ISSN: 1984-8781 - Anais XVIII ENANPUR 2019. Código verificador: **dwyXz73wNinL** verificar autenticidade em: http://anpur.org.br/xviiienanpur/anais

CICLO LIXOLÓGICO: modelagem socioambiental de resíduos sólidos em áreas urbanas degradadas

Autores:
Bárbara Maria Giaccom-Ribeiro - UFSM Cachoeira do Sul - barbara.giaccom@ufsm.br

Resumo:

Consideradas as mais elevadas formas de organização social, nas cidades também é onde se deflagram as maiores ameaças à urbanidade e à salubridade dos remanescentes de ambiente natural. Estudos e ações para identificação do ciclo de geração, transporte e disposição final dos resíduos sólidos são essenciais para se evitar ou minimizar as destinações indevidas de resíduos e, consequentemente, o comprometimento dos recursos hídricos. Propõe-se conceitualmente o “Ciclo Lixológico” a partir da integração de variáveis relativas ao ambiente físico, às características socioeconômicas da população e às condições da infraestrutura urbana existente, utilizando dados espacializados relativos a características do relevo, dos corpos d’água e do sistema de drenagem, da infraestrutura de acesso e circulação; bem como dados de uso e ocupação do solo; dados demográficos e socioeconômicos, e informações de cobertura e regularidade do serviço de coleta de resíduos. Com base nestas informações, são modelados a geração, o transporte e a acumulação de resíduos sólidos no contexto de uma bacia hidrográfica urbana.

CICLO LIXOLÓGICO:

modelagem socioambiental de resíduos sólidos em áreas urbanas degradadas

INTRODUÇÃO

> "Ninguém se pergunta para onde os lixeiros levam os seus carregamentos: para fora da cidade, sem dúvida; mas todos os anos a cidade se expande e os depósitos de lixo devem recuar para mais longe; [...] Acrescente-se que, quanto mais Leônia se supera na arte de fabricar novos materiais, mais substancioso torna-se o lixo, resistindo às intempéries, à fermentação e à combustão. E uma fortaleza de rebotalhos indestrutíveis que circunda Leônia, domina-a de todos os lados como uma cadeia de montanhas. [...] quanto mais Leônia expele, mais coisas acumula; as escamas do seu passado se solidificam numa couraça impossível de se tirar; renovando-se todos os dias, a cidade conserva-se integralmente em sua única forma definitiva: a do lixo de ontem que se junta ao lixo de anteontem e de todos os dias e anos e lustros" (CALVINO, 1990, p. 106-107).

Chamamos de "lixo" uma grande diversidade de resíduos sólidos de diferentes procedências, dentre eles os resíduos e rejeitos gerados no dia-a-dia. A geração de resíduos está relacionada aos hábitos de consumo de cada cultura, estando correlacionada ao poder econômico da população.

A existência do homem sempre esteve acompanhada da existência de resíduos, já que sua geração é inevitável. No século XVIII, êxodo rural, industrialização, urbanização e vertiginoso crescimento da população construíram o cenário para intensificação dos impactos ambientais decorrentes das diversas formas de poluição. Dentre elas, os resíduos acumulavam-se pelas ruas e imediações das cidades, provocando epidemias e causando morte de pessoas aos milhares. Naquele momento, a solução para os resíduos não configurava algo complexo, pois era suficiente afastá-lo, descartando-o em áreas mais distantes dos centros urbanos.

Com o crescimento das cidades, o desafio da limpeza urbana não consiste apenas em remover os resíduos de logradouros e edificações, mas, principalmente, em dar um destino final adequado aos resíduos coletados (MONTEIRO ET AL., 2001). Grande parte das cidades brasileiras encontra-se em situação delicada em relação aos resíduos sólidos gerados,

decorrente dos modelos de gestão adotados, que já apresentam, desde sua implantação, uma série de dificuldades; decorrente também do desconhecimento da importância de associar e incorporar sistematicamente o tratamento e destinação final de resíduos à sua geração.

O correto gerenciamento dos resíduos sólidos é um dos principais desafios dos grandes centros urbanos no início deste novo milênio (REICHERT, 2013). Até pouco tempo atrás, as ações no campo dos resíduos sólidos restringiam-se à limpeza urbana, ou seja, os recursos eram destinados somente à coleta e à limpeza das vias públicas, ficando o tratamento e a disposição final dos resíduos completamente relegados.

Nas últimas décadas, várias ações e projetos têm sido propostos para a melhoria da disposição final e do tratamento dos resíduos sólidos urbanos. Dados de 2017 divulgados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, por meio do "Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2017", apontam que 78,6% dos municípios brasileiros têm serviços de manejo de resíduos sólidos, o que representa um crescimento de 3% em relação ao ano anterior. Pouco mais de 70,4% dos municípios registraram alguma iniciativa de coleta seletiva[1] (ABRELPE, 2018).

Das quase 215 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos gerados **diariamente** no ano de 2017, cerca de 91,24% foram coletadas; deste montante, apenas 59% receberam destinação adequada (i.e., foram enviados a aterros sanitários) (ABRELPE, 2018). Enquanto que 1.610 municípios brasileiros adotaram a disposição final como os lixões e 1.742 os aterros "controlados"; apenas 2.218 municípios destinaram os resíduos a aterros sanitários; no total, 3.334 (60,2%) municípios conferem destinação inadequada aos seus resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2018). No Rio Grande do Sul, em 2014, 80% dos municípios enviavam seus resíduos para aterros sanitários próprios ou em outras cidades; cinco municípios ainda possuíam lixões (FEPAM, 2014).

O descarte inadequado dos resíduos provoca sérias e danosas consequências à saúde pública e ao meio ambiente. Em tempos de chuva, por exemplo, o acúmulo de resíduos sólidos em regiões inadequadas pode trazer diversos perigos: sua disposição ilegal em locais como terrenos baldios, margens de córregos e rios e nas ruas e calçadas, contribui diretamente com as enchentes, potencializando-as, pois entope bocas de lobo e galerias de água pluvial, diminuindo a capacidade de escoamento de água das mesmas; além de assorear córregos e rios, o que altera a seção transversal dos mesmos, reduzindo a sua profundidade e aumentando, então, a cota de inundação para um mesmo evento de chuva. As enchentes espalham os resíduos sólidos, que podem contaminar a água e alimentos. As perdas econômicas incluem os recursos destinados à limpeza das áreas atingidas, ao socorro às vítimas que perderam bens ou mesmo foram retiradas de suas residências, à recuperação de redes de infraestrutura que tenham sido danificadas (e.g., fornecimento de energia elétrica, abastecimento de água, transporte coletivo, etc.), bem como prejuízos decorrentes da interrupção das atividades cotidianas (e.g., transporte de pessoas e cargas que é

[1] Embora pareça expressiva a quantidade de municípios com iniciativas de coleta seletiva, convém salientar que, muitas vezes, tais atividades resumem-se à disponibilização de pontos de entrega voluntária ou convênios com cooperativas de catadores, não abrangendo a totalidade do território ou da população do município; nem tampouco refere-se à eficiência da reciclagem do resíduo (e sua eliminação do ciclo).

interrompido, cortes de energia elétrica, estabelecimentos comerciais e de serviços que são obrigados a interromper suas atividades, etc.). As consequências do lançamento inadequado de resíduos sólidos no ambiente acontecem sob efeito cascata, refletindo-se de montante à jusante na bacia hidrográfica.

As soluções mundialmente mais adotadas baseiam-se no gerenciamento integrado dos resíduos sólidos, conceito que combina várias técnicas para o manejo dos distintos elementos do fluxo de resíduos (REICHERT, 2013). Em um sistema de gerenciamento integrado, todos os elementos fundamentais são avaliados e utilizados, e todas as suas interfaces e conexões são consideradas para se conseguir a solução mais eficaz e econômica (TCHOBANOGLOUS ET AL., 1993). O gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos 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. Este sistema inclui a segregação na origem e a coleta de todos os tipos de resíduos e de todas as fontes, seguido por uma, ou mais, das seguintes opções: recuperação ou valorização secundária de materiais (reciclagem), tratamento biológico da matéria orgânica, tratamento térmico e aterro sanitário (com e sem recuperação de energia) (McDOUGALL ET AL., 2001).

Esforços consideráveis têm sido feitos na análise e pesquisa dos aspectos práticos dos sistemas municipais de manejo de resíduos (como coleta, transporte, tratamento e disposição final) (e.g., BRUSADIN, 2004; CAMPANI, REICHERT, 2006; COSTA, 2011; CAMPANI, 2012; CIASCA, SACCARO JR., 2012) e sobre a percepção das pessoas sobre separação na origem, reciclagem, incineração e aterro sanitário (e.g., OLIVEIRA, 2006; MUCELIN; BELLINI, 2008; PEREIRA; MELO, 2008, GALVÃO, 2014), porém, os administradores e gerentes de sistemas de manejo de resíduos muitas vezes não têm a perspectiva de análise do sistema em longo prazo (REICHERT, 2013).

A investigação sobre a disposição inadequada de resíduos sólidos demanda conhecimento sobre a gestão do programa municipal de coleta de resíduos. Entretanto, os dados oficiais constituem uma janela que permite apenas uma visão parcial da realidade da geração e transporte de resíduos. Dentre o universo de dados e informações que empresas de coleta de resíduos e limpeza urbana, e/ou administrações públicas possuem sobre a geração de resíduos sólidos, os dados de lançamento inadequado de resíduos no ambiente constituem justamente o dado que não se afere com facilidade (RIBEIRO, 2017).

Em virtude de métodos diretos de medição da geração de resíduos sólidos apresentarem restrições, principalmente de ordem econômica, vários estudos vêm sendo desenvolvidos de forma a quantificar a geração de resíduos sólidos indiretamente, a partir de parâmetros, como renda média domiciliar, Produto Interno Bruto do município, consumo de água e de energia elétrica nas unidades habitacionais, áreas das edificações e/ou das propriedades, entre outros.

O presente trabalho insere-se em uma pesquisa que investiga o ciclo dos resíduos sólidos em uma bacia hidrográfica urbana, aqui chamado de “Ciclo Lixológico”, que pode ser dividido nas etapas de geração, transporte e disposição final dos resíduos sólidos. A modelagem espacial da geração, transporte e disposição (i.e., acumulação) de resíduos sólidos

é realizada adotando-se a bacia hidrográfica como unidade básica de análise, a fim de se delimitar espacialmente o cenário de pesquisa. Adicionalmente, o foco está em áreas urbanas degradadas, em especial, aquelas caracterizadas por ocupações irregulares, onde não se observa, na maioria das vezes, adequação às condições mínimas de segurança, salubridade e respeito ao meio ambiente.

