



Desenvolvimento de modelos de previsão da geração de resíduos sólidos urbanos no Médio Vale do Itajaí

Jonathan Tenório de Lima ^{1*}, Jonas Formentin ²

¹Consultor, Engenheiro Ambiental e Sanitarista, Brasil. (*Autor correspondente: jonthantenorio88@gmail.com)

²Egresso do curso de graduação em Engenharia Sanitária, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 22/09/2020 – Revisado em: 06/11/2020 – Aceito em: 29/11/2020

RESUMO

O planejamento e a gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) são desafios diários para os técnicos e gestores da administração pública, o que é agravado pela ausência de ferramentas de previsão da geração de RSU. O presente trabalho teve por objetivo construir modelos matemáticos para a estimativa da geração de RSU em alguns municípios do Médio Vale do Itajaí, em Santa Catarina. Utilizou-se o método dos mínimos quadrados para desenvolver regressões lineares simples e múltiplas, numa tentativa de correlacionar os dados de geração de RSU ora com dados de população total (Pop) ora com dados de produto interno bruto (PIB) e, em seguida, com ambos, assumindo uma série histórica (2004-2017). As informações sobre geração de RSU foram obtidas junto ao Consórcio Intermunicipal do Médio Vale do Itajaí (CIMVI) enquanto os dados sobre a evolução da população total e do PIB dos municípios estudados foram coletados na página eletrônica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As regressões foram realizadas com o código livre BioEstat e calculou-se o teste estatístico dos valores P para uma significância de 5%. Os resultados revelaram-se majoritariamente positivos para a correlação entre as séries de dados, sendo a correlação entre RSU e PIB superior a RSU e Pop. Os coeficientes de determinação variaram desde 0,29 para Apiúna (RSU x Pop) até 0,9590 para Timbó (RSU x PIB). As regressões lineares múltiplas mostraram-se também favoráveis, sendo inclusive superiores em relação as regressões simples, em alguns casos. Os coeficientes de determinação para regressões múltiplas foram todos superiores a 0,59. Os testes estatísticos implicam que os modelos são representativos e corroboram a correlação entre as séries de dados. Apesar das limitações inerentes ao estudo, os resultados sugerem que os modelos podem ser utilizados para a previsão da geração de RSU com significância estatística e, portanto, subsidiar a tomada de decisões.

Palavras-Chaves: Geração de resíduos sólidos urbanos, Regressão linear, Planejamento em saneamento.

Forecasting municipal solid waste generation at medium valley of Itajaí River

ABSTRACT

Municipal solid waste (MSW) planning and management are great challenges for technicians and managers from the public administration which holds its responsibility in Brazil. Difficulties are just enhanced by the lack of tools to predict potential MSW generation within municipalities. The main objective of this work was to develop mathematical models to estimate MSW generation for selected municipalities located at medium valley of Itajaí River, Santa Catarina State. The minimum squares method was applied to attain simple linear regressions assuming correlation between MSW generation and total population, MSW and gross domestic product (GDP), and then a multiple linear regression for all data series. Data on MSW generation was acquired from Consórcio Intermunicipal do Médio Vale do Itajaí (CIMVI) by assuming MSW collected equals MSW generated. Data on total population and gross intern product was found at the webpage of Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). All data series ranged from 2004 to 2017. The regressions were carried out with free software BioEstat, allowing a significance equal to 5% and calculating the corresponding P-values. The results suggest reasonable agreement among data series, especially when MSW and GDP were analyzed together. The coefficients of determination varied from 0,29 for Apiúna (MSW x Pop) to 0,9590 for Timbó (MSW x GDP). The multiple linear regressions are aligned with the simple regressions and showed better fit in some cases. All determination coefficients for multiple linear regressions were higher than 0,59. Results are supported by the statistical tests which favor the use of the models. Despite limitations regressions might be used to forecast MSW generation with statistical significance and then assist decisions.

Keywords: Municipal solid waste generation, Linear regression, Sanitation systems planning.

Lima, J.T., Formentin, J. (2021). Desenvolvimento de modelos de previsão da geração de resíduos sólidos urbanos no Médio Vale do Itajaí. *Meio Ambiente (Brasil)*, v.3, n.1, p.64-79.



1. Introdução

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem atingido níveis crescentes nos últimos anos. Além da quantidade, a variedade de resíduos também se multiplicou. Esses fenômenos são percebidos em todo o mundo, inclusive no Brasil (Alfaia et al., 2017) e demandam novas estratégias de gestão e planejamento ambiental. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) instituída pela Lei Federal 12.305 de 2010 é referência atual em gestão de resíduos sólidos no Brasil, entretanto, seus objetivos foram apenas parcialmente atendidos. Ações voltadas a conscientização ambiental, logística reversa e reciclagem ainda são incipientes e a principal forma de destinação final dos resíduos sólidos ainda é a disposição em aterros sanitários e lixões.

O ciclo dos resíduos sólidos pode ser bastante complexo, porém, uma descrição simplificada inclui as etapas de geração, coleta, transporte, transbordo, reciclagem, tratamento e destinação final. Estas atividades invariavelmente requerem dados específicos como a caracterização e a capacidade de geração de RSU dentro do município. Quando ocorre alto teor de matéria orgânica os resíduos podem ser utilizados na produção de composto orgânico (CEMPRE, 2018), enquanto resíduos com maior conteúdo de produtos industrializados são gerados em regiões com elevado produto interno, necessitam de tratamento específico e, geralmente, mais dispendioso (Alfaia, Costa e Campos, 2017). A capacidade de geração de RSU é comumente estabelecida em termos de toneladas/ano ou através da taxa de geração per capita, usualmente representada na unidade de kg/habitante/dia.

Como é de se esperar as comunidades humanas passam por transformações, guiadas pelos interesses e pela capacidade financeira de seus membros. Logo, é esperado que os resíduos sofram mudanças em sua caracterização ao longo dos anos como mostra CEMPRE (2018, p.4). A renda facilita o aumento no padrão de consumo que por sua vez estimula a variedade dos resíduos gerados. Kawai e Tesaki (2016) fizeram um apanhado das taxas de geração de RSU em todo o mundo e analisaram a evolução dessas taxas em algumas localidades. Os autores verificaram que as taxas são crescentes e fortemente relacionadas com a economia local. Dias et al. (2012) desenvolveram um modelo matemático quadrático para explicar a evolução da geração per capita de RSU no município de Belo Horizonte e obtiveram um coeficiente de determinação igual a 0,8525. Os autores analisaram dados mensais de janeiro de 2006 a novembro de 2010 e nota-se que a geração per capita de RSU variou desde cerca de 0,40 kg/hab/dia até 1,30 kg/hab/dia conforme a renda per capita aumentou. Vieira e Matheus (2018) realizaram um estudo amplo sobre o impacto de variáveis socioeconômicas na geração de RSU para o município de São Paulo. Os autores identificaram a renda per capita e a desigualdade (medida pelo índice Gini) como os fatores com maior correlação com a geração de RSU.

