



II SEMINÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Promoção: Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação – PROPP – da FEEVALE

Avaliação do Ciclo de Vida em Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos

Geraldo Antônio Reichert

Engenheiro do DMLU de Porto Alegre
Professor da Universidade de Caxias do Sul – UCS

Novo Hamburgo, RS – 9 de junho de 2016

Perigo: instalações “elefante branco”



Tecnologias de tratamento de RSU

- Mais usadas
 - Aterro sanitário
 - Compostagem
 - Reciclagem
 - Novas tecnologias
 - Digestão anaeróbia (processo biológico)
 - Autoclave (para RSU)
 - Incineração
 - CDR – Combustível Derivado de Resíduo
 - Gaseificação
 - Pirólise
 - Plasma
 - Em pesquisa
 - Produção de etanol de RSU (hidrólise)
 - Depolimerização
- (processos térmicos)



Qual a melhor tecnologia?

Qual a pior?

Existe tecnologia ruim?

Existe alguma tecnologia que resolva sozinho?

Há que considerar:

- consistência técnica e operacional
- aspectos ambientais
- custos
- questões sociais

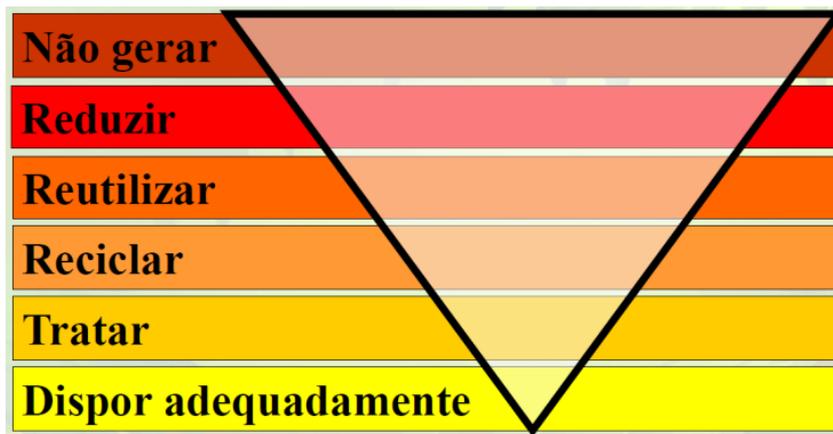
Mais que em tecnologias, temos que focar no
CONCEITO de gerenciamento integrado

Gerenciamento integrado

É uma forma diferenciada de manejo de resíduos, que combina diferentes métodos de coleta e tratamento para lidar com todos os materiais no fluxo de geração e descarte de resíduos, de maneira ambientalmente efetiva, economicamente viável e socialmente aceitável.

White *et al.* (1995)

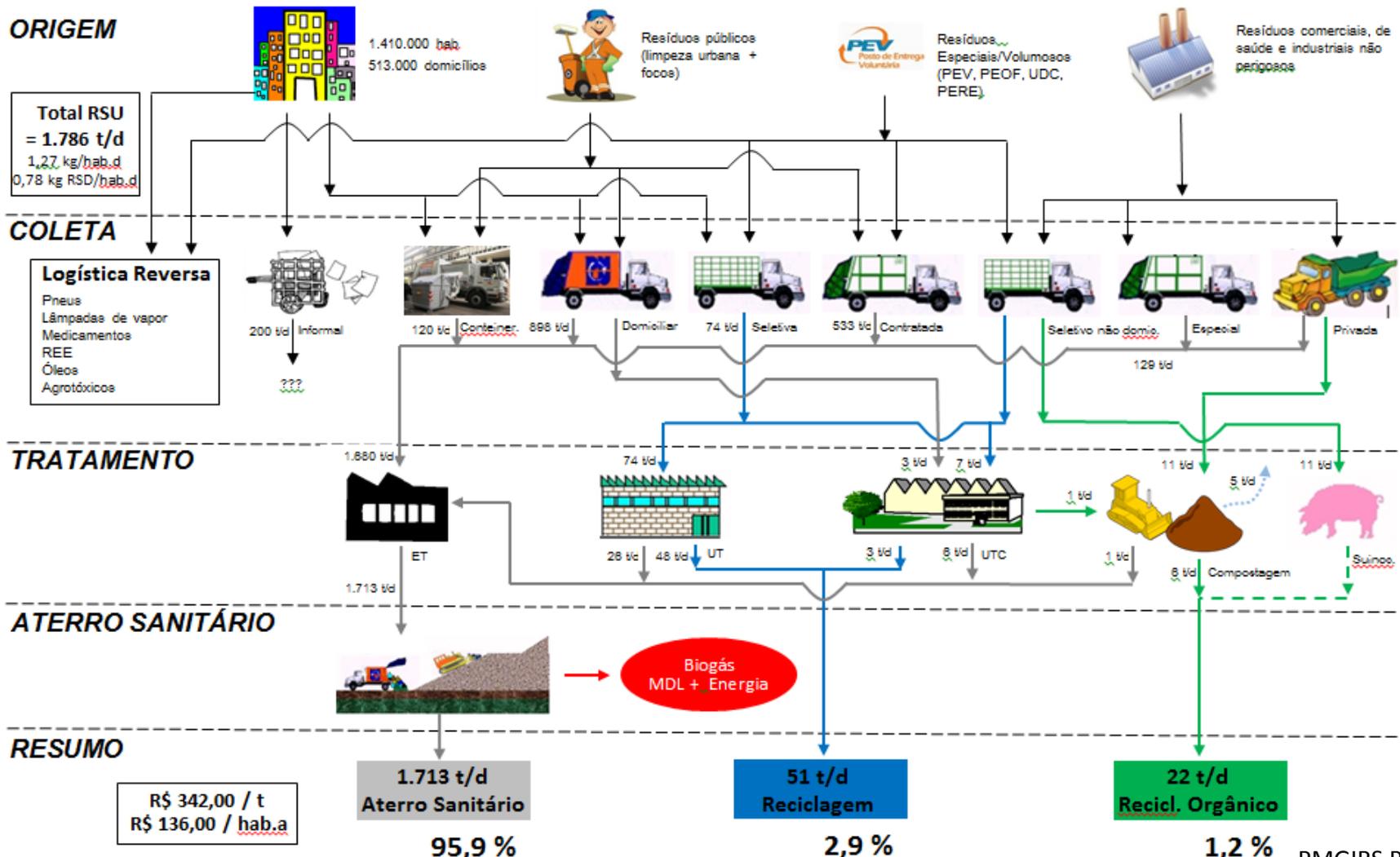
Gerenciamento integrado



O que era um CONCEITO, virou uma OBRIGAÇÃO pela PNRS.

Como avaliar e escolher o melhor cenário de gerenciamento de RSU?

FLUXOGRAMA GIRSU DE PORTO ALEGRE, RS - 2011



Fonte: PMGIRS POA, 2013

Metas do (Pré)Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Redução de recicláveis para aterro)

META 3 - Redução dos resíduos recicláveis secos dispostos em aterro, com base na caracterização nacional em 2013 (%)

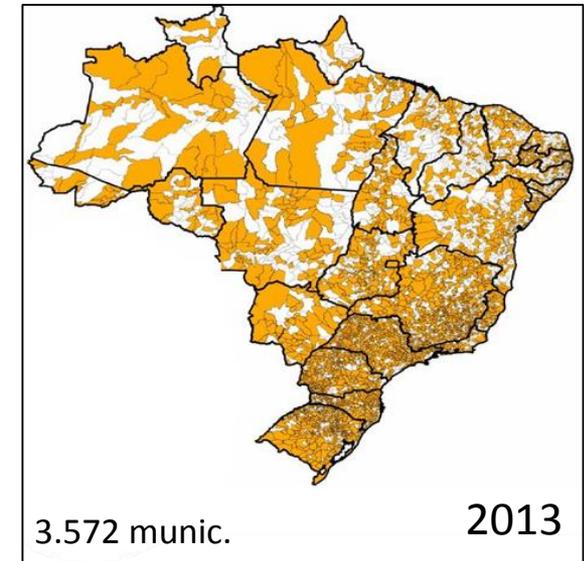
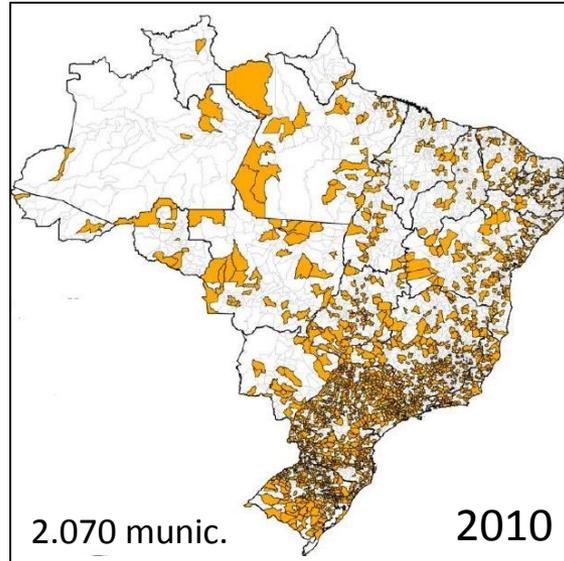
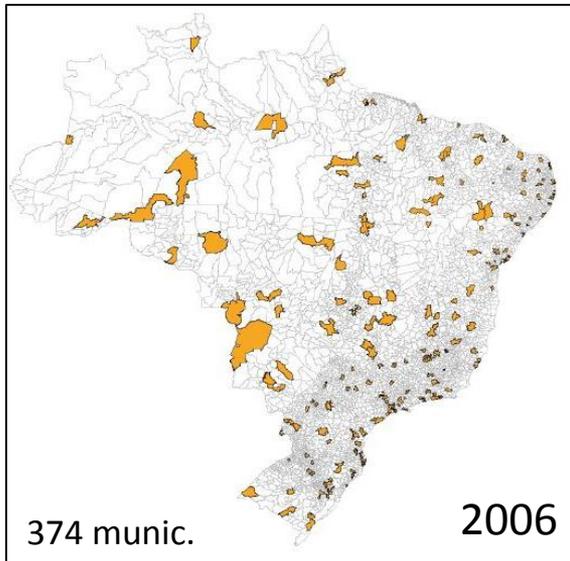
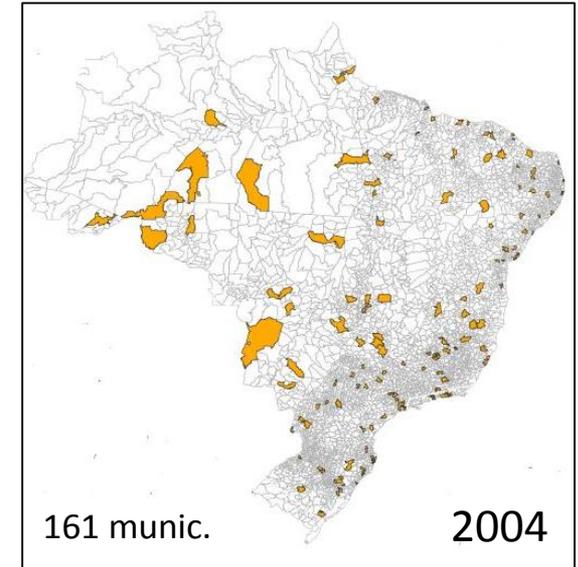
Meta	Região	Plano de Metas				
		2015	2019	2023	2027	2031
Redução dos resíduos recicláveis secos dispostos em aterro, com base na caracterização nacional em 2013	Brasil	22	28	34	40	45
	Região Norte	10	13	15	17	20
	Região Nordeste	12	16	19	22	25
	Região Sul	43	50	53	58	60
	Região Sudeste	30	37	42	45	50
	Região Centro-oeste	13	15	18	21	25