A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O popular "lixo urbano" (chamado, alternativamente, de detrito, sujeira, impureza, sobra, entulho, destroços, refugo, poluente bruto, entre outros) é um problema grave em diversas cidades brasileiras. É composto, geralmente, de materiais industrializados, tais como garrafas, latas, embalagens plásticas e de papel, jornais, sacolas de supermercado, maços de cigarros, seringas e agulhas hipodérmicas, mas também podendo incluir itens como peças de veículos, entulho de construção civil, móveis velhos, além dos resíduos orgânicos e animais mortos. O material sob investigação desta pesquisa engloba tanto o que é considerado resíduo quanto o que é rejeito[2]. Ou seja, o Ciclo Lixológico vem ao encontro de situações distantes das ideais, principalmente no tocante à mistura e consequente impossibilidade de tratamento, reciclagem e reutilização do material, que relega ao destino de "rejeito" itens que poderiam ser "resíduos".

Uma vez que não são descartados ou dispostos adequadamente, os resíduos podem se acumular nas imediações de centros comerciais, pátios de estacionamento, estações de trem e ônibus, estradas, escolas, parques públicos, terrenos baldios, lixeiras públicas, lixões, depósitos de coleta de recicláveis e ecopontos. Até que "alguém" vá removê-lo, permanece nesses locais; mas existe também a possibilidade de ser transportado pela força de ventos e/ou de chuvas, sendo, muitas vezes, conduzido no sistema de drenagem urbana (ARMITAGE, 2007).

Devido a fatores relacionados à ineficiência de infraestrutura urbana e de serviços e às condições socioeconômicas e culturais, os sistemas de drenagem urbana são, atualmente, vias de transporte de resíduos aos cursos d'água. Estando uma vez no sistema de drenagem, os resíduos podem ser transportados nos condutos, canais e cursos d'água naturais até alcançarem rios maiores, lagos naturais ou artificiais, estuários ou o mar (ARMITAGE; ROOSEBOOM, 2000; TUDOR; WILLIAMS, 2001). No caminho, entretanto, itens são frequentemente emaranhados na vegetação ao longo das margens dos córregos, rios ou lagos. A maioria provavelmente é enterrada pelos sedimentos dos rios, lagos ou praias (ARMITAGE, 2007).

[2] A Lei Federal nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, em seu artigo 4º, apresenta as seguintes definições para resíduos e rejeitos para efeito da mesma: "XV - **rejeitos**: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada; XVI - **resíduos sólidos**: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível" (BRASIL, 2010).

A presença de resíduos sólidos na rede de drenagem, além dos muitos impactos ao meio ambiente natural e à saúde humana, compromete a eficiência dos sistemas de drenagem urbana, estando diretamente relacionadas a entupimentos, inundações, ondas de resíduos e diversas perdas econômicas. A redução na geração de resíduos sólidos, bem como a remoção destes do ambiente urbano, é um problema complexo e difícil, especialmente para países em desenvolvimento. Armitage (2007) defende que a solução para este problema depende de cada autoridade local no desenvolvimento de uma estratégia de gestão integrada de resíduos sólidos no âmbito da bacia hidrográfica, que inclua controles de planejamento, de fonte e estruturais.

Ao buscar definir o "Ciclo Lixológico", i.e., o ciclo dos resíduos sólidos em uma bacia hidrográfica urbana, esta pesquisa apresenta como contribuição o potencial de produzir dados e fornecer insumos (i.e., informações qualitativas espacializadas) que auxiliem nas etapas iniciais da estratégia de gestão integrada, tornando as propostas e medidas mais adequadas à realidade local (Figura 1).

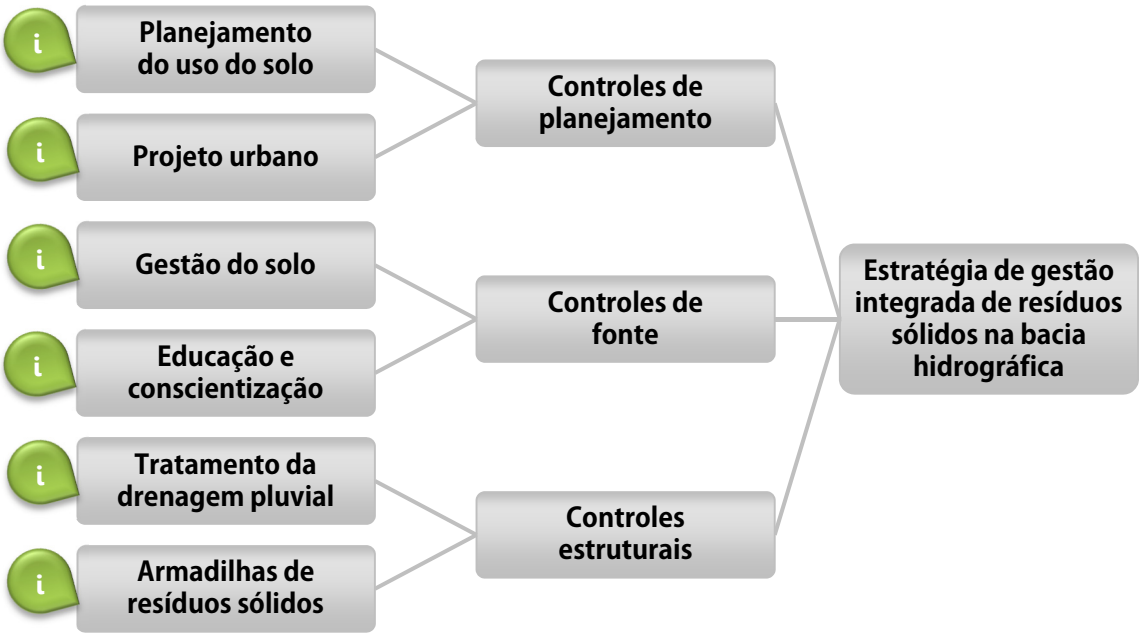


Figura 1 – Estratégia de gestão integrada de resíduos em uma bacia hidrográfica.
Fonte: adaptado de MARAIS ET AL. (2004).

ONTOLOGIA ECOLÓGICA

Ao longo de sua existência, o homem foi diversificando as relações com o ambiente e, consequentemente, aumentando a degradação da natureza. A degradação ambiental causada pela atividade humana é uma fração de três fatores: o tamanho da população, o grau de consumo e a tecnologia (COMMONER, 1992).

A questão da precariedade em que se encontram os recursos naturais do planeta denuncia uma crise ambiental global e suas causas mostram dimensões políticas, econômicas, institucionais, sociais e culturais. Guimarães (1996) aponta ser fundamental rever o próprio modelo de civilização, particularmente no que se refere ao padrão de articulação sociedade–natureza, o que exige uma compreensão adequada do processo social que desencadeou a crise, posto que as possíveis soluções, via desenvolvimento sustentável, dependem de dinâmicas intrínsecas ao sistema social. A preocupação com os problemas ambientais e, no caso específico, com os resíduos sólidos urbanos, vem crescendo constantemente, uma vez que os resíduos sólidos urbanos gerados pelas cidades têm se avolumado e se agravado, de forma que constituem, na atualidade, um dos principais desafios da sociedade em geral, e principalmente dos gestores urbanos (e.g., ZYGER, 2005).

Para Giddens (2010), a poluição não é necessariamente democrática e as consequências de se ignorar as desigualdades sociais por detrás dos problemas ambientais permitem a adoção de soluções que não asseguram igual proteção ambiental para todos. Para isso, seria necessário considerar as totalidades sociais e ambientais que compõem a ontologia da questão ecológica, o que implica o aumento da justiça ambiental envolva múltiplas estratégias de ação e permanente capacidade criativa (GIDDENS, 2010).

Commoner (1972), em sua obra *The Closing Circle*, que se tornou conhecida como "Quatro Leis da Ecologia", enfatiza que a estabilidade dos ecossistemas é possível uma vez que os resíduos gerados por uma parte do ciclo sejam utilizados por outra parte. Porém, ao se interferir no ciclo natural das coisas, seja destruindo, seja gerando resíduos em excesso, os ecossistemas se desestabilizam; como todos os ecossistemas estão conectados, problemas em um irão refletir nos demais.

Ao se discutir a importância da gestão urbana tendo como pano de fundo o recorte territorial e as distintas formas de ocupação estabelecidas e vinculadas às particularidades ambientais, é necessário definir a bacia hidrográfica como unidade de planejamento ambiental (GEDDES, 1915). Entende-se que qualquer análise ambiental não pode ser feita sem considerar a realidade de ocupação e a transformação de todo o território em que se encontra inserido. Neste sentido, a bacia hidrográfica como unidade de estudo e planejamento parece se constituir em um importante quadro de condições sociais, econômicas e mesmo políticas, que inspiram uma releitura da dimensão ambiental ali vivenciada.

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas vem da necessidade de se compreender o funcionamento dos processos que controlam o movimento da água e os impactos de mudança do uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água (WHITEHEAD; ROBINSON, 1993). O estudo das características fisiográficas da bacia hidrográfica, bem como seu uso e ocupação, no geral, tornam-se importantes fatores para a avaliação da degradação ambiental que essa bacia possa estar sofrendo ou mesmo contribuindo para que outras sofram.

A bacia hidrográfica é um recorte territorial que envolve uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída (TUCCI, 2009). A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu

exutório. Visto que usualmente busca-se a utilização da declividade natural do terreno, estes recortes territoriais possuem assim condições específicas de saneamento, sobretudo no que se refere à drenagem e ao abastecimento de água, permitindo considerar a ocupação antrópica como elementos integrados às suas características ambientais (YASSUDA, 1993). Entende-se que a bacia hidrográfica articula não apenas os elementos naturais estabelecidos pelo sítio e por sua situação geográfica, mas também a confluência de agrupamentos humanos ao longo do tempo, que se organizam no espaço, configurando assim um território dinâmico e em permanente transformação. Por suas características, a bacia hidrográfica também é a receptora natural de toda substância ou resíduo transportado pela chuva. Por isso, as infraestruturas e serviços de saneamento devem ser integradas a gestão dos recursos hídricos.

Nos últimos três séculos, as atividades humanas têm aumentado a sua influência sobre as bacias de drenagem no meio rural e urbano e, por conseguinte, sobre os canais constituintes, tornando-se um importante agente geomorfológico. Os cursos d'água, independentemente da interferência humana, realizam três processos geomorfológicos básicos: erosão, transporte e deposição, construindo, dessa forma, seu próprio perfil de equilíbrio. Sua extensão, sua largura, sua profundidade, a velocidade de suas águas e seu padrão de canal resultam da atuação daqueles processos, estando eles adaptados e ao mesmo tempo, os influenciando e alterando ao longo do tempo, evoluindo dinâmica e equilibradamente. Qualquer alteração no curso d'água altera esse equilíbrio dinâmico, obrigando o rio a buscar um novo ajuste (BOTELHO, 2011).