Grandes centros urbanos como os citados acima tendem a apresentar maior variabilidade de seus indicadores sociais, econômicos e ambientais, sobretudo, devido a pluralidade da população. Em municípios menores é esperada maior homogeneidade de hábitos e padrões de comportamento. Entretanto, independentemente da localização será necessário desenvolver atividades de gerenciamento dos RSU. Em todos os casos os gestores públicos poderiam fazer uso de ferramentas para a estimativa da geração de RSU.

Diversos são os estudos que investigaram a aplicação de modelos matemáticos para a previsão da geração de resíduos sólidos. Segundo Chhay et al. (2018), as técnicas utilizadas podem ser divididas em cinco grupos principais: métodos da estatística descritiva, análise de regressão, método do fluxo de materiais, análise de séries temporais e inteligência artificial (IA). Kokelar et al. (2016) revisaram os métodos de previsão da geração de resíduos sólidos e verificaram que os principais modelos utilizados englobam a análise multivariada, lógica fuzzy, redes neurais artificiais e algoritmos genéticos, regressão linear simples e múltipla, transformação de ondulações (*wavelet transform*), sistema de informação geográfica, processo de hierarquia analítica, modelo cinza e análise de séries temporais. Os autores ainda destacam que a aplicação de métodos baseados na modelagem pode criar complicações devido às interações entre as variáveis utilizadas.

Os parâmetros estimadores empregados em estudos semelhantes são diversos e incluem, principalmente, a população total (habitantes), a população total urbana, a população com idade entre 15 e 59 anos, a

expectativa de vida na área urbana, a quantidade de resíduos sólidos gerados, fatores socioeconômicos como o produto interno bruto (PIB) e PIB per capita. Apesar disso, Pisani Júnior et al. (2018) utilizaram uma variável independente menos óbvia: o consumo de energia elétrica. Outras variáveis não mencionadas também podem estar relacionadas com a geração de resíduos sólido, os exemplos são: eventos festivos, densidade demográfica, nível de educação da população, grau de industrialização local, programas e políticas públicas para a gestão sustentável dos resíduos etc.

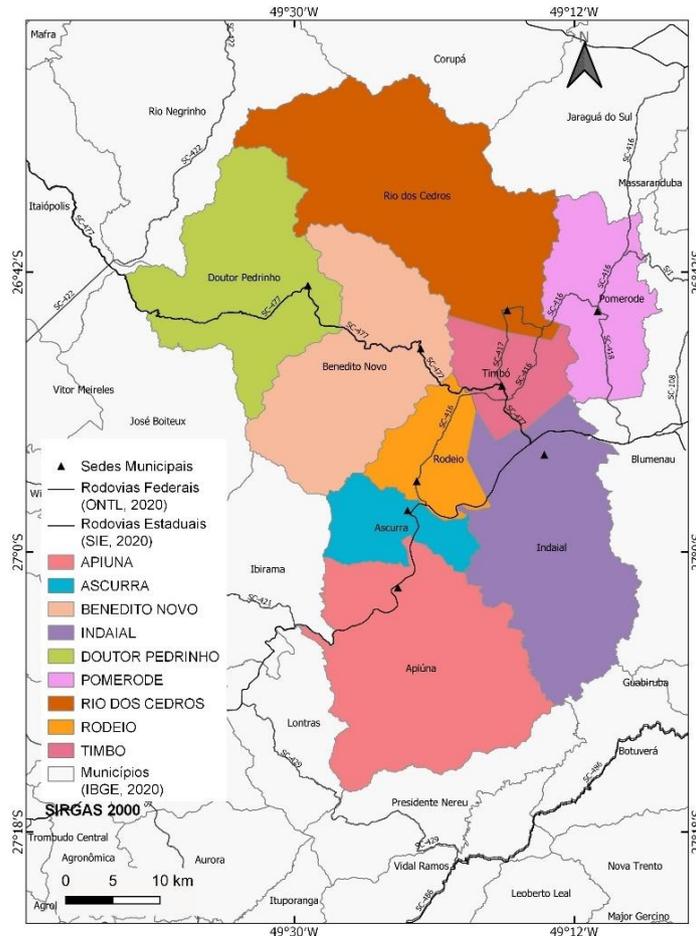
O objetivo deste trabalho foi desenvolver modelos matemáticos de previsão da geração de RSU para municípios do Médio Vale do Itajaí.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo e coleta de dados

A presente pesquisa foi realizada na região do Médio Vale do Itajaí, localizada no Estado de Santa Catarina. Os municípios estudados compõem o Consórcio Intermunicipal do Médio Vale do Itajaí (CIMVI), a saber: Apiúna, Ascurra, Benedito Novo, Botuverá, Gaspar, Doutor Pedrinho, Guabiruba, Ilhota, Indaial, Luiz Alves, Massaranduba, Pomerode Rio dos Cedros, Rodeio e Timbó (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: os autores

A região do Vale do Itajaí é reconhecida nacionalmente pela quantidade e variedade de indústrias instaladas, com particular destaque da indústria têxtil. Nos últimos anos, todos os municípios da região perceberam um aumento em suas atividades e, como consequência, ocorreu um crescimento nas receitas locais e das populações, inclusive com a chegada de mão-de-obra oriunda de outros estados. Segundo Goulart Junior (2017) os índices socioeconômicos do Médio Vale do Itajaí são intermediários entre o Baixo Vale do Itajaí e o Alto Vale do Itajaí, em concordância com a tendência de escoamento dos bens e produtos na região.

Após consulta, os autores decidiram avançar com a investigação apenas nos municípios com disponibilidade de dados. Foram selecionados nove municípios: Apiúna, Ascurra, Benedito Novo, Doutor Pedrinho, Indaial, Pomerode, Rio dos Cedros, Rodeio e Timbó. Os municípios selecionados contribuem com os resíduos sólidos urbanos enviados para o aterro sanitário de Timbó, administrado pelo CIMVI.

Para realizar as regressões lineares foram selecionados três dados distintos, sendo os mesmos o Produto Interno Bruto (PIB), a população total (Pop, em número de habitantes) e a taxa de geração de resíduos sólidos urbanos anual (ton/ano), de cada município estudado. Os dados de PIB e população foram coletados e estimados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019b,c) e obtidos a partir do portal IBGE cidades.

O censo demográfico brasileiro é realizado a cada dez anos, entretanto, o IBGE realizou uma estimativa populacional para os anos intermediários. Apesar desses dados não representarem a contagem real, a metodologia aplicada pelo IBGE é reconhecida e validada pela qualidade dos resultados. O PIB ajustado costuma ser divulgado no portal do IBGE com um atraso de dois anos e, por isso, o último dado disponível é referente ao ano de 2017. Os dados sobre a taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) foram disponibilizados pelo CIMVI, em escala temporal mensal e, em seguida, convertidos para base anual. Os dados de geração de RSU são na verdade dados de coleta de RSU e, por isso, a taxa de geração pode ser superior. O início do registro sobre a coleta de RSU data de 2003, contudo, apenas a partir da segunda metade deste ano e, portanto, o início da série histórica foi determinado como o ano de 2004. Em decorrência deste fato e da limitação imposta pelo ajuste do PIB, a série histórica utilizada contém dados das três variáveis para o período de 2004 a 2017.

