

INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Fluminense

MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FLUXO DE MICROPLÁSTICOS COM BASE NA
ANALOGIA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS: ESTUDO DE CASO DO
MUNICÍPIO DE MACAÉ/RJ

RAFAEL GOUVÊA GUIMARÃES

MACAÉ-RJ

2021

RAFAEL GOUVÊA GUIMARÃES

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FLUXO DE MICROPLÁSTICOS COM BASE NA
ANALOGIA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS: ESTUDO DE CASO DO
MUNICÍPIO DE MACAÉ/RJ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental.

Orientador: Dr. Jader Lugon Junior

Coorientador: Dr. Antônio José da Silva Neto

MACAÉ-RJ

2021

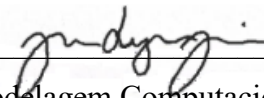
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G963m	<p>Guimarães, Rafael Gouvêa, 1982-.</p> <p>Modelagem computacional do fluxo de microplásticos com base na analogia do transporte de sedimentos coesivos: estudo de caso do município de Macaé/RJ / Rafael Gouvêa Guimarães. — Macaé, RJ, 2021. xiv, 48 f.: il. color.</p> <p>Orientador: Jader Lugon Júnior, 1962-.</p> <p>Coorientador: Antônio José da Silva Neto, 1961-.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2021.</p> <p>Inclui referências.</p> <p>Área de concentração: Sustentabilidade Regional.</p> <p>Linha de Pesquisa: Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental.</p> <p>1. Hidrodinâmica. 2. Plásticos. 3. Transporte de sedimentos – Macaé (RJ). 4. Poluição marinha – Macaé (RJ). 5. MOHID Water Modelling System (software) – modelagem computacional. I. Lugon Júnior, Jader, 1962-, orient. II. Silva Neto, Antônio José da, 1961-, coorient. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 627 (23. ed.)</p>
-------	---


Dissertação intitulada **MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FLUXO DE MICROPLÁSTICOS COM BASE NA ANALOGIA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE MACAÉ/RJ**, elaborada por **Rafael Gouvêa Guimarães** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental.

Aprovado em 17 de novembro de 2021

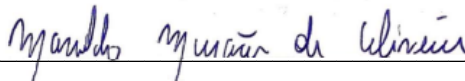
Banca Examinadora:



Jader Lugon Junior, Doutor em Modelagem Computacional / Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



Antônio José da Silva Neto, Doutor em Engenharia Mecânica / North Carolina State University (NCSU), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)



Manildo Marcião de Oliveira, Doutor em Biociências Nucleares / Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



Ramiro Joaquim de Jesus Neves, Doutor em Ciências Aplicadas / Université de Liège, Instituto Superior Técnico (IST)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa e filhas, por serem pilares e fontes de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me fortalecer e me auxiliar durante toda a jornada de aprendizado da vida.

Agradeço de modo especial, à minha esposa Mona Lisa, por me apoiar, me incentivar a sempre ir atrás do meu melhor, me ensinar a cada dia o sentido de família e me mostrar que a busca pela felicidade está nas pequenas atitudes do dia a dia.

Agradeço às minhas filhas, Helena e Luiza, por compartilharem comigo a doçura da infância, e por me ensinar que a percepção de tempo pode ser alterada numa simples brincadeira entre algumas gargalhadas.

Agradeço ao professor Silva Neto, por me ajudar a encontrar caminhos para a concretização deste projeto. Agradeço por cada conversa que sempre deixou uma mensagem de apoio que serviram de alicerce para me fazer acreditar que o sonho poderia se tornar realidade. Obrigado por fazer parte desta caminhada que se cumpre e àquelas que ainda estarão por se iniciar.

Agradeço ao professor Jader por acreditar que este projeto seria possível e por cada momento de dedicação incansável. Obrigado por trazer a luz quando tudo parecia estar perdido e por plantar a semente de continuidade na área de ciências ambientais.

Agradeço aos professores do IFF pela dedicação e apoio durante as fases do curso e também a todos os funcionários que permitiram a fluidez das atividades mesmo em períodos de adversidade.

Agradeço às entidades de fomento CAPES, CNPq e FAPERJ pelo apoio concedido aos grupos de pesquisa no Brasil.

EPIÍGRAFE

“A desgraça jamais o atingirá, e praga nenhuma vai chegar à sua tenda, pois Ele ordenou aos seus anjos que guardem você em seus caminhos.” (Salmo 91)

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1	
Figura 1 – Produção global de plástico a partir de 1950.....	8
Figura 2 – Produção mundial de resinas termoplásticas e de transformados de plástico em 2017.....	9
Figura 3 – Ranking de produtores globais de plástico em 2017.....	10
Figura 4 – Evolução do consumo aparente e índice de reciclagem mecânica de embalagens e equiparáveis do setor plástico.....	10
Figura 5 – Polímeros comuns derivados de óleo cru e gás natural.....	12
Figura 6 – Previsão de plástico e peixes nos oceanos em função do peso.....	13
Figura 7 – Artigos publicados sobre microplástico nos ecossistemas brasileiros.....	14
Figura 8 – Padronização de tamanho para MP.....	15
Figura 9 – Modelo representativo do transporte global de plástico do continente ao oceano..	16
Figura 10 – Estratégia para revisão sistemática.....	17
ARTIGO CIENTÍFICO 2	
Figura 1 – Rede de drenagem formada no terreno digital da área urbana de Macaé.....	33
Figura 2 – Representação esquemática do transporte de sedimentos.....	36
Figura 3 – Ponto de análise na foz do rio Macaé.....	40
Figura 4 – Fluxo de sedimentos a partir de séries históricas de chuva.....	41
Figura 5 – Precipitação implementada para o ano de 2009.....	42
Figura 6 – Precipitação implementada para o ano de 2019.....	42
Figura 7 – Sedimentos de fundo.....	43
Figura 8 – Fluxo de sedimentos.....	43

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1	
Tabela 1 – Resultados da busca no período de 01 de novembro de 2019 à 20 de janeiro de 2020.....	22
ARTIGO CIENTÍFICO 2	
Tabela 1 – Tensão crítica de cisalhamento.....	39
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no modelo.....	39

LISTA DE QUADROS

ARTIGO CIENTÍFICO 1	
Quadro 1 – Sequência de termos de busca.....	18
APÊNDICE	
Quadro 1 – Dados populacionais da cidade de Macaé.....	49
Quadro 2 – Resultado do cálculo da quantidade de MP que entra na bacia por ano.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico
- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CBH - Comitê de Bacias Hidrográficas
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- FAPERJ - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IFFluminense – Instituto Federal Fluminense
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE - Instituto nacional de Pesquisas Espaciais
- MOHID - Water Modelling System
- MP - Microplástico
- NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
- NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*
- OpenFlows FLOOD – Software de Modelagem de Inundação Integrado
- PP - Polipropileno
- PTFE - Politetrafluoretileno
- PET - Politereftalato de etileno
- PVC - Policloreto de vinila
- SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
- UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FLUXO DE MICROPLÁSTICOS COM BASE NA ANALOGIA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS: ESTUDO DE CASO DO MUNICÍPIO DE MACAÉ/RJ

RESUMO

Os plásticos representam um marco evolutivo na história humana e do planeta, pois o mesmo material que está presente nos grandes avanços tecnológicos da sociedade, também promove problemas significativos ao ambiente. Atualmente os plásticos são considerados o material mais utilizado e versátil da idade moderna, com aumento vertiginoso de produção para atender a demanda do mercado. É notável o avanço global da poluição marinha, e de modo especial a poluição por plásticos, que é consequência dos elevados índices produção e o consumo deste commodity. Debaxo do guarda-chuva do lixo plástico encontram-se os microplásticos, que tomaram lugar de destaque nos campos de estudos científicos, visto que o potencial de impacto ao ambiente é extremamente relevante e preocupante. Desta maneira torna-se importante saber a quantidade de plástico que entram nos rios, entender processos de degradação mecânica que reduzem o plástico ao nível micro e conhecer o comportamento de trajetórias do microplástico no mar. Neste trabalho é apresentada uma metodologia para busca de artigos científicos e promove a contribuição bibliográfica sobre o tema do transporte de microplástico do continente para o oceano. Também é apresentado o comportamento da concentração deste material, modelo matemático para associação do microplástico ao transporte de sedimentos coesivos, método de cálculo analítico da produção per capita de microplástico, e análise da tensão de cisalhamento de erosão e deposição de sedimentos na rede de drenagem da cidade de Macaé.

Palavras-chave: Microplástico. Modelagem Hidrodinâmica. Transporte de poluentes.

**COMPUTATIONAL MODELLING OF MICROPLASTICS FLOW BASED ON THE ANALOGY
OF COHESIVE SEDIMENTS TRANSPORT: CASE STUDY OF MACAÉ / RJ**

ABSTRACT

Plastics represent an evolutionary milestone in human and planet history, as the same material that is present in the great technological advances of society, also promotes significant problems to the environment. Currently, plastics are considered the most used and versatile material of the modern age, with a dramatic increase in production to meet market demand. The global advance of marine pollution is remarkable, and in particular pollution by plastics, which is a consequence of the high levels of production and consumption of this commodity. Under the umbrella of plastic waste are microplastics, which have taken a prominent place in the fields of scientific studies, as the potential impact on the environment is extremely relevant and worrisome. Thus, it is important to know the amount of plastic that enters rivers, understand processes of mechanical degradation that reduce plastic to the micro level and know the behavior of microplastic trajectories in the sea. This work presents a methodology to search for scientific articles and promotes the bibliographical contribution on the theme of microplastic transport from the continent to the ocean. The behavior of the concentration of this material is also presented, a mathematical model for the association of microplastic with the transport of cohesive sediments, a method of analytical calculation of the per capita production of microplastic, and analysis of the erosion shear stress and sediment deposition in the drainage network of the city of Macae.

Keywords: *Microplastic. Hydrodynamic Modeling. Transport of pollutants.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE QUADROS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	ix
RESUMO.....	x
<i>ABSTRACT</i>	xi
APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	1
ARTIGO CIENTÍFICO 1: REVISÃO SISTEMÁTICA DO TRANSPORTE DE MICROPLÁSTICO DO CONTINENTE PARA O OCEANO.....	6
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REVISÃO TEÓRICA.....	11
3. MATERIAL E MÉTODO.....	16
3.1. Definição da pergunta científica.....	17
3.2. A busca da evidência científica.....	17
3.3. Critério de seleção.....	19
3.3.1. Seleção dos artigos científicos.....	19
3.3.2. Análise dos artigos científicos.....	19
3.3.3. Fluxograma da iteração de busca.....	19
4. RESULTADOS.....	20
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
6. REFERÊNCIAS	23
ARTIGO CIENTÍFICO 2: MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS COM BASE NA ANALOGIA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS - ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE MACAÉ/RJ.....	29
1. INTRODUÇÃO.....	31
2. METODOLOGIA.....	32
2.1. Área de estudo e terreno digital.....	32
2.2. Modelagem Computacional.....	33
2.3. Analogia do transporte de sedimentos coesivos com o fluxo de MP.....	35
2.4. Entrada de MP na bacia hidrográfica.....	37
2.5. Condições iniciais e de contorno.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40

5. CONCLUSÃO.....	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO	48
APÊNDICE.....	49

APRESENTAÇÃO

O padrão de consumo mundial tem sido o pilar estrutural econômico dos países globalizados. Pautadas no crescimento da produção, as economias dos países ricos e pobres, se relacionam e equacionam uma complexa teia comercial. Nesta relação produtiva os processos industriais afetam o meio físico e o ambiente, algumas vezes de forma irreversível, iniciando um processo de desequilíbrio natural que retorna negativamente ao sistema.

Atualmente os economistas aceitam questões ambientais no balanceamento das questões econômicas, que são consideradas como um sistema aberto capaz de receber, transformar e liberar matéria e energia. Assim, pode-se dizer que estes sistemas obedecem a Segunda Lei da Termodinâmica uma vez que os processos produtivos dissipam energia, e transformam parte dela em energia mecânica, ou trabalho.

Sendo a energia dissipada irreversível ao sistema, quanto maior a produção, maior será a degradação. Dado que o consumo impulsiona a produção em escala exponencial, o meio ambiente é diretamente impactado, visto que não é uma fonte inesgotável de recursos. De fato, os sistemas econômicos exercem duplo impacto ao ambiente, seja consumindo recursos naturais, ou devolvendo material degradado para a natureza.