Para qualquer estudo em redes hidrográficas é fundamental conhecer os dois ciclos importantes para a dinâmica dos rios (PACHECO, 2013): o ciclo hidrológico, que é um sistema fechado (i.e., em termos do globo terrestre) envolvendo vários comportamentos da água, como precipitação, escoamento, infiltração, evapotranspiração, entre outro; e concomitantemente ao ciclo hidrológico, desenvolve-se o ciclo hidrossedimentológico.

O *ciclo hidrológico* é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes (MMA, 2007). Na atmosfera, forma as nuvens que, quando carregadas, provocam precipitações, na forma de chuva, granizo, orvalho e neve. Nos continentes, a água precipitada pode seguir os diferentes caminhos: infiltra e percola (passagem lenta de um líquido através de um meio) no solo ou nas rochas, podendo formar aquíferos, ressurgir na superfície na forma de nascentes, fontes, pântanos, ou alimentar rios e lagos; flui lentamente entre as partículas e espaços vazios dos solos e das rochas, podendo ficar armazenada por um período muito variável, formando os aquíferos; escoa sobre a superfície, nos casos em que a precipitação é maior do que a capacidade de absorção do solo; evapora retornando à atmosfera; em adição a essa evaporação da água dos solos, rios e lagos, uma parte da água é absorvida pelas plantas; essas, por sua vez, liberam a água para a atmosfera através da transpiração – a esse conjunto, evaporação mais transpiração, dá-se o nome de evapotranspiração; congela formando as camadas de gelo nos cumes de montanha e geleiras.

O *ciclo hidrossedimentológico* envolve o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia, sendo este intimamente ligado ao ciclo

hidrológico. Canais fluviais são abastecidos pelo lento escoamento do lençol freático, sendo estes lençóis abastecidos por águas pluviais infiltradas no solo ou na rocha, ou diretamente pelo escoamento superficial das águas pluviais. Estas formas de escoamento podem ser vistas como meio de dissipação de energia da qual a água está provida, ao se deslocar horizontalmente e verticalmente, sob ação da força gravitacional (TUCCI, 2009).

Mesmo sendo simultâneos, os ciclos possuem diferenças marcantes: o ciclo hidrossedimentológico é aberto – as partículas deslocadas, transportadas e depositadas não retornam ao meio de origem; o ciclo hidrológico é um sistema fechado, cuja ciclicidade é incessante e necessária. Diante disto, a mecânica fluvial no ciclo sedimentológico é impulsionada pela força da energia contida na água sobre o ambiente hídrico. Este fato demonstra o quanto a capacidade do transporte dos sedimentos sólidos está intrinsecamente ligada ao entendimento da dissipação de energia, quer por atrito, quer por suspensão (TUCCI, 2009).

Todo curso d'água possui um comportamento hidrossedimentológico próprio, ou seja, os processos de produção e deposição de sedimentos em uma bacia são naturais. No entanto, a interferência antrópica altera o fluxo natural dessa dinâmica, na medida em que o uso e ocupação da bacia hidrográfica estão relacionados com a produção e transporte de sedimentos podendo variar de acordo com a intensidade e manejo do uso do solo. Os sistemas hídricos (rios, lagos e outros corpos d'água) superficiais são também relevantes para o condicionamento socioambiental em equilíbrio. Caso haja impactos em qualquer seção fluvial, haverá comprometimento em todo o funcionamento fisiológico e respectiva relação com seus serviços ecossistêmicos dessas unidades hídricas (e.g., PACHECO, 2013).

CLASSIFICAÇÃO TEÓRICA

Bunge (1985) define a **tecnologia** como projeto (*design*) de artefatos e condiciona a planificação da sua realização ao conhecimento e ao método científico. Chama de artificial "qualquer coisa opcional, feita ou construída com ajuda de conhecimento aprendido e utilizável por outros" (BUNGE, 1985, p. 222, tradução nossa[3]). Para algo ser classificado como artificial, deve ser primeiramente opcional, i.e., fruto de uma decisão ou escolha deliberada do sujeito (LENZI, 2013).

O conceito de **artefato** para Bunge (1985) é bastante amplo. Os artefatos podem ser classificados em três categorias ontológicas: coisas artificiais, estados artificiais e mudanças artificiais. No Quadro 1, são apresentadas características que diferem processos naturais e artificiais.

[3] "*We call artificial anything optional made or done with help of learned knowledge and utilizable by others*" (BUNGE, 1985, p. 222).

Quadro 1 – Diferenças entre coisas e processos naturais e artificiais.

CARACTERÍSTICA	NATURAL	ARTIFICIAL
Modo de existência	Autônomo	Dependente do homem
Origem	Feito por si mesmo	Humana
Desenvolvimento	Espontâneo	Guiado pelo homem ou substituto (*proxy*)
Evolução	Por variação espontânea	Por alteração proposital
Regularidades	Leis e tendências	Leis/tendências/regras
Projeto	Não	Sim
Planejamento	Não	Sim
Custo de produção	Nenhum	Trabalho humano
Estudado pela	Ciência	Tecnologia

Fonte: traduzido de BUNGE (1985).

O artefato é resultado de um conhecimento aprendido: os artefatos são sempre produtos humanos ou de seus substitutos (*proxies*) (e.g., robôs ou máquinas). E os artefatos são produtos para humanos: o artefato deve ser utilizável por outros, deve conter um valor social, real ou potencial (BUNGE, 1985).

O artefato tampouco nasce espontaneamente: necessita ser projetado ou produzido para algum fim. Por isso, há a necessidade de projeto e planejamento. O projeto é realizado à luz do conhecimento científico e o artefato resultante será tecnológico (LENZI, 2013). Bunge defende que o projeto tecnológico não é fruto de uma sequência algorítmica, mas sim, depende, em última instância, de uma imaginação criativa do tecnólogo; porém, não pode ser limitado pela intuição ou experiência do projetista. Para Bunge (1985), o projeto será o resultado não só da força criativa, mas do emprego de conhecimento científico e tecnológico e outros princípios gerais que devem guiar o trabalho do projetista. Bunge (1985, p.225, tradução nossa[4]) define o conceito de projeto tecnológico como "uma representação de uma coisa ou processo artificial antecipado com a ajuda do conhecimento científico".

Enquanto a ciência visa estabelecer regularidades, que são as leis, a tecnologia, por sua vez pressupõe regras, definidas por Bunge como a prescrição de um curso de ações, i.e., normas que indicam como se deve proceder para alcançar um fim desejado. As regras possibilitam a construção de uma planificação em que consiste o projeto, sendo este uma lista ordenada (i.e., sequência) de ideias descrevendo operações ou ações em certas coisas, a serem realizadas por seres racionais ou seus substitutos, com o propósito de causar certas mudanças específicas nessas coisas (BUNGE, 1983); e qualquer plano ou programa pode ser analisado em trabalhos ou sub-rotinas, e cada uma é uma sequência de ações (BUNGE, 1983). A planificação então possibilita a antecipação do artefato que será concebido mediante os melhores meios disponíveis.

A partir da visão bungeana, parte-se para a apresentação do artefato "Ciclo Lixológico".

[4] *"[...] representation of an artificial thing or process anticipated with the help of scientific knowledge"* (BUNGE, 1985, p. 225).

"CICLO LIXOLÓGICO"

O "**Ciclo Lixológico**", da forma como proposto, é definido como um sistema aberto envolvendo vários comportamentos dos resíduos sólidos, podendo ser dividido em geração, transporte e disposição final (ou acumulação), podendo ou não haver uma retroalimentação do ciclo por meio da reciclagem do resíduo (Figura 2).

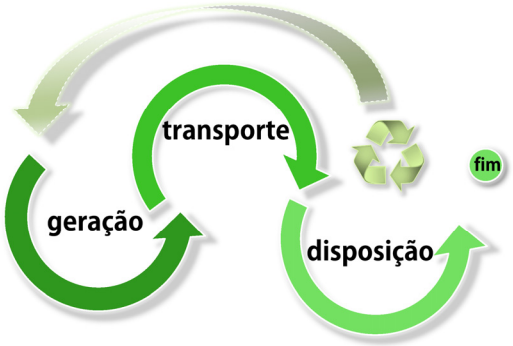


Figura 2 – Esquema teórico do Ciclo Lixológico.
Fonte: elaborado pela autora (2013).

De modo prático, a modelagem do Ciclo Lixológico se dá partir da integração de variáveis relativas ao ambiente físico, às características socioeconômicas da população e às condições da infraestrutura urbana existente. Para tanto, são utilizados dados espacializados da bacia hidrográfica urbana que configura o estudo de caso desta pesquisa, tais como: relevo, hidrografia, tipo de solo; características relativas aos corpos d'água e ao sistema de drenagem (e.g., rugosidade, declividade, orientação de vertentes); vias de acesso e circulação; dados de uso e ocupação do solo; dados socioeconômicos (e.g., densidade demográfica, renda e escolaridade); informações de cobertura e regularidade do serviço de coleta de resíduos sólidos. No Quadro 2, são relacionadas as variáveis associadas às três etapas que compõem o Ciclo Lixológico na presente pesquisa. Enfatiza-se que este delineamento pode ter conformação diferente quando aplicado em outras áreas.

Quadro 2 – Variáveis associadas às três fases do Ciclo Lixológico proposto.

	GERAÇÃO	TRANSPORTE	DISPOSIÇÃO (ou Acumulação)
Variáveis investigadas	• uso e ocupação do solo; • dados socioeconômicos (e.g., densidade demográfica, renda e escolaridade; • informações de cobertura e regularidade do serviço de coleta de resíduos;	• relevo, hidrografia, tipo de solo; • características relativas aos corpos d'água e ao sistema de drenagem (e.g., sinuosidade, rugosidade, declividade, obstruções existentes); • vias de acesso e circulação;	Condições inversas daquelas variáveis que propiciam o transporte
Outras variáveis recomendadas	• amostragem e coleta de dados *in situ*; • dados de resíduos exógenos	• dados meteorológicos; • dados de vazões dos corpos d'água • características físicas dos resíduos sólidos (e.g., forma, dimensões, peso	

Fonte: elaborado pela autora (2014).