2.1 Regressão linear

Engenheiros e cientistas fazem uso de diversos modelos matemáticos mecanicistas (ou deterministas) para estudar e interpretar os fenômenos físicos e químicos. Grande parte desses fenômenos são baseados em leis e corolários que podem ser deduzidos. Do contrário, busca-se suporte na experiência prática dos observadores. Entretanto, basear-se apenas na intuição pode conduzir a erros de interpretação ou mesmo do projeto final.

De forma a contornar essas dificuldades costuma-se empregar modelos empíricos. Nestes modelos, uma dispersão de dados é ajustada a um modelo matemático que representa a função distribuição de probabilidades para os eventos x_i . Não existem modelos determinísticos que representem a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Não obstante, a estimativa dessa taxa é uma poderosa ferramenta de gestão para o saneamento e, assim, muitos pesquisadores utilizaram modelos empíricos para a sua previsão (Azadi e Karimi-Jashni, 2016; Ghinea et al., 2016; Al-Salem, Al-Nasser, Al-Dhafeeri 2018; Araiza-Aguilar, Rojas-Valencia, Aguilar-Vera, 2020). No presente trabalho foram utilizados dois modelos empíricos para a previsão da geração de RSU: a regressão linear simples e a regressão linear múltipla.

Na regressão linear simples um conjunto de pares ordenados (x_i, y_i) são ajustados por uma reta em que existe apenas uma única variável independente (x_i). O ajuste é determinado pelo método dos mínimos quadrados, que assume existir o mínimo erro residual entre os dados reais e os dados ajustados para a variável dependente e toma a forma de uma distribuição como representado simplifadamente na equação 1.

$$y = \alpha + \beta x \quad (1)$$

Onde: y é na verdade $E(Y/x)$, isto é, a esperança matemática de que dada a variável independente x , o valor Y (aqui representado por y) seja a variável dependente correspondente, α e β são os coeficientes de regressão, dados, respectivamente, pelas equações 2 e 3.

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{\beta}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}} \quad (3)$$

Onde: n é o número de observações ou pares ordenados utilizados na operação de regressão linear.

Foi executada uma regressão linear para os conjuntos de dados (GRSU, pop) e (GRSU, PIB) para cada município do médio vale do Itajaí e, em seguida, os ajustes foram avaliados a partir do coeficiente de determinação correspondente, r^2 . Esse coeficiente dá uma medida do quão próximo de uma reta está a dispersão do conjunto de dados e pode ser calculado a partir do coeficiente de correlação, como dado na Equação 4.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}} \quad (4)$$

O coeficiente de determinação é utilizado no seguinte sentido, quando R^2 é igual a 1,0 então, os dados ajustam-se perfeitamente a uma reta e, portanto, linearmente correlacionados. À medida que o valor de R^2 diminui da unidade, o ajuste torna-se menos representativo de uma relação linear. O coeficiente de correlação é matematicamente semelhante, entretanto, varia entre -1,0, quando os dados se ajustam em tendência linear decrescente perfeita e +1,0, quando o ajuste é perfeitamente linear e crescente. O valor zero corresponde a completa ausência de correlação.

A regressão linear múltipla é utilizada quando a variável dependente está relacionada com duas ou mais variáveis independentes. O ajuste toma a forma de uma equação semelhante a 5.

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (5)$$

Onde: α e β_j ($j = 1, 2, 3, \dots, k$) são os coeficientes de regressão. Este modelo descreve um hiperplano no espaço dimensional $k+1$ de y e das variáveis de regressão x_j e cujos coeficientes de regressão podem ser determinados a partir da solução do sistema dado na equação 6 (Montgomery e Runger, 2018).

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

O coeficiente de determinação da regressão linear múltipla pode ser calculado com a equação 7, entretanto, o coeficiente de determinação ajustado (equação 8) costuma ser mais utilizado. De acordo com Montgomery e Runger (2018), acrescentar uma série de dados relativa a uma nova variável independente não costuma ter efeito redutor sobre o valor do coeficiente de determinação, entretanto, no caso do coeficiente de determinação ajustado, uma nova variável só elevará o valor do coeficiente caso também reduza o erro calculado pelo método dos mínimos quadrados.

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (7)$$

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{(n-1)}{[n-(k+1)]} (1 - R^2) \quad (8)$$

Onde: SS_R é a soma dos quadrados, SS_T é a soma total dos quadrados, SS_E é a soma residual dos quadrados, R_{aj}^2 é o coeficiente de determinação ajustado, R^2 é o coeficiente de determinação, n é o tamanho da amostra e k é o número de variáveis independentes. Mais detalhes podem ser obtidos em Montgomery e Runger (2018) e Triola (2014).

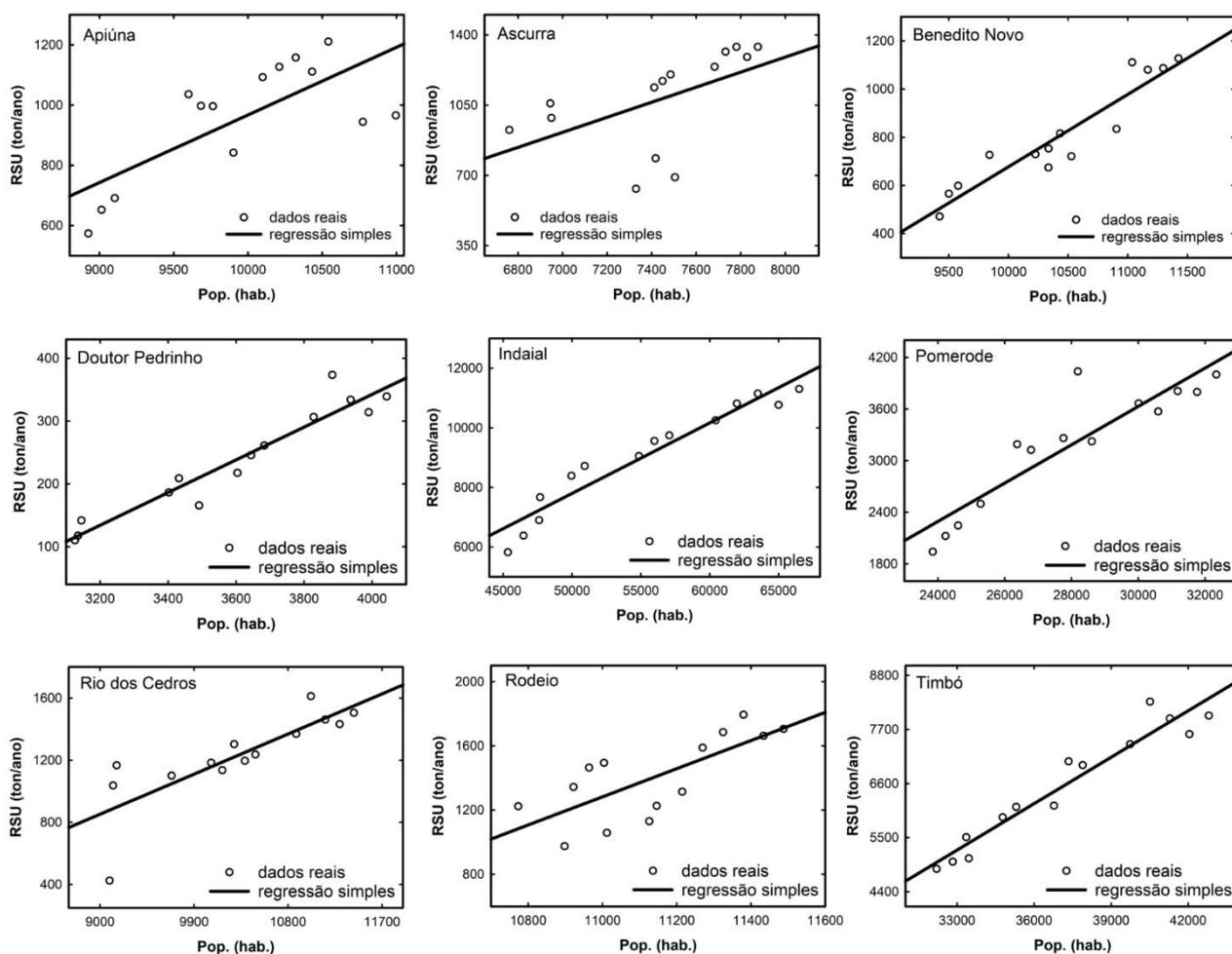
Para este trabalho foi realizada a regressão linear múltipla considerando apenas duas variáveis independentes, associando os conjuntos de dados trabalhados anteriormente (RSU, Pop, PIB). Existem atualmente diversas ferramentas numéricas que permitem calcular as regressões lineares simples e múltiplas. Os dados obtidos neste trabalho foram calculados com o software BioEstat (Ayres et al., 2007).