O consumo de combustível fóssil é um exemplo de fonte natural limitada, onde a exploração demanda alta capacidade tecnológica, possui alto consumo de energia e ao final do ciclo de vida de seus subprodutos há a presença de materiais degradados que causam impacto à natureza. É inevitável o impacto ambiental na produção deste *commoditie*, porém atualmente sua utilização é vital para o funcionamento da sociedade humana. Além da produção de combustíveis, subprodutos como os plásticos, são feitos a partir deste recurso natural, onde são produzidos através de processos de polimerização ou policondensação.

A descoberta do plástico foi um marco na história da humanidade, e é utilizado em praticamente todos os setores produtivos. No Brasil esta indústria começou a se estruturar no início dos anos 70, e vem apresentando crescimento exponencial e números expressivos de produção em transformados de plástico.

Do início dos anos 2000 até o ano de 2010 a indústria nacional do plástico saiu de uma produção de 3.888 mil toneladas de transformados para 5.920 mil toneladas, o que representou um salto de faturamento de 18,28 bilhões de reais para 44,15 bilhões de reais. No ano de 2020 o Brasil produziu 8,2 milhões de toneladas de resina termoplástica e 7,1 milhões de toneladas de transformados de plástico. A reciclagem foi de 838,5 mil toneladas, que representa cerca de 24% da produção. O faturamento deste período foi de 91,6 bilhões de reais, confirmando o crescimento vertiginoso deste setor. (ABIPLAST, 2021)

O reaproveitamento deste material possui baixos incentivos devido à perda de propriedades durante o processo de reciclagem, fazendo com que não possam ser utilizados em sua função original. Com isso, a maior parte da produção acaba sendo descartada, muitas vezes de maneira inadequada, tornando-se uma fonte

poluidora. Os custos para a produção do petróleo vêm caindo há alguns anos, o que potencializa a utilização de matéria prima virgem e inibe a reciclagem, que não consegue promover competitividade de mercado. Apesar dos esforços, os transformadores de plástico não possuem o desenvolvimento necessário para a gestão do ciclo de vida de seus produtos.

O plástico, em sua maioria, é utilizado na fabricação de produtos descartáveis que possuem ciclo de vida menor do que 3 anos, onde o mercado de embalagens, construção civil e automobilísticos lideram este consumo. O mundo não está equipado para um descarte adequado que é embalado por altas taxas de consumo.

A gestão de resíduos sólidos também é um desafio uma vez que sua ineficiência gera impacto direto no reaproveitamento deste material. Dentre os sistemas de gestão mais utilizados no planeta encontram-se os aterros, a incineração e o despejo. Estas técnicas não eliminam os danos causados à natureza pois resultam em grandes períodos de tempo para a degradação do material ou na emissão de dióxido de carbono para a atmosfera. O resultado final desta combinação de fatores é a presença de plásticos em todos os biomas do planeta.

Pesquisas apontam o plástico como um poluidor persistente, capaz de permanecer centenas de anos no ambiente, apenas alterando a forma de apresentação. Este material pode se degradar ao nível micro e continuar propagando a cadeia de danos ao ambiente.

Os microplásticos (MPs), são poluentes formados de fragmentos de tamanho $\leq 1\text{mm}$, que são classificados a partir do tipo de obtenção. Há o grupo dos MPs primários, produzidos neste tamanho como produto final, e são encontrados virgem, na forma de pelotas. O outro grupo, chamado de MPs secundários, são formados pela fragmentação do plástico macro, seja por processos mecânicos ou pela degradação natural deste material.

A comunidade acadêmica tem trabalhado em pesquisas que visam amenizar este impacto e desde o ano 1960 surgiram pesquisas sobre este assunto, sendo intensificadas a partir de 2017. O grupo de pesquisa liderado pelos orientadores deste trabalho desenvolvem modelos computacionais para análise de poluentes em corpos hídricos há mais de uma década. De modo particular, em aderência ao tema desta pesquisa, destacam-se os projetos FAPERJ FCT 2019 – AIR CENTRE, intitulado “Desenvolvimento de Modelos Computacionais para Avaliação dos Processos de Interação e Transporte de Poluentes no Sistema Marinho”, e o Programa CAPES – FCT, edital nº 22/2019 intitulado “Modelagem Computacional e Experimentação Aplicadas ao Estudo da Dinâmica de Microplásticos no Ambiente Marinho - Desenvolvimento, Implementação, Calibração e Validação. Nestes projetos são desenvolvidos modelos computacionais aplicados ao estudo da dinâmica de microplásticos no ambiente marinho”.

Os projetos desenvolvidos contam com coordenação no Brasil com a Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e o Instituto Federal Fluminense (IFF), e em Portugal, com participação do IMAR constituído por pesquisadores da Universidade dos Açores e a MARETEC no Instituto Superior Técnico na Universidade de Lisboa.

Apesar do crescente interesse da comunidade científica, as pesquisas ainda são dispersas e estão concentradas em pequenos grupos com pouca interação entre si. Não há consenso sobre as questões que envolvem esta temática e ainda requer padronização de coletas, definições sobre as classificações de MPs e respostas referentes ao dano causado à biota e aos seres humanos (COLE et al., 2011).

A fim de sistematizar a busca de informações e aumentar o conhecimento sobre os MPs, foi publicado o Artigo 1, onde foi realizada uma revisão sistemática da literatura. A publicação foi feita no Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, que é uma revista eletrônica de acesso livre com a finalidade de contribuir com o processo de tomada de decisão no campo ambiental. Os artigos são revisados por pares e são indexados em bases de dados científicas, bem como no Portal de Periódicos CAPES.

O viés na pesquisa é indesejável, a revisão sistemática atua para isenção deste fator. A metodologia é auditável, planejada e reprodutível, por este motivo torna-se um resultado além de uma coletânea de trabalhos científicos. O método utilizado na pesquisa é conhecido como *Framework Synthesis*, ou na tradução Síntese da Estrutura. Este método proporciona aos pesquisadores o desenvolvimento de teorias, e o conhecimento é gradualmente formado de maneira robusta. A partir de conceitos iniciais pré-determinados, este tipo de pesquisa exploratória atinge uma quantidade relevante de artigos.

O sucesso da revisão sistemática utilizando o método *Framework Synthesis* depende de uma construção coerente da pergunta científica e da trajetória de busca. Outro fator importante é o processo iterativo de buscas que permite aos pesquisadores agregar valor e dados relevantes.

O Artigo 1 contribui com resultado qualitativo sobre o transporte de MP em redes de drenagem respondendo à pergunta: Quanto de MP é transportado do continente para as águas fluviais e posteriormente para o oceano? O resultado final apresentou 67 artigos diretamente ligados ao tema desta pesquisa, selecionados a partir de um total de 7.417 artigos. Neste artigo foi proposta uma metodologia de indicadores de sensibilidade e precisão, onde foi possível observar que apesar da grande quantidade de artigos ligados ao tema do MPs, o aproveitamento em relação ao tema do transporte deste material em resposta à pergunta científica foi baixo.

Observando a trajetória de busca específica para modelagem, associada ao transporte de MP, o aproveitamento foi de 26 artigos, evidenciando a necessidade e relevância de trabalhos que atuem na construção de modelos computacionais.

A produção de modelos envolve os conceitos, as equações, os algoritmos e os softwares. A aplicação depende de dados que são pautados nos parâmetros condições iniciais, condições de contorno e validação.

A modelagem ambiental de corpos hídricos é baseada no conceito dos volumes de controle aplicados a uma grade onde os modelos computacionais respeitam princípios de conservação. Neste princípio a taxa de acumulação no interior do volume de controle é igual ao que entra menos o que sai, mais o que se produz menos o que se consome.

Neste trabalho as equações diferenciais foram discretizadas utilizando o método dos volumes finitos e implementadas em algoritmos na plataforma MOHID Land. O MOHID é um modelo modular uma vez que a produção e consumo são processos que podem ser aditivados à estrutura do programa.

O MOHID Land foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Técnica de Lisboa utilizando Fortran 95, e permite a simulação de diferentes fenômenos que ocorrem com a água através do ciclo hidrológico. Este módulo simula de forma integrada o escoamento superficial e a rede de drenagem, onde a integração dos diferentes processos é calculada de forma dinâmica através de gradientes hidráulicos que podem ser simulados combinados ou independentes. A precipitação atua com variações temporal e espacial, o escoamento superficial utiliza a equação de Manning, a drenagem utiliza as equações de onda de St. Venant.

De maneira geral não são conhecidos, e tão pouco modelados, os processos de interação entre o MP e outros poluentes encontrados nos corpos hídricos. As pesquisas globais ainda se limitam a entender a frequência da ocorrência de MP e o entendimento de processos intermediários.

A modelagem ambiental é conceitual, e está baseada na analogia entre o fluxo de sedimentos coesivos e os MPs. Há tipos de plásticos que possuem densidade maior do que da água, conseqüentemente as partículas de MP tendem a se depositar por efeito da gravidade, analogamente os sedimentos coesivos também se depositam da mesma forma. O comportamento mecânico deste tipo de sedimento está relacionado à distribuição granulométrica e composição, o que também pode ser considerado quanto a degradação do MP. Por fim, os estudos teóricos de sedimentos são determinados por um ou dois fatores relevantes, tais como, descarga de água, velocidade de fluxo, energia potencial e tensão de cisalhamento, que são módulos encontrados na plataforma MOHID.

O trabalho apresentado no Artigo 2 aborda a analogia baseada no transporte de sedimentos a fim de avaliar a distribuição de MP na cidade de Macaé. O artigo foi apresentado no XXIV Encontro de Modelagem Computacional dentro do Simpósio de Modelagem Ambiental, que contou com palestras de pesquisadores internacionais, bem como discussões técnicas com especialistas no assunto.

O artigo considerou um terreno digital que abrange exclusivamente a parte urbana da cidade, que está completamente inserida na região de baixo curso do rio. Foram avaliados a entrada de MP para os anos de 2009 e 2019, desconsiderando a entrada de MP através da fronteira da rede de drenagem. A fim de representar materiais com diferentes densidades, sob regime de chuva constante, foram implementados valores de incremento da tensão de cisalhamento de deposição e erosão. A partir da precipitação constante para os anos de 2009 e 2019, e séries históricas, foi avaliado o MP primário que é descarregado diretamente na rede de drenagem, e MP secundário que está depositado no solo da cidade e é erodido com a velocidade da correnteza formada pela água da chuva.

Os resultados apresentaram o comportamento qualitativo de MPs durante processos de erosão e deposição. A analogia apresentada representou um comportamento esperado para o transporte de sedimentos, ainda que a descarga representativa esteja de acordo com o consumo de plástico *per capita*.

A continuidade deste trabalho está em curso para realizar a avaliação de outras propriedades dos transportes de MP em analogia com o transporte de sedimentos, visto que um modelo é passível de falha quando as propriedades dentro do volume de controle não são uniformes. Análises adicionais estão sendo implementadas com a finalidade de avaliar mais detalhadamente as velocidades de fluxo e energia potencial.

A calibração do modelo através da coleta de MP nos pontos que o modelo indicou maior incidência deste material é uma das perspectivas futuras. Outra perspectiva de trabalho é a implementação do módulo específico para os MPs na plataforma MOHID, a partir do aperfeiçoamento do módulo de transporte Lagrangiano.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

REVISÃO SISTEMÁTICA DO TRANSPORTE DE MICROPLÁSTICO DO CONTINENTE PARA O OCEANO

SYSTEMATIC REVIEW OF MICROPLASTIC TRANSPORT FLOW FROM LAND TO OCEAN

Rafael Gouvêa Guimarães - IFFluminense/PPEA

Jader Lugon Junior - IFFluminense/PPEA

Antônio José da Silva Neto - UERJ/IPRJ

RESUMO

O perfil de consumo e a destinação final de produtos que contenham plástico demonstram claramente padrões de consumo de uma economia globalizada pautada no crescimento de produção como alicerce econômico. Ao longo da história a cultura mundial não agregou aos plásticos metodologias de ciclo de vida e produção circular que vislumbrem reuso, a reciclagem e formas de descarte deste material. É imprescindível à sociedade criar sistemas para gerenciar o ciclo de produção, consumo e destinação final adequado de plásticos. A estimativa de crescimento produtivo não se alinha com o crescimento significativo de reciclagem, fator que contribui para o descarte e conseqüentemente aumenta a quantidade de resíduos que serão lançados nos oceanos. Desta maneira torna-se importante saber a quantidade de plástico que entram nos rios e são transportadas para o mar, como ocorre o transporte no globo e como são os processos de degradação e quais os impactos causados à natureza. A revisão da literatura é um passo fundamental para pesquisa e formação do conhecimento científico. Através da revisão sistemática é possível explicitar, planejar, justificar e atualizar questões relevantes do foco da pesquisa. Neste trabalho é apresentado uma metodologia para busca de artigos científicos e promove a contribuição bibliográfica sobre do tema do transporte de microplástico do continente para o oceano.

