



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



Caracterização de Resíduos Sólidos Urbanos visando seu aproveitamento energético.

Gilberto Martins

Universidade Federal do ABC - UFABC

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



Programa

1. Visão geral do projeto de P&D
2. O contexto regional da região do Grande ABC
3. Metodologia: Planejamento amostral da gravimetria e metodologia de amostragem
4. Metodologia de caracterização das amostras
5. Resultados
6. Conclusões

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



1. Projeto de P&D: Geração de Eletricidade em ciclo combinado utilizando biogás e resíduos sólidos urbanos

Projeto de P&D submetido pela PETROBRAS na Chamada 14/2012 ANEEL Projeto Estratégico "ARRANJOS TÉCNICOS E COMERCIAIS PARA INSERÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS ORIUNDO DE RESÍDUOS E EFLUENTES LÍQUIDOS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA" . 15 de Outubro de 2013 a 5 de julho de 2018)



Fundação Escola de
Sociologia e Política
de São Paulo



São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL

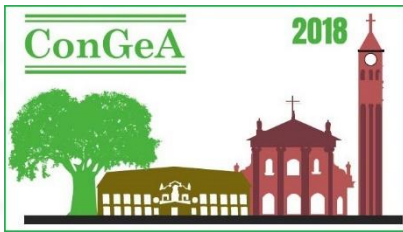


1. Projeto de P&D

Etapas do Projeto:

- 1) Análise de Tecnologias
- 2) Adequação de Tecnologias existentes
- 3) Análise dos impactos da rede elétrica
- 4) Análise das emissões de gases
- 5) Estudos de melhorias para o aumento da produção de biogás**
- 6) Estudo da vida útil dos equipamentos.
- 7) Proposta de arranjos técnicos e comerciais
- 8) Caracterização e gerenciamento de Resíduos**
- 9) Projeto básico da planta
- 10) Capacitação de laboratórios**

São Bernardo do Campo/SP – 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



2. Contexto Regional

Região Metropolitana de São Paulo (RMSP): área total: 7.948 Km²

39 municípios

21.242.939 habitantes (2016)

Região do Grande
ABC(SE):

Área: 828,7 Km²

7 municípios

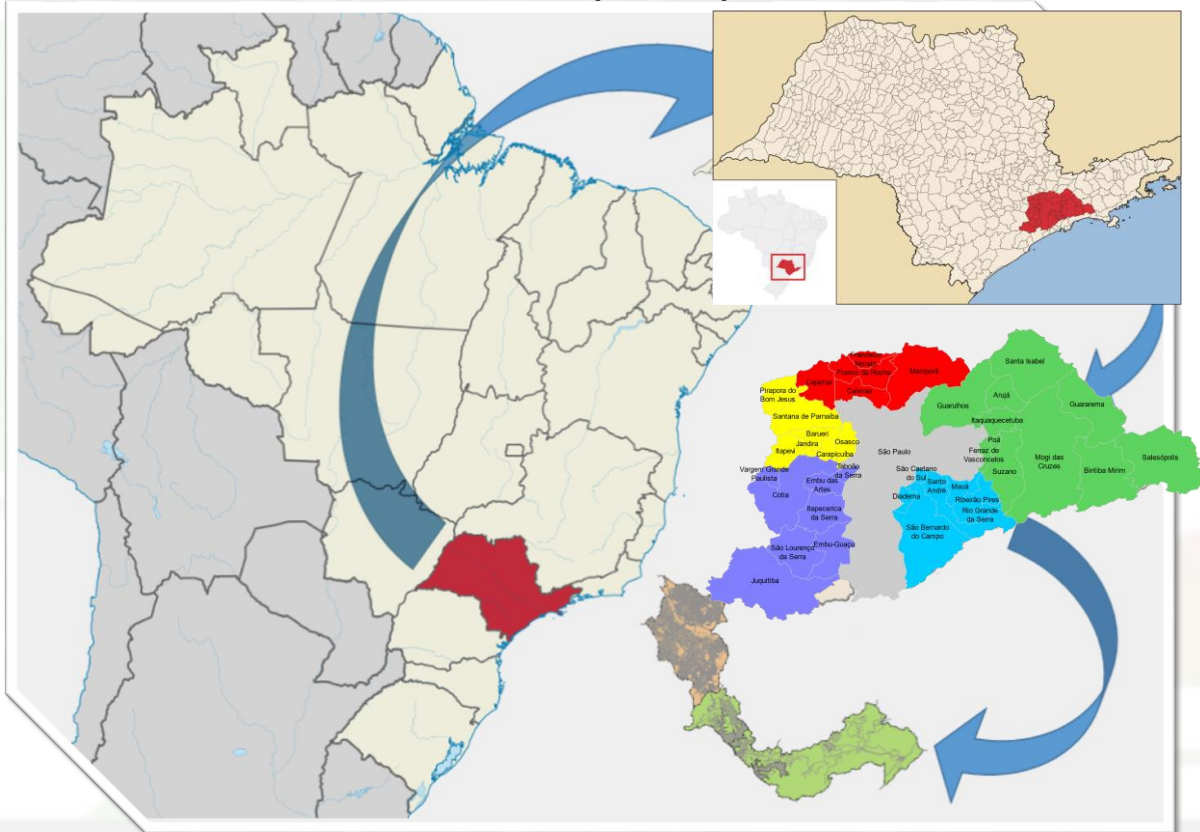
2.736.638

habitantes

Santo André: Área:

175,78 Km²

710.210 habitantes



São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



3. Metodologia: Planejamento Amostral

Planejamento amostral	Local: Aterro de Santo André	
Objetivo da Pesquisa	Coletar amostras de resíduos sólidos urbanos que representem o tipo de resíduo que é coletado através da coleta indiferenciada (úmidos) em Santo André.	
Variáveis	Plásticos, papéis, restos de alimentos, material sanitário, têxteis e umidade.	
Parâmetros	PCS e PCI (Regressão)	
Unidade elementar	Resíduo úmido (indiferenciado)	
Unidade amostral	Veículo coletor	
Público alvo	Subsetores do município de Santo André	
Sistema de Referência	Informações fornecidas pelo SEMASA	
Tipos de Investigação	Levantamento de dados	
Método de coleta de dados	Instrumentos estruturados com estudo observacional	
Tipo de amostragem	Amostragem aleatória simples	
Determinação do tamanho da amostra	Considerando intervalo de População Finita $N = 56$ $n = 36$ caminhões	$\varepsilon = 10\%$ $Z_{\alpha} = 95\%$ $(Z_{\alpha} = 1,96 \text{ tabelado})$ $s = 50\%$ (literatura)

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



3. Metodologia: Planejamento Amostral

Simulação tamanho de amostras

Nível de confiança					N	S	n
Erro	0,02	0,90	0,95	0,99	56	0,50	n_1
	0,05						n_2
	0,10					
							n_9

$$n = \frac{N \times \sigma^2 \times (Z_\alpha)^2}{(N - 1) \times \varepsilon^2 + \sigma^2 \times (Z_\alpha)^2}$$

Em que:

N = Tamanho da população: 56 subsetores

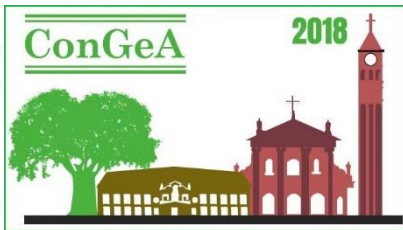
σ^2 = Desvio padrão : 1,96 (tabelado)