Inicialmente, considera-se que o Ciclo Lixológico acontece em função da geração, transporte e disposição dos resíduos sólidos. Considerando as variáveis associadas às três fases do Ciclo Lixológico proposto (Quadro 2), o Ciclo Lixológico pode ser representado por meio de uma função mais detalhada (Eq. 1):

$$RS = f\,(FO\,, FS\,, FC\,, EX\,, P\,, CF\,, CC\,, CR\,) \qquad (1)$$

onde:

RS é a produção total de resíduos sólidos de uma bacia hidrográfica;

FO é o fator de ocupação (determinado pelo uso do solo);

FS é o fator socioeconômico (determinado pelo perfil da população; consiste num fator de "nível de consciência ambiental");

FC é o fator de coleta de resíduos sólidos (i.e., resíduos que são excluídos do modelo);

EX é o fator de resíduos sólidos exógenos (i.e., resíduos trazidos para área de estudo por pessoas e/ou veículos vindos de locais fora da bacia hidrográfica em estudo);

P é a precipitação, em mm/tempo (evento de chuva);

CF são as características físicas dos resíduos sólidos (i.e., forma, massa, material/composição);

CC são as características do caminho (i.e., declividade, sinuosidade, rugosidade, obstruções existentes); os caminhos podem ser os corpos d'água, a rede de drenagem ou as ruas;

CR é a extensão do caminho / distância a ser percorrida sob as condições de dado caminho (CC).

A formulação do Ciclo Lixológico advém dos estudos de perda de solo. Modelos empíricos de predição de erosão do solo, tal como a *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978), prestam-se à análise conjunta dos fatores condicionantes da erosão para estimativa de perda de solo pela ação do escoamento das águas pluviais em superfície, com ênfase nos processos de erosão laminar.

Além da alusão à USLE, o Ciclo Lixológico proposto baseia-se na Razão de Aporte de Sedimentos (SDR – *Sediment Delivery Ratio*), que consiste na razão entre a produção de sedimento no exutório e a erosão total na bacia hidrográfica, para estudo e determinação da produção de sedimentos (i.e., neste caso, resíduos sólidos) em bacias hidrográficas (WALLING, 1983). A SDR foi estabelecida para quantificar uma fração de todo sedimento erodido na área da bacia que consegue atingir o seu exutório. A taxa de aporte é um fator que relaciona a disponibilidade de sedimento e a deposição em várias escalas espaciais na bacia e, assim, envolve os vários processos erosivos, a desagregação, o transporte e a deposição dos sedimentos (LU ET AL., 2006).

O Ciclo Lixológico conceitualmente identificado para a área de estudo da bacia Mãe d'Água consiste dos seguintes eventos:

a) Os resíduos sólidos são gerados em estabelecimentos residenciais e comerciais, conforme padrões de geração de resíduos *per capita*, ou por área bruta locável[5], entre outros;

b) Parte de tais resíduos é coletada pelo serviço de coleta regular da Prefeitura; estes resíduos são considerados como extintos do Ciclo Lixológico, pois, na teoria, receberam a disposição final mais adequada;

c) A fração não coletada permanece no ambiente e sofre a ação de ventos e chuvas, que podem causar seu deslocamento;

d) Há também na área diversos pontos de disposição irregular (e ilegal) de resíduos sólidos, entulhos, móveis velhos e animais mortos: o ambiente degradado serve de convite ao lançamento de novos montantes, pois o infrator percebe que está num local em que esta prática é recorrente;

e) Os resíduos exógenos também estão disponíveis para transporte, e de fato se deslocam bacia abaixo quando dos eventos de grandes chuvas concentradas no tempo (i.e., carga de lavagem);

f) Os resíduos sólidos se deslocam pela bacia, acompanhando a declividade do terreno e se acumulando em locais devido a alguns fatores, tais como: por serem pontos baixos, sem possibilidade de continuarem seu deslocamento somente sob força da gravidade; alta rugosidade do terreno ou presença de obstruções ou elementos que causem sua retenção (e.g., em que os resíduos enrosquem, por exemplo); em locais onde há trechos com galerias de águas pluviais fechadas (e.g., sob ruas), grandes objetos podem obstruir a passagem dos demais que vêm na sequência; no caso da presente área de estudo, há trechos de canalização realizados pelos próprios moradores, sem o devido planejamento ou execução conforme as necessidades calculadas e normas vigentes;

g) Após sua acumulação, os resíduos sólidos podem passar por novo processo de coleta ou podem permanecer acumulados até que uma nova força os faça se deslocarem novamente (e.g., outro evento de precipitação);

h) O acúmulo de resíduos no ambiente urbano interfere na qualidade ambiental daquele espaço, afeta negativamente valores de imóveis e pode causar sentimentos na população de não-apropriação do espaço; o que resulta em descuido crescente, e, menos topofilia, mais depredação, e assim por diante, formando um ciclo vicioso;

[5] Área bruta locável (ABL) é um termo para designar a área interna de um edifício comercial ou de serviços, como por exemplo, *shopping centers*, destinado à locação de salas e quiosques. A área bruta locável é medida em metros quadrados e é muito utilizada para comparação de tamanho de centros comerciais. Também é a unidade de medida utilizada em relatórios socioambientais de tais estabelecimentos, inclusive, para relacionar a geração de resíduos sólidos

i) Além de prejudicar as pessoas que moram naquele ambiente, essa poluição devido ao lançamento de resíduos sólidos afeta flora, fauna, recursos hídricos e solo, o que, novamente, alimenta o ciclo de degradação do ambiente.

O Ciclo Lixológico em uma área urbana degradada pode ter vários *loopings*, dependendo do nível de degradação do ambiente e da falta de comprometimento da população e dos órgãos públicos para com aquele problema.

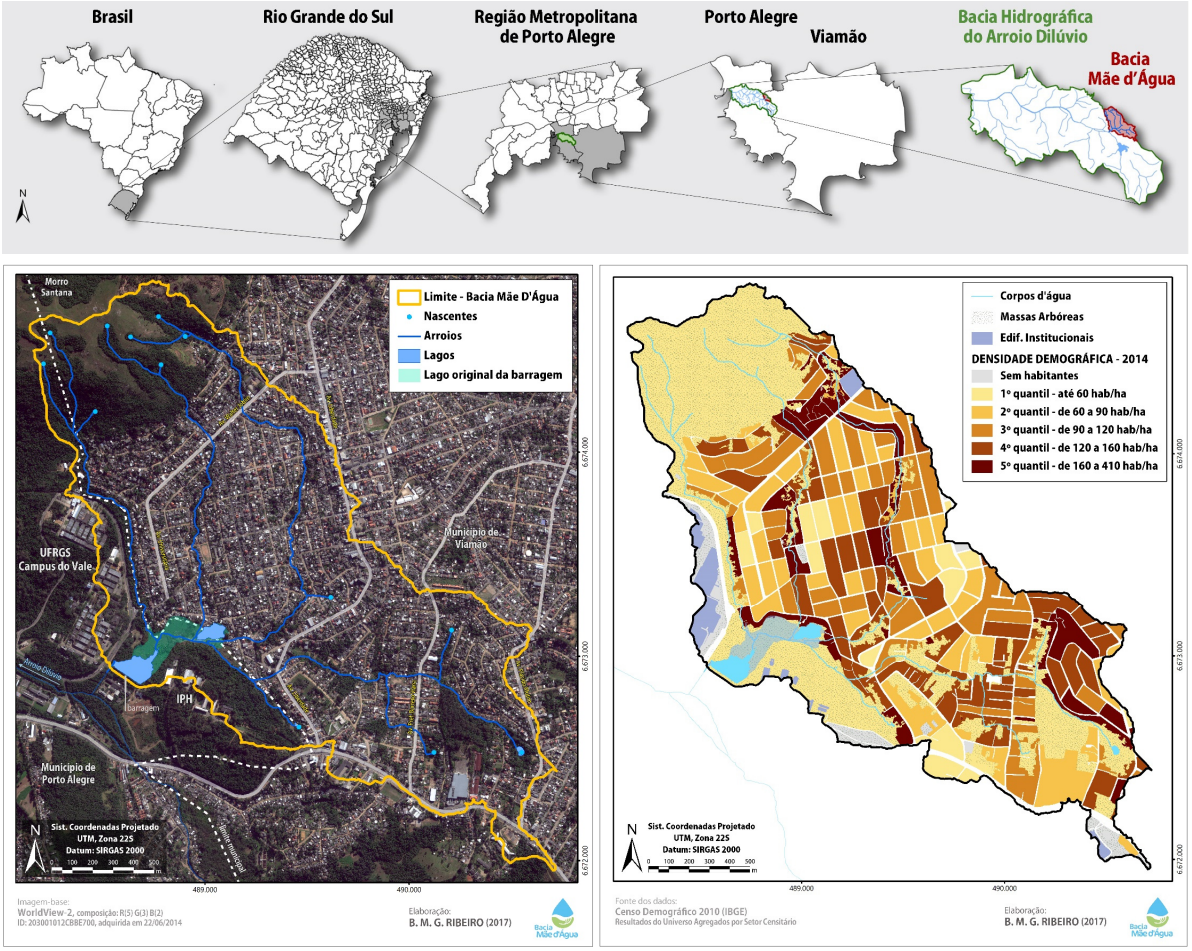
A presente pesquisa tomou uma área de estudo como palco para aplicar métodos relativos à produção de dados e informações sobre: o meio físico da bacia, sua ocupação antrópica, a caracterização socioeconômica de sua população, para então produzir análises a respeito de como se desenvolve o Ciclo Lixológico naquele ambiente.

MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa usa a Bacia Hidrográfica da Barragem Mãe d'Água como estudo de caso, área escolhida para realização do estudo empírico. A bacia hidrográfica da Barragem Mãe d'Água localiza-se na divisa entre os municípios de Porto Alegre e Viamão, na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), Rio Grande do Sul (Figura 3), sendo delimitada a partir do exutório definido como o vertedouro da barragem construída no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A bacia Mãe d'Água, composta por quatro arroios principais e totalizando uma área de 336,79 hectares, é uma das componentes da cabeceira do Arroio Dilúvio, importante curso d'água que se estende do município de Viamão para o de Porto Alegre, cortando-o no sentido leste–oeste e abrigando mais de 515 mil habitantes (IBGE, 2011). Nos limites de Porto Alegre, estão compreendidos 83% da bacia do Dilúvio, sendo uma das mais densamente constituídas na cidade: o eixo que margeia o Arroio Dilúvio em quase toda a sua extensão, a Avenida Ipiranga, é uma das principais vias de fluxo na capital, possuindo importância regional no contexto da RMPA. A foz do Arroio Dilúvio está no Lago Guaíba, importante manancial vinculado ao centro de Porto Alegre e às faixas de ocupação mais antigas da cidade. Embora tenha seu curso praticamente inteiro dentro dos limites da cidade de Porto Alegre, o Arroio Dilúvio tem suas principais nascentes em Viamão, na região das represas Lomba do Sabão e Mãe d'Água.

O fluxo metodológico proposto envolve quatro grandes etapas: (1) construção da base de dados espaciais, para posterior (2) sistematização dos dados de entrada do modelo; (3) construção e aplicação do modelo; (4) análise dos resultados (Figura 4).



