,81 g.Kg⁻¹ (SEIDEL *et al.*, 2010) para esterco suíno.

3.2. Avaliação dos resultados do processo de codigestão anaeróbia pelo planejamento experimental

A Tabela 3 apresenta as combinações de tratamento e as variáveis dependentes (respostas) de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), razão SV/ST e redução da demanda química de oxigênio (RDQO).

Tabela 3 – Resultados físico-químicos das amostras submetidas ao processo de codigestão.

Ensaio	FS	RM	TC	ST (%)	SV (%)	SV/ST	RDQO (%)
1	-1,00	-1,00	-1,00	4,97±0,05	0,88±0,21	0,82±0,04	98,54±0,14
2	-1,00	-1,00	1,00	5,84±1,00	1,35±0,17	0,77±0,01	98,56±0,08
3	-1,00	1,00	-1,00	5,29±0,14	1,07±0,01	0,80±0,01	98,19±0,09
4	-1,00	1,00	1,00	4,52±0,30	1,00±0,08	0,78±0,01	98,08±0,64
5	1,00	-1,00	-1,00	7,95±0,30	3,37±1,36	0,58±0,16	95,48±0,19
6	1,00	-1,00	1,00	9,02±0,30	3,75±0,18	0,58±0,03	96,10±0,41
7	1,00	1,00	-1,00	9,12±0,39	3,21±0,36	0,65±0,02	91,81±0,40
8	1,00	1,00	1,00	6,91±0,16	1,61±0,16	0,77±0,02	95,75±1,00
9	-1,68	0,00	0,00	2,60±0,41	0,35±0,06	0,86±0,01	97,55±0,50
10	1,68	0,00	0,00	7,17±0,28	3,27±0,71	0,54±0,12	94,32±0,12
11	0,00	-1,68	0,00	5,26±0,49	0,96±0,02	0,82±0,01	99,07±0,11
12	0,00	1,68	0,00	7,20±1,25	1,34±0,17	0,81±0,01	98,67±0,06
13	0,00	0,00	-1,68	8,97±1,55	2,17±0,57	0,76±0,02	98,41±0,15
14	0,00	0,00	1,68	7,86±0,50	1,61±0,04	0,80±0,02	98,47±0,02
15	0,00	0,00	0,00	9,15±0,56	2,47±0,29	0,73±0,01	97,88±0,02
16	0,00	0,00	0,00	8,29±0,48	1,87±0,01	0,77±0,01	98,53±0,19
17	0,00	0,00	0,00	7,40±2,01	2,06±0,51	0,72±0,01	98,69±0,04
18	0,00	0,00	0,00	7,59±0,42	1,75±0,19	0,77±0,01	99,69±0,12
19	0,00	0,00	0,00	7,98±0,20	2,54±0,13	0,68±0,01	99,37±0,25
20	0,00	0,00	0,00	7,11±0,72	1,38±0,08	0,80±0,01	98,16±1,70

Conforme as condições utilizadas no processo de codigestão anaeróbia, a porcentagem de remoção de RDQO variou entre 91,81% e 99,69% e a razão SV/ST variou entre 0,54 e 0,86. Evidencia-se que as porcentagens de remoção de DQO são consideravelmente altas e as razões SV/ST demonstrando uma estabilidade no fertilizante. Observa-se também que os pontos centrais para as respostas, apresentam uma pequena variação nos valores o que indica uma boa reprodutibilidade do processo.

Na Tabela 4 podem-se observar os valores dos efeitos estimados, coeficientes de regressão, as interações com parâmetros significativos e não significativos, além do erro associado aos efeitos e aos coeficientes, bem como o nível de significância atribuído a cada parâmetro para a variável RDQO. Na análise das estimativas dos efeitos foram considerados os fatores significativos para o intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Tabela 4 – Efeitos, coeficientes de regressão e interações para a variável RDQO.