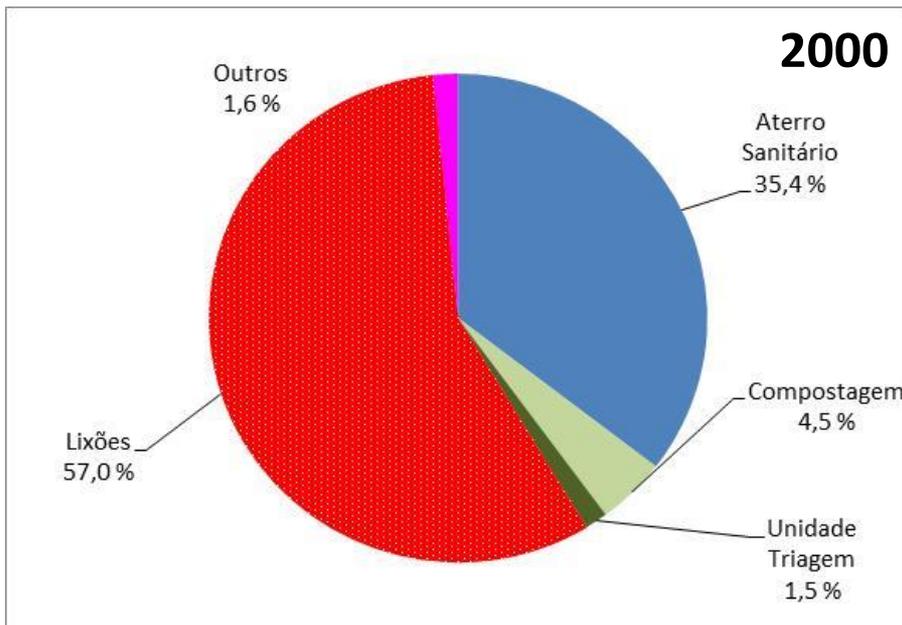
Meta 4 - Redução do percentual de resíduos úmidos disposto em aterros, com base na caracterização nacional de 2013 (%)

Meta	Região	Plano de Metas				
		2015	2019	2023	2027	2031
Redução do percentual de resíduos úmidos disposto em aterros, com base na caracterização nacional realizada em 2013	Brasil	19	28	38	46	53
	Região Norte	10	20	30	40	50
	Região Nordeste	15	20	30	40	50
	Região Sul	30	40	50	55	60
	Região Sudeste	25	35	45	50	55
	Região Centro-oeste	15	25	35	45	50

SNIS

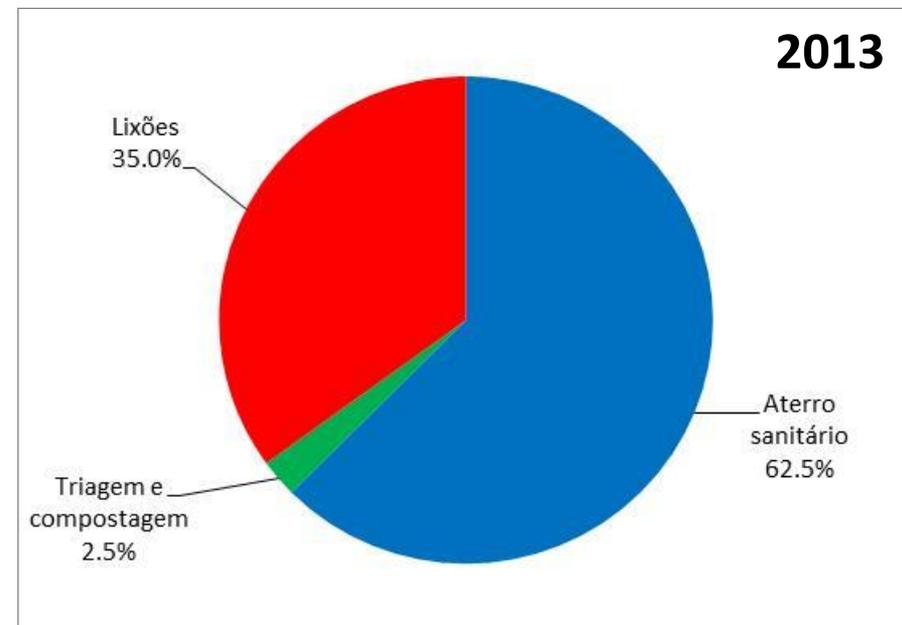
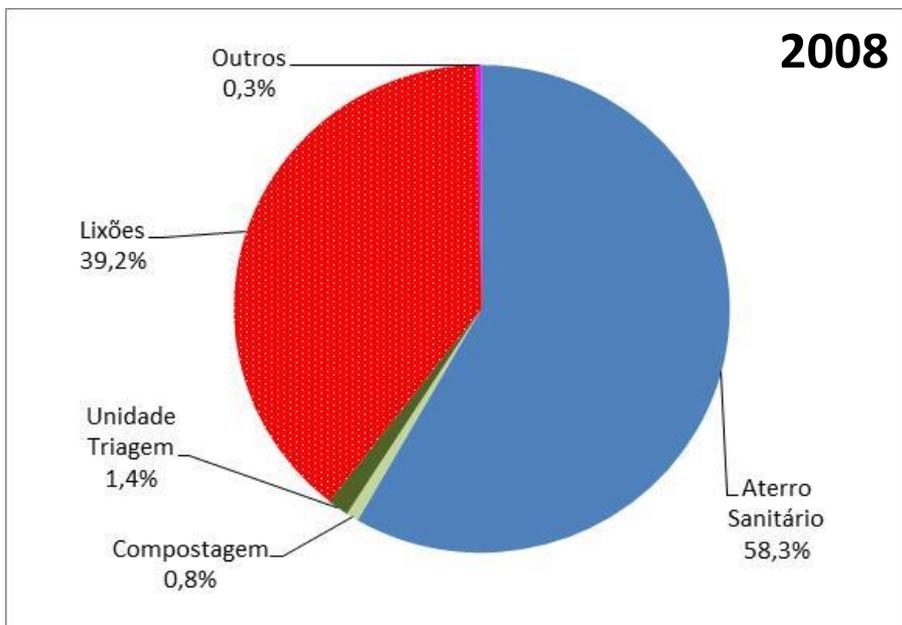
Distribuição espacial dos municípios amostrados