(a) (b)

Figura 3 – Mapa de localização da Bacia Mãe d'Água (a) e mapa de densidade demográfica (b).
Fonte: elaborado pela autora (2014).

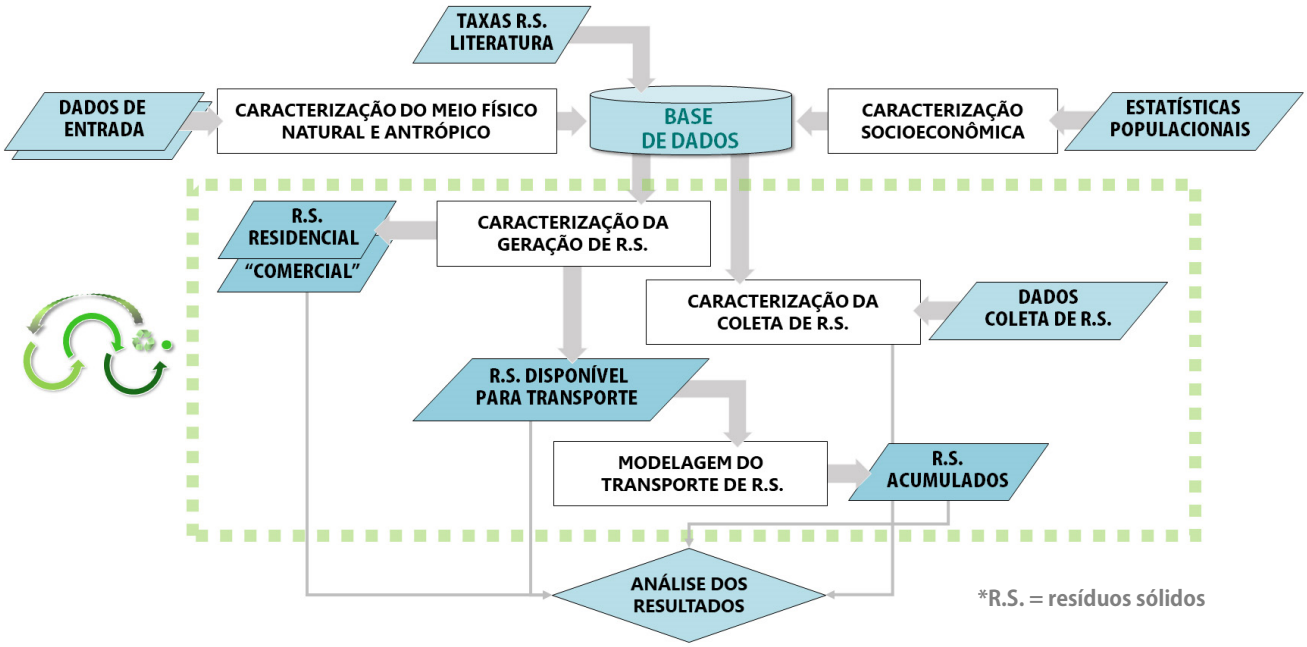


Figura 4 – Síntese dos fluxos metodológicos propostos.
Fonte: elaborado pela autora (2017).

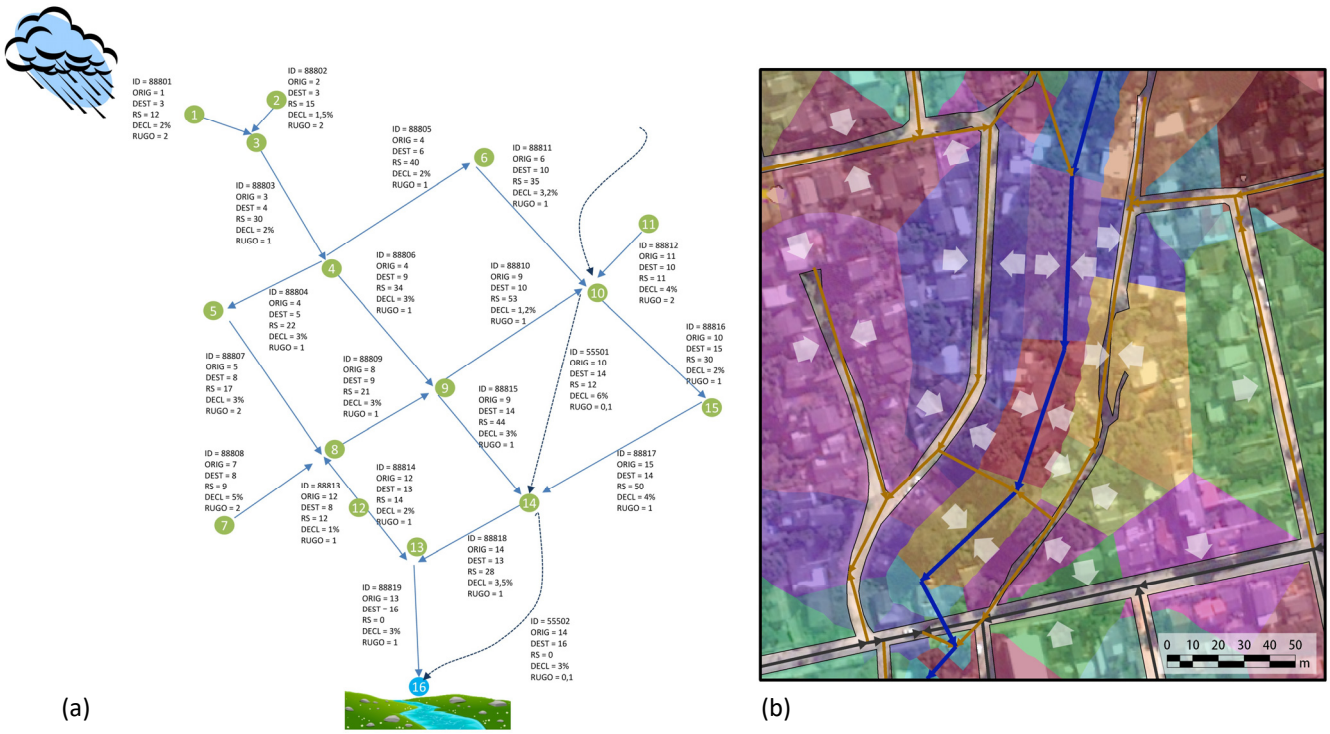
Caracterização do meio físico: o conhecimento dos atributos e características do meio físico que controlam os processos dinâmicos das bacias hidrográficas possibilita identificação de problemas ambientais, bem como pode permitir adoção de instrumentos de gestão eficazes na proteção dos recursos naturais e de planejamento urbano e regional com boas condições de reduzir danos ao ambiente natural e construído e prejuízos à sociedade. A preparação da base de dados relativa ao meio físico é o primeiro passo para elaboração da base que dará suporte espacial à modelagem da geração e transporte de resíduos sólidos desta pesquisa. A caracterização do meio físico abrange quatro temas: (1) a delimitação da área de estudo, fazendo uso do conceito de bacia hidrográfica, para encerramento territorial da presente pesquisa; (2) a morfometria da área de estudo, especialmente em seus aspectos contemporâneos, i.e., considerando as alterações antrópicas ocorridas recentemente; (3) as áreas de preservação permanente, tendo em vista suas condições de delimitação; e, por fim, (4) a cobertura do solo, que retrata a fronteira entre os meios físico e antrópico.

Caracterização do meio socioeconômico: o diagnóstico socioeconômico é uma importante ferramenta de análise para a elaboração de planos e projetos que levem em consideração a população da área de análise (i.e., habitantes, pessoas que trabalham no local, etc.), bem como seus aspectos econômicos. Desta forma, a caracterização do meio socioeconômico consiste na captação de dados relativos às dinâmicas social e econômica, identificando os pontos de conflitos e as potencialidades da área em estudo. Essas informações servirão de base para a formulação de ações correspondentes e adequadas a cada local e situação. Na presente pesquisa, a caracterização do meio socioeconômico envolve, principalmente, a caracterização demográfica. Para se caracterizar a população que vive e trabalha na região, três etapas de tratamento de dados são desenvolvidas: (1) inferência da quantidade população residente na área de estudo; (2) ponderação e espacialização dos dados socioeconômicos de modo a caracterizar a população residente inferida; e (3) inferência e espacialização da população que trabalha na área de estudo. Tais dados fornecem os insumos que subsidiam a modelagem da geração dos resíduos sólidos na área de estudo.

Construção da base espacial para modelagem: são construídas duas bases distintas para modelagem dos dados: (1) a rede espacial de transporte de resíduos sólidos, que consiste em representação por meio de grafos direcionados da superfície de transporte possível, ou seja, considerando o "ambiente" de transporte dos resíduos sólidos, i.e., o local por onde os resíduos podem passar / deslocar-se, consiste nas vias (e.g., ruas e calçadas, vielas, escadarias, etc.), nos arroios e nos terrenos baldios ou aqueles desprovidos de edificação; por sua vez, esta pesquisa assume que os resíduos não passam de um lote para outro (i.e., assume-se que haja barreiras físicas entre os lotes, como muros ou cercas); e (2) a base espacial de geração de resíduos sólidos, criada a partir dos segmentos da rede espacial de transporte de modo a distribuir de modo ponderado espacialmente os atributos socioeconômicos a serem utilizados na modelagem do transporte de resíduos sólidos.

Na Figura 5a, é ilustrada a elaboração conceitual do modelo de transporte de resíduos sólidos em uma situação hipotética. Os nós da rede espacial de transporte de resíduos sólidos estão representados pelos círculos verdes enumerados; as arestas são as setas azuis, representando as ruas, e as linhas tracejadas pretas, representando os rios; a cada aresta são atribuídos atributos relativos a: origem e destino do segmento (i.e., nós da rede), quantidade de resíduos geradas nas áreas adjacentes àquele segmento, declividade da via e rugosidade.

Na Figura 5b, são ilustrados os polígonos que compões a base espacial de geração de resíduos sólidos, determinantes da área de contribuição de cada quadra, com relação aos atributos que possui (i.e., variáveis socioeconômicas), a cada elemento da rede espacial de transporte de resíduos sólidos (i.e., cada segmento de via). Ou seja, tais polígonos determinam, de forma ponderada por área, a porcentagem dos atributos de cada fração da quadra, com relação ao conjunto de dados de toda a quadra (i.e., associados às edificações previamente mapeadas e utilizadas para ponderação das variáveis demográficas).