Fatores	Efeitos	Erros efeitos	t _{calc}	p-valor	Coeficientes	Erro coeficientes
Média*	98,76	0,28	348,63	0,00*	98,76	0,28
FS (L)*	-2,88	0,38	-7,66	0,00*	-1,44	0,19
FS (Q)*	-2,45	0,37	-6,69	0,00*	-1,22	0,18
RM (L)*	-0,81	0,38	-2,15	0,04*	-0,40	0,19
RM (Q)	-0,37	0,37	-1,01	0,32	-0,18	0,18
TC (L)	0,67	0,38	1,78	0,09	0,33	0,19
TC (Q)	-0,67	0,37	-1,84	0,08	-0,34	0,18
FS(L) x RM(L)	-0,80	0,49	-1,62	0,12	-0,40	0,25
FS(L) x TC(L)*	1,16	0,49	2,37	0,02*	0,58	0,25
RM(L) x TC(L)	0,80	0,49	1,63	0,11	0,40	0,25

* Fatores estatisticamente significativos (p<0,05).

Observa-se que os efeitos quadrático (Q) e linear (L) da fração de sólidos foram muito significativos (p<0,00). Além deste, o efeito linear da razão de mistura se mostrou significativo com p<0,04. Os efeitos (L) e (Q) do tempo não influenciaram significativamente na resposta, e além destes, o efeito (Q) da razão de mistura também não foi significativo sobre a variável resposta (p>0,05). Ainda observa-se que a interação entre a fração de sólidos e o tempo (p<0,02), foi bastante significativa para o efeito (L). A razão de mistura em interação tanto com o tempo, quanto com a fração de sólidos, apresentou efeito linear insignificante sobre a variável resposta (p>0,05).

A Tabela 5 apresenta a análise de variância com valores resumidos para a variável resposta redução da demanda química de oxigênio, RDQO, considerando-se o delineamento proposto.

Tabela 51 – Análise de variância para a variável RDQO.

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F _{calc}
Regressão	119,14	3	39,71	49,39
Resíduo	28,94	36	0,80	
Total	149,08	39		

R² - 0,8045; T_{tab}, 0,05; 3,36 = 2,87; SQ: Soma dos Quadrados; GL: Grau de Liberdade; QM: Quadrado Médio

Com análise de variância no intervalo de confiança de 95% (p<0,05) pode-se notar que a eficiência na resposta média foi de aproximadamente 80,45%, sendo que o resíduo foi de 19,55%. A significância entre as médias é ainda comprovada pelo valor de F_{calc}, que neste caso foi superior ao valor tabelado, evidenciando a diferença significativa entre as médias.

A Equação 1 expressa a equação numérica matemática entre as variáveis independentes razão de mistura (RM) e fração de sólidos (FS) para a variável dependente redução da demanda química de oxigênio (RDQO). A Figura 2 apresenta os gráficos de superfície de resposta e curvas de contorno da Equação 1, para as variáveis citadas em que a variável tempo (TC) mantida fixa no ponto central.

$$RDQO (\%) = 98,76 - 1,44.FS - 1,22.FS^2 - 0,40.RM - 0,18.RM^2 - 0,40.FS.RM \quad (1)$$