Palavras chave: Microplástico. Revisão sistemática. Fluxo de material. Poluição oceânica.

ABSTRACT

The consumption profile and the final destination of products that contain plastic clearly demonstrate consumption patterns of a globalized economy based on the growth of production as an economic foundation. Throughout history, world culture has not added to plastics life cycle methodologies and circular production that is focus on reuse, recycling and ways of disposing of this material. It is essential for society to create systems to manage the production, consumption and final destination cycle of plastics. The estimative of productive growth does not align with the significant growth in recycling, a factor that contributes to disposal and consequently increases the amount of waste that will be released into the oceans. In this way, it is important to know the amount of plastic that enter rivers and are transported to the sea, how transport happens on the globe and how the degradation processes are and what impacts are caused to nature. Literature review is a fundamental step for research and formation of scientific knowledge. Through the systematic review, it is possible to explain, plan, justify and update relevant issues of the research focus. This work presents a methodology for searching for scientific articles and promotes the bibliographic contribution on the topic of microplastic transport from the continent to the ocean.

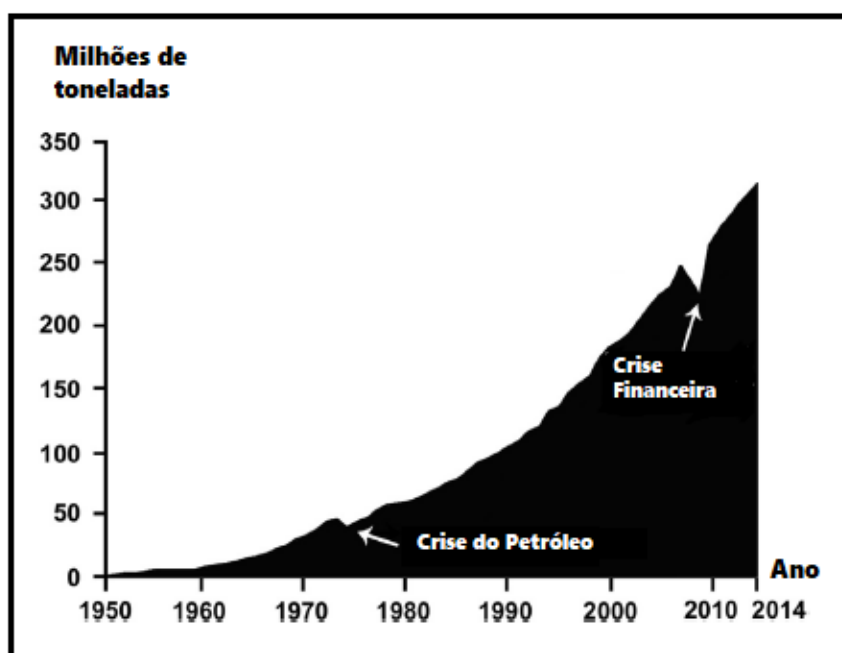
Keywords: *Microplastic. Systematic review. Material flow. Ocean pollution.*

1. INTRODUÇÃO

Os plásticos representam um marco evolutivo na história humana e do planeta, pois o mesmo material que está presente nos grandes avanços tecnológicos da sociedade, também promove problemas significativos ao ambiente. Atualmente os plásticos são considerados o material mais utilizado e versátil da idade moderna, com aumento vertiginoso de produção para atender a demanda do mercado.

O anuário de produção de plástico de 1950 apontou uma produção mundial de 1,5 milhões de toneladas, e apesar de crises, como a do petróleo de 1973 e a financeira de 2007, a marca de produção em 2009 foi de 250 milhões de toneladas. Historicamente o crescimento de produção gira em torno de 9% ao ano, contudo, em 2014 a taxa de produção atingiu 311 milhões de toneladas. Este número representou um aumento de 25% na produção em 5 anos, enquanto que em 65 anos o crescimento observado foi de 20%. O crescimento exponencial está ilustrado na figura 1, que apresenta a produção global de plástico a partir de 1950. (CRAWFORD; QUINN, 2017)

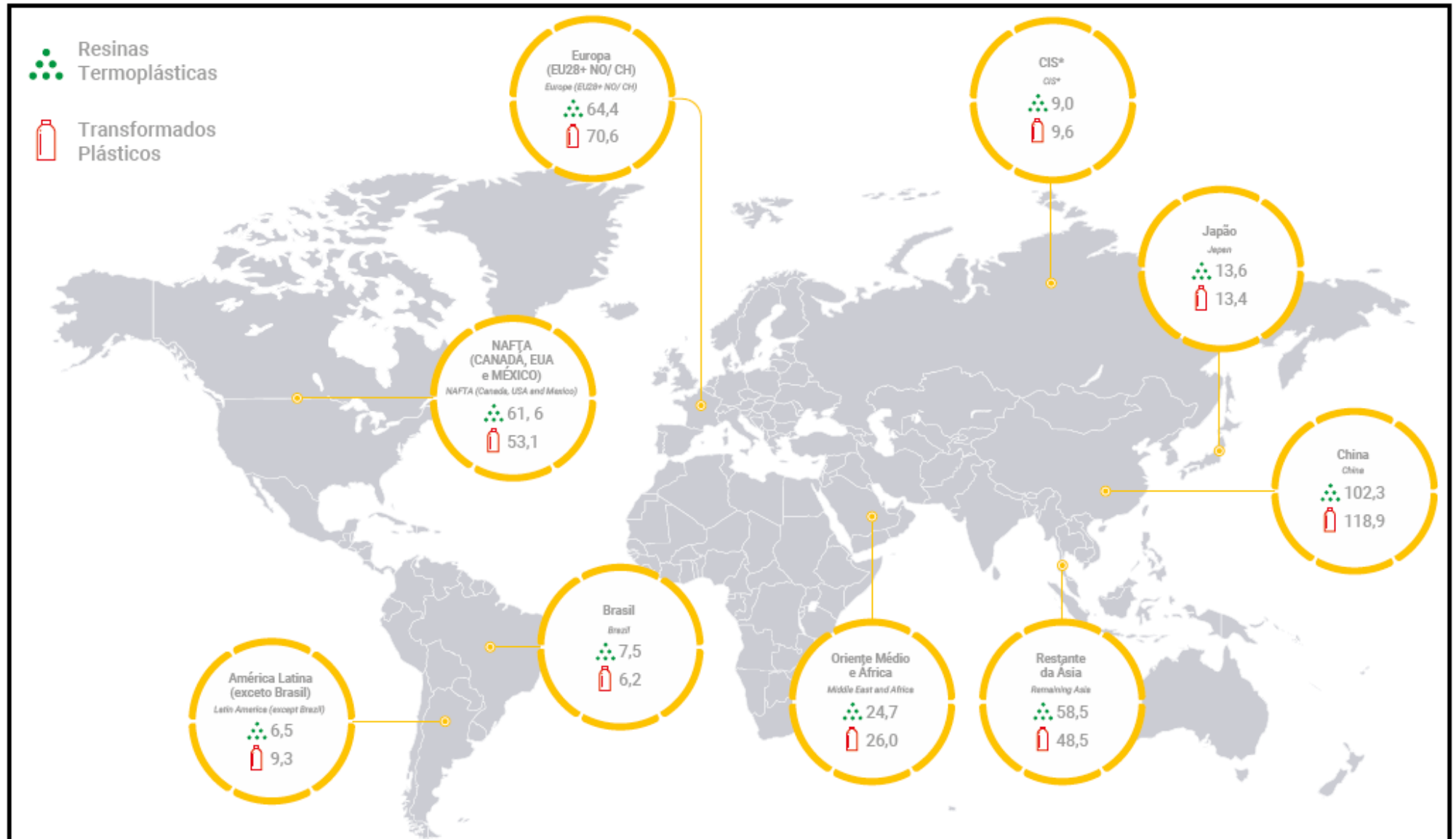
Figura 1: Produção global de plástico a partir de 1950



Fonte: Adaptado de (CRAWFORD; QUINN, 2017)

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico, Abiplast, em 2017 a produção nacional foi de 7,5 milhões de toneladas de resina termoplástica e 6,2 milhões de plásticos transformados. Com uma crescente produção nacional, a projeção é que seja atingido valores de 7 milhões de toneladas de produção de transformados de plástico e consumo de 8 milhões de toneladas até 2023. Estes dados podem ser comparados com a produção mundial mostrada na figura 2. (ABIPLAST, 2018).

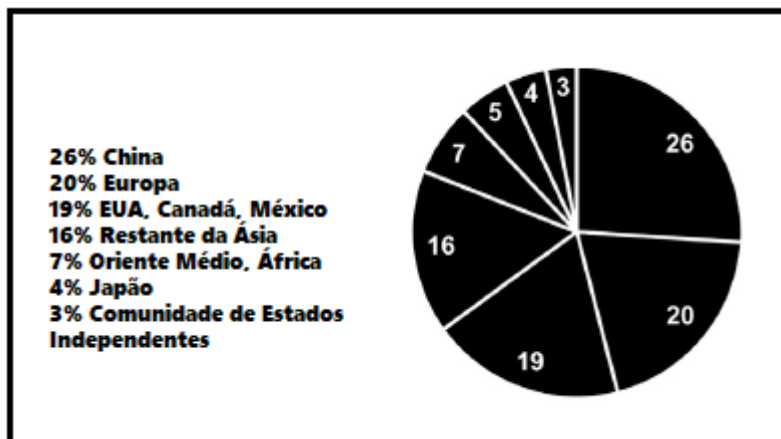
Figura 2: Produção mundial de resinas termoplásticas e de transformados de plástico em 2017



Fonte: Adaptado de Abiplast, 2018

No topo do ranking de produtores globais de plástico encontra-se a China com 26%, seguido da Europa e os Estados Unidos com 20% e 19% respectivamente. Na Europa, apenas cinco países somam 63,9% da demanda de plástico no continente, sendo a Alemanha com 24,9%, a Itália com 14,3%, a França com 9,6%, o Reino Unido com 7,7% e a Espanha com 7,4% conforme apresentado na figura 3. (CRAWFORD; QUINN, 2017)

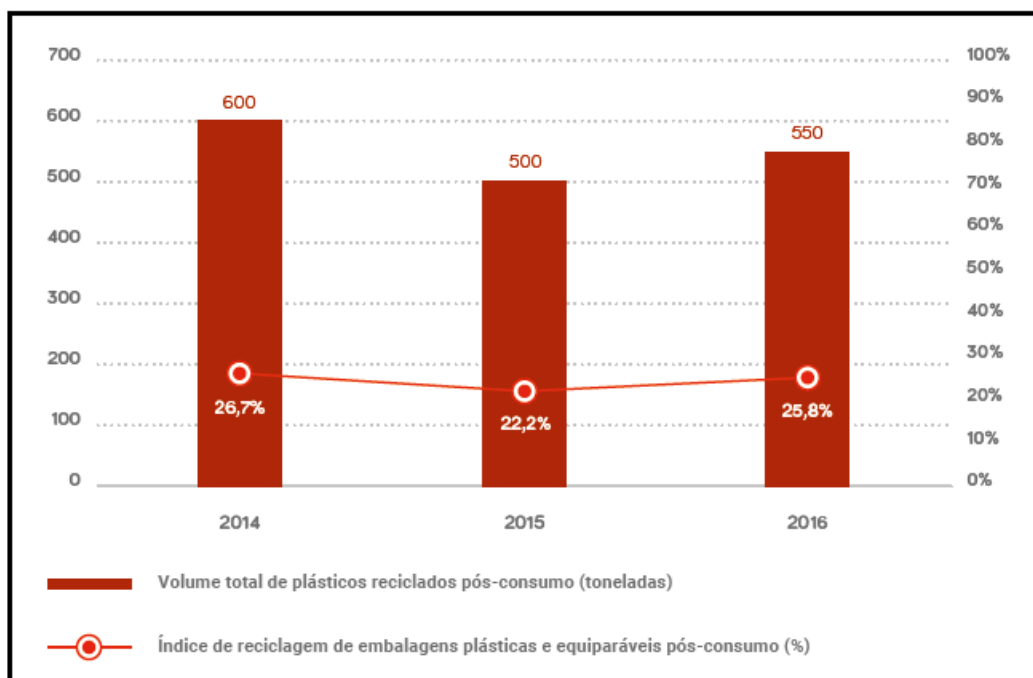
Figura 3: Ranking de produtores globais de plástico em 2017



Fonte: Adaptado de (CRAWFORD; QUINN, 2017)

Ainda que a produção brasileira não esteja nos mesmos patamares dos padrões mundiais, a quantidade de plástico descartada é bastante expressiva frente a quantidade de plástico reciclado no país, onde o índice de reciclagem mecânica não ultrapassa os 27% da produção, como mostrado na figura 4.