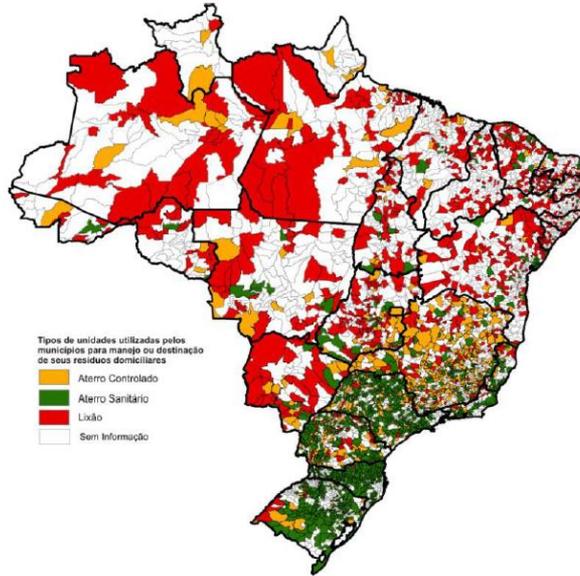


Destinação final de RSU no Brasil Porcentagem em massa

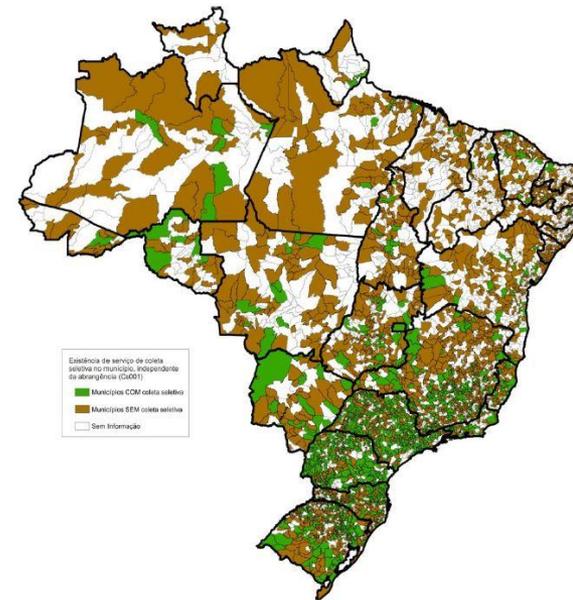
Fonte: PNSB 2000 e 2008 (IBGE) e SNIS 2013



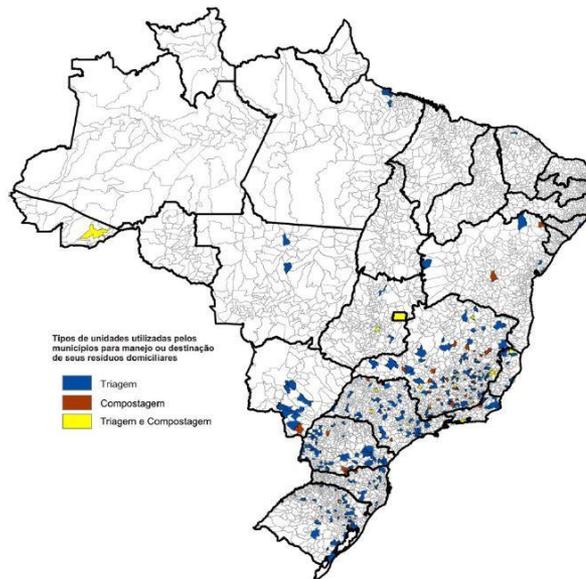
Disposição final no Brasil



Existência de coleta seletiva



Existência de triagem e compostagem

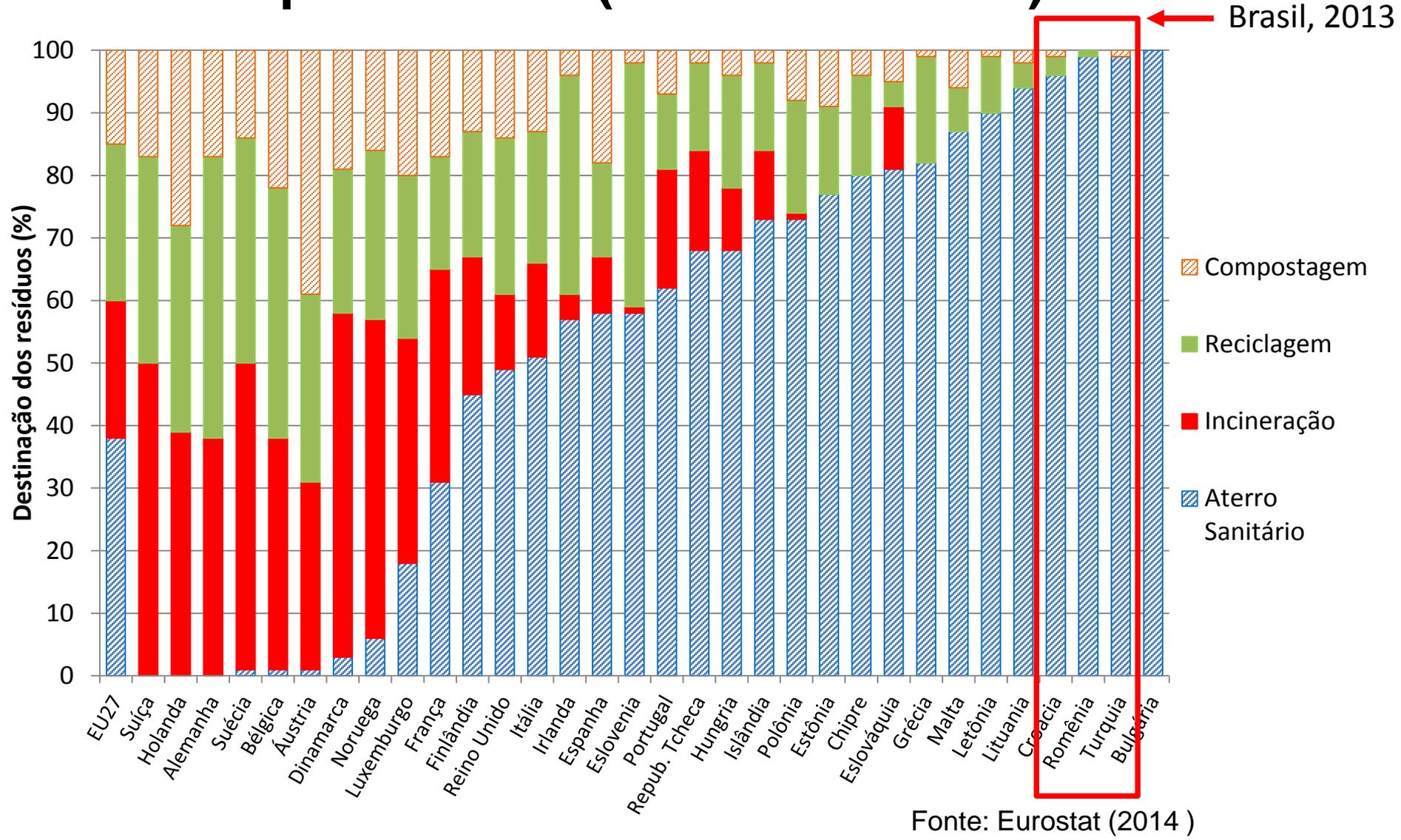


Em 2013 :

- Somente 20,8% dos municípios tinham coleta seletiva
- Somente 3,5% dos domicílios com coleta seletiva

Fonte: SNIS (2013)

Destinação dos resíduos nos países da Europa em 2010 (em % de massa)

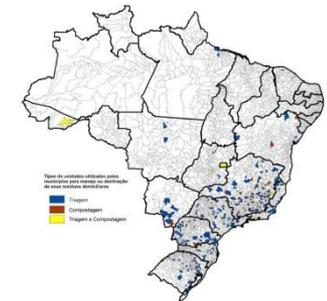
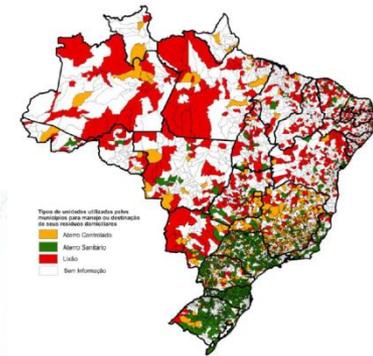


Existência de cobrança pelos serviços

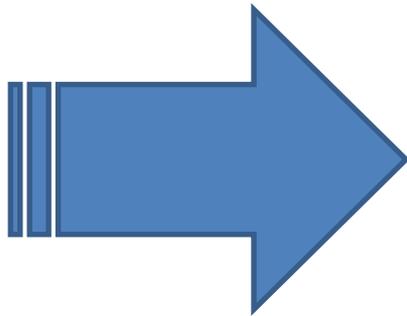
QUADRO 10.1

Existência de cobrança pelos serviços regulares de coleta, transporte e destinação final de RSU dos municípios participantes do SNIS-RS 2013, segundo região geográfica

Região	Quantidade de municípios	Percentual de municípios que cobram	Percentual de municípios sem cobrança	Percentual de pop. urbana correspondente aos munic. que cobram
	(municípios)	(%)	(%)	(%)
norte	242	12,4%	87,6%	40,7%
nordeste	862	5,6%	94,4%	30,7%
sudeste	1.248	45,6%	54,4%	56,3%
sul	940	76,5%	23,5%	86,8%
centro-oeste	280	16,4%	83,6%	41,0%
total - 2013	3.572	39,5%	60,5%	53,4%
total - 2012	3.043	41,6%	58,4%	54,2%
total - 2011	2.100	47,0%	53,0%	57,8%