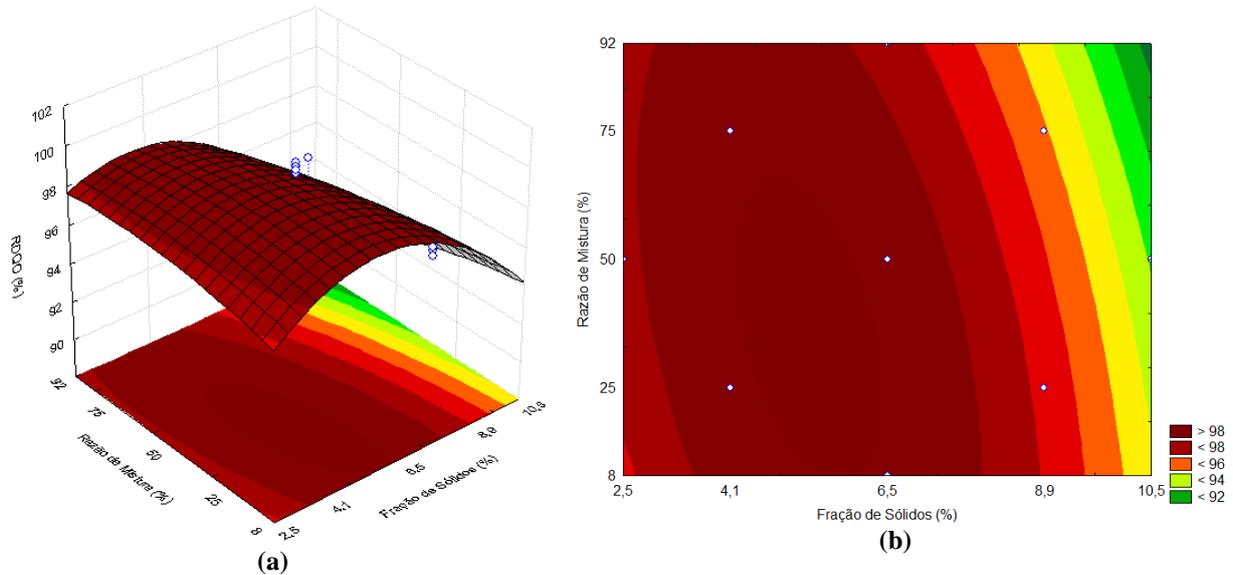


Figura 2 – Superfície de resposta (a) e curva de contorno (b) para a variável resposta RDQO em função da razão de mistura e fração de sólidos, com o tempo do processo mantido em nível zero.

A partir da Figura 2 é possível observar que a porcentagem de remoção de DQO aumenta na faixa de valores mínimos à médios de razão de mistura (8 a 50%). O fator fração de sólidos produz uma variação na resposta significativa em valores médios (6,5%), diminuindo para valores máximos (10,5%).

A expressão numérica para a variação do tempo de contato (TC) e da fração de sólidos (FS), pode ser observada na Equação 2. Esta interação pode também ser evidenciada na Figura 3 por meio dos gráficos de superfície de resposta e curvas de contorno, considerando as variáveis independentes citadas e razão de mistura (RM) mantida fixa no ponto central.

$$RDQO (\%) = 98,75 - 1,44.FS - 1,22.FS^2 + 0,33.TC - 0,34.TC^2 + 0,58.FS.TC \quad (2)$$