Figura 4: Evolução do consumo aparente e índice de reciclagem mecânica de embalagens e equiparáveis do setor plástico



Fonte: Adaptado de Abiplast, 2018

O perfil de consumo, e a destinação final de produtos que contenham plástico, demonstram claramente padrões de consumo de uma economia globalizada pautada no crescimento de produção como alicerce econômico. Ao longo da história a cultura mundial não agregou aos plásticos metodologias de ciclo de vida e produção circular que vislumbrem reuso, a reciclagem e formas de descarte deste material. É imprescindível à sociedade criar sistemas para gerenciar o ciclo de produção, consumo e destinação final adequado de plásticos. Também é importante conhecer as formas de transporte no globo terrestre e as interações com o ambiente, para que soluções sejam propostas adequadamente.

2. REVISÃO TEÓRICA

Plástico é um termo genérico utilizado para descrever substâncias que podem ser moldadas ou conformadas, e que representa uma grande variedade de materiais. De maneira geral, utilizamos este termo no dia-a-dia sem nos importarmos com o tipo de plástico a que estamos nos referindo, contudo existem diferentes tipos para diferentes aplicações. Todos os plásticos possuem algo em comum, pois são compostos com grandes cadeias poliméricas, denominadas macromoléculas. Cada molécula da cadeia polimérica é considerada uma unidade singular chamada de monômero. O processo de conexão que mantém os monômeros agrupados é chamado de polimerização e pode ser observado na figura 7. (CRAWFORD; QUINN, 2017)

Possuem sua composição diversificada em função da aplicabilidade nos diferentes setores industriais (construção civil, higiene, vestuário, automóveis, etc). Os principais constituintes, que se destacam a nível mundial, são o polietileno (PE), o polietileno de alta densidade (HDPE), o polietileno de baixa densidade (LDPE), o polipropileno (PP), o polietileno tereftalato (PET), o policloreto de vinila (PVC) e o poliestireno (PS). As propriedades desses compostos, principalmente em relação a sua densidade, influenciam a distribuição e destino final no ambiente aquático. (ZHANG, 2017)

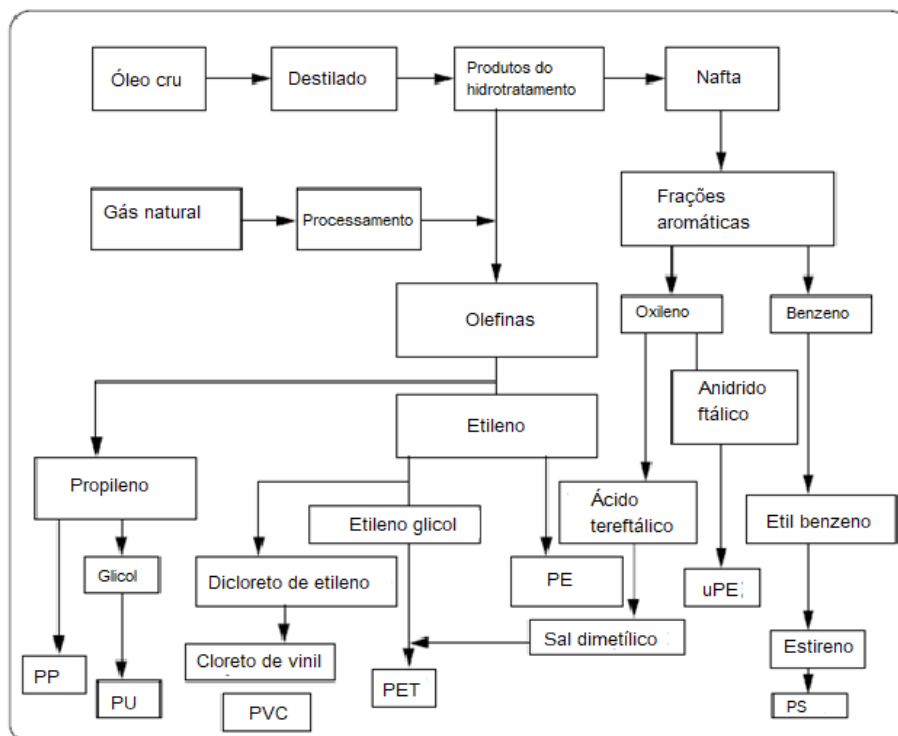
Um diagrama simplificado com as possíveis rotas para plásticos comuns é mostrado na figura 5. Qualquer material polimérico apresenta alterações quando exposto ao ambiente. As perdas de propriedades mecânicas como alongamento, resistência a tensão e impacto, que são importantes para as aplicações deste material, ficam seriamente afetadas. A degradação nos plásticos implica na perda de propriedades úteis seguido de alteração química. (ANDRADY, 2011)

Uma vez que os plásticos entram nos oceanos vários fatores começam a ter efeitos na degradação. Como os plásticos são materiais com grandes cadeias de moléculas a degradação pode ser definida como o processo que resulta na quebra de cadeias longas em cadeias menores, com peso molecular menor que consiste a apenas alguns monômeros. (CRAWFORD; QUINN, 2017)

A radiação ultravioleta tem papel fundamental no processo de degradação nos oceanos, visto que pode ser rapidamente absorvida pela água, no entanto, são atribuídos diferentes graus a estes processos, dependendo

dos aditivos inseridos nos processos de fabricação, o tipo do polímero e a temperatura do ambiente. (BERGMANN et al., 2015)

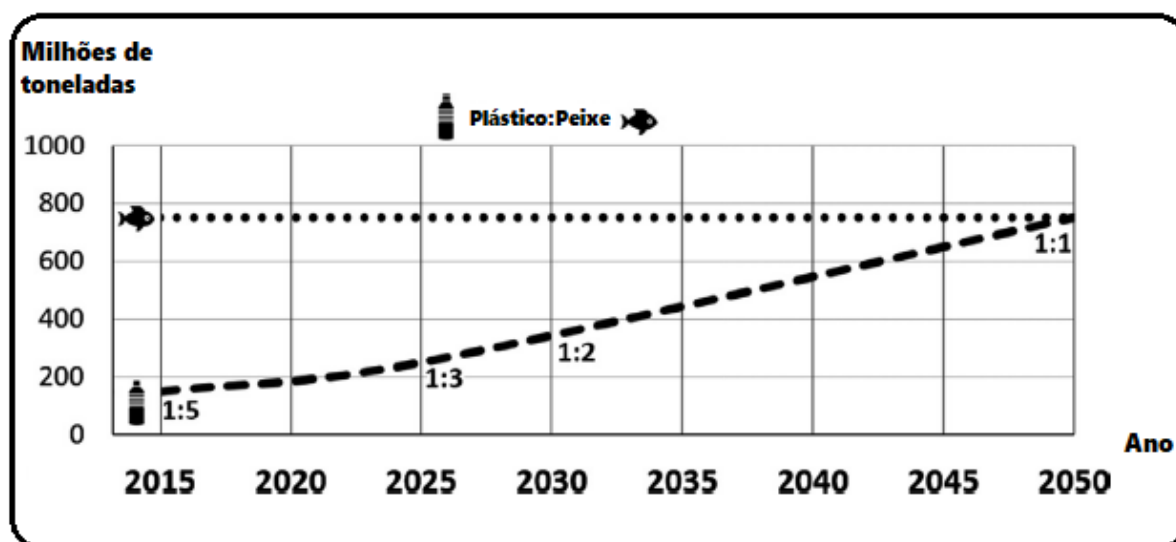
Figura 5: Polímeros comuns derivados de óleo cru e gás natural.



Fonte: Adaptado de (ANDRADY, 2003)

Devido aos altos custos envolvidos, que chega a cerca de 20% de custos de manufatura, no ano de 2017 foram reciclados em torno de 17% de todo plástico produzido no mundo, enquanto que a reciclagem de alumínio e papel representaram aproximadamente 69% e 60% respectivamente. O ciclo de reciclagem deste material gira em torno de três vezes, isso devido ao fato de que os processos de fusão e remodelagem diminuem as propriedades mecânicas do material. Com as propriedades mecânicas reduzidas, os plásticos perdem flexibilidade e se tornam frágeis, também perdem as cores e se tornam translúcidos. Desta forma, não podem ser reaproveitados nas aplicações originais e precisam ser reutilizados com as novas características ou descartados. Com isso, a demanda deste commodity aumenta ao passo que o incentivo a reciclagem diminui. Também em 2017 estimava-se que já se encontrava nos oceanos cerca de 150 milhões de toneladas de plástico, e que cerca de 8 milhões de toneladas entram a cada ano. Isto é equivalente ao despejo de 15 toneladas de plástico por minuto, e se nenhuma ação for tomada, estima-se que o incremento previsto para entrar nestes ecossistemas até 2030 seja de 16 milhões de toneladas, chegando a aproximadamente 32 milhões de toneladas até 2050. A figura 6 mostra a comparação estimada da quantidade de peixes e de plásticos nos oceanos, em função da quantidade de peso. (CRAWFORD; QUINN, 2017)

Figura 6: Previsão de plástico e peixes nos oceanos em função do peso



Fonte: Adaptado de (CRAWFORD; QUINN, 2017)

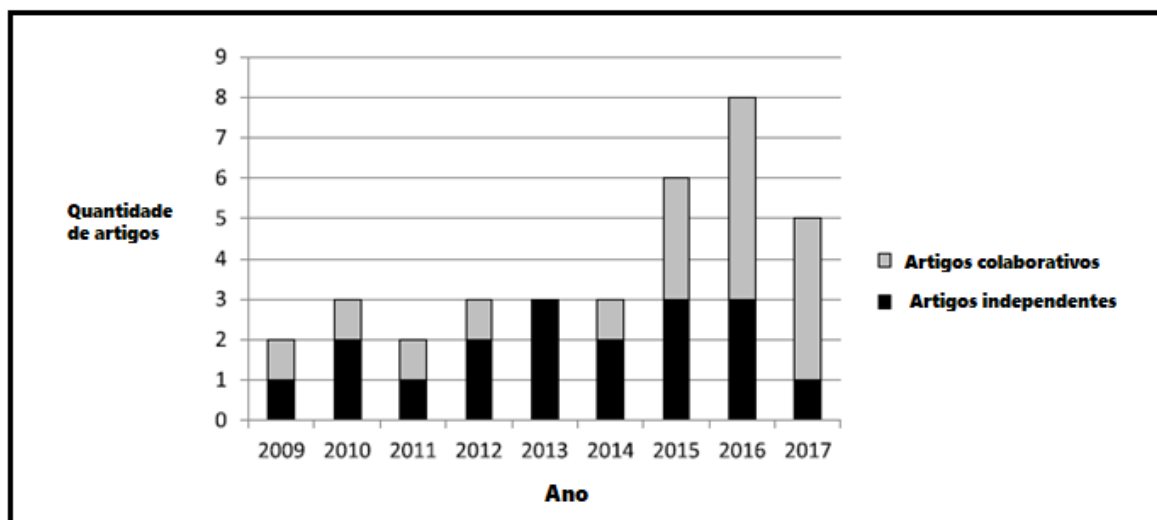
A comunidade acadêmica demonstra uma tendência de interesse crescente sobre o assunto do lixo marinho, com crescimento oscilante a partir dos anos 60. Nas décadas de 70 e 80 foram identificadas tratativas e políticas para atacar o problema de lixo nos oceanos, onde foram coletados dados de distribuição, abundância e impacto ao ambiente. Curiosamente as pesquisas nesta área diminuíram na década de 90, apesar de haver aumento na quantidade de lixo nos mares. O interesse nestas pesquisas retomou a partir dos anos 2000, principalmente a respeito do lixo plástico, das formas que ele pode assumir e seu impacto nos ecossistemas, como por exemplo o caso dos microplásticos (MP). (BERGMANN et al., 2015)