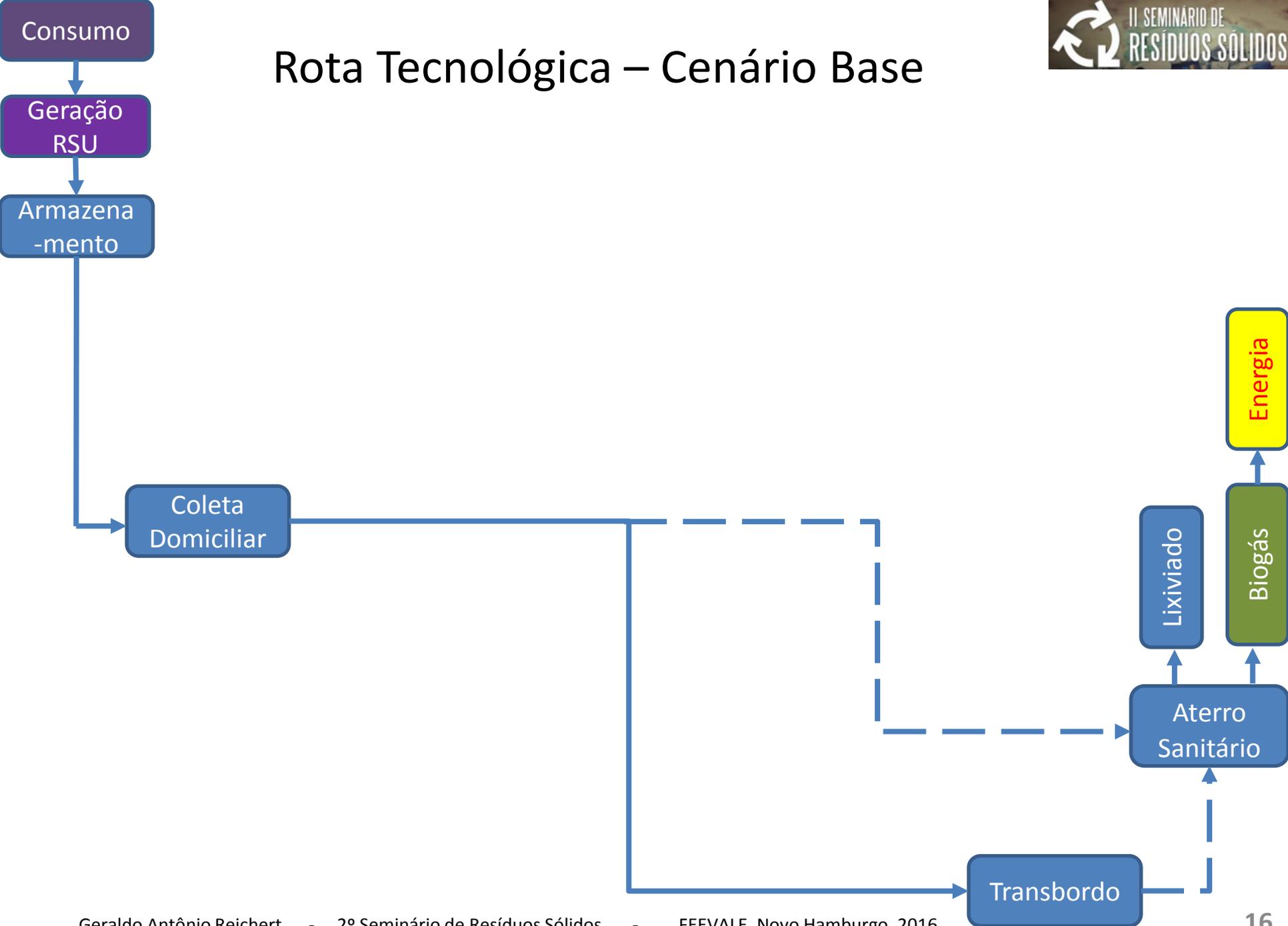


Quais as possibilidades para o Brasil?

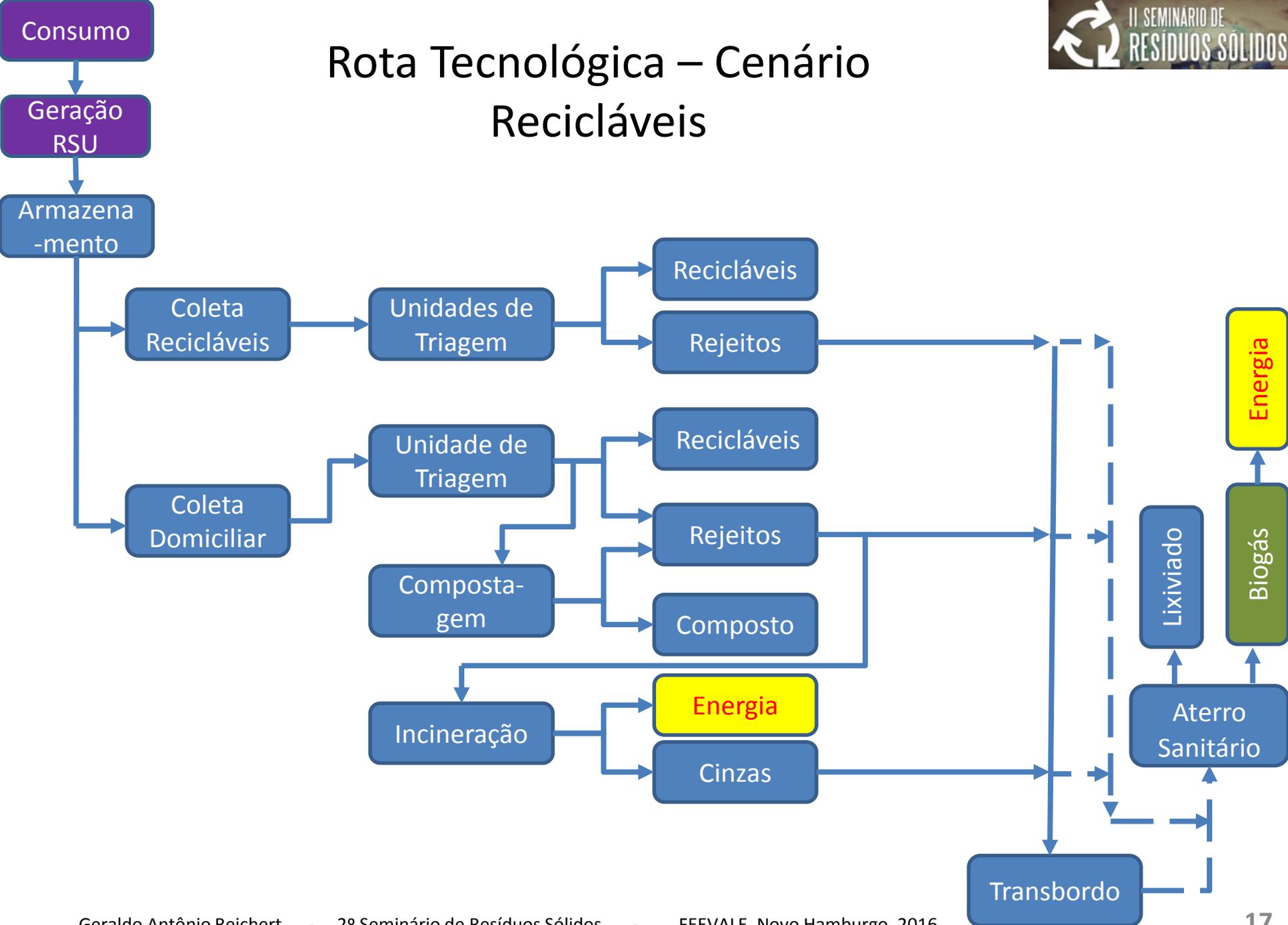


diferentes novos cenários (ou novas tecnologias ou novas rotas tecnológicas) de gerenciamento...