O coeficiente de determinação é um bom indicador da qualidade do ajuste numérico, contudo, uma análise mais cuidadosa requer a realização de um teste de hipóteses. A hipótese nula (H_0) assume que os coeficientes determinados são nulos, enquanto a hipótese alternativa (H_1) implica em que os coeficientes são diferentes de zero. Assumindo uma significação menor do que 5% (0,05) ou um intervalo de confiança de 95%, pode-se calcular o valor P, isto é, a probabilidade de que os valores de coeficientes determinados não tenham sido calculados ao acaso. Segundo Triola (2014), se não existe uma correlação linear entre duas variáveis o valor P é a probabilidade de obter-se, por acaso, uma amostra com coeficiente de correlação r que seja ao menos tão extremo quanto aquele obtido para a amostra analisada. Logo, apenas um pequeno valor P, menor ou igual ao nível de significância adotado (0,05 ou 5%) sugere que de fato existe uma correlação linear entre os dados. O método é válido também para a regressão linear múltipla, em que um baixo valor P exclui a hipótese nula e, portanto, pelo menos uma das variáveis independentes é capaz de explicar as variações na variável independente.

3. Resultados e Discussão

No presente trabalho foi utilizada uma série histórica (2004-2017) contendo dados de população total (Pop), Produto Interno Bruto (PIB) e taxa de geração de resíduos sólidos urbanos anual (RSU), dos municípios que compõem o Médio Vale do Itajaí (selecionados), para regredir os dados e desenvolver modelos de previsão da geração de RSU. Foram realizadas regressões simples, relacionando às variáveis RSU e Pop e, em seguida, RSU e PIB e, por fim, foram desenvolvidas regressões lineares múltiplas para cada município com os dados de RSU, Pop e PIB. O resultado do primeiro conjunto de regressões simples pode ser conferido na Figura 2.

Figura 2 – Representação das regressões lineares simples. Foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados os pares ordenados formados por dados de geração de resíduos sólidos urbanos (GRSU) e População (Pop) de cada município analisado para a série histórica (2004-2017).



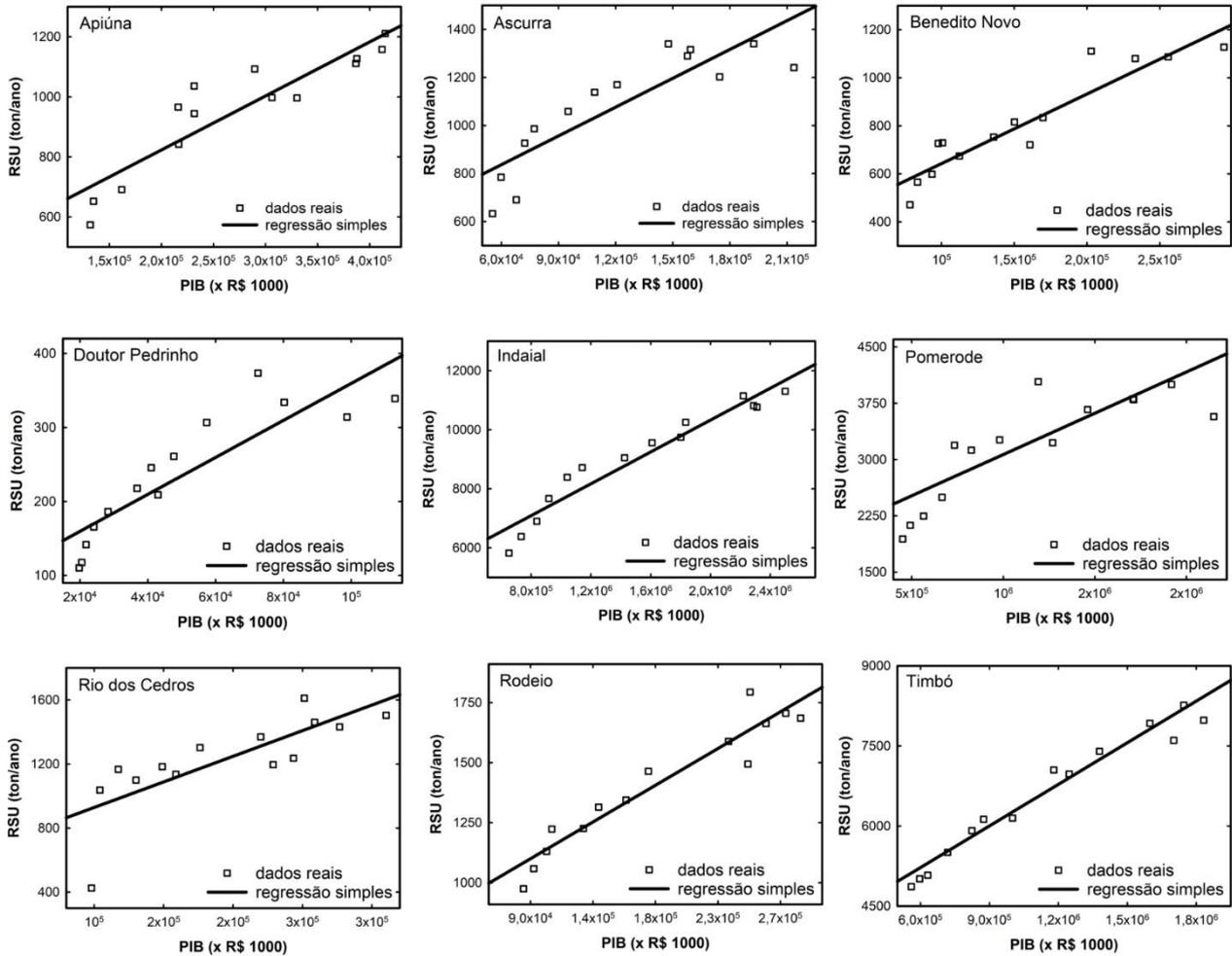
Fonte: os autores

Como pode ser visto na Figura 2, as regressões lineares simples expõem uma tendência crescente quando comparados os dados de população total (Pop) e taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Como esperado, a população total impacta no montante de RSU produzido. Nos gráficos é possível perceber que a