Z_α = Nível de confiança: 95%

ε = erro amostral: 10%

n = Tamanho da amostra = 36

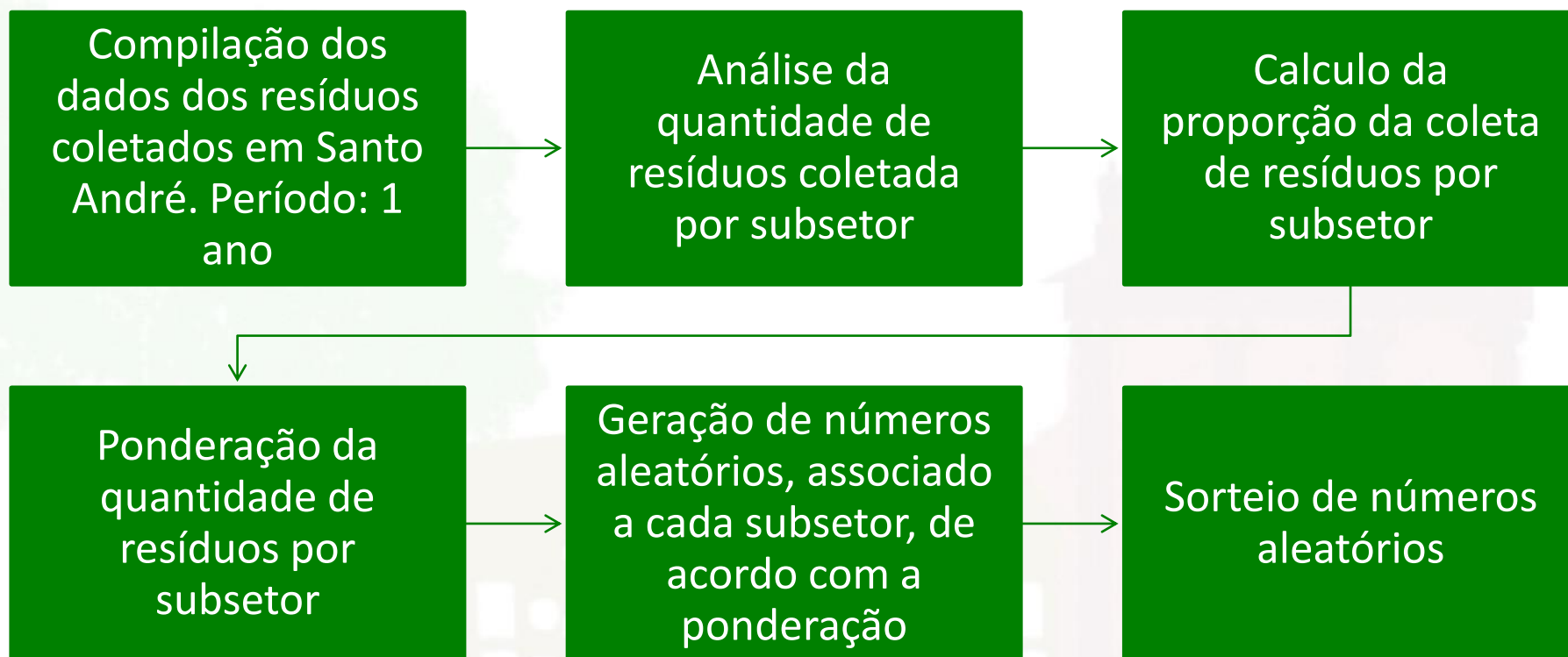




IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



3. Metodologia: Escolha dos caminhões



3. Metodologia: amostragem



- Gravimetria: setembro de 2015 a janeiro de 2016.
- Dois caminhões (20 ton) do mesmo setor descarregam no pátio.



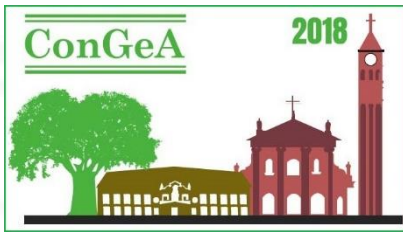
IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



3. Metodologia: amostragem

- Homogeneização e quarteamento com pás carregadeiras até restar 2,5 toneladas.
- A amostras coletadas de várias partes e colocadas em 2 tambores de 200 litros (cerca de 100 a 120 kg).





IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



3. Metodologia: amostragem

- A amostra é pesada e separada em 33 categorias de materiais, pesadas individualmente, determinando a gravimetria do subsetor.
- 25 das 33 categorias são reagrupadas em 5 frações: Orgânicos, Sanitários, Plásticos, Papéis e Texteis.

Frações	Categorias	
Material orgânico (alimentos e podas)	Orgânicos	Frações combustíveis processadas
Material orgânico (materiais inseparáveis)		
Material orgânico (sanitário)	Sanitários	
Fraldas		
Borracha	Plásticos	
Isopor		
PET[1] - politereftalato de etileno		
PEAD[2] - polietileno de alta densidade		
V [3] - pvc		
PEBD[4] - polietileno de baixa densidade		
PP [5] - polipropileno		
PS[6] - poliestireno		
Outros plásticos		
Sacos plásticos (sacos de lixo)		Papeis
Sacos plástico (supermercado)		
Embalagens aluminizadas		
Papel branco	Têxteis	
Papelão		
Tetra pack		
Jornais e revistas	Madeira	Frações Combustíveis não processadas
Tecido, pano		
Madeira natural	Outros	Fração não combustível
Madeira processada		
Outro (Sem identificação)	Inertes	
Resíduos tecnológicos-pilhas		
Resíduos tecnológicos-lâmpadas		
Resíduos tecnológicos-informática		
Resíduos tecnológicos-outros		
Entulho		
Vidro		
Metal (ferroso)		
Metais não ferrosos		
Alumínio		

3. Metodologia: preparo das amostras

- Após homogeneização e quarteamento de cada fração combustível, amostras de 3 a 5 kg são coletadas trituradas "in loco" para caracterização.



Orgânicos



Sanitários



Plásticos



Papéis



Têxteis



3. Metodologia: preparo das amostras

- Amostras são trituradas e embaladas a vácuo (± 3 kg).



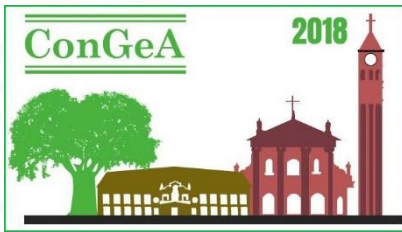
3. Metodologia: preparo das amostras

- Quintuplicatas (± 10 g) de cada fração são pesadas, seladas e encaminhadas para o Laboratório na UFABC para determinação de umidade.



- Amostras (± 3 kg) são secas em estufa e embaladas a vácuo para serem utilizadas nas caracterizações.





IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



4. Metodologia de caracterização

Triplicatas das 5 frações combustíveis dos 36 subsetores foram utilizados para a determinação de:

- **Densidade a granel (ASTM E1109-86)**
- **Umidade**
- **Análise imediata (ASTM E 897-88 and E 830-87)**
- **Poder Calorífico Superior (ASTM E 711) – IKA C 2000**
- **Análise elementar (ainda em execução) *Thermo Scientific Flash EA 1112.***

Para a fração orgânica foi feita a caracterização para processamento bioquímico que também inclui :

- **COT (APHA,2005 – 5310 B) – *Shimadzu TOC-L***
- **Sólidos fixos, totais e voláteis (APHA,2005 – 2540 B,G and E)**
- **Lipídios (AOAC, 1990 960.02) – Soxhlet**
- **Nitrogênio Kjeldahl (AOAC, 1998 960.52)**
- **Potencial Bioquímico de Metano (VDI 4630) – Eudiômetros/ analisador de gas *Landtec GEM 5000* ou *Bioprocess AMPTS II.***

São Bernardo do Campo/SP – 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: gravimetria

Categoria	% em massa (56 caminhões)	Desvio padrão (56 caminhões)	% em massa (36 caminhões)	Desvio padrão (36 caminhões)
Orgânicos	42,23%	14,64%	38,79%	13,45%
Sanitários	12,36%	5,39%	10,80%	4,92%
Plásticos	14,64%	5,19%	14,77%	3,85%
Papeis	10,73%	5,67%	11,12%	5,02%
Têxteis	7,80%	6,32%	8,94%	7,03%
Outros	12,25%	10,82%	15,58%	11,98%
Total	100%		100%	

Fonte: (DRUDI, 2017)

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018

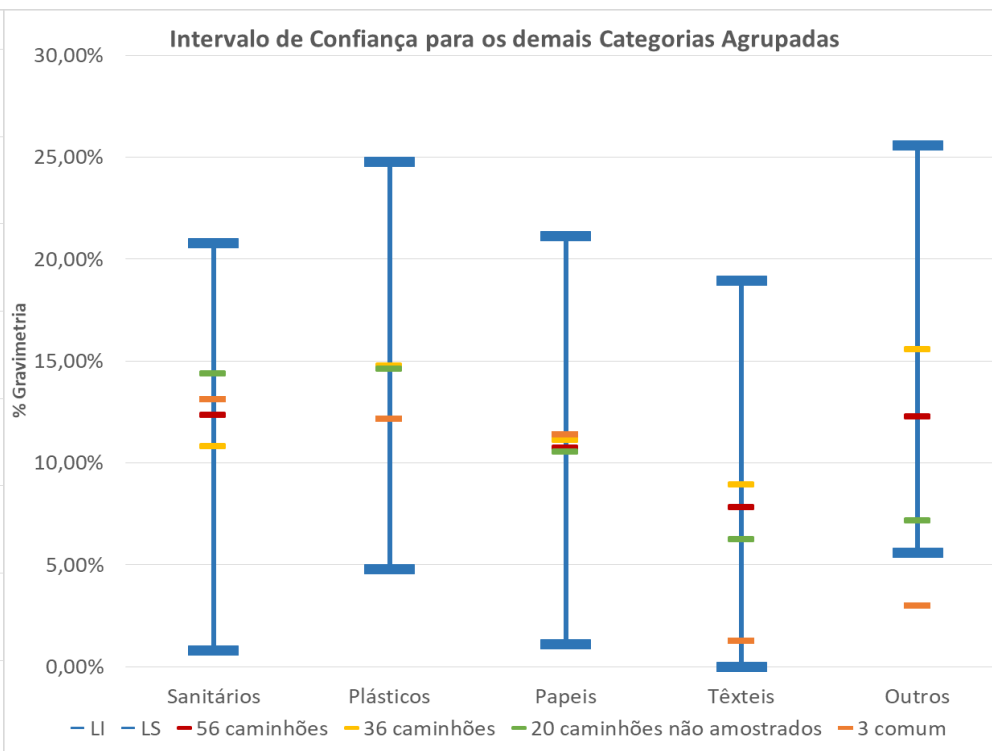
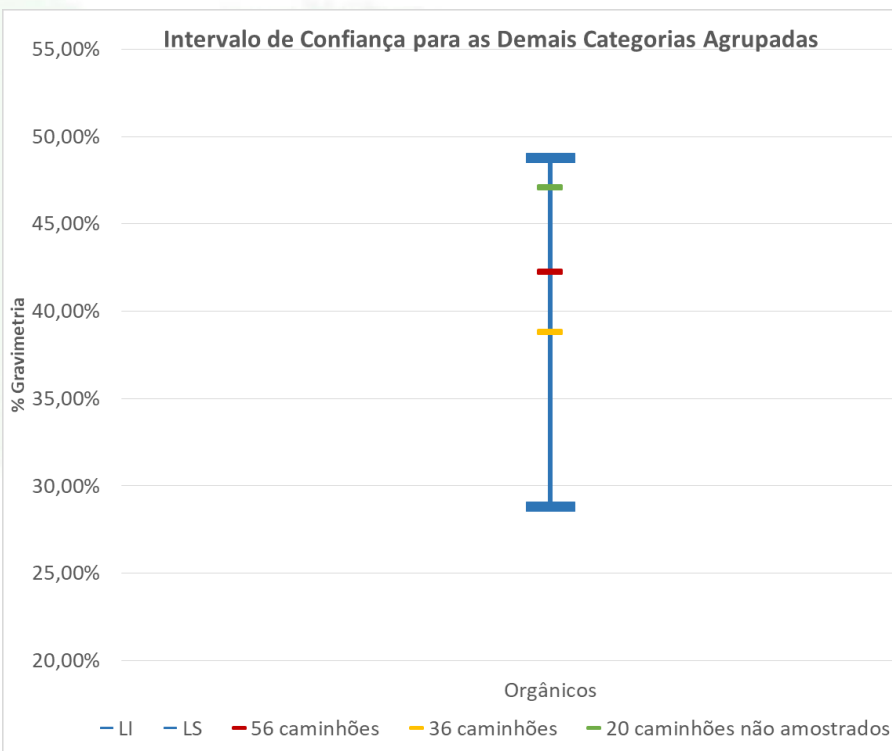


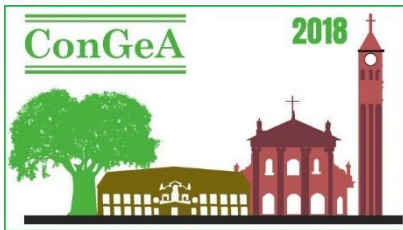
IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: gravimetria

Os resultados da gravimetria nos 56 caminhões ficou dentro do intervalo de confiança exceto para a categoria "outros" (3 primeiras amostras de 14 com metodologia em ajuste) (DRUDI, 2017)





IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL

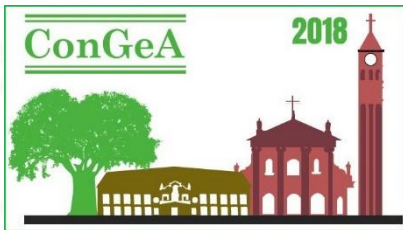


5. Resultados: caracterização para processos termoquímicos

Resultados das médias por categoria da densidade a granel, umidade (b.u), PCS (b.s) e PCI (bu) para os 36 caminhões amostrados (GUTIERREZ GOMEZ, 2016)