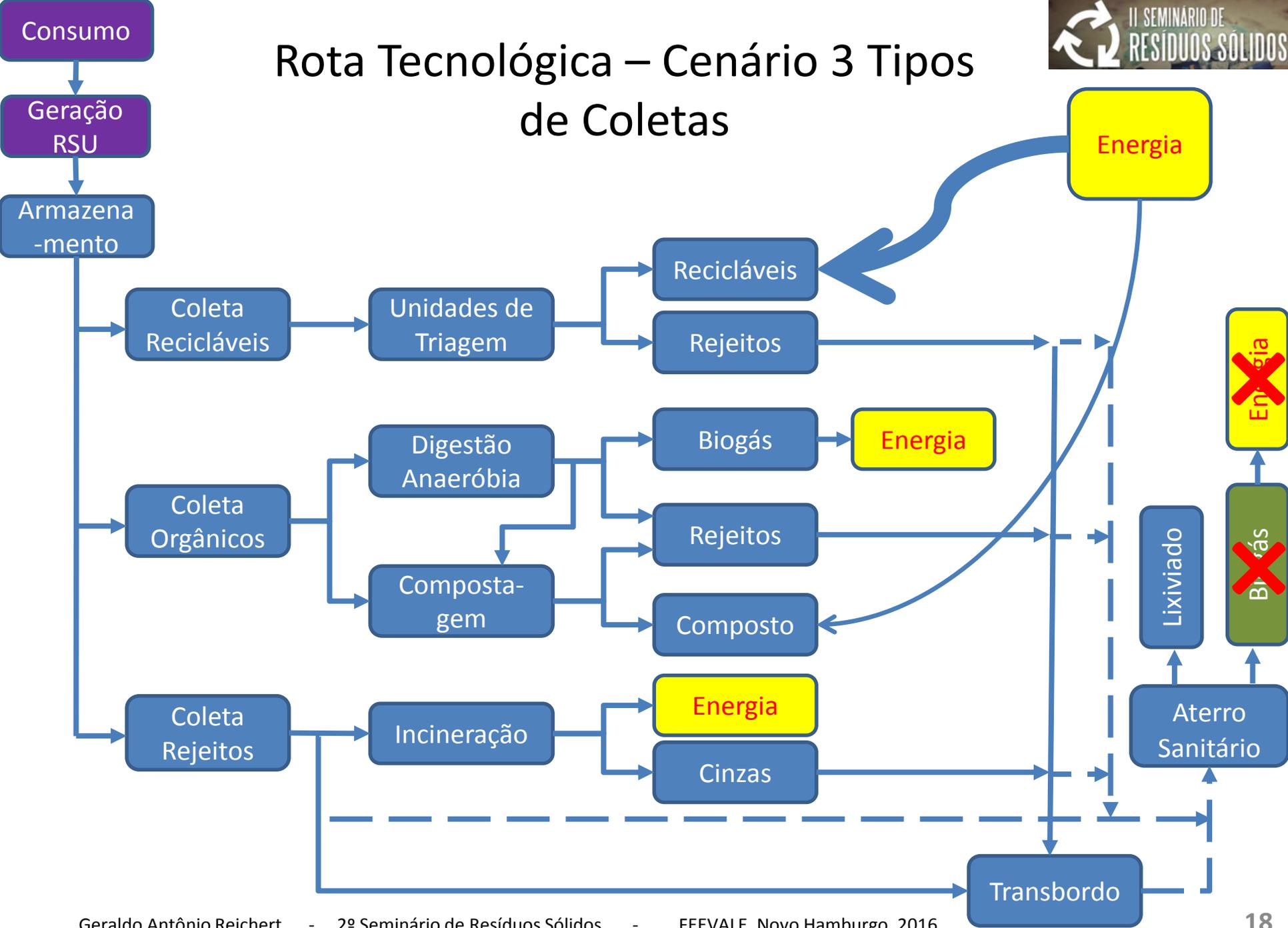
Rota Tecnológica – Cenário Base



Rota Tecnológica – Cenário Recicláveis



Rota Tecnológica – Cenário 3 Tipos de Coletas

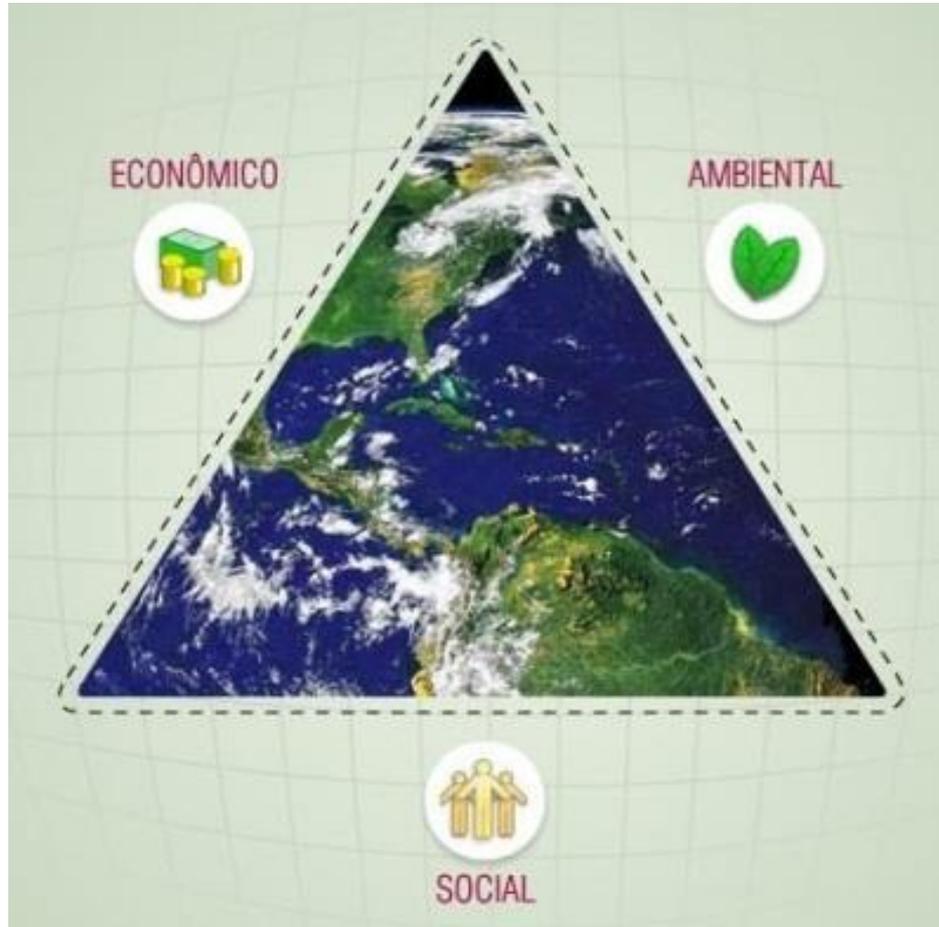


Como decidir?

Rota, alternativa ou cenário mais sustentável?

Aplicar “tecnologia” no processo de apoio à decisão!

Sustentabilidade



Como avaliar a sustentabilidade de SGIRS?

Ciclo de vida

ICV (Inventário do Ciclo de Vida) – Compilação e quantificação das entradas e saídas de um sistema ao longo do seu ciclo de vida

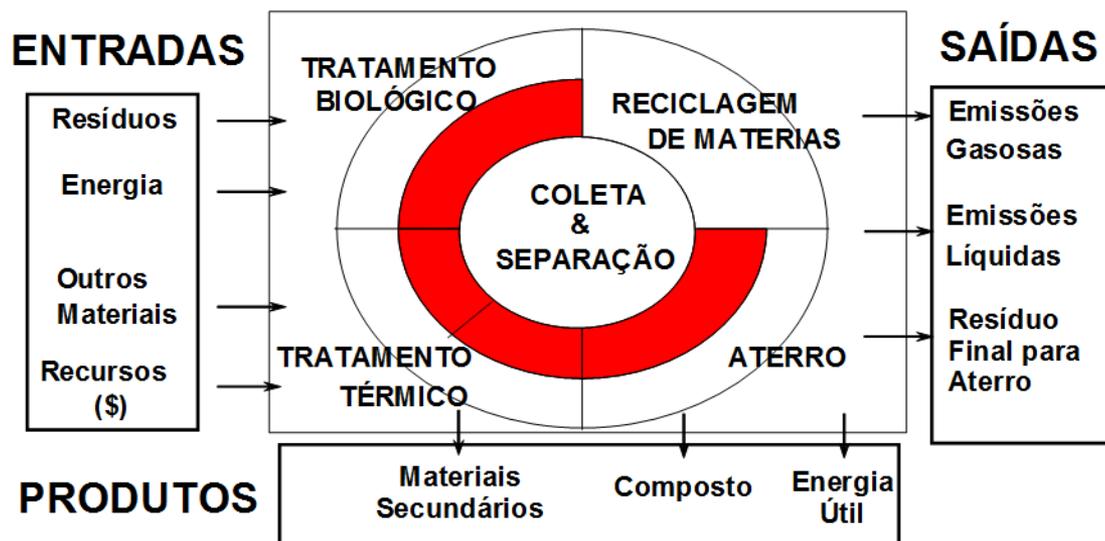
AICV (Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida) – Compreensão e avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais de um sistema

ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) – Compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema ao longo do seu ciclo de vida

Fazer a ACV é estabelecer uma conexão entre o inventário e os danos ou impactos potenciais.

$$\text{ICV} + \text{AICV} = \text{ACV}$$

Ciclo de vida dos RSU



McDougall *et al.* (2001)

Fluxo de massa por cenário

Cenário	Por tipo de coleta (% em massa)				Por tipo de tratamento (t/d)							Destinação final (% em massa)		
	Reciclagem direta	Seletiva de recicláveis	Seletiva de orgânicos	Rejeitos	Triagem		Trat. biológico		Trat. Térmico			Aterro sanitário	Reciclagem de materiais	Biodegradação ou com- bustão
					UT – Unidade de triagem	UTC – Unid. triagem e compostagem	Digestão anaeróbia	Compostagem	CDR – Combustível derivado de resíduos	Incineração				
#1 BASE	0	7,7	1,7	90,6	100,9	22,3	0,0	34,1	0,0	0,0	91,7	7,1	1,2	
#2 PGTA	1	15	10	74	196,5	131,0	52,4	180,8	0,0	149,3	63,3	19,8	16,9	
#3 PDT	0	10	3	87	131,0	131,0	0,0	104,8	0,0	0,0	83,9	12,3	3,8	
#4 OGTA	3	25	38	34	327,5	196,5	262,0	517,5	0,0	235,8	18,6	42,1	39,3	
#5 ODT	2	24	30	44	314,4	22,7	262,0	425,8	187,3	0,0	34,5	37,4	28,1	
#6 DASI	0	20	0	80	262,0	1.048,0	524,0	366,8	0,0	0,0	38,3	36,3	24,4	
#7 QM	0	20	5	75	262,0	0,0	0,0	65,5	0,0	1.053,3	16,1	18,0	65,9	
#8 GICI	0	25	30	45	327,5	0,0	393,0	275,1	0,0	685,2	10,5	29,1	60,4	