De fato, as décadas de 70 e 80 trouxeram benefícios, resultados de discussões políticas e recomendações para diminuir o montante de lixo nos oceanos, e conseqüentemente o número de plásticos que entram neste ambiente. O controle dos fabricantes de plástico e das perdas de transporte de pelotas industriais nos oceanos, associados a legislações, reduziram a eliminação de resíduos plásticos no mar. Contudo, ficou aparente que a maior parte dos detritos plásticos são oriundos do continente, onde é mais difícil a realização de controles. Assim, ainda que o controle de fabricação e transporte deste material tenha sido efetivo, o crescimento da produção fez com que houvesse uma compensação na quantidade de lixo que chega até os oceanos. (BERGMANN et al., 2015)

A costa brasileira possui dimensões continentais, e também está suscetível ao problema dos MPs. As pesquisas sobre MP no Brasil tiveram início na década de 70 e reportaram presença de pelotas na costa do Rio Grande do Sul que estavam relacionadas a limpeza offshore de navios. Pesquisas no ano de 1997 e de 2014 também reportaram a presença de pelotas de plástico em praias ao longo dos anos. O país tem observado crescimento nas pesquisas relacionadas a este tema na última década e o panorama nacional segue a mesma

tendência internacional. A figura 7 apresenta a evolução nacional de artigos publicados sobre MP nos ecossistemas brasileiros. (CASTRO; SILVA; ARAÚJO, 2018)

Figura 7: Artigos publicados sobre microplástico nos ecossistemas brasileiros.



Fonte: Adaptado de (CASTRO; SILVA; ARAÚJO, 2018)

Pesquisas bibliográficas apontam que dentre os artigos brasileiros publicados internacionalmente sobre MP, 36% são sobre a contaminação da biota, 25% são estudos sobre amostras de plâncton, 22% são estudos sobre MPs em sedimentos e 17% são estudos sobre interações poluentes do MP. (CASTRO; SILVA; ARAÚJO, 2018)

Os MPs são classificados conforme o tipo de obtenção, onde aqueles considerados primários são produzidos nesta dimensão para consumo final. Este material é encontrado virgem na forma de pequenas pelotas, e é utilizado em cosméticos, como por exemplo os esfoliantes, e também em processos industriais como o jateamento a ar, aplicado na remoção de tintas e incrustações.

Outra forma de classificação são aqueles considerados secundários, os quais são oriundos dos macroplásticos, e podem ser encontrados no continente ou no mar. Os MPs secundários podem ser produto de processos mecânicos, que fragmentam o material ao nível micro, como também pode ser produto da degradação natural devido aos longos períodos de exposição às ações do ambiente. (COLE et al., 2011)

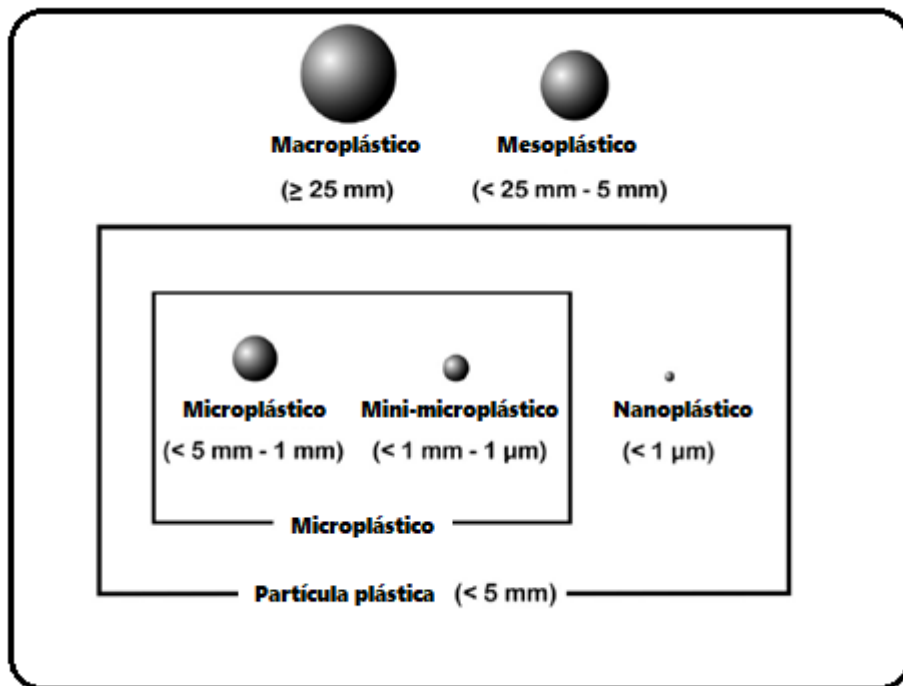
No meio marinho, a maioria dos MPs interage através de processos físicos e biológicos e modifica as suas propriedades, acabando uma parte por ser incluída nos sedimentos por deposição gravítica e outra parte por ser integrada nos sedimentos através das fezes e das pseudofezes. Uma parte é absorvida pelos animais marinhos e pode acabar por ser integrada na alimentação humana.

Diversos estudos detectaram a presença de Poluentes Orgânicos Persistentes (POP) em organismos transferidos através de MPs. Tem surgido evidências crescentes no contato de organismos marinhos com MP, induzindo a perda de elementos fundamentais por contaminação. (RODRIGUES et al., 2019) Também há

evidências de que alguns POPs apresentam sorção preferencial por alguns polímeros em comparação a sorção por sedimentos naturais. (BAKIR; ROWLAND; THOMPSON, 2012)

O termo MPs tem sido atribuído aos plásticos de diversos tamanhos que variam de 5 mm a 1 μm . (COLE et al., 2011). Porém, estudos recentes propuseram uma sistemática para os tamanhos de MP. (CRAWFORD; QUINN, 2017) A proposta está representada na figura 8.

Figura 8: Padronização de tamanho



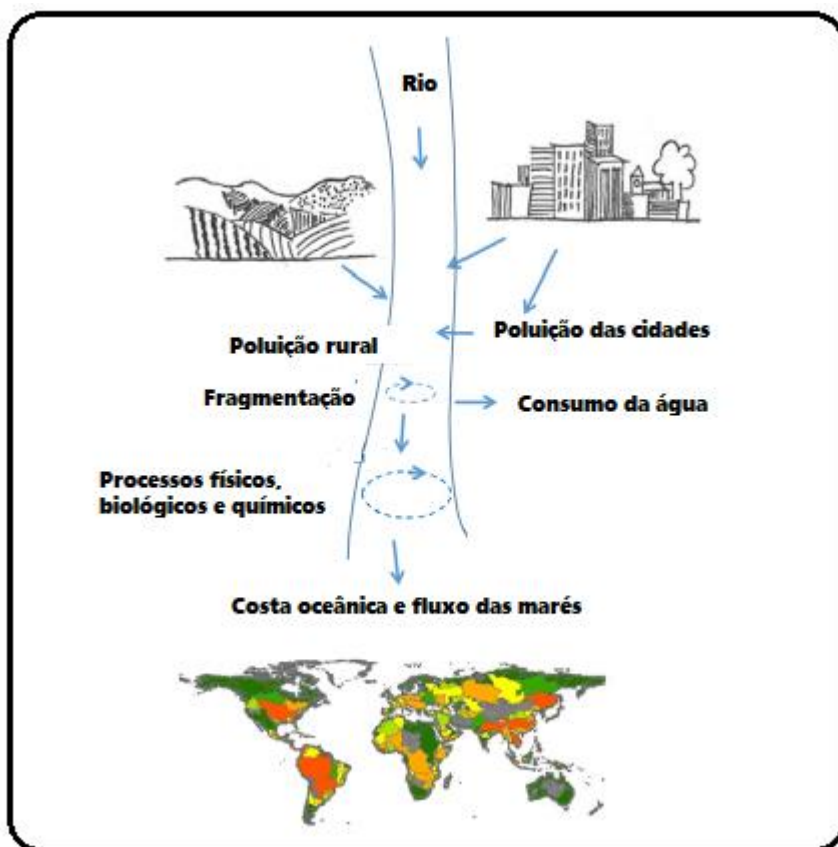
Fonte: Adaptado de (CRAWFORD; QUINN, 2017)

A quantificação dos MPs é essencial na identificação das fontes, no entendimento do transporte e da interação destes com outros poluentes, sedimentos e biota, bem como do grau de contaminação no ambiente. Por se tratar de um conjunto heterogêneo de fragmentos, com grande variabilidade de tamanho, cor, composição, densidade, entre outras características, a definição de critérios para amostragem e análise desse material nas diferentes matrizes ambientais é de elevada relevância. Hidalgo-Ruz et al. (2012) realizaram uma comparação entre metodologias de 68 estudos visando a identificação e quantificação de MPs no ambiente marinho. A partir de 2015, a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration dos Estados Unidos da América) elaborou um protocolo com os métodos empregados na quantificação desses compostos em águas e sedimentos de regiões marinhas (MAUSRA; FOSTER, 2015)

O descarte indiscriminado de resíduos plásticos no ambiente favorece o transporte e acúmulo de material plástico tanto na região costeira como no meio marinho, uma vez que esses resíduos são transportados via escoamento fluvial. Estudos científicos apontam formas para criação de modelos locais para descrever o transporte de plástico do continente para os oceanos (KOOI et al., 2018; SIEGFRIED et al., 2017; VAN WIJNEN; RAGAS; KROEZE, 2019; ZHANG, 2017). Estima-se que aproximadamente 80% dos plásticos encontrados

nos oceanos foram transportados do continente, e dentro deste montante encontra-se MPs (COLE et al., 2011). A figura 9 apresenta um desenho esquemático do transporte global de plástico do continente ao oceano.

Figura 9: Modelo representativo do transporte global de plástico do continente ao oceano.