relação entre as duas variáveis não é perfeitamente linear e, por vezes, os dados reais (°) estão distantes da reta, ajustada pelo método dos mínimos quadrados, como fica destacado para o município de Ascurra. Entretanto, para os municípios de Doutor Pedrinho, Indaial e Timbó, o ajuste parece promissor.

A Figura 3 contém os resultados dos ajustes lineares desenvolvidos ao associar as variáveis de PIB e RSU. Semelhante aos dados da Figura 2, os resultados apontam para uma tendência crescente positiva e, portanto, o aumento do PIB tende a contribuir com a geração de RSU nos municípios estudados.

Figura 3 – Representação das regressões lineares simples. Foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados os pares ordenados formados por dados de geração de resíduos sólidos urbanos (GRSU) e o Produto Interno Bruto (PIB) de cada município analisado para a série histórica (2004-2017).



Fonte: os autores

Os coeficientes obtidos a partir das regressões lineares simples para ambos os casos apresentados podem ser verificados nas Tabelas 1 e 2. Como apresentado anteriormente, α corresponde ao intercepto da reta, β é o coeficiente angular e R^2 é o coeficiente de determinação.

Tabela 1 – Resultado das regressões lineares simples para os pares ordenados (Pop, RSU).

Município	α	β	R^2	R^2_{aj}	Valor P
Apiúna	-1279,56	0,22468	0,5406	0,5023	0,0030
Ascurra	-1707,55	0,37465	0,29	0,2308	0,0449
Benedito Novo	-2328,48	0,30059	0,8826	0,8728	< 0,0001
Doutor Pedrinho	-699,50	0,2605	0,9189	0,9122	< 0,0001
Indaial	-4036,79	0,2367	0,9289	0,9230	< 0,0001
Pomerode	-3059,71	0,2230	0,8219	0,8071	< 0,0001
Rio dos Cedros	-1728,9	0,2868	0,6606	0,6323	0,0006
Rodeio	-8364,38	0,877	0,5436	0,5055	0,0029
Timbó	-5152,43	0,3151	0,9286	0,9227	< 0,0001

Fonte: os autores

Tabela 2 – Resultado das regressões lineares simples para os pares ordenados (PIB, RSU).

Município	α	β	R^2	R^2_{aj}	Valor P
Apiúna	462,997	0,0018	0,8312	0,8172	< 0,0001
Ascurra	596,54	0,00397	0,7502	0,7294	0,0002
Benedito Novo	352,47	0,00293	0,8737	0,8632	< 0,0001
Doutor Pedrinho	109,54	0,00254	0,7750	0,7563	0,0001
Indaial	4927,87	0,0027	0,9329	0,9273	< 0,0001
Pomerode	1966,43	0,00105	0,6957	0,6703	0,0004
Rio dos Cedros	608,40	0,00317	0,6001	0,5668	0,0014
Rodeio	793,923	0,00338	0,9134	0,9062	< 0,0001
Timbó	3660,64	0,00256	0,9590	0,9557	< 0,0001

Fonte: os autores

Os resultados para os pares (Pop, RSU) são encorajadores e, em geral, apresentam correlações que variam de boa a forte, com exceção do município de Ascurra. Os municípios de Indaial e Timbó apresentaram os melhores resultados.

O coeficiente de determinação pode ser interpretado, do ponto de vista da estatística, como o percentual que uma variável independente é capaz de representar a variação da variável dependente e, assim, pode-se dizer que a população total (Pop) é capaz de representar 92,89% da variação na taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) para o município de Indaial, mas apenas 29% para o município de Ascurra.

Em todas as regressões simples o valor P calculado estava abaixo da significância imposta no teste estatístico e, portanto, pode-se afirmar que os ajustes encontrados são representativos e as duas variáveis estão de fato correlacionadas.

As regressões simples para os pares (PIB, RSU) apresentam médio a alto grau de correlação quando analisados os coeficientes de determinação, sendo o menor valor de R^2 verificado para o município de Rio dos Cedros e o maior para Timbó. Neste caso, o PIB é capaz de representar 60,01% das variações do RSU para Rio dos Cedros e 95,91% para Timbó.

A média dos coeficientes de determinação para os pares (PIB, RSU) é igual a 0,8082 enquanto para os pares (Pop, RSU) é 0,7240, o que sugere que a variável PIB está melhor correlacionada com a geração de resíduos sólidos urbanos nos municípios estudados ou ainda o PIB apresenta uma maior influência sobre a capacidade de geração de RSU. Esta é apenas uma tendência média e, portanto, relevante para a escala regional. Não obstante, vale destacar que para os municípios de Doutor Pedrinho e Pomerode ocorre efeito contrário. Este fato pode estar relacionado a diversos fatores como o grau de conscientização ambiental, menor consumo de produtos industrializados e hábitos locais. O coeficiente de Gini, referente ao ano de 2010 (IBGE, 2013) é

igual a 0,345 para Doutor Pedrinho. Este é o menor valor para os municípios estudados. Possivelmente, uma menor desigualdade entre os habitantes influencia na taxa de média de geração de RSU e, assim, o aumento da geração de RSU poderia ser prioritariamente explicado pelo aumento da população.

Kumar e Sammader (2017) aplicaram a regressão linear simples para prever a geração de RSU em Dhanbad, Índia e obtiveram coeficientes de determinação de 0,782 e 0,676 para os resíduos biodegradáveis e não-biodegradáveis, respectivamente. Estes valores concordam com os resultados obtidos para Ascurra, Doutor Pedrinho, Pomerode e Rio dos Cedros, embora, nenhuma distinção tenha sido feita quanto a biodegradabilidade dos RSU no presente estudo. Ghinea et al. (2016) realizaram a regressão linear, porém, obtiveram resultados com melhor ajuste utilizando outros métodos como a regressão log-linear e a análise de séries em curva-S, entretanto, o estudo foi conduzido na cidade de Iazi, uma das mais populosas da Romênia, de modo que, aparentemente, a regressão linear apresenta piora de ajuste conforme aumenta a população, uma vez que aumenta também a heterogeneidade da população.