Fonte: Reichert, 2013

Resultado de ICV – Saída Programa IWM-2

POA – Estudo de Caso

Substância e meio para o qual é emitido		Total da emissão da substância por Cenário (em g/a)							
		#1 BASE	#2 PGTA	#3 PDT	#4 OGTA	#5 ODT	#6 DASI	#7 QM	#8 GICI
Nome da substância	Meio								
Amônia	ar	7,421E+05	8,263E+05	6,334E+05	4,284E+05	9,133E+05	2,491E+05	2,050E+06	1,638E+06
Arsênico	ar	-6,477E+04	-1,688E+05	-1,297E+05	-4,034E+05	-1,919E+05	-5,595E+05	-1,481E+05	-1,865E+05
Cádmio	ar	-1,230E+01	-3,129E+02	-9,616E+01	-6,350E+02	-5,428E+02	-6,156E+02	5,724E+02	4,260E+02
Dióxido de carb.	ar	1,005E+11	9,713E+10	7,989E+10	4,939E+10	-2,266E+10	-2,781E+10	2,964E+11	2,058E+11
Monóxido de carb.	ar	9,451E+07	2,331E+07	8,189E+07	-7,309E+07	-1,439E+07	-4,627E+07	-2,291E+07	-1,472E+07
Cromo	ar	3,81E+01	3,624E+02	5,774E+01	7,925E+02	1,744E+02	1,862E+02	1,476E+03	1,195E+03
Cobre	ar	1,408E+02	1,704E+03	2,534E+02	4,093E+03	9,245E+02	9,865E+02	5,515E+03	5,293E+03
Oxido nitroso	ar	1,748E+03	-1,035E+06	-5,007E+05	-3,735E+06	-2,922E+06	-2,596E+06	1,170E+05	-1,702E+06
Dioxinas	ar	3,400E-02	2,450E-02	3,040E-02	7,200E-03	8,800E-03	1,080E-02	1,790E-02	1,420E-02
Acido clorídrico	ar	1,632E+06	1,318E+05	1,031E+06	-1,567E+06	-6,688E+05	-2,486E+05	-1,253E+06	-9,228E+05
Acido fluorídrico	ar	2,495E+05	1,342E+05	2,018E+05	1,108E+04	9,829E+04	1,596E+05	5,718E+04	5,394E+04
Acido sulfídrico	ar	3,660E+06	2,372E+06	3,306E+06	3,442E+05	1,038E+06	1,098E+06	4,602E+04	8,803E+04
Chumbo	ar	5,198E-04	1,465E+05	1,033E+05	3,431E+05	1,624E+05	4,445E+05	1,357E+05	1,620E+05
Mercúrio	ar	8,902E+00	1,322E+03	-4,689E+01	2,763E+03	-9,673E+01	-2,930E+01	1,132E+04	7,941E+03
Metano	ar	7,126E+09	4,572E+09	6,414E+09	5,459E+08	1,874E+09	2,028E+09	-1,561E+07	1,435E+07
Níquel	ar	-1,842E+03	-1,055E+04	-3,439E+03	-2,262E+04	-9,695E+03	-1,191E+04	-5,278E+03	-5,548E+03
NO _x	ar	2,108E+08	9,120E+07	1,607E+08	-6,014E+07	-3,373E+07	-9,281E+07	4,129E+06	5,072E+06
SO ₂	ar	-1,207E+07	-8,081E+07	-3,082E+07	-1,662E+08	-1,504E+08	-1,277E+08	-9,782E+07	-1,121E+08
Zinco	ar	1,266E+03	2,048E+03	5,231E+02	2,812E+03	-1,112E+03	-1,736E+03	1,568E+04	1,313E+04
Amônio (ion)	água	3,760E+05	1,312E+06	6,592E+05	3,803E+06	2,788E+06	4,840E+06	5,776E+05	3,858E+06
Arsênico	água	-2,500E+03	-1,735E+04	-7,019E+03	-3,253E+04	-1,523E+04	-1,850E+04	-1,309E+04	-1,300E+04
Bário	água	-7,143E+04	-6,767E+05	-2,491E+05	-1,307E+06	-4,978E+05	-7,368E+05	-4,489E+05	-4,127E+05
Cádmio	água	9,320E+01	-1,845E+02	1,265E+00	-5,734E+02	2,348E+02	-3,287E+02	-5,662E+01	1,719E+01
DQO	água	-4,388E+08	-8,334E+08	-5,496E+08	-1,444E+09	-1,501E+09	-1,082E+09	-1,185E+09	-1,489E+09
Cromo	água	-1,355E+04	-8,931E+04	-3,672E+04	-1,673E+05	-8,095E+04	-9,752E+04	-6,801E+04	-6,814E+04
Cobre	água	3,505E+03	-1,883E+04	-1,638E+03	-3,774E+04	7,430E+03	8,961E+01	-8,54E+03	-2,43E+03
Dioxinas	água	1,000E-03	8,000E-04	1,100E-03	2,000E-04	5,000E-04	5,000E-04	1,000E-04	0,000E+00
Fluoreto	água	8,767E+02	-2,696E+02	4,328E+02	-1,721E+03	-1,751E+03	-2,172E+03	-4,686E+02	-1,189E+03
Chumbo	água	-6,307E+03	-4,482E+04	-1,811E+04	-8,581E+04	-3,921E+04	-5,074E+04	-3,215E+04	-3,192E+04
Mercúrio	água	2,269E+01	4,806E+01	3,275E+01	8,391E+01	9,504E+01	9,466E+01	5,227E+01	6,375E+01
Níquel	água	-5,769E+03	-4,257E+04	-1,712E+04	-8,026E+04	-3,785E+04	-4,597E+04	-3,224E+04	-3,223E+04
Nitrato	água	8,150E+06	1,551E+07	1,029E+07	2,687E+07	2,796E+07	2,060E+07	2,154E+07	2,716E+07
Fenóis	água	-3,987E+03	-1,572E+04	-8,595E+03	-3,141E+04	-2,680E+04	-3,353E+04	-1,296E+04	-1,566E+04
Fosfato	água	1,385E+05	-1,001E+05	6,714E+04	-2,428E+05	3,011E+05	2,740E+04	1,717E+05	3,218E+05
Zinco	água	-7,622E+03	-7,943E+04	-2,886E+04	-1,524E+05	-6,382E+04	-8,013E+04	-5,964E+04	-5,750E+04

Indicadores de sustentabilidade - AICV

Ambientais

- Mudanças climáticas
- Toxicidade humana
- Formação de foto-oxidantes
- Acidificação
- Eutrofização
- % disposição final recicláveis secos
- % disposição final recicláveis orgânicos

Etapas da AICV – Ambiental

Seleção das categorias de impacto

- uso de energia;
- mudanças climáticas;
- toxicidade humana;
- formação de foto-oxidantes;
- acidificação;
- eutrofização;
- disposição de recicláveis secos em aterro sanitário;
- disposição de recicláveis orgânicos em aterro sanitário.

Classificação

Alocação dos resultados do inventário às categorias de impacto

CO₂ → mudanças climáticas

NO₂ → formação de foto-oxidantes e
→ acidificação

... → ...

... → ...
...
...

Caracterização e agregação

Para cada categoria de impacto:
*Indicador de Impacto = Resultado
do Inventário x Fator de
Caracterização*

$$MdCI = \sum_{i=1}^n PAG_i \times m_i$$

$MdCI$ = resultado do indicador, que é
expresso em kg-CO₂-equivalente
 PAG_i = Potencial de Aquecimento Global da
substância i
 m_i = massa da substância i emitida em kg

Normalização

Etapa utilizada para expressar o
indicador de impacto de
maneira que possa ser
comparado dentre as
categorias de impacto

Ponderação

Atribuição de pesos

Etapa subjetiva

3 (muito importante) e 0 (sem
importância)