Fonte: Adaptado de (VAN WIJNEN; RAGAS; KROEZE, 2019)

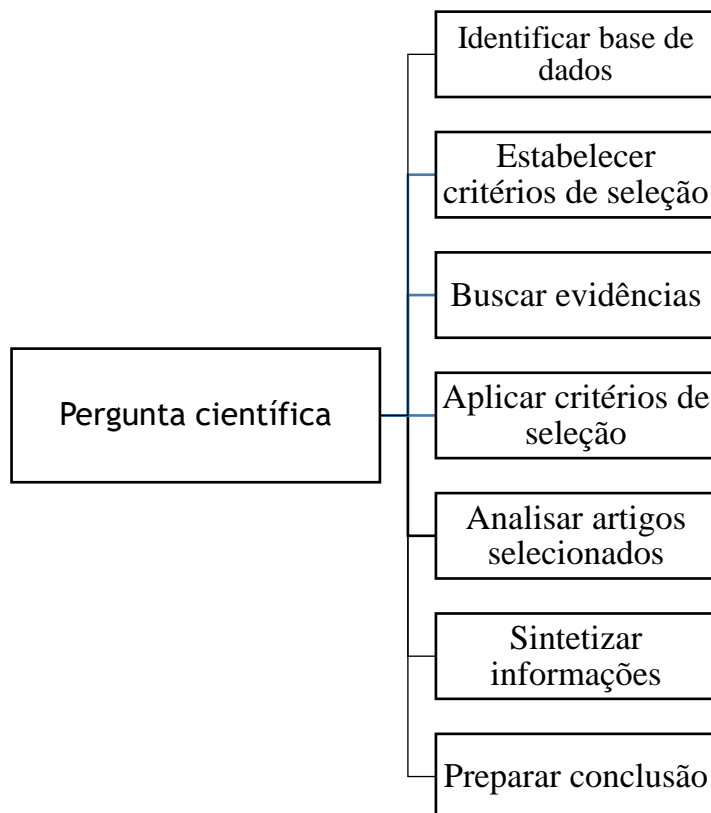
3. MATERIAL E MÉTODO

Revisões sistemáticas da literatura possuem o papel de agrupar e consolidar os resultados de estudos primários sobre um determinado tema. Através de uma análise crítica e metodológica, é possível identificar lacunas para temas de pesquisas, e sintetizar informações relevantes de um volume crescente de resultados publicados. (GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012)

O método utilizado para esta revisão é conhecido como Síntese da Estrutura, uma tradução do termo inglês Framework Synthesis. Este método permite uma estrutura inicial conceitual durante a síntese, o que torna os revisores mais familiares com a literatura que está sendo revisada. Também permite análises sistemáticas e matriciais, utilizando ferramentas de busca. A revelação dos resultados se dá por avaliações do conteúdo, que agregam dados e reconfiguram as buscas, e são apresentados de acordo com a estrutura das tentativas de busca do tema, e conceitos identificados. (GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012)

Este artigo utilizou a estratégia de busca mostrado figura 11 como método sistemático de revisão para planejar as etapas, fazendo com que os resultados possam ser auditáveis, replicáveis, e úteis no suporte a pesquisas relacionadas a problemática dos MPs nos oceanos e corpos hídricos.

Figura 10: Estratégia para revisão sistemática



Fonte: Os autores (2019)

3.1. Definição da pergunta científica

Trabalhos de revisão necessitam especificar a questão científica à qual estão tentando responder e a metodologia empregada para tal finalidade (GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012). Este trabalho buscou o entendimento do fenômeno científico e suas inter-relações com as condições de contorno do ambiente, e com o objetivo de obter um resultado qualitativo, para responder à pergunta: Quanto de microplástico é transportado do continente para as águas fluviais e posteriormente para o oceano?

3.2. A busca da evidência científica

A busca utilizou o portal de Periódicos Capes < <http://www.periodicos.capes.gov.br/> > como base indexadora de dados. Os recursos selecionados para análise foram artigos revisados por pares e com idioma inglês. A busca foi feita por assunto, a fim de obter resultados de diversas fontes de informação, como por exemplo Scopus e Scielo.

Utilizou-se termos de busca associados a operadores booleanos, e quando foi necessário encontrar um número maior de artigos, foram utilizados operadores de proximidade juntamente com os operadores booleanos.

Os termos de busca utilizados nesta revisão sistemática da literatura foram correlacionados com as seguintes palavras-chave: *microplastics*, *transport of microplastics*, *modelling*, *material flow analysis* e *systematic reviews*.

Para construção dos termos de buscas foi utilizado a sequência mostrada no Quadro 1.

Quadro 1: Sequência de termos de busca

Iteração	Termos de busca
1	<i>microplastics</i>
2	<i>microplastics AND (marine environment) AND (marine litter) AND (marine debris)</i>
3	<i>microplastics AND POP AND contaminant AND adsorption</i>
4	<i>microplastics AND (column water) AND river AND ocean</i>
5	<i>microplastics AND model* AND (numerical model*) AND (math* model*)</i>
6	<i>microplastics AND model* AND phytoplankton</i>
7	<i>microplastics AND model* AND (column water) AND (global circulation)</i>
8	<i>model* AND (per capita plastic waste) AND (math* model*)</i>
9	<i>microplastics AND math* AND model*</i>
10	<i>microplastics AND fate AND (land to sea)</i>
11	<i>microplastics AND transport AND export AND nutrientes</i>
12	<i>microplastics AND Brazil AND river AND coastal</i>
13	<i>(plastic waste) AND (material flow analysis) AND microplastics</i>
14	<i>microplastics AND prediction AND rout*</i>
15	<i>(systematic review) AND microplastics AND (design science)</i>

3.3. Critério de seleção

De acordo com o método de Síntese da Estrutura, após as buscas iniciais para encontrar evidências científicas, há a etapa de buscas interativas para refinamento dos resultados. Para este refinamento, adotou-se a seguinte sistemática: i) Termos de busca; ii) Filtros de seleção; iii) Avaliação do título dos artigos; iv) Avaliação do conteúdo dos resumos.

3.3.1. Seleção dos artigos científicos

A fim de construir o alicerce da pesquisa, foram selecionados artigos capazes de responder às perguntas:

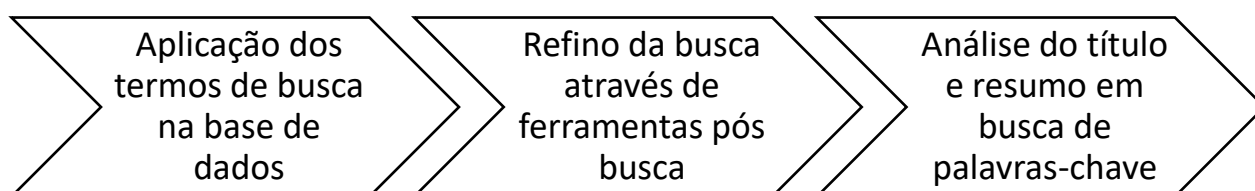
- O que são e como se formam os MPs?
- Qual o impacto à natureza causado pelos MPs?
- Como ocorre o transporte de MP no globo terrestre?

Durante a fase de seleção utilizou-se os filtros do Portal Capes como ferramentas pós-busca. Desta forma, apenas termos específicos diretamente ligados às perguntas de refino foram estabelecidos como critério de seleção.

3.3.2. Análise dos artigos científicos

A partir do resultado dos critérios de seleção foi feita a análise criteriosa dos artigos. Nesta análise houve a busca por alguma das palavras-chave, relacionadas à pergunta científica, que estivessem contidas no título ou resumo dos artigos. O material obtido nesta etapa foi analisado na íntegra e fez parte desta pesquisa como referência bibliográfica.

3.3.3. Fluxograma da interação de busca



4. RESULTADOS

A revisão sistemática da literatura obteve resultados a partir da sequência de busca apresentada no Quadro 1, o que resultou em 7.417 artigos. Com a aplicação dos critérios de seleção o resultado obtido foi de 3.343 artigos. Com a análise dos artigos científicos foi possível selecionar 67 trabalhos ligados ao tema de interesse da pesquisa. Na Tabela 1 é apresentado o planejamento da estrutura de buscas, os resultados alcançados através das etapas interativas e a bibliografia selecionada após a aplicação de todos os critérios estabelecidos.

Foi possível capturar artigos com dados que apresentam a teoria das relações químicas de degradação do plástico até o nível micro, termos e definições utilizados pelos pesquisadores do tema, ocorrência de MP nos ecossistemas e ocorrência de MP em ambientes marinhos. Durante a busca pela relevância do tema, bem como o potencial da ação poluente deste material, foi possível encontrar artigos que apresentassem o MP como poluente ambiental, MP como vetor de contaminação e os efeitos ambientais causados pela presença de MP. Ao retornar as buscas ao tema central da pesquisa, através de assuntos relacionados ao transporte de MP no globo terrestre, foram encontrados artigos que apresentam modelos globais de transporte de nutrientes e modelos de transporte de MP do continente para o oceano.

A qualidade das revisões sistemáticas pode ser expressa por indicadores de sensibilidade e precisão. A sensibilidade é a habilidade de alocar registros de interesse e a precisão é a relevância da estratégia de busca para identificar registros de interesse. Estes indicadores não se confrontam, e podem atuar balanceando as pesquisas científicas. (GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012)

O cálculo é realizado através das expressões abaixo:

$$\text{Sensibilidade} = \frac{\text{Reter registros relevantes}}{\text{Todos os registros relevantes que existem}} = \frac{67}{3343} = 0,02 \quad (1)$$

$$\text{Precisão} = \frac{\text{Reter registros relevantes}}{\text{Todos os registros retidos na pesquisa}} = \frac{67}{7417} = 0,009 \quad (2)$$

A formação do indicador é livre, e não há na literatura valores comparativos para os resultados de sensibilidade e precisão. Por isso, nesta pesquisa adotou-se a razão entre os indicadores como critério de avaliação. Desta forma, quando a razão sensibilidade / precisão resultar em 1 afirma-se que poucos artigos foram perdidos na pesquisa e os artigos encontrados possuem alta relevância.

Interação	Palavra-chave	Termos de busca	Artigos encontrados	Artigos selecionados	Artigos analisados	Autores
1	microplastic	<i>microplastics</i>	4.106	2.368	23	AKDOGAN; GUVEN, 2019; ANDRADY, 2003, 2011; BAKIR; ROWLAND; THOMPSON, 2012; BERGMANN et al., 2015; CARUSO, 2019; CASTRO; SILVA; ARAÚJO, 2018; CHUBARENKO, 2016; CINCINELLI et al., 2019; COCCA et al., 2018; COLE et al., 2011; CRAWFORD; QUINN, 2017; HIDALGO-RUZ et al., 2012; LAMBERT; WAGNER, 2018; LI; LIU; PAUL CHEN, 2018; LUSHER, 2015; MAUSRA; FOSTER, 2015; RIBEIRO et al., 2019; RODRIGUES et al., 2019; RODRIGUES; R. ALMEIDA; RAMOS, 2019; WAGNER, 2017; WORM et al., 2017; WU et al., 2019
2		<i>microplastics AND (marine environment) AND (marine litter) AND (marine debris)</i>	930	271		
3		<i>microplastics AND POP AND contaminant AND adsorption</i>	22	6		
4		<i>microplastics AND (column water) AND river AND ocean</i>	389	158		
5	modelling	<i>microplastics AND model* AND (numerical model*) AND (math* model*)</i>	58	42	16	(CALKIN, 1996; CINCINELLI et al., 2019b; COLLINS; HERMES, 2019; ENDERS et al., 2015; EVERAERT, [s.d.]; GOUIN et al., 2011; HARDESTY et al., 2017; ISOBE et al., 2019; KROEZE, [s.d.]; LEBRETON; GREER; BORRERO, 2012; MUSY, [s.d.]; NORDAM et al., 2019; SHERMAN; VAN SEBILLE, 2016; SONAM et al., 2019; VAN WIJNEN; RAGAS; KROEZE, 2019)
6		<i>microplastics AND model* AND phytoplankton</i>	268	137		
7		<i>microplastics AND model* AND (column water) AND (global circulation)</i>	168	28		
8		<i>model* AND (per capita plastic waste) AND (math* model*)</i>	1	0		
9		<i>microplastics AND math* AND model*</i>	265	84		

10		<i>microplastics AND fate AND (land to sea)</i>	401	77		(AUTA; EMENIKE; FAUZIAH, 2017; BAKIR; ROWLAND; THOMPSON, 2014; BALLENT et al., 2013; JAMBECK et al., 2015; KOOI et al., 2018; KROEZE; BOUWMAN; SEITZINGER, 2012; LONG et al., 2015; MAYORGA et al., 2010; SIEGFRIED et al., 2017; ZHANG, 2017)
11	<i>transport of microplastics</i>	<i>microplastics AND transport AND export AND nutrientes</i>	46	25	10	
12		<i>microplastics AND Brazil AND river AND coastal</i>	166	22		
13	<i>material flow analysis</i>	<i>(plastic waste) AND (material flow analysis) AND microplastics</i>	410	80	14	(BAI et al., 2018; BASSLER; PACZUSKI; AL-TSHULER, 2001; BRUNNER; RECHBERGER, 2004, 2017; DA SILVA et al., 2019; GORAN et al., 2010; HE et al., 2018; LEBRETON et al., 2017; PATRÍCIO et al., 2015; TRAMOY et al., 2019; WANG; MA, 2018, 2018)
14		<i>microplastics AND prediction AND rout*</i>	96	21		
15	<i>systematic review</i>	<i>(systematic review) AND microplastics AND (design science)</i>	91	24	4	(COOPER; HEDGES; VALENTINE, 2009; Design science and design science research, 2014; GOUGH; OLIVER; THOMAS, 2012; SAM-PAIO; MANCINI, 2007)

Tabela 1: Resultados da busca no período de 01 de novembro de 2019 à 20 janeiro 2020

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se que há uma diferença considerável entre os indicadores, onde está apresentado um valor de sensibilidade maior do que o valor de precisão. Uma alta sensibilidade significa que poucos registros foram perdidos na pesquisa, e uma baixa precisão significa que a pesquisa identificou muitos registros que não foram relevantes para a revisão.