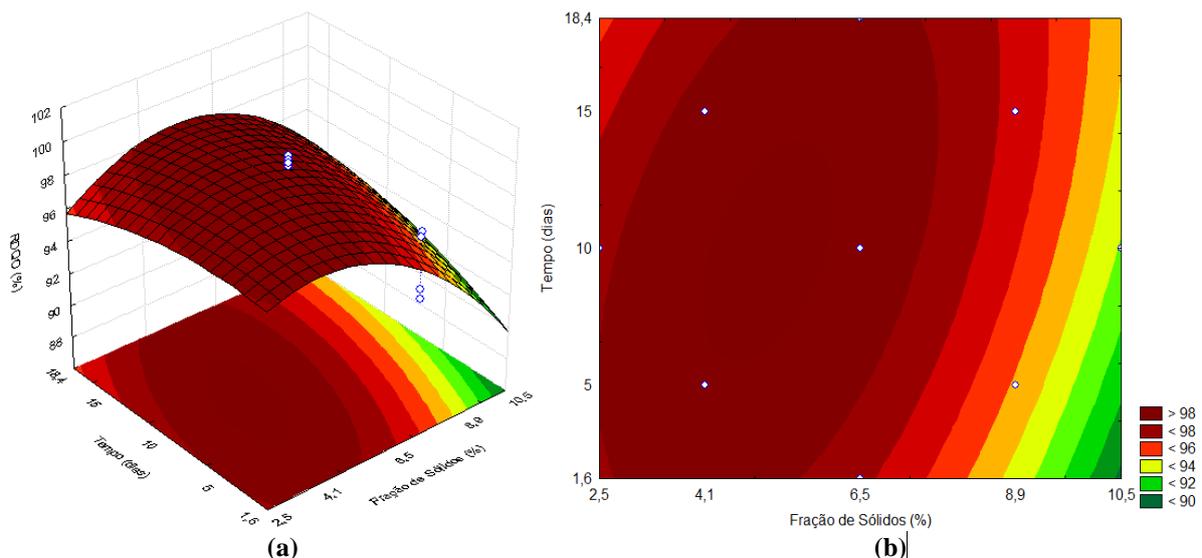


Figura 31 – Superfície de resposta (a) e curva de contorno (b) para a variável resposta RDQO em função do tempo e fração de sólidos, com a razão de mistura mantida no ponto central.

Observa-se que na Figura 3 a resposta porcentagem de remoção de DQO é significativa com valores de Fração de sólidos de 4,1 a 6,5% e valores médios de tempo (10 dias). A interação destas duas variáveis produz uma superfície maior obtendo uma alta porcentagem de remoção.

A Equação 3 corresponde à Figura 4 e representa a superfície de resposta e as curvas de contorno para a variável resposta RDQO, variando-se o tempo e a razão de mistura, com a fração de sólidos sendo fixada no ponto central.

$$RDQO (\%) = 98,76 - 0,40.RM - 0,18.RM^2 + 0,33.TC - 0,34.TC^2 + 0,40.RM.TC \quad (3)$$

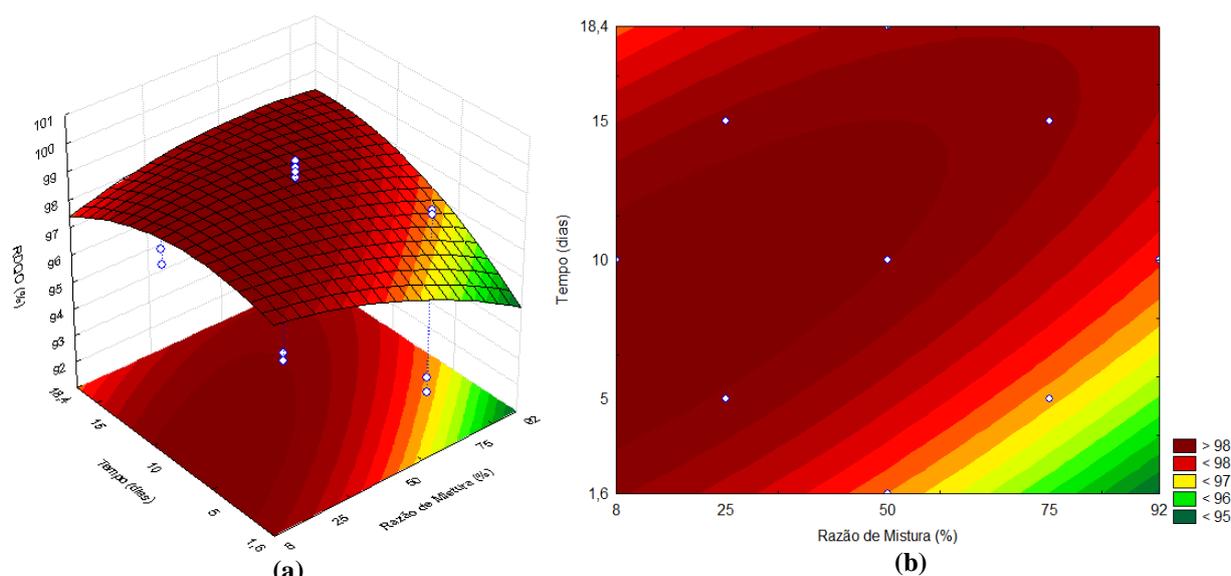


Figura 42 – Superfície de resposta (a) e curva de contorno (b) para a variável resposta RDQO em função do tempo e razão de mistura, com a fração de sólidos mantida no ponto central.

A análise da Figura 4 indica que a resposta porcentagem de remoção de DQO é fortemente influenciada por valores de razão de mistura, sendo evidente que os melhores resultados são em valores menores deste parâmetro. A porcentagem de remoção na faixa de tempo estudada é variável, pois evidencia-se maiores resultados em um tempo de 10 dias.