Fatores de Caracterização para AICV

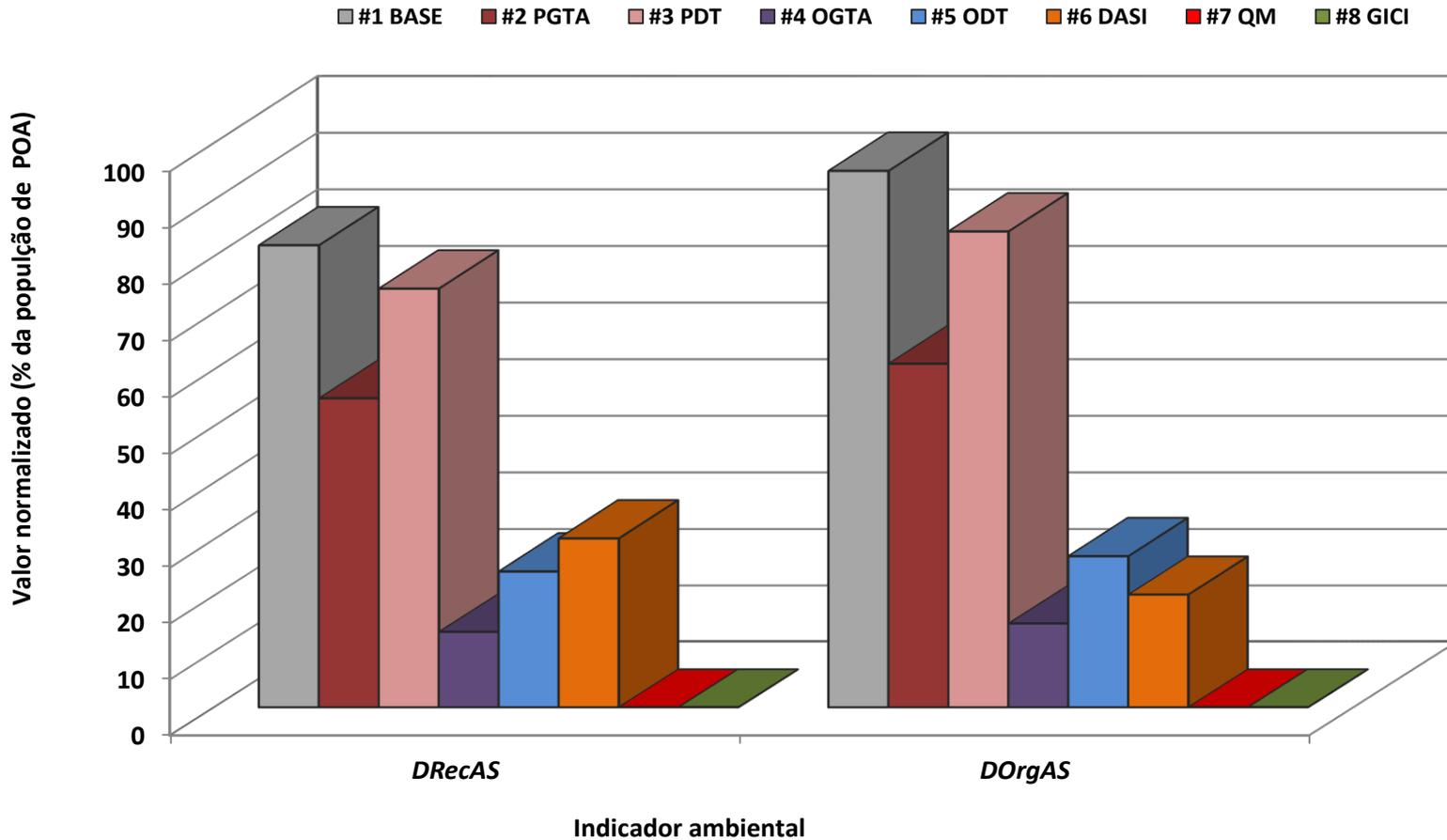
Categoria de Impacto			Mudanças Climáticas	Toxicidade humana	Oxidação fotoquímica	Acidificação	Eutrofização
Substância			PAG	PTH	PCFO	PA	PE
Nome	Emissão	Unidade	kg CO ₂ eq	kg C ₆ H ₄ Cl ₂ eq	kg C ₂ H ₄ eq	kg SO ₂ eq	kg PO ₄ eq
Petróleo	recursos	kg					
Amônia	ar	kg		1,00E-01		1,60E+00	3,50E-01
Arsênico	ar	kg		3,48E+05			
Cádmio	ar	kg		1,45E+05			
Dióxido de carbono	ar	kg	1,00E+00				
Monóxido de carbono	ar	kg			2,70E-02		
Cromo	ar	kg		6,47E+02			
Cobre	ar	kg		4,30E+03			
Oxido nitroso	ar	kg	2,96E+02				
Dioxinas	ar	kg		1,93E+09			
Acido clorídrico	ar	kg		5,00E-01			
Acido fluorídrico	ar	kg		2,85E+03			
Acido sulfídrico	ar	kg		2,20E-01			
Chumbo	ar	kg		4,67E+02			
Mercurio	ar	kg		6,01E+03			
Metano	ar	kg	2,30E+01		6,00E-03		
Níquel	ar	kg		3,50E+04			
NO _x	ar	kg		1,20E+00	2,80E-02	5,00E-01	1,30E-01
SO ₂	ar	kg		9,60E-02	4,80E-02	1,00E+00	
Zinco	ar	kg		1,04E+02			
Amônio (ion)	água	kg					3,30E-01
Arsênico	água	kg		9,51E+02			
Bário	água	kg		6,30E+02			
Cádmio	água	kg		2,29E+01			
DQO	água	kg					2,20E-02
Cromo	água	kg		2,05E+00			
Cobre	água	kg		1,34E+00			
Dioxinas	água	kg		8,58E+08			
Fluoreto	água	kg		3,64E+03			
Chumbo	água	kg		1,23E+01			
Mercurio	água	kg		1,43E+03			
Níquel	água	kg		3,31E+02			
Nitrato	água	kg					1,00E-01
Fenóis	água	kg		4,92E-02			
Fosfato	água	kg					1,00E+00
Zinco	água	kg		5,84E-01			

$$MdCl = \sum_{i=1}^n PAG_i \times m_i$$

Resultado de ACV

POA

Envio de recicláveis para Aterro Sanitário

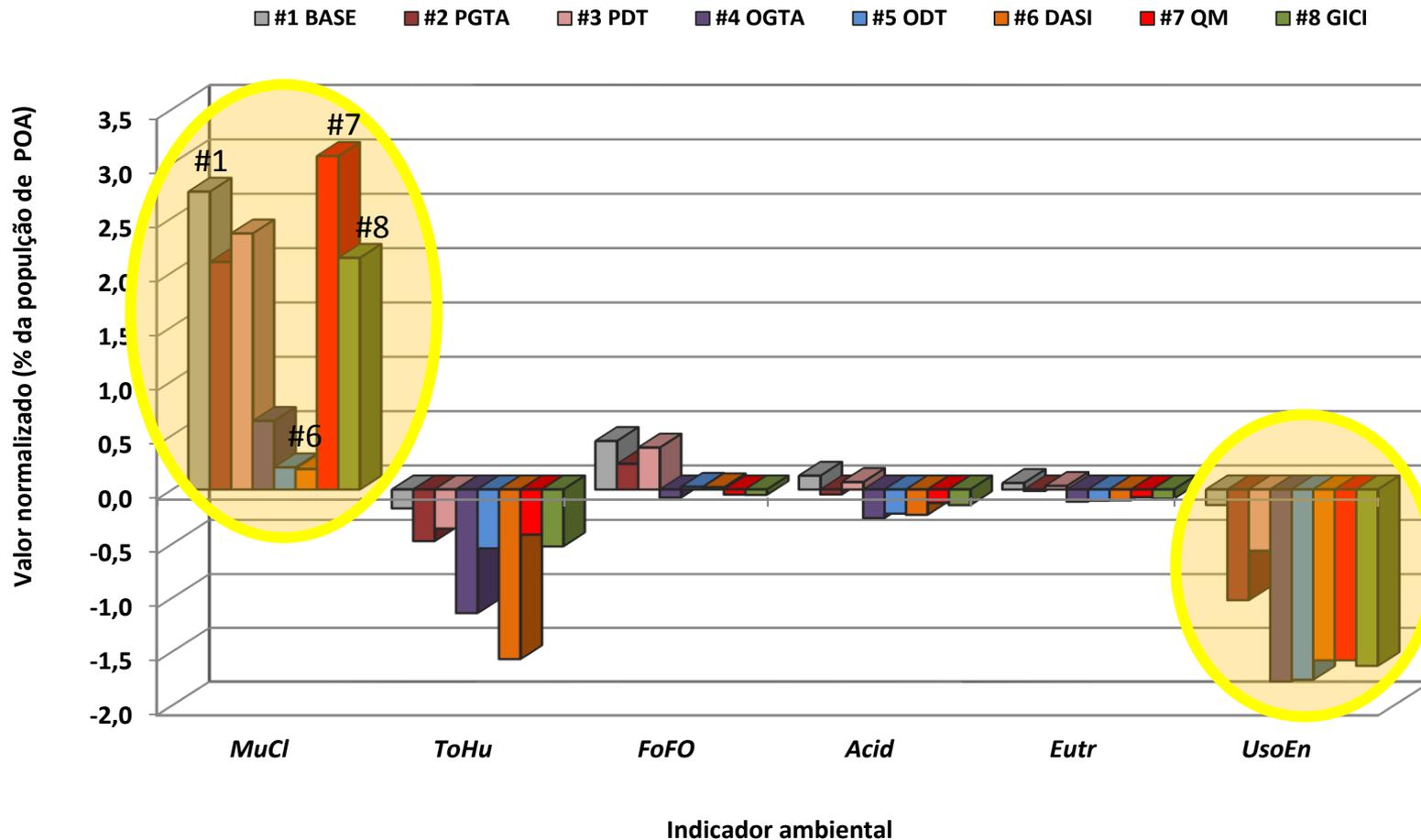


Resultado de ACV

POA

Cenários:

- #1 – Atual (cor cinza)
- #6 – c/ Biodigestão (laranja)
- #7 – c/ Queima mássica (vermelho)
- #8 – Gestão integrada c/ DA e QM rejeito (verde)