Categoria	Densidade a granel Kg/m ³	Umidade % (b.u.)	PCS (b.s.) MJ/kg	PCI (b.u.) MJ/kg
Orgânicos	268,24	66 (± 9)	15,84	3,46
Sanitários	122,02	52 (± 12)	19,86	7,62
Plásticos	34,60	25 (± 8)	31,14	22,34
Papeis	71,70	31 (± 10)	17,67	10,71
Têxteis	117,51	30 (± 13)	20,71	12,43
Outros	n.d.	n.d.	-	-
Média	n.d.	48	16,70	7,77

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



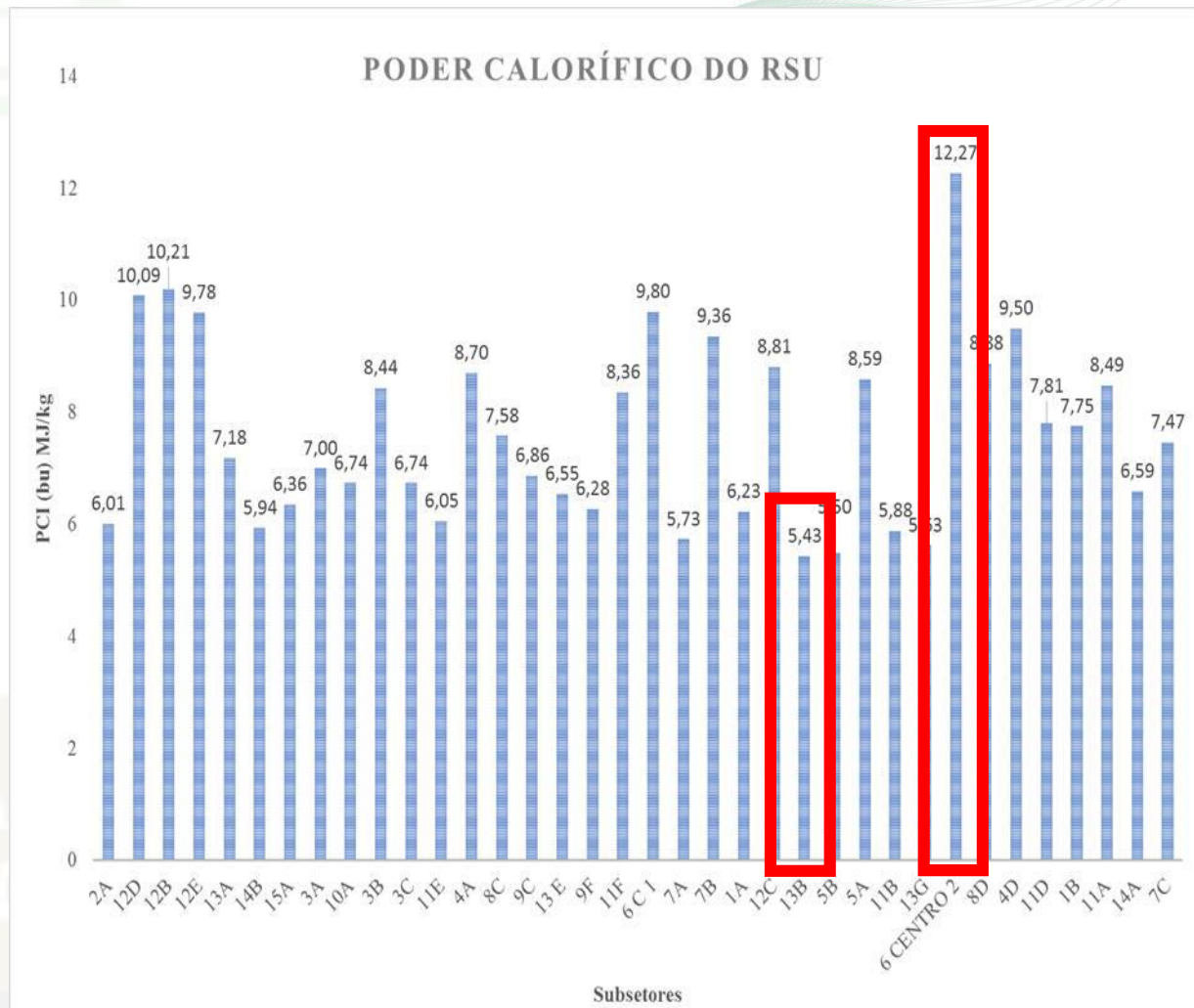
IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados:

Análise utilizando umidade média por setor (caminhão) (DRUDI, 2017)

Valor	PCI (b.u.) [MJ/kg]
Máximo	12,27
Médio	7,06
Mínimo	5,43



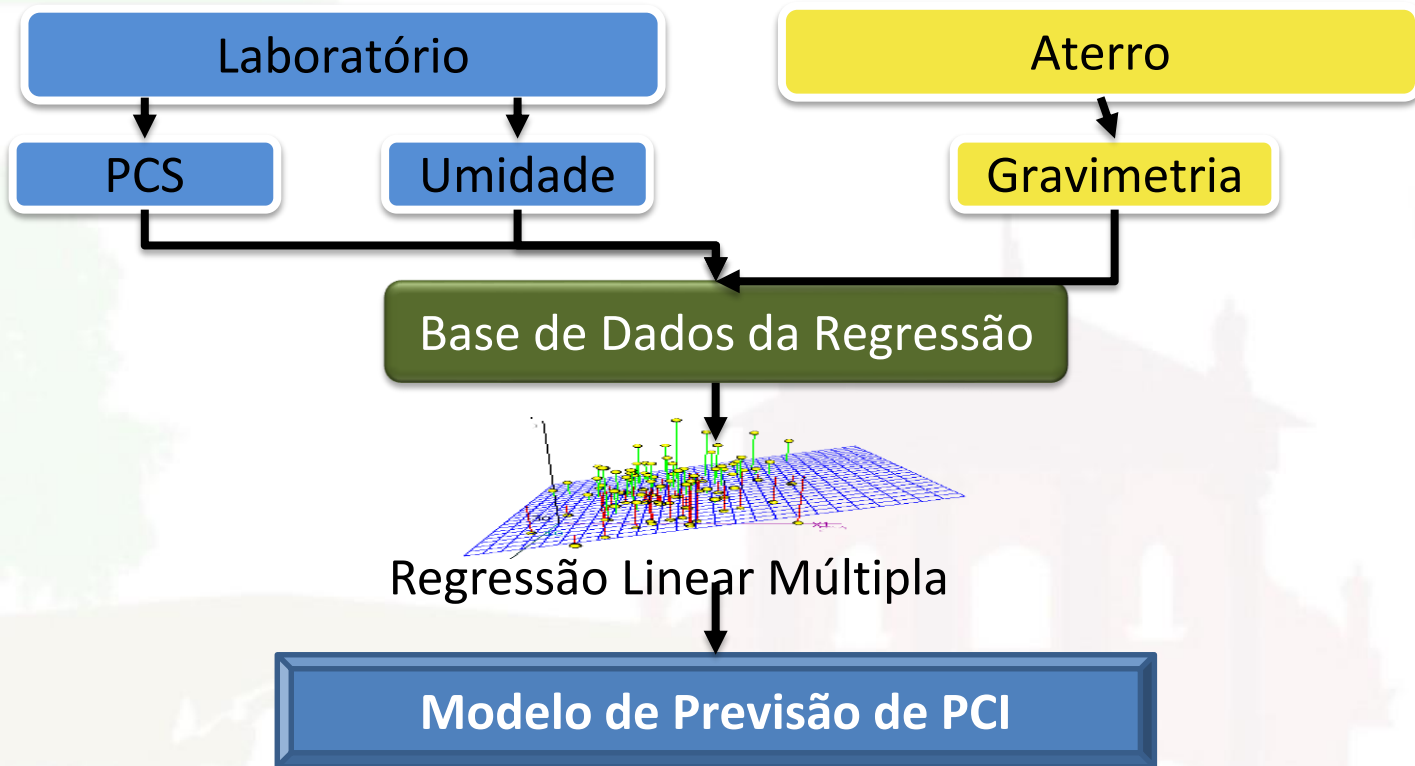


IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados:

A partir dos resultados dos valores do PCI em base úmida obtidos com a umidade média de cada um dos 36 setores foram construídos 48 modelos através de regressão linear múltipla e testados estatisticamente, obtendo-se um modelo robusto para avaliar o PCI em base úmida.





IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados:

Modelos: PCI (base seca) (DRUDI, 2017)

$$PCI_s = (15,46 O + 19,28 S + 32,79 P_l + 8,31 P_a + 21,61 T)$$

$$PCI_u = [(15,46 O + 19,28 S + 32,79 P_l + 8,31 P_a + 21,61 T) \times (1 - W_u)] - [2,442 \times W_u]$$

Em que:

PCI_s = Poder calorífico superior base seca (MJ/kg)

PCI_u = Poder calorífico superior base úmida (MJ/kg)

O = Fração Orgânica = Resto de alimentos + podas $\left(\frac{kg \text{ da fração}}{kg \text{ total}}\right)$

S = Sanitários = Resíduos sanitários + fraldas $\left(\frac{kg \text{ da fração}}{kg \text{ total}}\right)$

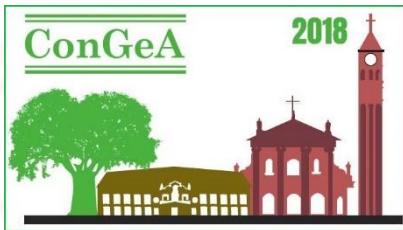
P_l = Todos os plásticos $\left(\frac{kg \text{ da fração}}{kg \text{ total}}\right)$

P_a = Papel branco + papelão + jornais + revistas + tetra-pack $\left(\frac{kg \text{ da fração}}{kg \text{ total}}\right)$

T = Tecidos $\left(\frac{kg \text{ da fração}}{kg \text{ total}}\right)$

W_u = Umidade em base úmida $\left(\frac{kg \text{ de água}}{kg \text{ total}}\right)$

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: validação do modelo

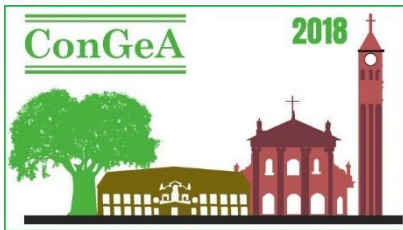
O PCI foi calculado pela equação proposta a partir de dados de outros autores e os resultados obtidos. Exceto no caso de Soares(2008), todos os demais apresentam resultados com Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE) abaixo de 10%, o que é considerado excelente para um modelo

Trabalho	Org	San	Pla	Pap	Têx	W	PCI Med ¹	Mod 57 ²	Mod 58 ²	MAPE (57)	MAPE (58)
DDMA (2010)	54,08%	3,05%	12,40%	20,46%	3,17%	39,90%	7,95	8,15	8,28	2,49%	4,17%
Leão (2011)	47,50%	5,40%	16,70%	18,50%	4,71%	49,10%	7,84	7,10	7,16	9,42%	8,66%
Soares (2011)	44,40%	3,40%	19,00%	13,70%	4,70%	38,29%	7,57	8,80	8,88	16,21%	17,29%
Juca (2013)	37,58%	3,56%	16,27%	12,38%	8,42%	30,37%	9,02	9,30	9,48	3,07%	5,10%

¹PCI medido em MJ/kg (bu) ²PCI previsto pelos modelos em MJ/kg (bu)

Fonte: (DRUDI, 2017)

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018

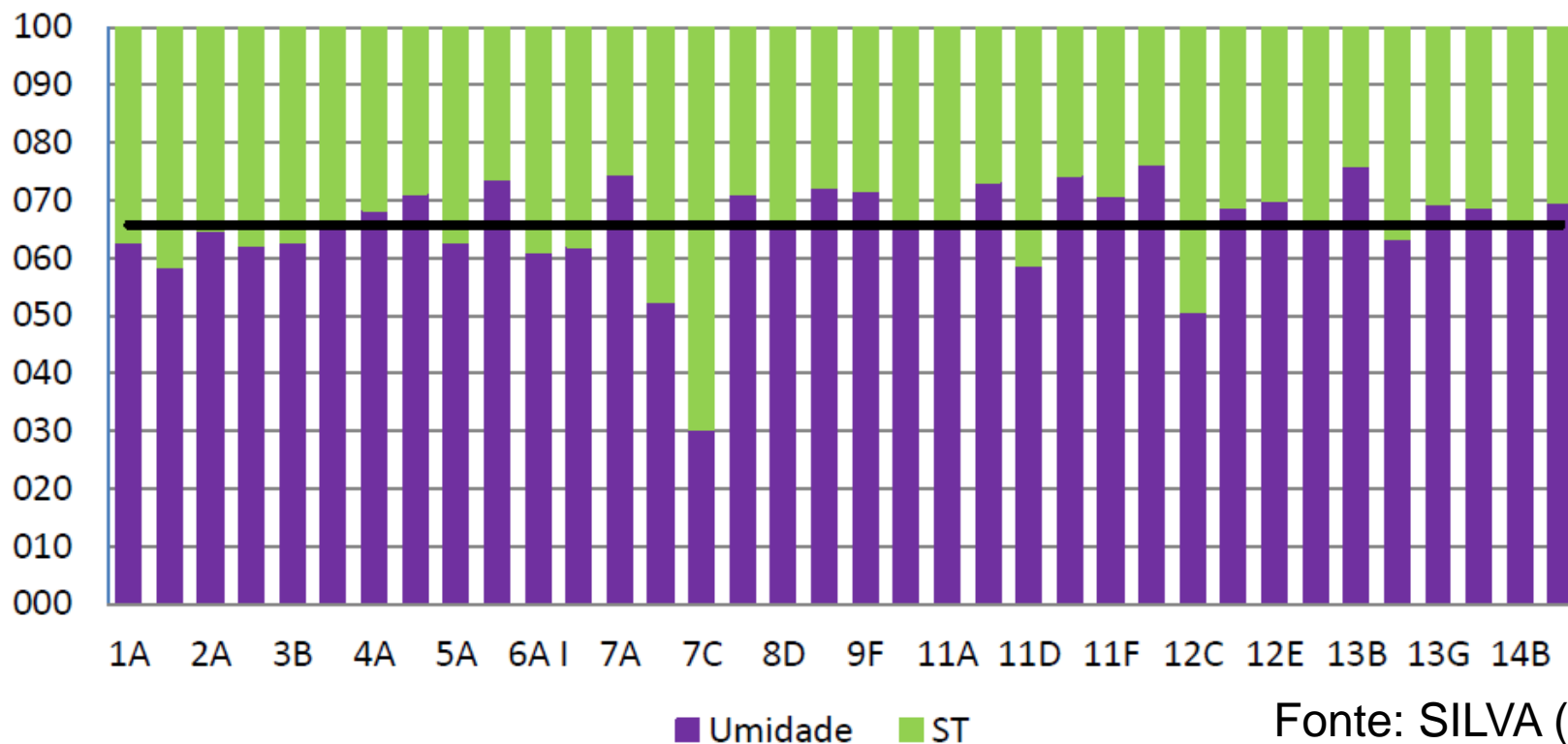


IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: Caracterização para processos bioquímicos