Analisando os resultados para a variável resposta RDQO observa-se semelhança entre as curvas de contorno. Para todos os casos, ou seja, na interação entre todas as variáveis observa-se comportamento semelhante. Isto indica que a variável tempo em interação com a razão de mistura e com a fração de sólidos, não apresenta variação significativa, indicando o mesmo comportamento em diferentes intervalos de tempo.

Em relação à Demanda Química de Oxigênio, esta é importante, pois está vinculada à quantidade de matéria orgânica. Essa quantidade de matéria orgânica no solo auxilia na fixação de nutrientes, evitando assim, a lixiviação dos mesmos. Porém é necessário que ocorra redução neste teor de DQO para que o biofertilizante quando produzido não afete o solo, e possíveis recursos hídricos, se lixiviado.

Na Tabela 6, podem-se observar os valores dos efeitos estimados, coeficientes de regressão, as interações com parâmetros significativos e não significativos, além do erro associado aos efeitos e aos coeficientes, bem como o nível de significância atribuído a cada parâmetro para a variável SV/ST. Na análise das estimativas dos efeitos foram considerados os fatores significativos para o intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Tabela 6 – Efeitos, coeficiente de regressão e interações para a variável SV/ST.

Fatores	Efeitos	Erros efeitos	t _{calc}	p-valor	Coeficientes	Erro coeficientes
Média*	0,75	0,02	47,56	0,00*	0,75	0,02
FS (L)*	-0,17	0,02	-7,92	0,00*	-0,08	0,01
FS (Q)*	-0,05	0,02	-2,52	0,02*	-0,03	0,01
RM (L)	0,03	0,02	1,64	0,11	0,02	0,01
RM (Q)	0,03	0,02	1,35	0,19	0,01	0,01
TC (L)	0,02	0,02	0,75	0,46	0,01	0,01
TC (Q)	0,00	0,02	0,06	0,95	0,00	0,01
FS(L)x RM(L)*	0,07	0,03	2,45	0,02*	0,03	0,01
FS(L) x TC(L)	0,05	0,03	1,80	0,08	0,02	0,01
RM(L) x TC(L)	0,04	0,03	1,37	0,18	0,02	0,01

* Fatores estatisticamente significativos (p<0,05).

Observa-se que a variável fração de sólidos mostrou-se significativa sobre a variável resposta para o efeito linear (L) e quadrático (Q), com p<0,00 para ambos os casos. O efeito linear (L) da interação entre a fração de sólidos e a razão de mistura também é significativa com p<0,02.

Para as variáveis: razão de mistura e tempo, o efeito linear (L) e o efeito quadrático (Q) não foram significativos sobre a variável resposta (p>0,05). Ainda observa-se que a variável tempo em interação tanto com a fração de sólidos, quanto com a razão de mistura, apresentou efeito linear insignificante sobre a variável resposta (p>0,05).

A Tabela 7 apresenta a análise de variância com valores resumidos para a variável resposta razão SV/ST, considerando-se o delineamento proposto.

Tabela 7 – Análise de variância para a variável SV/ST.

Fonte de Variação	SQ	GL	QM	F _{calc}
Regressão	0,26	2	0,13	53,11
Resíduo	0,09	37	0,002	
Total	0,35	39		

R² - 0,7416; F_{tab}, 0,05,2,37 = 3,29; SQ: Soma dos Quadrados; GL: Grau de Liberdade; QM: Quadrado Médio

Para o intervalo de confiança de 95% (p<0,05), pode-se considerar satisfatório os resultados desta análise, pois se observa uma variação em torno da média sendo explicada de aproximadamente 74,16%, sendo que o resíduo foi de 25,84%. Além disso, o valor de F_{calc} foi maior que seu respectivo valor tabelado, sendo assim, há significância evidenciada entre as médias.