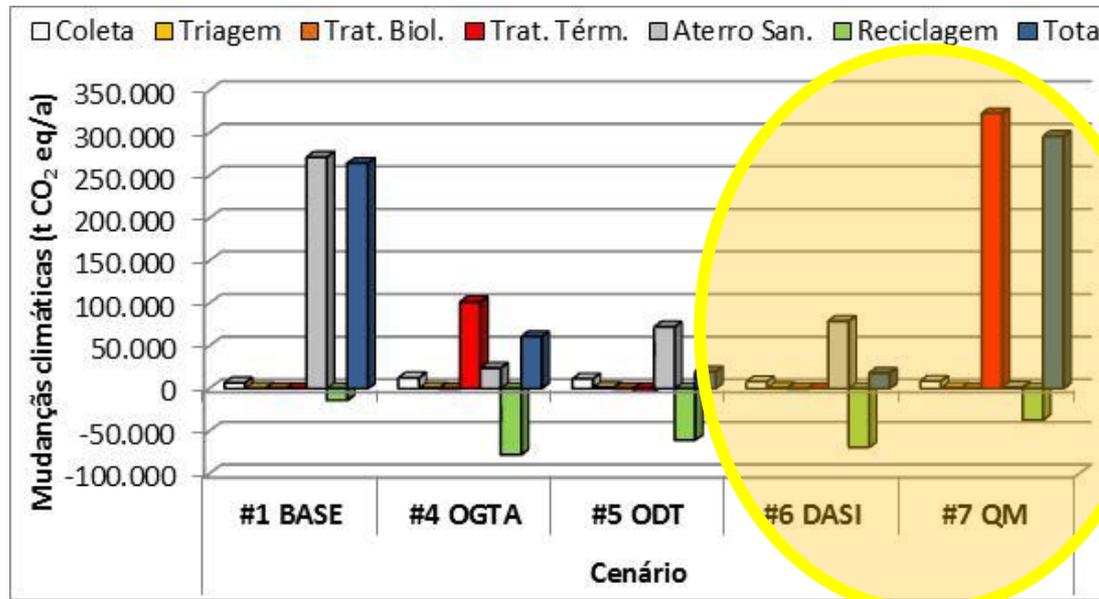
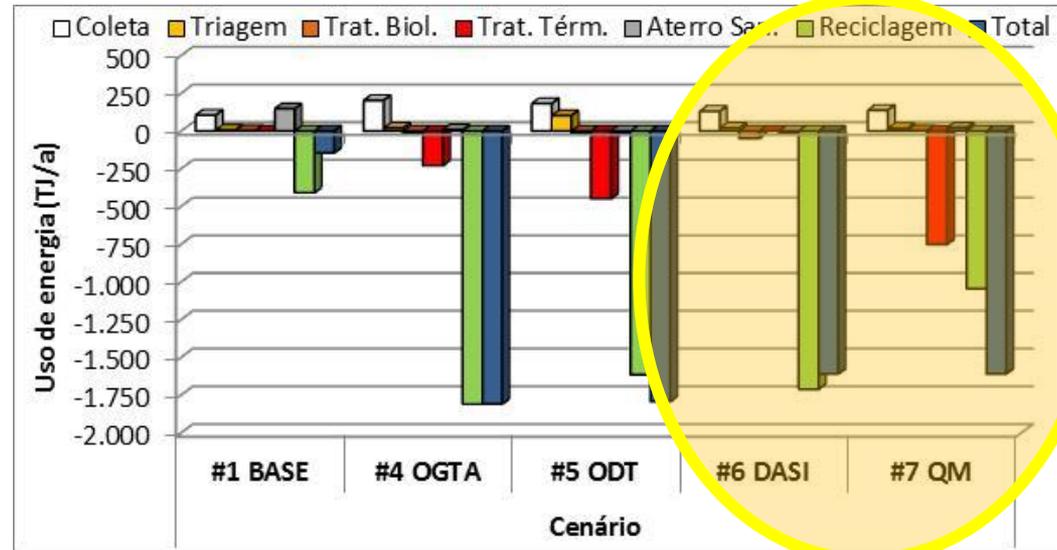


Resultado de ACV

POA – Por etapa do sistema

Cenários:

- #1 – Atual
- #6 – c/ Biodigestão
- #7 – c/ Queima mássica



Indicadores de sustentabilidade

Ambientais

- Mudanças climáticas
- Toxicidade humana
- Formação de foto-oxidantes
- Acidificação
- Eutrofização
- % disposição final recicláveis secos
- % disposição final recicláveis orgânicos

Sociais

- Odor
- Impacto visual
- Uso espaço urbano
- Uso espaço privado
- Complexidade
- Qualidade dos empregos gerados
- Quantidade de emprego
- Taxa de reciclagem

Econômicos

- Custo por tonelada, por domicílio e por pessoa
- Custo do SGMIRS como porcentagem do orçamento total do município
- Custo por pessoa como porcentagem do valor do salário mínimo
- Relação entre receitas e despesas do SGMIRS

Tomada de decisão

Sustentabilidade dos Cenários: com base em subíndices e índice geral

Indicadores foram normalizados entre 0 e 1

Subíndices

$$SI_{ambiental} = \sum_{i=1}^n Ind_{amb\ i} \times p_{amb\ i}$$

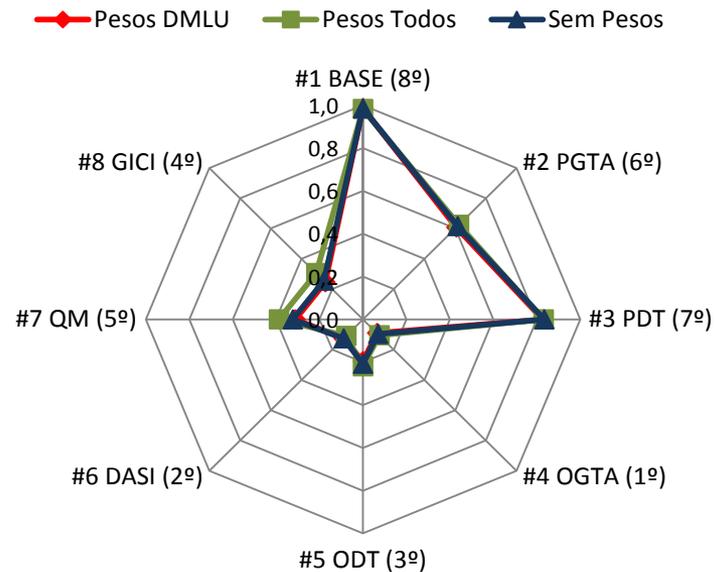
$$SI_{econômico} = \sum_{i=1}^n Ind_{econ\ i} \times p_{econ\ i}$$

$$SI_{social} = \sum_{i=1}^n Ind_{soc\ i} \times p_{soc\ i}$$

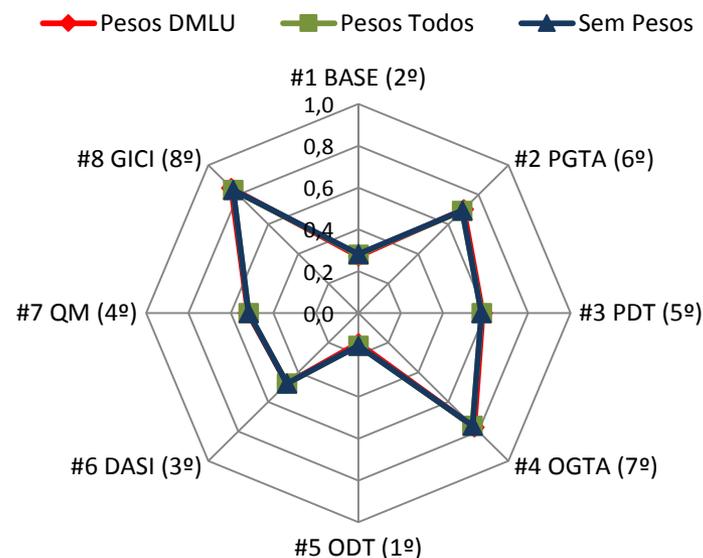
Índice geral

$$ISG = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 SI_j \times ps_j$$

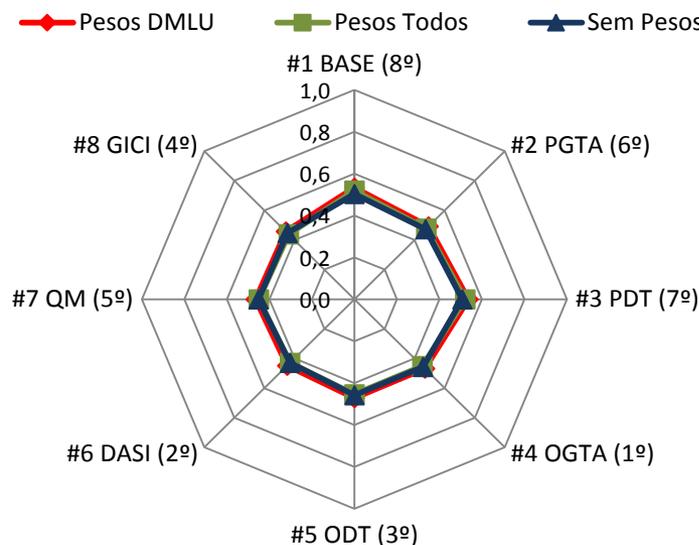
SI AMBIENTAL



SI ECONÔMICO



SI SOCIAL



Hierarquização dos Cenários - ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE GERAL



Considerações finais

- Gerenciamento de RSU é problema complexo, e como tal não tem solução simples nem solução única
- A sustentabilidade passa pela adoção de várias tecnologias encadeadas, baseada na segregação na origem e na(s) coleta(s) seletiva(s)
- As etapas de coleta e de triagem também geram impactos ambientais
- Incineração pode fazer parte da solução, somente para a fração “rejeitos” e em soluções conjuntas (necessidade de efeito escala)
- A ACV possibilita de fato avaliar o desempenho ambiental de diferentes cenários, servindo como apoio à tomada de decisão
- Estudo de ACV envolvem necessidade de levantamento de grande quantidade de dados e informações (isso por si só já se traduz em um ganho às gestões públicas)
- Soluções adequadas, com redução de envio para AS, implicam necessariamente em custos operacionais maiores (reforça necessidade de cobrança pelos serviços de manejo de RSU)
- A reciclagem é a etapa que implica, sempre, nos maiores ganhos ambientais (mas NÃO resolve sozinha o problema, aliás nenhuma tecnologia resolve, nem mais o aterro!)

**Muito obrigado
pela sua
atenção!**



"Eu entendo que a Terra pertence a uma vasta família da qual muitos membros estão mortos, alguns estão vivos, e um número infinito ainda não nasceu."

Autor desconhecido

Geraldo Antônio Reichert

Engenheiro Civil

Doutor em Saneamento Ambiental

gareichert@cpovo.net

(51) 3289.6885