Umidade e sólidos totais da fração orgânica dos 36 subsetores



Fonte: SILVA (2016)

Umidade média= 65,75% - ST médio = 35,24 - Desvio padrão = 8,90%

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: Caracterização para processos bioquímicos

Sólidos Fixos e Voláteis (b.s) da fração orgânica dos 36 subsetores



Fonte: SILVA (2016)

Média SV = 72,23% - Média SF = 27,77 - Desvio padrão = 12,28%

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL

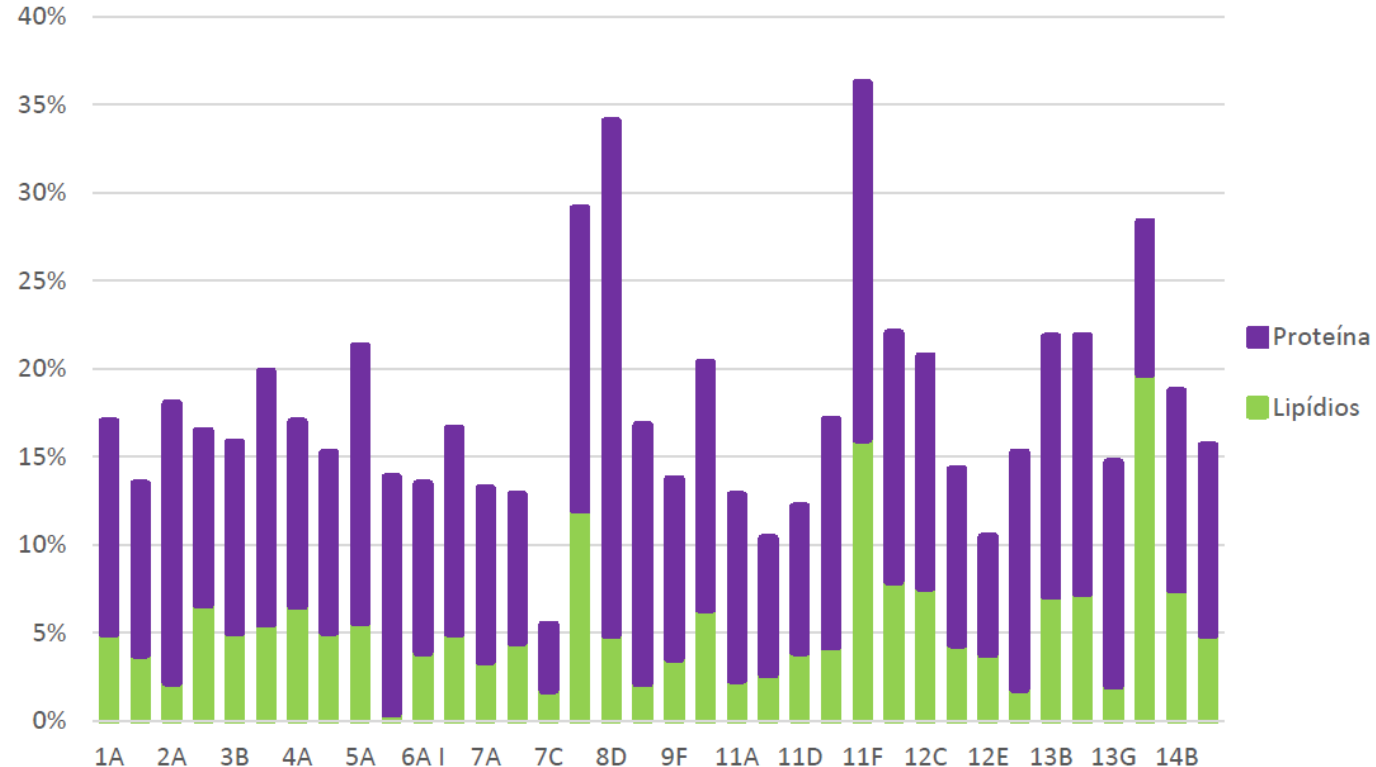


5. Resultados: Caracterização para processos bioquímicos

Média de lipídios =
5,43% - Desvio
padrão = 0,51%

Média de proteínas =
12,33 - Desvio
padrão = 2,10

Lipídios e Proteínas (%) - Rotas



Fonte: SILVA (2016)