A Equação 4 representa a expressão numérica matemática entre os parâmetros razão de mistura (RM) e fração de sólidos (FS) para a variável resposta razão sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST). A Figura 5 apresenta os gráficos de superfície de resposta e curvas de contorno oriundo da expressão matemática para os parâmetros citados. Neste caso, a variável tempo (TC) foi mantida fixa no ponto central.

$$SV/ST = 0,75 - 0,09.FS - 0,03.FS^2 + 0,02.RM + 0,01.RM^2 + 0,03.FS.RM \quad (4)$$

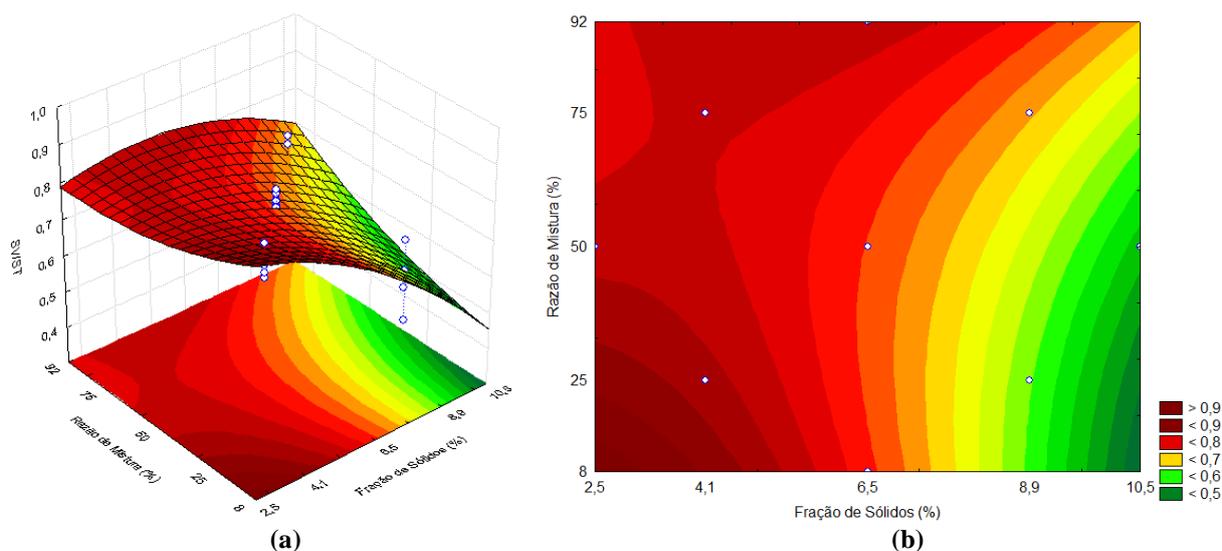


Figura 5 – Superfície de resposta (a) e curva de contorno (b) para a variável resposta razão SV/ST em função da razão de mistura e fração de sólidos, com o tempo fixado em nível zero.

A razão SV/ST, indica a relação entre o teor de sólidos voláteis e sólidos totais presentes na amostra de dejetos tratados. Na análise da Figura 5, observa-se a variável fração de sólidos (FS) em interação com a razão de mistura (RM), nota-se que em fração de sólidos abaixo do ponto central a razão SV/ST é aumentada. Para a razão de mistura, não se pode destacar uma faixa considerada ideal, ou seja, em todos os intervalos estudados não ocorreu alteração significativa na variável resposta.

Para a razão SV/ST, sólidos voláteis e sólidos totais, é importante citar que quanto menor for esta razão, menor é a quantidade de sólidos voláteis presentes na amostra, indicando maior estabilidade do processo de codigestão, devido à redução no teor de matéria orgânica. Por isso quanto maior a redução da DQO, menor a quantidade de matéria orgânica e assim sendo o teor de sólidos voláteis diminui, diminuindo também a relação SV/ST.

A redução da DQO para todos os ensaios foi superior a 90%, demonstrando que há uma eficiência nos ensaios de codigestão anaeróbia, sendo as maiores reduções (>98%) para substratos com frações de sólidos de 6,5% para qualquer razão de mistura e tempo de contato.