Chhay et al. (2018) empregaram os métodos de regressão linear simples, modelo GM(1,1) e redes neurais artificiais (RNA) para prever a geração de RSU na China. Os autores verificaram que ambos os métodos apresentaram resultados razoáveis, entretanto, a RNA apresentou os melhores ajustes, com coeficiente de determinação superior a 0,99. Ainda segundo os autores, as projeções baseadas em regressões lineares simples foram sobrestimadas, porém, na mesma ordem de grandeza dos outros métodos.

Assim como para qualquer modelo matemático utilizado para representar fenômenos reais, é necessário bom senso e atenção ao utilizar os modelos anteriores. Todos os coeficientes lineares (interceptos) para os ajustes com dados de população apresentaram valores negativos. Considerando apenas a matemática, este fato define que para população total nula a produção de RSU seria negativa. Contudo, na prática, esta situação hipotética é impossível. Quando avaliadas as expressões obtidas para os pares (PIB, RSU) nota-se que os interceptos são todos positivos e, assim, para população total nula, haveria geração de resíduos sólidos urbanos e esta situação também é impossível. Os valores P encontrados corroboram com os resultados.

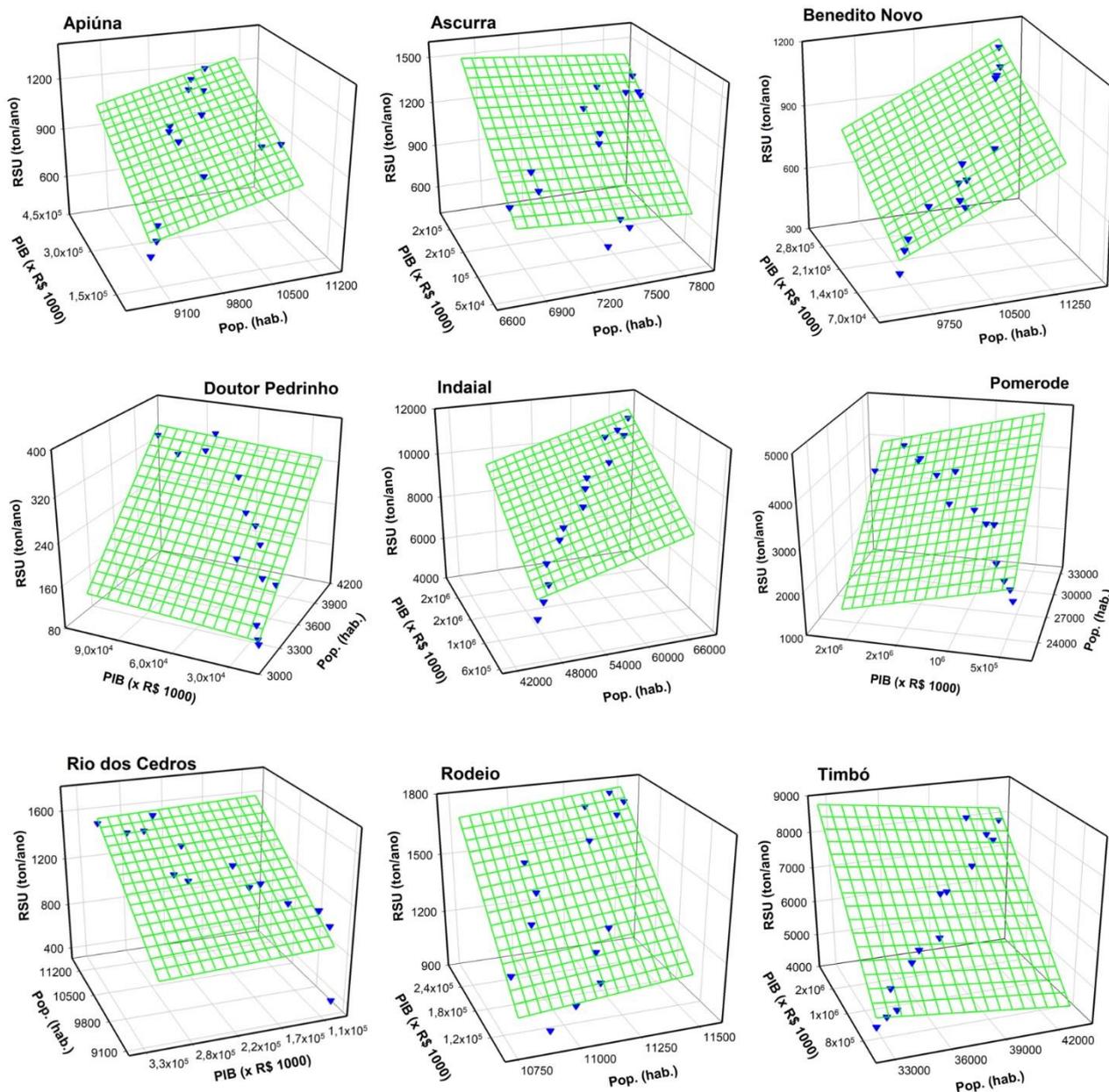
Os modelos de regressão permitem uma previsão dos eventos futuros, isto é, uma extrapolação dos resultados, entretanto, existem limitações para a sua aplicação, impostas, sobretudo, pela quantidade de dados utilizados na construção do modelo.

Os dados de PIB consistido, como mencionado anteriormente, são liberados com dois anos de atraso e, por isso, uma medida desta variável para os anos que sucedem 2017 depende de estimativas, entretanto, os dados sobre população para os anos de 2018 e 2019 estão disponíveis no portal do IBGE. No ano de 2018 a população total estimada de Indaial era de 67.923 habitantes e taxa de geração de RSU atingiu 11.928,64 ton/ano enquanto uma simulação apresentou valor de 12.040,57 ton/ano. No ano seguinte, a população era igual a 69.425 e a geração de RSU medida alcançou 12.158,52 ton/ano e a simulação resultou em 12.391,1 ton/ano, com erros, respectivamente de -0,94% -1,95%.

Após as regressões lineares simples os autores realizaram ainda algumas regressões lineares múltiplas relacionando as ternas (Pop, PIB, RSU) conforme representado na Figura 4, onde é possível ver a distribuição dos pontos em relação aos planos obtidos a partir das regressões. Nota-se a partir dos gráficos que os planos gerados podem estar voltados preferencialmente para uma das variáveis independentes. Na maioria dos casos, os planos estão voltados para a direção do PIB, entretanto, os planos gerados para os municípios de Doutor Pedrinho e Pomerode apresentam tendência contrária e estão principalmente voltados a variável população total (Pop). Este resultado corrobora com aquele apresentado nas regressões lineares simples, onde os coeficientes de determinação (R^2) calculados para esses municípios apresentou maiores valores para a variável Pop quando comparados com a variável PIB. A Tabela 3 contém as expressões matemáticas desenvolvidas para cada plano a partir das regressões lineares múltiplas. Chhay et al. (2018) identificaram que o fator socioeconômico preponderante na geração de RSU na China é o crescimento populacional e que a influência do PIB não é direta. Apesar disso, Oliveira e Athayde Júnior (2017) observaram impactos variáveis do PIB e da população total sobre a geração de RSU nos municípios brasileiros, o que concorda com o presente estudo.