Assim, é possível concluir que a pesquisa gerou um alto índice de artigos referentes ao tema de MP no ambiente, no entanto, não foi possível aproveitar grande número de resultados para o tema do transporte de microplástico e da resposta pergunta científica proposta.

O resultado desta pesquisa está plenamente alinhado com outras pesquisas recentes que também apontam a necessidade de crescimento de trabalhos que reforçam a necessidade da construção de modelos e simulações numéricas (HARDESTY et al., 2017), dado que os MPs podem ser um poluente de alto potencial (RODRIGUES et al., 2019), e estão com crescimento exponencial nos oceanos e copos hídricos (AUTA; EMENIKE; FAUZIAH, 2017; CRAWFORD; QUINN, 2017), além de estarem presentes nas bacias hidrográficas e na costa brasileira (CASTRO; SILVA; ARAÚJO, 2018).

6. REFERÊNCIAS

ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria de Plástico, São Paulo: Perfil 2018. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/>. Acesso em 22 nov. 2019.

AKDOGAN, Z.; GUVEN, B. Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs. **Environmental Pollution**, v. 254, p. 113011, nov. 2019.

ANDRADY, A. L. (ED.). **Plastics and the environment**. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2003.

ANDRADY, A. L. Microplastics in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 8, p. 1596–1605, ago. 2011.

AUTA, H. S.; EMENIKE, C. U.; FAUZIAH, S. H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. **Environment International**, v. 102, p. 165–176, maio 2017.

BAI, M.; ZHU, L.; AN, L.; PENG, G.; LI, D. Estimation and prediction of plastic waste annual input into the sea from China. **Acta Oceanologica Sinica**, v. 37, n. 11, p. 26–39, nov. 2018.

BAKIR, A.; ROWLAND, S. J.; THOMPSON, R. C. Competitive sorption of persistent organic pollutants onto microplastics in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 64, n. 12, p. 2782–2789, dez. 2012.

BAKIR, A.; ROWLAND, S. J.; THOMPSON, R. C. Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 140, p. 14–21, mar. 2014.

BALLENT, A.; PANDO, S.; PURSER, A.; JULIANO, M. F.; THOMSEN, L. Modelled transport of benthic marine microplastic pollution in the Nazaré Canyon. **Biogeosciences**, v. 10, n. 12, p. 7957–7970, 6 dez. 2013.

BASSLER, K. E.; PACZUSKI, M.; ALTSHULER, E. Simple model for plastic dynamics of a disordered flux-line lattice. **Physical Review B**, v. 64, n. 22, p. 224517, 21 nov. 2001.

BERGMANN, M.; GUTOW, L.; KLAGES, M. **Marine anthropogenic litter**. Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer, 2015.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. **Practical handbook of material flow analysis**. Boca Raton, FL: CRC/Lewis, 2004.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. **Handbook of material flow analysis: for environmental, resource, and waste engineers**. Second Edition ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.

CALKIN, M. G. **Lagrangian and Hamiltonian mechanics**. Singapore ; River Edge, NJ: World Scientific, 1996.

CARUSO, G. Microplastics as vectors of contaminants. **Marine Pollution Bulletin**, v. 146, p. 921–924, set. 2019.

CASTRO, R. O.; SILVA, M. L. DA; ARAÚJO, F. V. DE. Review on microplastic studies in Brazilian aquatic ecosystems. **Ocean & Coastal Management**, v. 165, p. 385–400, nov. 2018.

CHUBARENKO, I. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. p. 8, 2016.

CINCINELLI, A.; MARTELLINI, T.; GUERRANTI, C.; SCOPETANI, C.; CHELAZZI, D.; GIARRIZZO, T. A potpourri of microplastics in the sea surface and water column of the Mediterranean Sea. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 110, p. 321–326, jan. 2019a.

COCCA, M.; DI PACE, E.; ERRICO, M. E.; GENTILE, G.; MONTARSOLO, A.; MOSSOTTI, R. **Proceedings of the International Conference on Microplastic Pollution in the Mediterranean Sea**. Cham: Springer International Publishing, 2018.

COLE, M.; LINDEQUE, P.; HALSBAND, C.; GALLOWAY, T. S. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 12, p. 2588–2597, dez. 2011.

COLLINS, C.; HERMES, J. C. Modelling the accumulation and transport of floating marine micro-plastics around South Africa. **Marine Pollution Bulletin**, v. 139, p. 46–58, fev. 2019.

COOPER, H. M.; HEDGES, L. V.; VALENTINE, J. C. (EDS.). **The handbook of research synthesis and meta-analysis**. 2nd ed ed. New York: Russell Sage Foundation, 2009.

CRAWFORD, C. B.; QUINN, B. **Microplastic pollutants**. Amsterdam: Elsevier, 2017.

DA SILVA, L. F.; GUEVARA, A. J. H.; GONZALES, E. D. R. S.; OLIVEIRA, P. S. G. Evolution toward environment sustainable behavior: search for survival in the plastic industry in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 21, n. 3, p. 1291–1320, jun. 2019.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JR, J. A. V. **Design science and design science research**. New York: Springer, 2014.

ENDERS, K.; LENZ, R.; STEDMON, C. A.; NIELSEN, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. **Marine Pollution Bulletin**, v. 100, n. 1, p. 70–81, nov. 2015.

EVERAERT, G. Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions. p. 33, 2018.

GORAN, V. V.; JOVICIC, N. M.; BABIC, M. J.; STANISAVLJEVIC, N. Z.; BANTINIC, B, M.; PAVLOVIC, A. R. Assessment of plastic flows and stocks in Serbia using material flow analysis. **Thermal Science**, v. 14, n. suppl., p. 89–95, 2010.

GOUGH, D.; OLIVER, S.; THOMAS, J. (EDS.). **An introduction to systematic reviews**. London ; Thousand Oaks, Calif: SAGE, 2012.

GOUIN, T.; ROCHE, N.; LOHMANN, R.; HODGES, G. A Thermodynamic Approach for Assessing the Environmental Exposure of Chemicals Absorbed to Microplastic. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 4, p. 1466–1472, 15 fev. 2011.

HARDESTY, B. D.; HARARI, J.; ISOBE, A.; LEBRETON, L.; MAXIMENKO, N.; POTEMRA, J.; VAN SEBILLE, E.; VETHAAK, A. D.; WILCOX, C. Using Numerical Model Simulations to Improve the Understanding of Micro-plastic Distribution and Pathways in the Marine Environment. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, 31 mar. 2017.

HE, K.; TAN, Q.; ZHENG, L.; LI, J. Adapting to new policy environment – past pattern and future trend in us-sino waste plastic trade flow. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 25, n. 8, p. 703–712, 17 nov. 2018.

HIDALGO-RUZ, V.; GUTOW, L.; THOMPSON, R. C.; THIEL, N. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 6, p. 3060–3075, 20 mar. 2012.

ISOBE, A.; IWASAK, S.; UCHIDA, K.; TOKAI, T. Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 417, dez. 2019.

JAMBECK, J. R.; GEYER, R.; WILCOX, C.; SIEGLER, T. R.; PERRYMAN, M.; ANDRADY, A.; NARAYAN, R.; LAW, K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, v. 347, n. 6223, p. 768–771, 13 fev. 2015.

KOOI, M.; BESSELING, E.; KROEZE, C.; VAN WENZKE, A. P.; KOELMANS A. A. Modeling the Fate and Transport of Plastic Debris in Freshwaters: Review and Guidance. In: WAGNER, M.; LAMBERT, S. (Eds.). . **Freshwater Microplastics**. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 58p. 125–152.

KROEZE, C.; GABBERT, S.; HOFSTRA, N.; KOELMANS, A. A.; LI, A.; LOHR, A.; LUDWIG, F.; STOKAL, M.; VERBURG, C.; VERMEULEN, L.; VAN VLIET, M. TH.; DE VRIES, W.; WANG, M.; VAN WIJNEN, J. Global modelling of surface water quality: a multi-pollutant approach. p. 11, 2016.

KROEZE, C.; BOUWMAN, L.; SEITZINGER, S. Modeling global nutrient export from watersheds. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 2, p. 195–202, maio 2012.

LAMBERT, S.; WAGNER, M. Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview. In: WAGNER, M.; LAMBERT, S. (Eds.). . **Freshwater Microplastics**. Cham: Springer International Publishing, 2018. v. 58p. 1–23.

LEBRETON, L. C. M.; VAN DER ZWET, J.; DAMSTEEG, J. W.; SLAT, B.; ANDRADY, A.; REISSER, J. River plastic emissions to the world's oceans. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 15611, ago. 2017.

LEBRETON, L. C.-M.; GREER, S. D.; BORRERO, J. C. Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. **Marine Pollution Bulletin**, v. 64, n. 3, p. 653–661, mar. 2012.

LI, J.; LIU, H.; PAUL CHEN, J. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. **Water Research**, v. 137, p. 362–374, jun. 2018.

LONG, M.; MORICEAU, B.; GALLINARI, M.; LAMBERT, C.; HUVET, A.; RAFFRAY, J.; SOUDANT, P. Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: Impact on their respective fates. **Marine Chemistry**, v. 175, p. 39–46, out. 2015.

LUSHER, A. Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: BERGMANN, M.; GUTOW, L.; KLAGES, M. (Eds.). . **Marine Anthropogenic Litter**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 245–307.

MAUSRA, B.; FOSTER, A. Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment. p. 39, 2015.

MAYORGA, E.; SEITZINGER, S. P.; HARRISON, J. A.; DUMONT, E.; BEUSEN, A. H. W.; BOUWMAN, A. F.; FEKET, B. M.; KROEZE, C.; VAN DRECHT, G. Global Nutrient Export from WaterSheds 2 (NEWS 2): Model development and implementation. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 7, p. 837–853, jul. 2010.

MUSY, A. Hydrology: A Science for Engineers, 2015.

NORDAM, T.; KRISTIANSEN, R.; NEPSTAD, R.; ROHRS, J. Numerical analysis of boundary conditions in a Lagrangian particle model for vertical mixing, transport and surfacing of buoyant particles in the water column. **Ocean Modelling**, v. 136, p. 107–119, abr. 2019.

PATRÍCIO, J.; KALMYKOVA, Y.; ROSADO, L.; LISOVSKAJA, V. Uncertainty in Material Flow Analysis Indicators at Different Spatial Levels: Uncertainty in Material Flow Analysis Indicators at Different Spatial Levels. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 5, p. 837–852, out. 2015.

RIBEIRO, F.; O'BRIEN, J. W.; GALLOWAY, T.; THOMAS, K. V. Accumulation and fate of nano- and micro-plastics and associated contaminants in organisms. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 111, p. 139–147, fev. 2019.

RODRIGUES, J. P.; DUARTE, A. C.; ECHEANDIA, J. S.; SANTOS, T. R. Significance of interactions between microplastics and POPs in the marine environment: A critical overview. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 111, p. 252–260, fev. 2019.

RODRIGUES, S. M.; R. ALMEIDA, C. M.; RAMOS, S. Adaptation of a laboratory protocol to quantify microplastics contamination in estuarine waters. **MethodsX**, v. 6, p. 740–749, 2019.

SAMPAIO, R.; MANCINI, M. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83–89, fev. 2007.

SHERMAN, P.; VAN SEBILLE, E. Modeling marine surface microplastic transport to assess optimal removal locations. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 1, p. 014006, 1 jan. 2016.

SIEGFRIED, M.; KOELMANS, A. A.; BESSELING, E.; KROEZE, C. Export of microplastics from land to sea. A modelling approach. **Water Research**, v. 127, p. 249–257, dez. 2017.

SONAM, C.; PRASSAD, Y. B.; ANWAR, S. N.; KUMAR, C. S. Mathematical modelling and analysis of plastic waste pollution and its impact on the ocean surface. **Journal of Ocean Engineering and Science**, p. S2468013319301676, set. 2019.