Como as relações SV/ST nos ensaios 5, 6, 7 e 10 estão abaixo do valor estabelecido pela legislação (< 0,7) (BRASIL, 2006), podem ser considerados fertilizantes tratados para fins de uso agrícola.

Os valores de redução de DQO e da razão SV/ST neste estudo são superiores ou próximos ao encontrados na literatura, para o processo de digestão de resíduo bovino – RDQO: 87% e SV/ST: 0,59 (BARROS *et al.*, 2009) e de resíduo suíno – RDQO: 52,28% e SV/ST: 0,85 (RODRIGUES *et al.*, 2010).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelos parâmetros estudados, a fração de sólidos é o que mais influencia no processo, sendo esta, otimizada em 6,5% para qualquer razão de mistura utilizada, quando se deseja reduzir a DQO (> 98%) e produzir um biofertilizante estabilizado (SV/ST < 0,7). Assim sendo, o processo de co-digestão anaeróbia para resíduos agropecuários pode ser considerado um aliado para propriedades que possuem pequenas quantidades de animais, pois as mesmas podem utilizar de misturas de resíduos de animais para a produção de biogás e biofertilizante.

Neste contexto, os resíduos gerados são de responsabilidade do proprietário, e o processo de codigestão anaeróbia contempla o conceito de reciclo (biogás para geração de energia e



biofertilizante para adubação), bem como a minimização de contaminações em ambientes aquáticos devido a não disposição inadequada destes resíduos.

Agradecimentos

À Fundação Araucária, Capes e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco pelo apoio.

REFERÊNCIAS

ABUBAKER, J.; CEDERLUND, H.; ARTHURSON, V.; PELL, M. Bacterial community structure and microbial activity in different soils amended with biogas residues and cattle slurry. **Applied Soil Ecology**, v. 72, p.171-180, 2013.

ÁLVAREZ, J. A.; OTERO, L.; LEMA, J. M. A methodology for optimising feed composition for anaerobic co-digestion of agro-industrial wastes. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 1153-1158, 2010.

APHA (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION). **Standard Methods for the Examinations for Water and Wastewater**. Washington: 21th Centennial Edition, 2005. 1368 p.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; NASCIMENTO, Y. D. S.; GUSHIKEN, E.; CALHEIROS, H. C.; SILVA, F. G. B. da; STANO-JUNIOR, A. Estudo da produção de biogás da digestão anaeróbia de esterco bovino em um biodigestor. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 15, n. 2, p. 95-116, 2009.

BRASIL, CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2011. **Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006**: Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.

CAMPOS, A. T. de; FERREIRA, W. A.; PACCOLA A. A.; LUCAS JÚNIOR, J. de; ULBANERE, R. C.; CARDOSO, R. M.; CAMPOS, A. T. Tratamento biológico aeróbio e reciclagem de dejetos de bovinos em sistema intensivo de produção de leite. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 2, p. 426-438, 2002.

CASSOL, P. C.; GIANELLO C.; COSTA, V. E. U. Frações de fósforo em estrumes e sua eficiência como adubo fosfatado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 635-644, 2001.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbios**, v. 5, Belo Horizonte: SEGRAC, 1997. 246 p.

COSTA, A. M. T. **Codigestão anaeróbia de resíduos bovinos e suínos: caracterização química e produção de biofertilizante para uso em cultura de milho**. Pato Branco, 157 p., 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

De frutas e verduras na digestão anaeróbia. **Revista Tópos**, Presidente Prudente, v. 2, n. 2, p. 153-165, 2008.

ECKHARDT, D. P.; REDIN, M.; JACQUES, R. J. S.; LORENSINI, F.; SANTOS, M. L.; WEILER, D. A.; ANTONIOLLI, Z. I. Mineralization and efficiency index of nitrogen in cattle manure fertilizers on the soil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.3, P. 472-477, 2016.



EL-MASHADA, H. M.; ZEEMAN, G.; VAN LOON, W. K. P.; BOT, G. P. A.; LETTINGA, G. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. **Bioresource Technology**, v. 95, p. 191-201, 2004.