Esse contraste de resultados pode estar associado às características intrínsecas das duas regiões. Não obstante, ambos estudos demonstraram que a população e o PIB são fatores essenciais na estimativa da geração de RSU, contudo outros fatores podem também ser relevantes.

Figura 4 – Representação das regressões lineares múltiplas. Os triângulos em azul correspondem aos dados reais e a grade em verde é a representação do plano derivado da regressão.



Fonte: os autores

Tabela 3 – Modelos matemáticos de previsão da geração de (RSU) obtidos a partir das regressões lineares múltiplas.

Apiúna	$GRSU (Pop, PIB) = 0,093854Pop + 0,001442PIB - 373,9688$	(9)
Ascurra	$GRSU (Pop, PIB) = -0,075429 \times Pop + 0,004315 \times PIB + 1116,1237$	(10)
Benedito Novo	$GRSU (Pop, PIB) = 0,167405 \times Pop + 0,001387 \times PIB - 1154,12$	(11)
Doutor Pedrinho	$GRSU (Pop, PIB) = 0,244117 \times Pop + 0,000192 \times PIB - 650,243$	(12)
Indaial	$GRSU (Pop, PIB) = 0,084565 \times Pop + 0,001744 \times PIB + 1711,101$	(13)
Pomerode	$GRSU (Pop, PIB) = 0,322298 \times Pop - 0,000537 \times PIB - 5225,3$	(14)
Rio dos Cedros	$GRSU (Pop, PIB) = 0,307725 \times Pop - 0,00025 \times PIB - 1895,19$	(15)
Rodeio	$GRSU (Pop, PIB) = 0,101228 \times Pop + 0,00316 \times PIB - 294,037$	(16)
Timbó	$GRSU (Pop, PIB) = -0,0563 \times Pop + 0,0030 \times PIB + 5250,644$	(17)

Fonte: os autores

Os coeficientes lineares (interceptos) calculados para os municípios de Ascurra, Indaial e Timbó são positivos, em contrapartida, os demais interceptos são negativos. É válida a mesma interpretação dada aos resultados das regressões lineares simples.

Deve-se tomar atenção também aos coeficientes angulares, pois alguns deles são negativos como é o caso para o município de Rio dos Cedros. Neste caso, se tomado um valor nulo de população total, a taxa de geração de RSU calculada será negativa e, logo irreal.

Para além disso, o coeficiente angular para o PIB é em geral pelo menos uma ordem de grandeza menor do que o coeficiente angular para a variável população total (Pop) e isto deve-se à magnitude dos dados utilizados, em que o PIB é representado com valores que superam em ao menos uma ordem de grandeza os valores para a variável Pop.

Na tabela 4 estão contidos os coeficientes calculados junto com as regressões lineares múltiplas e utilizados para a avaliar o modelo. O menor coeficiente de determinação foi calculado para o município de Rio dos Cedros e o maior valor ocorreu para Timbó. Os coeficientes de determinação ajustados são, em geral, ligeiramente menores do que os coeficientes de determinação ajustados calculados nas regressões lineares simples. As exceções ficam por conta dos municípios Apiúna e Benedito Novo, em que os coeficientes calculados indicam uma melhor relação da variação da taxa de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) quando aplicada a regressão linear múltipla.

Tabela 4 – Avaliação dos resultados das regressões lineares múltiplas.

Município	r	R ²	R ² _{aj}	Valor P
Apiúna	0,9551	0,8933	0,8739	< 0,0001
Ascurra	0,8697	0,7564	0,7122	0,0007
Benedito Novo	0,9511	0,9046	0,8873	< 0,0001
Doutor Pedrinho	0,9590	0,9197	0,9051	< 0,0001
Indaial	0,9668	0,9346	0,9227	< 0,0001
Pomerode	0,9146	0,8365	0,8068	0,0001
Rio dos Cedros	0,8129	0,6609	0,5992	0,0029
Rodeio	0,9575	0,9168	0,9017	< 0,0001
Timbó	0,9797	0,9598	0,9525	< 0,0001

Fonte: os autores

Os valores P foram todos menores do que a significância de 5% e, assim, corroboram com a qualidade dos ajustes numéricos. Esses resultados permitem afirmar, com elevada precisão, que os coeficientes angulares e lineares estimados a partir das regressões lineares múltiplas não foram obtidos ao acaso e, logo, as expressões ajustadas são representativas da taxa de geração de resíduos sólidos urbanos para os municípios estudados.

Azadi e Karimi-Jashni (2016) aplicaram o método da regressão linear múltipla e redes neurais artificiais para estudar a geração de RSU na província de Fars, Irã, utilizando como variáveis independentes a população, a frequência de coleta de RSU, a temperatura máxima e a altitude. Os pesquisadores afirmaram que o primeiro método não é razoável devido à baixa correlação entre os valores previstos e aqueles medidos ($r = 0,70$), entretanto, não são investigadas as razões da falha do método. Contudo, esta pode ser devida à ausência de uma variável independente representativa da situação econômica e a escolha da escala espacial do estudo que abarca uma área maior que 120 mil km² e contendo uma população total superior 4,58 milhões de habitantes.

Oliveira e Athayde Júnior (2017) desenvolveram uma série de regressões lineares múltiplas para a previsão da geração de RSU nos municípios do Brasil. Os autores verificaram que os modelos criados atendiam a maioria dos municípios, entretanto, dois grupos de municípios ficaram fora do alcance dos modelos, os municípios com população total inferior a 30.000 habitantes; e os municípios com população total entre 30.000 e 100.000 habitantes e PIB *per capita* inferior a R\$ 29.000,00. Para o início do horizonte estudado (2004) todos os municípios investigados no presente estudo se encaixariam em uma destas opções, sobretudo, devido ao baixo PIB *per capita*. Alguns municípios superaram o critério do PIB a partir do ano 2011 como Apiúna, Pomerode e Timbó, entretanto, o critério de população total permaneceu para a maioria dos municípios, inclusive Apiúna. Não obstante, os modelos ajustados para cada município neste trabalho mostraram-se confiáveis, indicando que uma avaliação casuística dos dados é preferível em comparação a um modelo regional ou global.

Conforme discutido, os modelos matemáticos de previsão podem subsidiar a tomada de decisão dos planejadores e técnicos responsáveis pela gestão de RSU. Um exemplo prático é o dimensionamento de uma célula de aterro sanitário. Supondo que um técnico em 2007 tenha calculado a taxa de geração de RSU per capita na região teria encontrado um valor médio aproximado de 110,57 kg/hab.ano. Admitindo-se constante a taxa calculada e uma massa específica para os resíduos compactos igual a 0,7 ton/m³ e que a célula fosse projetada para um horizonte de 10 anos então em 2019 (fim do horizontado projetado) a massa total de RSU esperada seria de 200.161,33 toneladas e o volume igual a 140,11 dam³. O valor da projeção em 2007 seria um pouco diferente pois um censo foi realizado em 2010 e alterou as projeções de população. Os dados reais correspondem a 269.976,73 toneladas e 188,98 dam³. Os dados estimados com os modelos da Tabela 3 seriam 265.596,28 toneladas e 185,92 dam³. O erro da projeção com taxa constante é igual a 25,86% enquanto o erro calculado com os modelos desenvolvidos neste estudo corresponde a apenas 1,62%.