(a) (b)

Figura 5 – (a) Elaboração esquemática da rede de transporte de resíduos sólidos;
(b) representação esquemática de como ocorre a transferência de variáveis entre os polígonos da base espacial e os trechos da rede de transporte.
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Modelagem da geração e transporte de resíduos sólidos: a modelagem dos resíduos sólidos em termos de geração, transporte e retenção (i.e., acúmulo), além de mensurar a carga no exutório, permite a distribuição espacial dos resultados referentes à dinâmica de geração e transporte de resíduos nos caminhos de fluxo naturais e antropogênicos, bem como a identificação de locais de acumulação de resíduos, ainda que temporária. A modelagem dos resíduos sólidos abrange três principais temas: (1) a geração de resíduos sólidos, que pode ser residencial ou proveniente de estabelecimentos de comércio, serviços, institucionais, entre outros; considera-se um subitem da geração a coleta de resíduos sólidos, pois os montantes coletados serão subtraídos do estoque de resíduos disponível para transporte; (2) o transporte de resíduos sólidos, utilizando como base espacial um grafo em forma de rede de trechos de vias (i.e., ruas, corpos d'água, etc.); (3) o acúmulo de resíduos sólidos, ou seja, os resíduos que não sofreram deslocamentos no modelo de transporte ou que se deslocaram até atingir um ponto baixo da rede (para mais detalhes, vide RIBEIRO, 2017; GIACCOM-RIBEIRO; MENDES, 2018).

Verificação da modelagem: a verificação da modelagem busca determinar se o modelo experimental se comporta de maneira suficientemente satisfatória com relação aos objetivos do estudo, dentro do seu domínio de aplicação, i.e., dentro do conjunto de condições prescritas para as quais o modelo experimental foi testado, comparado com o sistema real e julgado apto para uso. Ou seja, a verificação do modelo consiste na comparação de seu comportamento com o comportamento do sistema real, quando ambos são submetidos às mesmas condições de entrada. Esta verificação pode ser realizada por meio de técnicas subjetivas ou estatísticas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Resolução CONAMA 01/1986 define impacto ambiental como "qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais". Esta mesma Resolução determina então a obrigatoriedade de se realizar um estudo de impacto ambiental (EIA), que é composto, dentre outros, pelo diagnóstico ambiental.

Nesta pesquisa, partiu-se do preceito de que a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos em áreas urbanas afetam diretamente o meio ambiente da bacia hidrográfica, i.e., a ausência ou a ineficiência da gestão e/ou do gerenciamento dos resíduos sólidos podem ser causadores de impactos ambientais negativos, danosos ao meio ambiente e às populações que nele vivem.

Resguardada a importância de se analisar os impactos ambientais decorrentes da má gestão e/ou mau gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, a presente pesquisa não pretende apresentar um estudo de impactos ambientais. O foco aqui está na modelagem socioambiental de resíduos sólidos em áreas urbanas degradadas, que pode, inclusive, fornecer insumos a tal instrumento (i.e., ao EIA). Como modelagem, entende-se *uma* representação proposital e simplificada de algum sistema ou qualquer outro aspecto do mundo real (STARFIELD ET AL., 1990), que auxilia em sua compreensão. A qualificação da modelagem por "socioambiental" deixa explícita a intenção de representar a realidade envolvendo os elementos (ou problemas) sociais em sua relação com os elementos (ou problemas) ambientais.

A modelagem dos **resíduos sólidos gerados** na área de estudo divide-se em duas componentes, relativas aos resíduos residenciais e não-residenciais, em ambos os casos, considerando-se apenas os resíduos e rejeitos coletados por serviço regular (i.e., sem incluir resíduos da construção civil, de saúde, etc.). A estimação da quantidade de resíduos sólidos gerados por pessoas que trabalham em estabelecimentos comerciais, industriais, institucionais, etc., na área de estudo foi realizada de modo a considerar aquele resíduo gerado pelo funcionário no transcorrer de suas atividades normais e que pudesse ser classificado como resíduo sólido urbano.

A modelagem apresenta um resultado final de resíduos sólidos gerados por estabelecimentos não-residenciais de 6,97 toneladas diárias. O mapa da distribuição espacial da geração de resíduos sólidos não-residenciais evidencia a existência de ruas "comerciais" (i.e., não residenciais), onde se localizam a maioria dos estabelecimentos e, consequentemente, onde se concentra a geração de resíduos sólidos não-residenciais (Figura 6). O setor de coleta relativo às "Avenidas" realiza o serviço de coleta duas vezes ao dia para garantir o recolhimento de todo resíduo gerado.

A geração de resíduos sólidos residenciais foi calculada por meio de seis métodos, resultando então em seis cenários de estimação de resíduos sólidos (para mais detalhes metodológicos, vide RIBEIRO, 2017). O Cenário 6 foi desenvolvido com base em Beigl et al. (2008), que se baseia na existência de crianças nos domicílios para cálculo da geração diária de resíduos sólidos *per capita*, inserindo-se uma modificação com relação ao montante diário gerado por bebês entre 0 e 2 anos de idade. O mapa apresentado na Figura 7 corresponde ao resultado obtido pela modelagem no Cenário 6, em que são geradas 21,48 toneladas de resíduos sólidos residenciais diariamente.

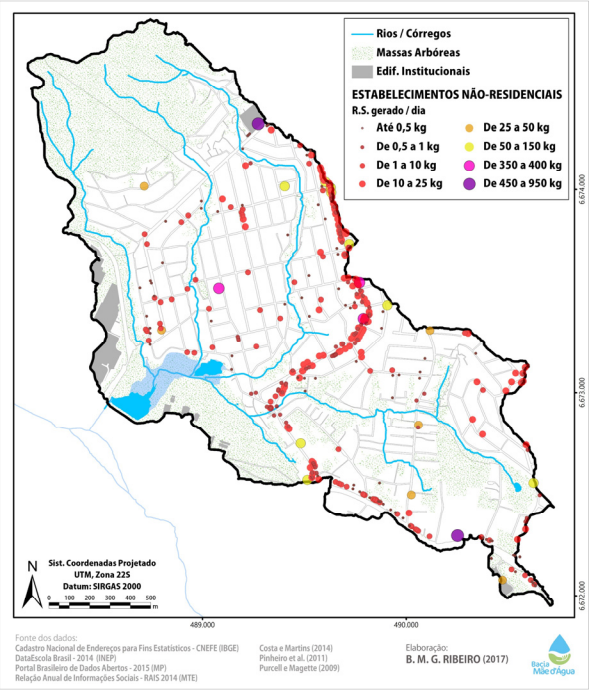


Figura 6 – Mapa da distribuição da geração de resíduos sólidos em estabelecimentos não-residenciais na bacia Mãe d'Água, para o ano de 2014.
Fonte: elaborado pela autora (2017).

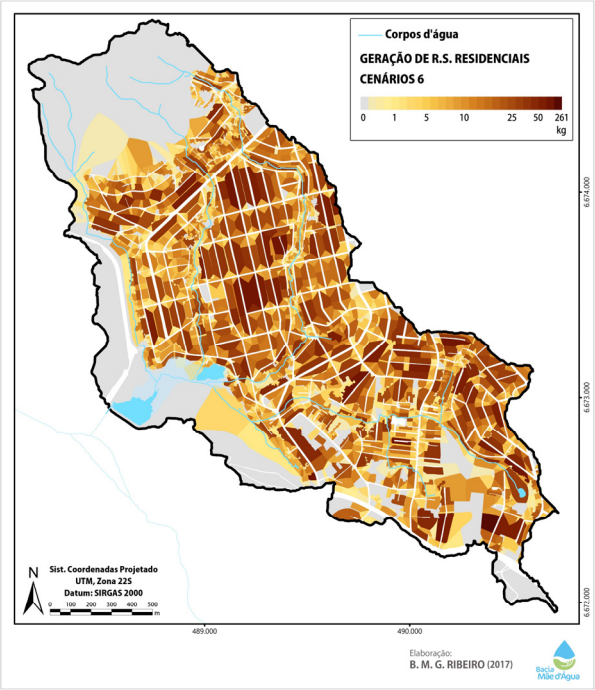


Figura 7 – Mapa da geração de resíduos sólidos residenciais (Cenário 6), na Bacia Mãe d'Água.
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Por meio da Figura 8, ilustram-se os resultados da análise da geração e coleta de resíduos sólidos urbanos na Bacia Mãe d'Água. As ruas com maior presença de comércio são as que mais geram resíduos sólidos (em roxo), seguidas pelas áreas junto aos córregos (em preto e cinza escuro); coincidentemente, essas ruas mais estreitas e irregulares não são atendidas pelo serviço de coleta regular, bem como as ruas à montante na bacia, inclusive na região de nascentes (ruas em vermelho).

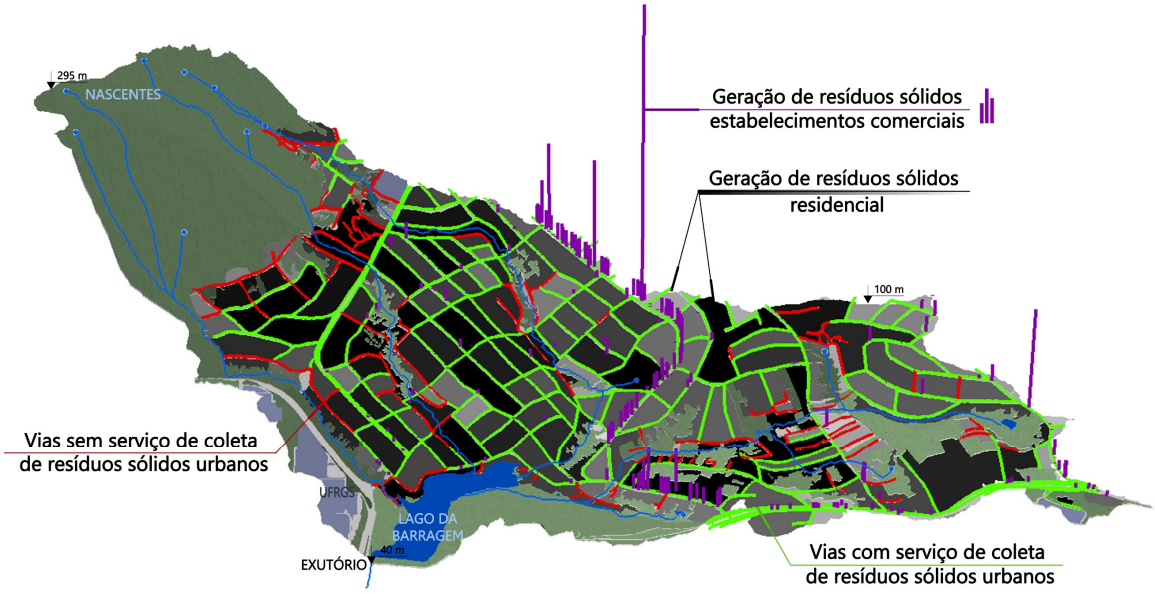


Figura 8 – Geração de resíduos sólidos na Bacia Mãe d'Água × áreas atendidas pelo serviço de coleta de resíduos sólidos urbanos. Mapa em perspectiva com exagero vertical.
Quadras em tons de cinza conforme geração de resíduos sólidos residenciais;
resíduos não-residenciais representados pelas barras verticais roxas; as ruas estão classificadas conforme o atendimento (em verde) pelo serviço de coleta regular de resíduos sólidos.
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Os resíduos sólidos gerados na Bacia Mãe d'Água que não foram recolhidos por serviço de coleta regular compõem o montante de **resíduos disponível para transporte**. Isto inclui os resíduos sólidos que permanecem na área de estudo, sejam dispostos em lixeiras ou lançados em terrenos baldios, ruas ou às margens dos córregos. Estes resíduos sólidos remanescentes podem se deslocar ou permanecer parados. Muitas forças podem agir em prol de seu deslocamento: ação humana ou animal, escoamento devido à gravidade, com ou sem auxílio de chuvas, ou devido a ventos fortes, entre outros. Nesta pesquisa, busca-se avaliar a susceptibilidade ao transporte devido às características do meio físico (e.g., declividade, rugosidade, etc.). Então, foram desconsideradas influências exercidas por outras forças que possam agir influenciando no deslocamento dos resíduos sólidos.