HIGASHIKAWA, F. S.; SILVA, C. A.; BETTIOL, W. Chemical and physical properties of organic residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1743-1752, 2010.

IZUMI, K.; OKISHIO, Y.; NAGÃO, N.; NIWA, C.; YAMAMOTO, S.; TODA, T. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 64, p. 601-608, 2010.

JENSEN, P. D.; MEHTA, C. M.; CARNEY, C.; BATSTONE, D. J. Recovery of energy and nutrient resources from cattle paunch waste using temperature phased anaerobic digestion. **Waste Management**, v. 51, p. 72-80, 2016.

KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON, L. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 31, p. 1737-1744, 2011.

KIM, J. K.; OH, B. R.; CHUN, Y. N.; KIM, S. W. Effects of Temperature and Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Food Waste. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 102, n. 4, p. 328-332, 2006.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S. Tratamento anaeróbico de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. **Engenharia Sanitária e ambiental**. Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p. 280-284, 2004.

MACHADO, C. R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar**. Botucatu, 53 p. 2011. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp - Campus de Botucatu.

MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J., MACÉ, S.; ASTALS, S. Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 31, p. 99-111, 2011.

OLIVEIRA, V.; FIALHO, E.; LIMA, J. F.; FREITAS, R. F.; SOUZA, R. V.; BERTECHINI, A. G. Desempenho e composição corporal de suínos alimentados com rações com baixos teores de proteína bruta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 12, p. 1775-1780, 2006.

RISK, M. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G. Avaliação dos efeitos da diluição de resíduos

RODRIGUES, L. S.; SILVA, I. J. da; ZOCCATO, M. C. de O.; PAPA, D. N.; VON SPERLING, M.; OLIVEIRA, P. R. de. Avaliação de desempenho de reator UASB no tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 94-100, 2010.

ROMANO, R. T.; ZHANG, R. Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 631-637, 2007.

SAADY, N. M. C.; MASSÉ, D. I. Starting-up low temperature dry anaerobic digestion of cow feces and wheat straw. **Renewable Energy**, v. 88, p. 439-444, 2016.



SEIDEL, E. P.; GONÇALVES JUNIOR, A. C.; VANIN, J. P.; STREY, L.; SCHWANTES D.; NACKE, H. Aplicação de dejetos de suínos na cultura do milho cultivado em sistema de plantio direto. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 113-117, 2010.

SOARES, M. T. S.; GALVANI, F.; FERNANDES, A. H. B. M.; FERNANDES, F. A.; OLIVIERI, F. L.; LIMA, I. B. T. de; CRISPIM, S. M. A.; RIEGER, K. L. Caracterização Físico-Química de Efluentes Líquidos de Granjas Suínas Tratados em Biodigestor. In: SIMPOSIO SOBRE RECURSOS NATURAIS E SÓCIOECONOMICOS DO PANTANAL, 5, Corumbá. **Anais...** Corumbá: UFMS – Centro de Convenções, 2010, p. 1-4.

SONG, C.; LI, M.; XI, B.; WEI, Z.; ZHAO, Y.; JIA, X.; QI, H.; ZHU, C. Characterization of dissolved organic matter extracted from the bio-oxidative phase of co-composting of biogas residues and livestock manure using spectroscopic techniques. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 103, p. 38-50, 2015.

SOUSA, F. A.; CAMPOS, A. T.; SILVA, E. B.; GANDINI, A. M. M.; CORRÊA, J. M. Redução do potencial poluidor de dejetos de suínos em lagoas de estabilização em série. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 65-73, 2014.

SOUZA, C. F.; CARVALHO, C. C. S.; CAMPOS, J. A.; MATOS, A. T.; FERREIRA, W. P. M. Caracterização de dejetos de suínos em fase de terminação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56 n. 2, p. 128-133, 2009.

VIVAN, M.; KUNZ, A.; STOLBERG, J.; PERDOMO, C.; TECHIO, V.H. Eficiência da interação biodigestor e lagoas de estabilização na remoção de poluentes em dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 320-325, 2010.