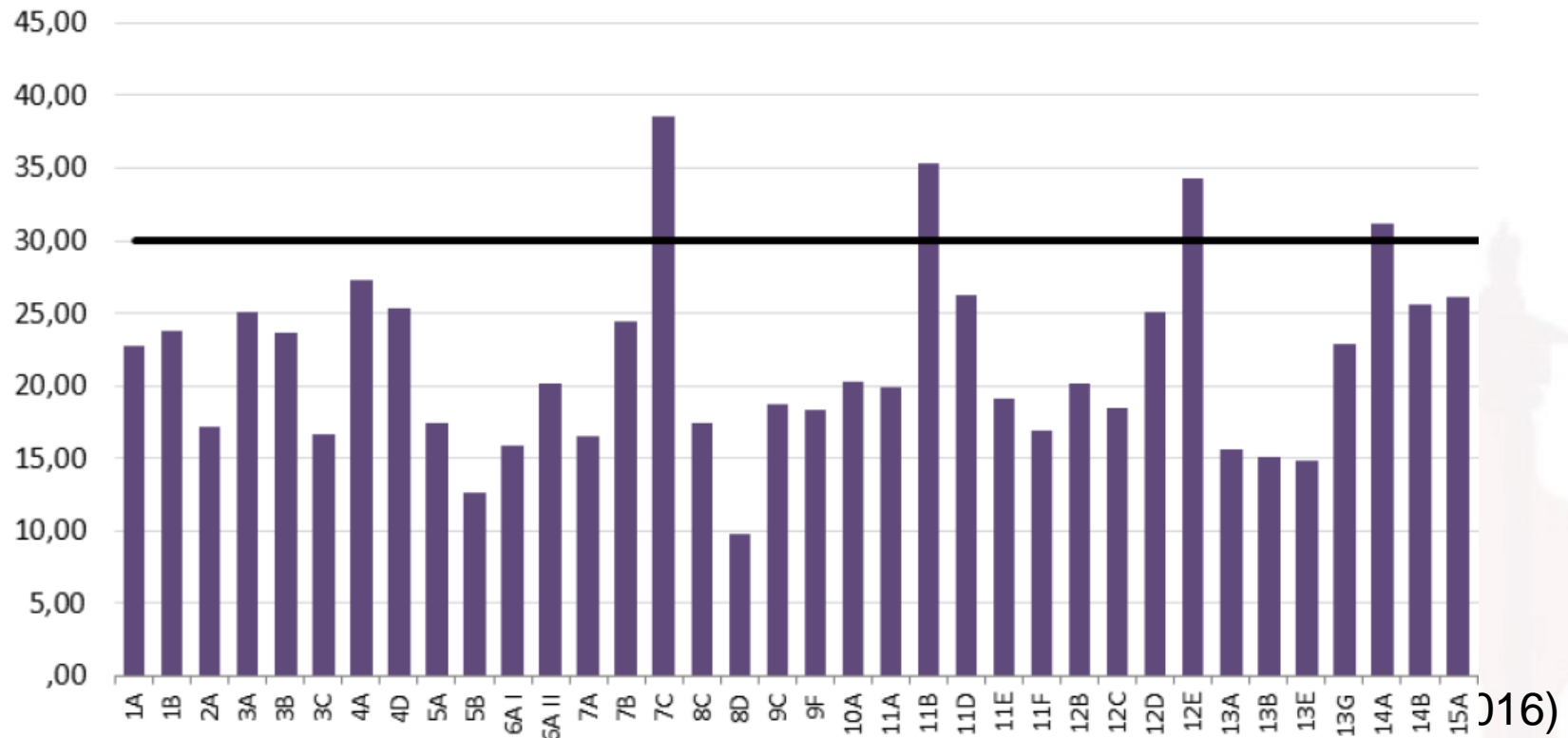


IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: Caracterização para processos bioquímicos

Relação C/N da fração orgânica dos 36 subsetores



Relação CN média = 21,63

Fonte: SILVA (2016)

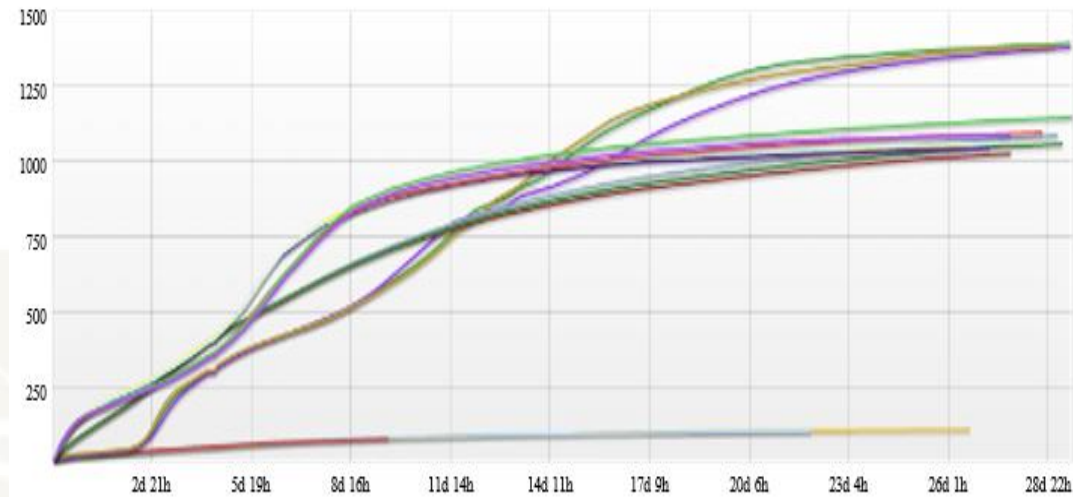
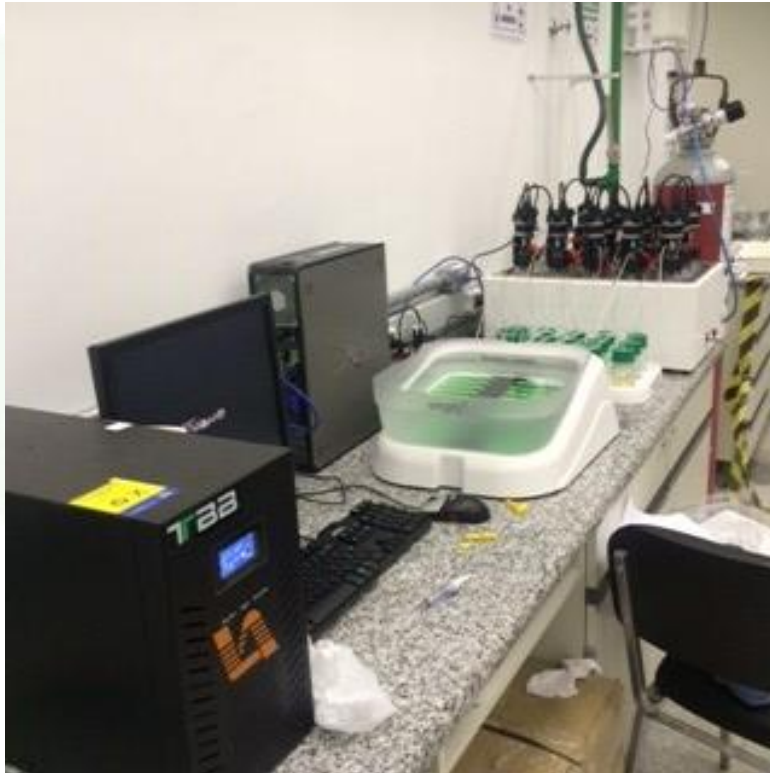


IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

Amostras compostas da fração orgânica dos RSU (36 caminhões), de feiras livres (5 amostras) e da CRAISA (3 amostras) foram caracterizadas e submetidas ao teste para determinação de Potencial Bioquímico de Metano utilizando o AMPTS II da Bioprocess. (MARANA, 2017)