Os modelos não são infalíveis, não atendem a todas as demandas e solicitações dos gestores e ainda possuem limitações, sobretudo, em relação a projeções que superem o número de anos utilizados para a construção deles, entretanto, funcionam como uma alternativa para previsões e apoiam a tomada de decisões. Os modelos gerados neste trabalho podem ser aplicados aos municípios estudados, entretanto, devem ser continuamente atualizados e revisados à medida que novos dados estiverem disponíveis.

4. Conclusão

A partir de técnicas de regressão linear simples e múltipla foram desenvolvidos modelos matemáticos de previsão da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) para municípios selecionados, localizados no Médio Vale do Itajaí, admitindo-se como variáveis independentes a população total de cada município e/ou o produto interno bruto (PIB).

As regressões lineares simples resultaram em modelos que demonstram correlações entre os dados

variando entre média a elevada, sendo que o menor coeficiente de determinação (0,29) foi verificado para o município de Ascurra ao relacionar RSU x Pop e o maior ocorreu para Timbó quando analisada a relação da taxa de geração de RSU em comparação ao PIB. Os resultados indicam que, em média, as regressões lineares simples que utilizaram a série de dados de PIB apresentaram melhores resultados.

As regressões lineares múltiplas revelaram que a geração de RSU possui elevada correlação quando se utiliza a população total e o PIB municipal como variáveis independentes, com coeficientes de determinação que variaram desde 0,5992 (Rio dos Cedros) até 0,9598 (Timbó). Os municípios de Apiúna e Benedito Novo apresentaram os melhores resultados para os modelos de regressão linear múltipla quando comparados com a regressão simples. Não obstante, os resultados das regressões múltiplas são próximos daqueles encontrados para as regressões simples, sendo a escolha do modelo casuística.

Os testes estatísticos resultaram em valores P menores do que a significância máxima imposta (5%) e, em diversos casos, os valores foram menores do que 0,0001, o que corrobora com os resultados de correlação entre os dados e sugere que os coeficientes angulares e lineares não foram calculados pelo acaso.

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados por parte terceira o que representa por si uma importante limitação do estudo e que pode ter afetado alguns resultados, contudo, os resultados mostraram-se estatisticamente satisfatórios e representativos e, portanto, os modelos construídos podem servir como ferramentas para prever e subsidiar o planejamento e a gestão dos resíduos sólidos urbanos nos municípios estudados.

5. Agradecimentos

Os autores manifestam seus agradecimentos à equipe do Consórcio Intermunicipal do Médio Vale do Itajaí (CIMVI) por terem cedido a série histórica de dados sobre geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) nos municípios da região.

6. Referências

Alfaia, R. G. S. M., Costa, A. M., Campos, J. C. (2017). Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management and Research**, 35(12), 1195-1209.

Al-Salem, S. M., Al-Nasser, A., Al-Dhafeeri, A. T. (2018) Multi-Variable Regression Analysis for the Solid Waste Generation in The State of Kuwait. **Process Safety and Environmental Protection**, 119, 172-180.

Araiza-Aguilar, J. A., Rojas-Valencia, M. N., Aguilar-Vera, R. A. (2020). Forecast generation model of municipal solid waste using multiple linear regression. **Global Journal of Environmental Science and Management**, 6(1), 1-14.

Ayres, M. et al. (2007). **BioEstat 5.0 - Aplicações Estatísticas nas Áreas das Ciências Biológicas e Médicas: Sociedade Civil Mamirauá**, Belém. Brasília: CNPq.

Azadi, S., Karimi-Jashni, A. (2016). Verifying the performance of artificial neural network and multiple linear regression in predicting the mean seasonal municipal solid waste generation rate: A case study of Fars province, Iran. **Waste Management**, 48, 14-23.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. (2018). **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4ed. São Paulo: CEMPRE. 350p.

Chhay, L., Reyad, M. A. H., Suy, R., Islam, M. R., Mian, M. M. (2018). Municipal solid waste generation in China: influencing factor analysis and multi-model forecasting. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 20,1761–1770.

Dias, D. M., Martinez, C. B., Barros, R. T. V., Libânio, M. (2012). Modelo para estimativa da geração de resíduos sólidos domiciliares em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas conjunturais. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 17(3), 325-332.

Ghinea, C., Drăgoi, E. N., Comănită, E.-D., Gavrilescu, M., Câmpean, T., Curteanu, S., Gavrilescu, M. (2016). Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis. **Journal of Environmental Management**, 182, 80-93.

Goulart Jr., R. (2017). Desenvolvimento, meio ambiente e produção do espaço: análise de indicadores socioeconômicos e ambientais na Bacia do Itajaí (SC). **Revista Catarinense de Economia**, 1(1), 159-182.

IBGE (2013). Atlas do Censo demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE.

IBGE (2019a). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha municipal. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html?=&t=downloads> (acessado em 01 de julho de 2020).

IBGE (2019b). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativa da População Residente nos Municípios Brasileiros com data de referência a 1º de julho de 2019. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=downloads> (acessado em 29 de maio de 2020).

IBGE (2019c). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produto Interno dos municípios. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=downloads>. (acessado em 29 de maio de 2020).

Kawai, K., Tasaki, T. (2016). Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 18, 1-13.

Kolekar, K. A., Hazra, T., Chakrabarty, S. N. (2016) A Review on Prediction of Municipal Solid Waste Generation Models. **Procedia Environmental Sciences**, 35, 238-244.

Kumar, A., Samadder, S.R. (2017). An empirical model for prediction of household solid waste generation rate – A case study of Dhanbad, India. **Waste Management**, 68, 3-15.

Montgomery, D. C., Runger, G. C. (2018). **Applied Statistics and Probability for Engineers** (7th edition). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.

Oliveira, M. M., Athayde Júnior, G. B. (2017). Estimation of municipal solid waste generation based on income rates and population size in Brazilian municipalities. **Int. J. Environment and Waste Management**, 20(2), 134-154.

ONTL - Observatório Nacional de Transportes e Logística. *Shapefile* de rodovias. Brasília: ONTL. Disponível

em: <https://ontl.epl.gov.br/downloads>. (Acessado em 22 de setembro de 2020).

Pisani Jr., R., Castro, M. C. A. A., Costa, A. A. (2018) Influence of population, income and electricity consumption on per capita municipal solid waste generation in São Paulo State, Brazil. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 20, 1216-1227.

SIE - Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade do Governo de Santa Catarina. (2020). Mapa rodoviário 2020. Florianópolis: SIE. Disponível em: <https://www.sie.sc.gov.br/maparodoviario>. (Acessado em 22 de setembro de 2020).

Triola, M. F. (2014). **Introdução à Estatística: atualização da tecnologia** (11 ed.). Rio de Janeiro: LTC.

Vieira, V. H. A. M., Matheus, D. R. (2018). The impact of socioeconomic factors on municipal solid waste generation in São Paulo, Brazil. **Waste Management & Research**, 36(1), 79-85.