A aplicação do **modelo de transporte** sobre os montantes de resíduos sólidos remanescentes na bacia hidrográfica, utilizando valores de impedância ao movimento, i.e., restrições ao seu deslocamento impostas, por exemplo, devido à rugosidade do caminho por onde os resíduos se deslocam, produz resultados nos quais se observa a acumulação de resíduos ao longo da rede espacial de transporte. O mapa da Figura 9 apresenta o resultado que consiste na utilização do coeficiente de susceptibilidade ao transporte de resíduos sólidos como fator de ponderação do transporte (ou acumulação): a cada *looping* do modelo, parte dos resíduos chegam ao exutório da bacia hidrográfica ou aos pontos baixos (onde se acumulam, sem possibilidade de novos deslocamentos devido à gravidade), parte dos resíduos sólidos se acumulam ao longo dos caminhos da rede.

O balanço de massa da modelagem faz saltar aos olhos a quantidade de **resíduos sólidos acumulados**, i.e., que permanecem no ambiente, causando os mais diversos impactos

ambientais: excluindo-se os resíduos sólidos coletados por serviço de coleta, das 15,7 toneladas de resíduos remanescentes na área de estudo, menos de 0,6% chega, de fato, ao exutório da bacia hidrográfica; 1,8% acumulam-se nos pontos baixos; 11% ao longo dos corpos d'água e 86,5% se acumula nos logradouros, praças e terrenos baldios. O mapa da Figura 10 retrata os resultados de resíduos sólidos acumulados ponderados pelos locais onde se acumulam, i.e., a densidade de massa de resíduos sólidos acumulados, em kg/km².

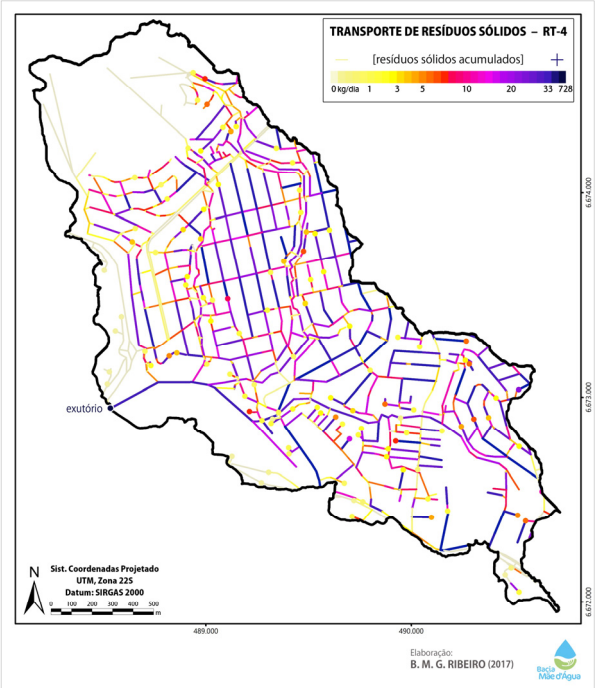


Figura 9 – Mapa do transporte de resíduos sólidos com impedância na Bacia Mãe d'Água – classificação da rede de transporte quanto ao montante de resíduos sólidos acumulados nos trechos e nos pontos baixos, por quantis.
Fonte: elaborado pela autora (2017).

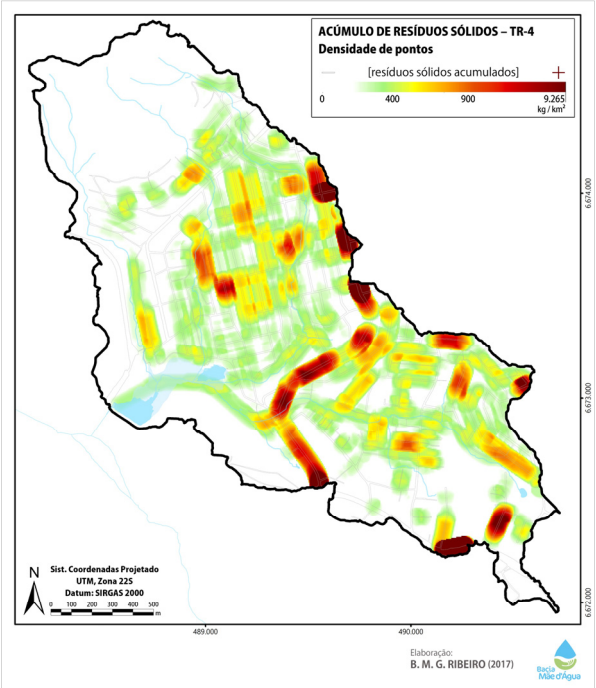


Figura 10 – Mapa de densidade de resíduos sólidos acumulados na Bacia Mãe d'Água – em kg/km² – células de 5 metros e raio de busca de 50 metros.
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Por meio de fotos apresentadas na Figura 11, ilustra-se algumas dessas situações observadas de acúmulo de resíduos sólidos na Bacia Mãe d'Água.

Figura 11 – Fotos de disposição inadequada de resíduos sólidos em locais impróprios para este fim – logradouros (2 e 4), terrenos baldios (3), margens de arroios (1 e 5).
Fonte: arquivo pessoal – fotos tomadas na área de estudo (em junho/2014 e outubro/2016).

A modelagem da **acumulação de resíduos sólidos** pode ser usada de modo prático no planejamento de ações de gerenciamento de resíduos sólidos. O mapeamento permite identificar locais onde se deve intensificar os serviços de coleta e limpeza urbana, bem como indicar locais onde esses serviços devam ser implantados com urgência. Também nesses locais, medidas de curto prazo devem ser tomadas com o objetivo de verificar a possível existência de focos de reprodução de organismos transmissores de doenças infecciosas. O mapa apresentado na Figura 12 ilustra possíveis locais de implantação das intervenções citadas.

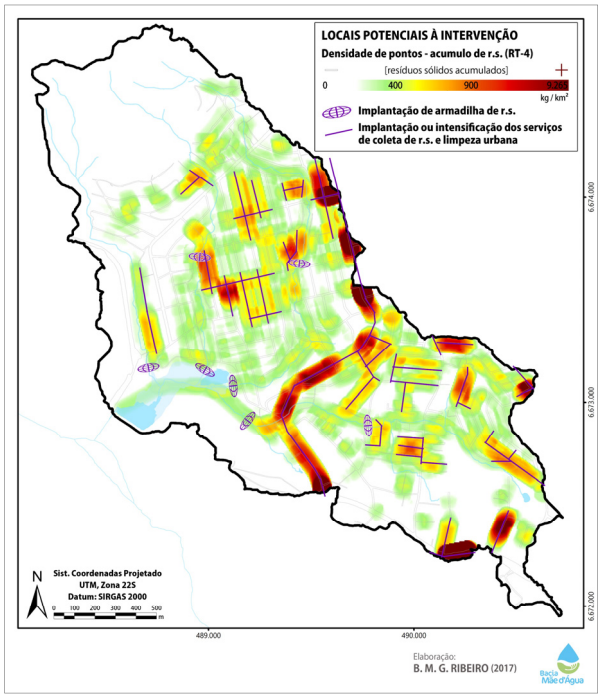


Figura 12 – Mapa de locais potenciais de intervenção para minimização dos problemas ambientais de resíduos sólidos na Bacia Mãe d'Água, por meio de: instalação de armadilhas de resíduos sólidos e intensificação ou implantação de serviço de coleta de resíduos e limpeza urbana.
Fonte: elaborado pela autora (2017).

Figura 13 – Exemplo de rede para captura de resíduos sólidos instaladas em tubos de drenagem de concreto na cidade de Kwinana, na Austrália (março de 2018), com capacidade para cerca de 400 kg de detritos.
Fonte: KWINANA (2018)

A modelagem tem como objetivo primeiro representar uma realidade daquilo que se propõe a modelar, de modo que a finalidade de qualquer modelo é *simplificar* a realidade. Desta forma, mais do que apresentar soluções, uma modelagem como a desta pesquisa, de geração e transporte de resíduos sólidos, busca indicar caminhos.

Diversas são as experiências relatadas na literatura de maneiras de se investigar e propor medidas para o controle dos resíduos sólidos lançados no ambiente. As armadilhas de resíduos sólidos, construídas em escalas operacionais na África do Sul, por exemplo, são demonstrações de que é possível remover "à força" os resíduos do ambiente (e.g., ARMITAGE, 2007). No caso de se adotar medidas estruturais para contenção dos resíduos sólidos que são transportados pelos córregos (e.g., Figura 13), a modelagem pode apontar locais mais adequados para a construção de tais estruturas (i.e., dadas as condicionantes locais de

topografia, tipo de rocha e solo), desde que utilizados dados para sua calibração e validação. De modo mais objetivo, a instalação de armadilhas de resíduos nas fozes dos quatro córregos, já junto à área de inundação do lago da barragem Mãe d'Água, serviria de barreira para que os resíduos sólidos não atingissem o arroio Dilúvio e os demais corpos d'água subsequentes. A implantação de tais estruturas depende de estudos detalhados dos locais passíveis de instalação, bem como avaliação do modelo de armadilha mais indicado. Além disso, a operação de tais estruturas deve acontecer conjuntamente com a remoção de tais resíduos daquele local, e condução para local de disposição final adequada (e.g., aterro sanitário).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs e definiu o "Ciclo Lixológico" no âmbito de uma bacia hidrográfica, construído e analisado a partir da integração de variáveis relativas ao ambiente físico e sua ocupação, às características socioeconômicas da população e às condições da infraestrutura urbana existente.