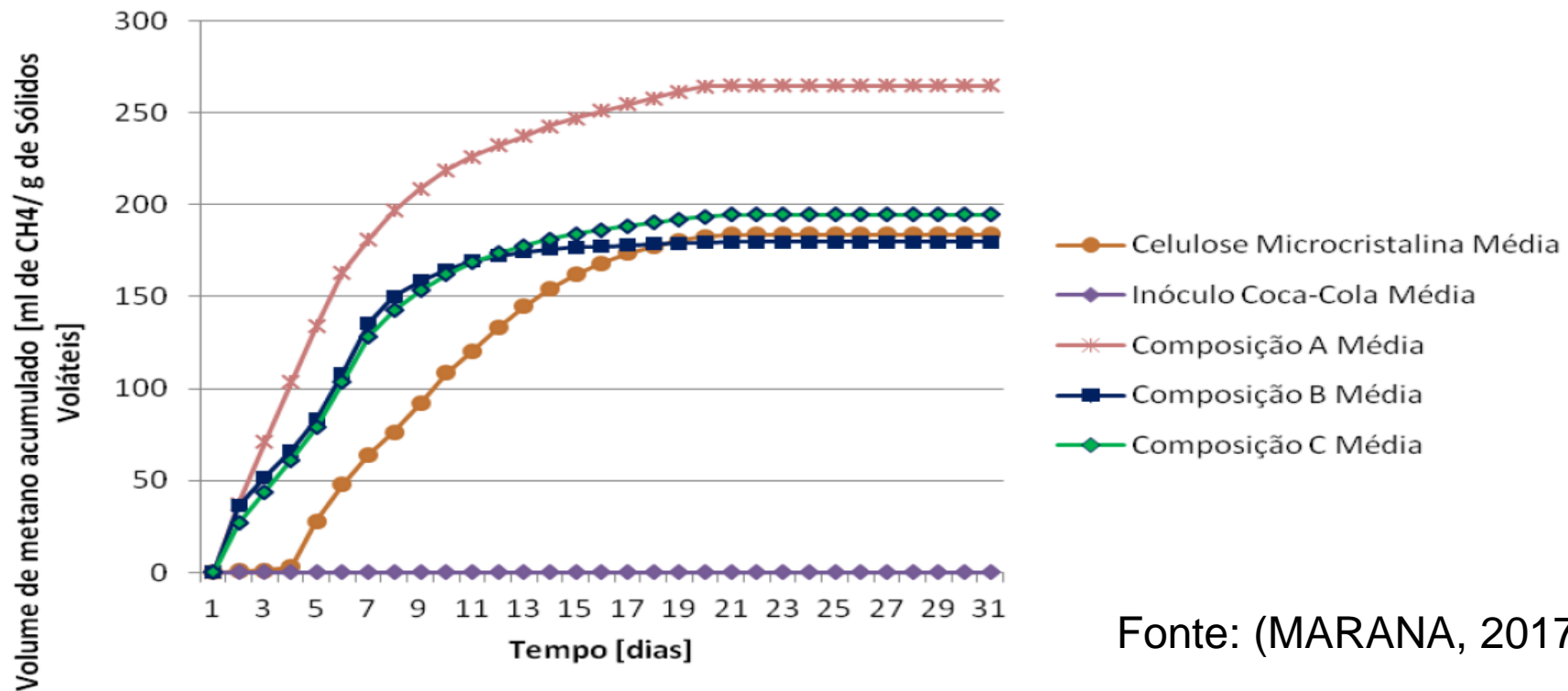


IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

Produção média acumulada de metano corrigida (experimental) - Experimento II



Fonte: (MARANA, 2017)

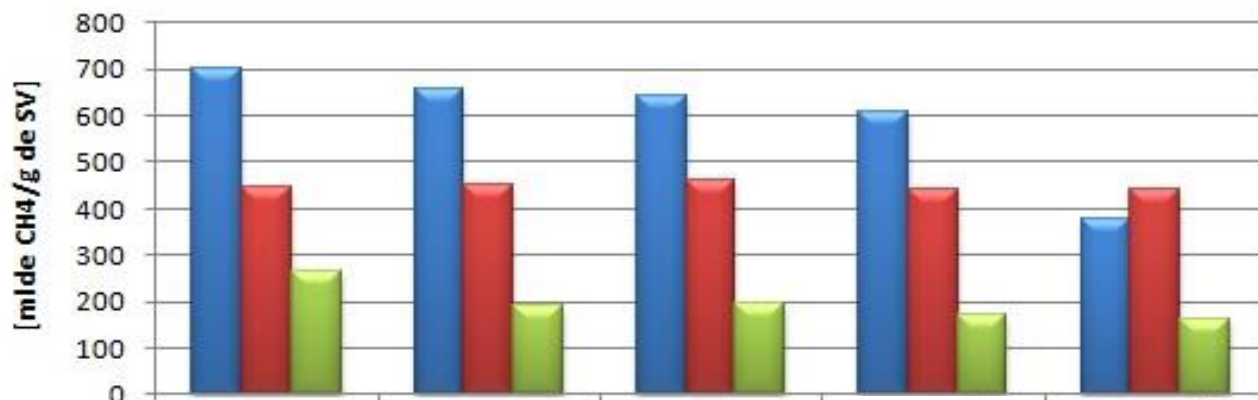


IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



5. Resultados: Potencial Bioquímico de Metano (PBM)

Produção média de metano das composições de fração orgânica de RSU do município de Santo André.



	MSW _A	MSW _B	MSW _C	Open Markets	CRAISA
■ PBMelementar	699,46	658,42	642,43	608,63	376,83
■ PBMcentesimal	447,46	452,18	460,24	441,03	440,27
■ PBMexperimental	264,83	191,48	194,52	170,85	163,93

Composições de fração orgânica de RSU

Fonte: (MARANA, 2017)



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



6. Conclusões:

- A metodologia proposta para o planejamento amostral e os valores de 95% de intervalo de confiança e 10% de erro apresentou resultados que se mostraram estatisticamente confiáveis, constituindo-se numa proposta para aprimoramento da norma brasileira sobre amostragem de RSU (NBR 10.007/2004) .
- O Poder Calorífico Inferior médio do RSU "in natura" avaliado para a amostra (7,06 MJ/kg \pm 1,65) indica possibilidade de aproveitamento energético através de processos termoquímicos.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



6. Conclusões:

- A separação da fração orgânica dos RSU aumentaria o Poder Calorífico Inferior do Combustível Derivado de Resíduo, embora reduza significativamente sua quantidade, facilitaria o projeto e operação do sistema.
- A fração orgânica dos RSU separada, assim como de feiras livres e da CRAISA apresentam potencial significativo de produção de metano, aproximadamente $51 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ton}$ fração orgânica ($200 \text{ Nm}^3 / \text{ton sv} \times 0,3524 \text{ ton st} / \text{ton FORSU} \times 0,7223 \text{ ton sv} / \text{ton st}$) o que, considerando o PCI do metano de $36 \text{ MJ} / \text{Nm}^3$ seria o equivalente a $1,84 \text{ MJ} / \text{kg}$ e portanto cerca de metade do PCI dessa fração com sua umidade ($3,46 \text{ MJ} / \text{kg}$).



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



7. Grupo de Pesquisa no Tema:

- **Prof. Dr. Gilberto Martins**
- **Prof. Dra. Juliana Tofano de Campos Leite Toneli**
- **Profa. Dra. Graziella Colato Antonio**
- **Profa. Dra. Ana Maria Pereira Neto**
- Heleno Quevedo de Lima (Pos Doutorando)
- Kelly Cristina Rosa Drudi (Pos Doutoranda)
- Andrea Carolina Gutierrez Gomez (Doutoranda)
- Caroline Aparecida da Silva (Doutoranda)
- Katherine Benites Bonato Marana (Doutoranda)
- Michele Carlis Sotero (Mestranda)
- Karen Hidalgo (Mestranda)
- Renata de Almeida (Mestranda)
- Aneliza Fraio das Neves (graduanda)



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



8. Referências Bibliográficas:

- DRUDI, K. C. R. **Modelo de predição de poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos a partir de sua composição gravimétrica.** Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Energia. Universidade Federal do ABC. 2017.
- GUTIERREZ GOMES, A. C. **Caracterização da fração combustível de resíduos sólidos urbanos úmidos do município de Santo André visando seu aproveitamento energético por processos termoquímicos.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Energia. Universidade Federal do ABC. 2016.
- MARANA, K. B. B. **Potencial de produção de biogás a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos do município de Santo André.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Energia. Universidade Federal do ABC. 2017.
- SILVA, C. A. S. **Caracterização da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos do aterro municipal de Santo André visando seu aproveitamento energético via biodigestão anaeróbia.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Energia. Universidade Federal do ABC. 2016.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL



Obrigado

Contato:

gilberto.martins@ufabc.edu.br

São Bernardo do Campo/SP - 26 a 29/11/2018