Estudos e ações, em escala de bacia hidrográfica urbana, para identificação do ciclo de geração, transporte e disposição final dos resíduos sólidos são essenciais para se evitar ou minimizar as destinações indevidas de resíduos e, consequentemente, o comprometimento dos recursos hídricos. A contribuição do presente estudo é fornecer insumos (i.e., informações qualitativas espacializadas) que auxiliem nas etapas iniciais da estratégia de gestão integrada, tornando as propostas e medidas mais adequadas à realidade local; além de servirem como base para melhorias e otimização em termos de metas de sustentabilidade (ambientais, econômicas e sociais).

Adicionalmente à estimativa da carga no exutório da bacia hidrográfica, a modelagem permite a quantificação e espacialização de resultados relativos aos cenários de geração e coleta de resíduos sólidos, à dinâmica de transporte de resíduos nas vias de escoamento naturais e antrópicas, bem como à identificação de locais de acumulação, ainda que temporária, de resíduos sólidos. A modelagem mostra-se operacional e passível de reprodução em outras bacias hidrográficas urbanas, podendo contribuir com as futuras gestões de recursos hídricos e de resíduos sólidos, orientando o planejamento e a implementação de intervenções a curto e longo prazo.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2017*. São Paulo, SP: ABRELPE, 2018. 74 p.

ARMITAGE, N.; ROOSEBOOM, A. The removal of urban litter from stormwater conduits and streams: Paper 1 - The quantities involved and catchment litter management options. *Water SA*, v.26, n.2, 181-187, 2000.

ARMITAGE, N. The reduction of urban litter in the stormwater drains of South Africa. *Urban Water Journal*, v.4, n.3, 151-172, 2007. DOI: 10.1080/15730620701464117.

BEIGL, P.; LEBERSORGER, S.; SALHOFER, S. Modelling municipal solid waste generation: A review. *Waste Management*, v.28, n.1, 200-214, 2008. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.12.011.

BOTELHO, R. G. M. Bacias hidrográficas urbanas. (71-115). In: GUERRA, A. T. S. (org.) *Geomorfologia urbana*. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand Brasil, 2011.

BRASIL. *Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. DOU, S.1 – Atos Poder Legislativo, ano 147, n.147 de 03/08/2010.

BRUSADIN, M. B. *Análise de instrumentos econômicos relativos aos serviços de resíduos sólidos urbanos*. São Carlos, 2003. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra). Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana. São Carlos, SP: UFSCar, 2004.

BUNGE, M. *Epistemology & Methodology III: Philosophy of Science and Technology. Part I: Formal and Physical Sciences*. Dordrecht, Holanda: D. Reidel Publishing Comp., 1985. DOI: 10.1007/978-94-009-5281-2.

BUNGE, M. *La investigación científica - su estrategia y su filosofía*. 2.ed. Barcelona, Espanha: Editora Ariel, 1983. Tradução (para o espanhol): Manuel Sacristán. 983 p.

CALVINO, Í. *As cidades invisíveis*. 2. ed. Tradução: Diogo Mainardi. Título do original: Le città invisibili, 1972. São Paulo, SP: Companhia das Letras, 1990. 152 p.

CAMPANI, D. B. *Indicadores socioambientais como instrumento de gestão na coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos*. Porto Alegre, 2012. 109 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre: UFRGS, 2012.

CAMPANI, D. B.; REICHERT, G. A. Gestão integrada de resíduos sólidos – 16 anos de experiência – o caso de Porto Alegre. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, v.1, n.1, 1-11, 2006.

CIASCA, B. S.; SACCARO JÚNIOR, N. L. *Análise de Instrumentos Econômicos Relativos aos Serviços de Resíduos Sólidos Urbanos. Diagnóstico dos Instrumentos Econômicos e Sistemas de Informação para Gestão de Resíduos Sólidos*. Relatório de Pesquisa. Coord. J. A. MOTA; A. R. ALVAREZ. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2012.

COMMONER, B. *The closing circle. Nature, Man, and Technology*. 2. ed. New York, EUA: Bantam Books, 1972.

COMMONER, B. *Making peace with the planet*. New York, EUA: New Press, 1992.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). *Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986*. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. DOU nº 31, de 17/02/1986, p. 2548-2549.

COSTA, S. L. *Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos. Aspectos jurídicos e ambientais*. Aracaju, SE: Evocati, 2011. 238 p.

FEPAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER. *Sistema Integrado de Informações Institucionais – S3I*. Banco de dados da FEPAM. Porto Alegre, RS: FEPAM, 2014.

GALVÃO, R. G. *Política Nacional de Resíduos Sólidos e a inserção dos catadores: análise crítica à luz da justiça ambiental*. São Paulo, 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo (USP), Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental (PROCAM). São Paulo, SP: USP, 2014.

GEDDES, P. *Cities in evolution: an introduction to the town planning movement and to the study of civics*. Londres: Williams & Norgate, 1915. Disponível em: <https://archive.org/details/citiesinevolutio00gedduoft/page/n9>. Acesso em: 2 de junho de 2014.

GIACCOM RIBEIRO, B. M.; MENDES, C. A. B. Avaliação de parâmetros na estimativa da geração de resíduos sólidos urbanos. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento*, v.7, n.3 422-443, 2018. DOI: 10.3895/rbpd.v7n3.8652.

GIDDENS, A. *A política da Mudança Climática*. Rio de Janeiro, RJ: Jorge Zahar, 2010. 316p.

GUIMARÃES, R. P. Desenvolvimento Sustentável: Proposta Alternativa ou Retórica Neoliberal? *Anais da 3ª Reunião Especial da SBPC – Ecossistemas Costeiros: do Conhecimento à Gestão*. Florianópolis, SC: UFSC/SBPC, 1996.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo Agregados por Setor Censitário*. Revisado em 22/02/2013. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2011. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/Agregados_por_Setores_Censitarios/>. Acesso: 25 de abril de 2013.

KWINANA. *City's Drainage Nets Post Goes Viral*. 3 de agosto de 2018. Revisado em 06/08/2018.Disponível em: <https://www.facebook.com/cityofkwinana/photos/a.162938487108981/1806627536073393/?type=3&theater>. Acesso: 25 de agosto de 2018.

LENZI, L. *A ambiguidade da Tecnologia: da analítica de Mario Bunge à hermenêutica de Lewis Mumford*. Florianópolis, 2013. 149 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Filosofia. Florianópolis, SC: UFSC, 2013.

LU, H.; MORAN, C. J.; PROSSER, I. P. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. *Environmental Modelling & Software*, v.21, n.9, 1297-1308, 2006. DOI: 10.1016/j.envsoft.2005.04.021.

MARAIS, M.; ARMITAGE, N.; WISE, C. The measurement and reduction of urban litter entering stormwater drainage systems: Paper 1 - Quantifying the problem using the city of Cape Town as case study. *Water SA*, v.30, n.4, 469-482, 2004.

McDOUGALL, F. R.; WHITE, P. R.; FRANKE, M.; HANDLE P. *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*. 2. ed. Oxford, Reino Unido: Backwell Publ., 2001. 544 p.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. *Ciclo Hidrológico. Águas Subterrâneas e o Ciclo Hidrológico*. 8 de agosto de 2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>. Acesso: 4 de maio de 2015.

MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F. DE; BRITO; J. C. X. DE; ALMEIDA, T. P. F. DE; MANSUR, G. L. *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. ZVEIBIL, V. Z. (coord. téc.). Rio de Janeiro, RJ: IBAM, 2001. 200 p.

MUCELIN, C. A.; BELLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v.20, n.1, 111-124, 2008.

OLIVEIRA, N. A. DA S. *A percepção dos resíduos sólidos (lixo) de origem domiciliar, no bairro Cajuru-Curitiba-PR: um olhar reflexivo a partir da educação ambiental*. Curitiba, 2006, 173 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná (UFPR), Pós-Graduação em Geografia Setor de Ciências da Terra. Curitiba, PR: UFPR, 2006.

PACHECO, J. B. *Uso e ocupação da terra e a sustentabilidade ambiental da dinâmica fluvial das microbacias hidrográficas Zé Açu e Tracajá na Amazônia Ocidental*. Brasília, 2013. 210 p. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília (UnB), Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS), Programa de Doutorado Interinstitucional em Desenvolvimento Sustentável – (DINTER/UnB), Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Brasília, DF: UnB, 2013.

PEREIRA, S. S.; MELO, J. A. B. DE. Gestão dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande/PB e seus reflexos socioeconômicos. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, Taubaté, v.4, n.4, 193-217, 2008.

REICHERT, G. A. *Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre*. Porto Alegre, 2013. 276 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2013.

RIBEIRO, B. M. G. *Modelagem Socioambiental de Resíduos Sólidos em Áreas Urbanas Degradadas: Aplicação na Bacia Mãe d'Água, Viamão, RS*. Porto Alegre, 2017. 392 p. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional). Universidade Federal Rio Grande do Sul (UFRGS), Faculdade de Arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional (PROPUR). Porto Alegre, RS: UFRGS, 2017. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=001052926&loc=2017&l=a71ecd9213478373>.

STARFIELD, A. M.; SMITH, K. A.; BLELOCH, A. L. *How to model it: Problem solving for the computer age*. New York, EUA: McGraw-Hill Inc., 1990. 206 p.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. New York, EUA: McGraw-Hill, 1993. 978 p.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia, ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2009. 943 p.

TUDOR; D. T.; WILLIAMS, A. T. *Investigation of litter problems in the Severn estuary / Bristol Channel area*. R&D Technical Report E1-082/TR2001. Bath Spa University College. Bristol, Reino Unido: Environment Agency, 2001. 301 p.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, v.65, n.1-2, 209-237, 1983. DOI: 10.1016/0022-1694(83)90217-2.

WHITEHEAD, P. G.; ROBINSON, M. Experimental basin studies: an international and historic perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology*, v.145, n.3-4, 217-230, 1993. DOI: 10.1016/0022-1694(93)90055-E.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting Rainfall-Erosion Losses: Guide to Conservation Planning*. Washington, EUA: United States Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service (ARS), 1978. 61 p.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. *Revista de Administração Pública*, v.27, n.2, p. 5-18, 1993.

ZYGER, I. C. *Um estudo sobre a participação e o conhecimento da comunidade no manejo dos resíduos sólidos no Município de Santa Helena - PR*. Florianópolis, 2012, 147 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Florianópolis, SC: UFSC, 2005.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro à execução deste trabalho sob forma de bolsa de doutorado.