TRAMOY, R.; GASPERI, J.; DRIS, R.; COLASSE, L.; FISSON, C.; SANANES, S.; ROCHER, V.; TASSIN, B. Assessment of the Plastic Inputs From the Seine Basin to the Sea Using Statistical and Field Approaches. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, p. 151, 10 abr. 2019.

VAN WIJNEN, J.; RAGAS, A. M. J.; KROEZE, C. Modelling global river export of microplastics to the marine environment: Sources and future trends. **Science of The Total Environment**, v. 673, p. 392–401, jul. 2019.

WAGNER, M. **Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?** New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

WANG, Y.; MA, H. Analysis of uncertainty in material flow analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 1017–1028, jan. 2018.

WORM, B.; LOTZE, H. K.; JUBINVILLE, I.; WILCOX, C.; JAMBECK, J. Plastic as a Persistent Marine Pollutant. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 42, n. 1, p. 1–26, 17 out. 2017.

WU, P.; HUANG, J.; ZHENG, Y.; YANG, Y.; ZHANG, Y.; HE, F.; CHEN, H.; QUAN, G.; YAN, J.; LI, T.; GAO, B. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 184, p. 109612, nov. 2019.

ZHANG, H. Transport of microplastics in coastal seas. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 199, p. 74–86, dez. 2017.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS COM BASE NA ANALOGIA DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS - ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE MACAÉ/RJ

MODELLING THE DISTRIBUTION OF MICROPLASTICS BASED ON THE ANALOGY OF TRANSPORT OF COHESIVE SEDIMENTS - CASE STUDY OF MACAÉ/RJ

Rafael Gouvêa Guimarães - IFFluminense/PPEA

Jader Lugon Junior - IFFluminense/PPEA

Antônio José da Silva Neto - UERJ/IPRJ

RESUMO

A presença de microplásticos no ambiente tem sido motivo de preocupação global, onde pesquisas têm demonstrado que este material está presente em corpos hídricos, regiões costeiras e oceânicas. Os rios têm sido apontados como o maior meio condutor entre o continente e o oceano, por este motivo, são alvos de estudos para solução deste problema ambiental. A modelagem computacional associa informações geográficas a modelos matemáticos a fim de avaliar o comportamento hidrológico de bacias e redes de drenagem. O objetivo da pesquisa é, através da analogia entre o fluxo de microplástico e o transporte de sedimentos coesivos, apresentar resultados qualitativos da concentração de partículas na rede de drenagem da cidade de Macaé. Neste trabalho é apresentado o comportamento da concentração deste material, modelo matemático para associação do microplástico ao transporte de sedimentos coesivos, método de cálculo analítico da produção per capita de microplástico, e análise da tensão de cisalhamento de erosão e deposição de sedimentos na rede de drenagem da cidade de Macaé.

Palavras chave: Microplásticos, Modelagem Hidrodinâmica, Transporte de poluentes, MOHID.

ABSTRACT

The presence of microplastics in the environment has been a matter of global concern, where research has shown that this material is present in water bodies, coastal and oceanic regions. Rivers have been pointed out as the main conduit between the continent and the ocean, for this reason, they are reasons for studies to solve this environmental problem. Computational modeling associates geographic information with mathematical models in order to assess the hydrological behavior of basins and drainage networks. The objective of this research is, through the analogy between the microplastic flow and cohesive sediment transport, to present qualitative results of the concentration of particles in the drainage network of the city of Macaé. In this work, conclusions about the behavior of the material concentration in different periods are presented through the mathematical model for the association of microplastic with the transport of cohesive sediments, analytical calculation of the per capita production of microplastic, calculation of total sediment discharge, and computational model of the network. of drainage in the city of Macaé.

Keywords: *Microplastics, Hydrodynamic Modeling, Pollutant Transport, MOHID.*

1. INTRODUÇÃO

O microplástico (MP) é um fragmento de plástico de tamanho $\leq 1\text{mm}$ (CRAWFORD; QUINN, 2017). O MP pode ser produzido nestas dimensões para aplicação em produtos de cuidado pessoal ou pelotas que são utilizadas como matéria prima industrial, onde são classificados como fonte primária. Também podem ser formados a partir da degradação do plástico macro, utilizado na fabricação de embalagens, garrafas, pneus, onde são classificados como fontes secundárias. O MP é um contaminante emergente considerado onipresente no ambiente, particularmente nos rios e oceanos, trazendo impactos aos ecossistemas (WU et al., 2019). De acordo com Cole et al. (2011), a transferência toxicológica de componentes químicos para a biota via ingestão de MP é uma preocupação significativa, e para Caruso (2019), a preocupação se estende para a microbiota onde microrganismos, como bactérias e microalgas, podem colonizar as partículas de MP e interagir com contaminantes químicos.

A proporção entre a entrada e produção de plástico no país, frente a saída e a reciclagem é desproporcional, e cria um cenário de saturação deste material no ambiente, onde todas as cidades do país são vulneráveis aos efeitos poluidores. O Brasil produziu 8,3 milhões de toneladas de resina termoplástica e 7,2 milhões de toneladas de produtos transformados em 2018. Além do aumento de produção, referente ao ano anterior, o país importou mais do que exportou produtos que contém plástico transformado. Estima-se que da produção nacional de 2018, apenas 22,1% foi reciclado e reintroduzido na indústria nacional (ABIPLAST, 2019).

O rio Macaé é responsável pelo abastecimento hídrico dos municípios de Casemiro de Abreu, Rio das Ostras e Macaé, e também pelo abastecimento da zona industrial da Bacia de Campos, que representa cerca de 78% da cadeia petrolífera do país (JERONYMO et al., 2016). As águas do rio são largamente utilizadas para abastecimento da agricultura e abastecimento urbano, visto que apenas na cidade de Macaé há uma população estimada de aproximadamente 251 mil habitantes. A cidade também movimenta um mercado pesqueiro, através do Mercado Municipal de Peixes, que funciona desde 1924 e atende cerca de 500 pessoas por dia (MACAÉ, 2020). A cidade está situada numa região estuarina e a economia, industrial, agrícola e pesqueira, está ligada ao rio e seu entorno.

Estudos sobre MP ainda estão em processo de construção e muitas questões ainda precisam ser esclarecidas. Para autores como Cole et al. (2011), Auta et al. (2017), Ribeiro et al. (2018) e Rodrigues et al. (2019), é unânime a opinião de que há lacunas sobre a classificação do tamanho das partículas, potencial poluidor, proporção dos impactos ambientais, o caminho percorrido na cadeia alimentar e

biota, e estudos de modelagem do comportamento deste material na coluna d'água dos oceanos e corpos hídricos.

Neste trabalho é apresentado um estudo conceitual com resultado qualitativo para a distribuição de MP na cidade de Macaé a partir da erosão deste material submetidas aos efeitos de chuvas intensas. Para isso, a modelagem da cidade será realizada utilizando um modelo digital de elevação a partir dos dados SRTM da NASA, obtidos através do projeto Topodata, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. Os dados geomorfométricos serão implementados no software OpenFlows FLOOD® que permite a simulação de diferentes fenômenos que ocorrem com a água através do ciclo hidrológico. Assim, será apresentado modelo hidrodinâmico, com referência Euleriana, para o cálculo de transporte de MP, baseados no transporte de sedimentos coesivos na rede de drenagem.

2. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho está baseada na construção de modelo hidrológico a partir do terreno digital de elevações da cidade, simulações do transporte de partículas na rede de drenagem e fluxos de água decorrentes das chuvas.

2.1. Área de estudo e terreno digital

O rio Macaé recebe águas dos rios Bonito, Sana e São Pedro, possui área de aproximadamente 1.710 km² e abrange parte dos municípios de Nova Friburgo, Casemiro de Abreu e Macaé (CBH MACAÉ OSTRAS, 2020). O rio é dividido em alto, médio e baixo curso, e a área de estudo está exclusivamente na região baixa onde encontra-se a cidade de Macaé, e a foz do rio.

O terreno digital da cidade foi construído a partir da região 22s42, obtida através projeto Topodata, que é um banco de dados geomorfométricos. Estas informações de elevação são elaboradas a partir de dados de satélite do projeto SRTM, Shuttle Radar Topography Mission, com resolução espacial aproximada de 30m x 30m, e os converte em arquivos de texto com estruturas de coordenadas xyz. Este arquivo de texto que contém os dados topográficos é importado e reconhecidos pelo software.

Sobre esta topografia foi definida uma malha constituída de células de 250m x 200m e um polígono de pontos que delimita a área de interesse a ser computada nas análises. A finalização da construção do terreno digital foi realizada através de recursos do software, com ajustes que permitem o amortecimento do terreno, eliminando ruídos oriundos das imagens de satélite, e escavações no leito do rio, que permitem eliminar resoluções grosseiras, assim como remoção das depressões do terreno.

A rede de drenagem apresentada na figura 1 demonstra o delineamento dos canais naturais que foram obtidos com este procedimento. Os canais foram formados com geometria trapezoidal e a rede apresentou número de Horton-Strahler com ramificações de ordem 4.

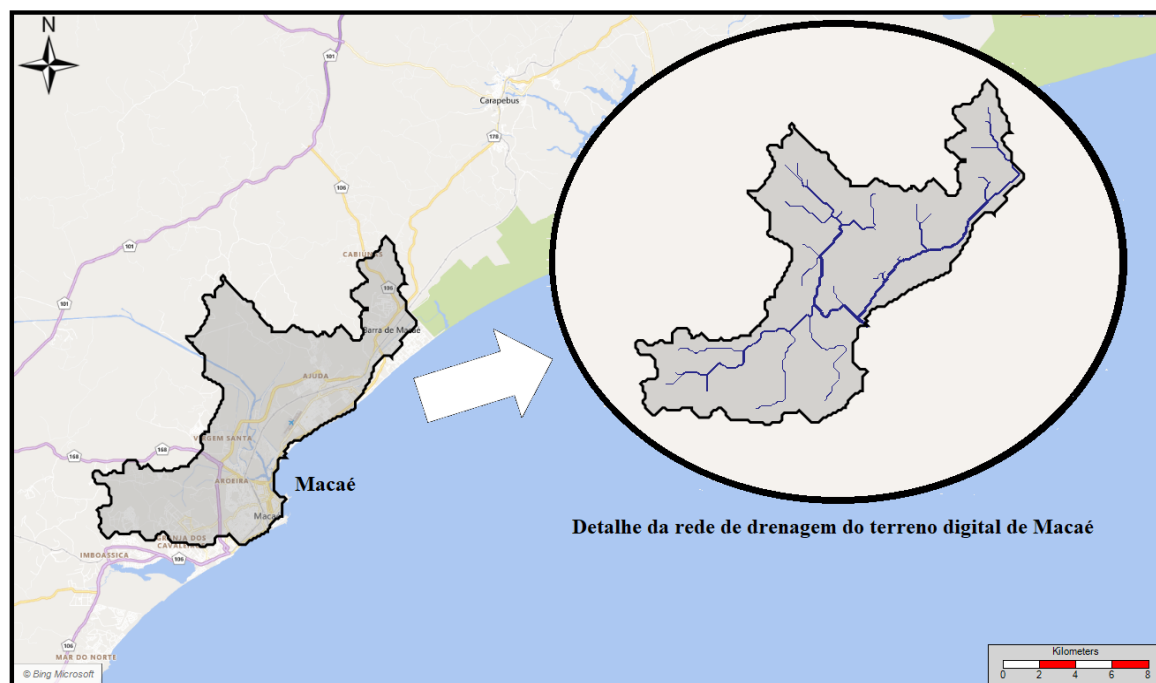


Figura 1: Rede de drenagem formada no terreno digital da área urbana de Macaé

2.2. Modelagem Computacional

O OpenFlows FLOOD® é um software desenvolvido pela Bentley como uma evolução do MOHID Studio, que foi desenvolvido pela Action Modulers (Bentley, 2021). Os algoritmos do MOHID são baseados no método dos volumes finitos, utilizando iterações adaptativas a cada passo no tempo, em termos da conservação de massa e continuidade do movimento (MOHID WIKI, 2021).

Segundo Neves (2013), o MOHID é formulado utilizando a equação de estado da Eq. 1, que descreve o princípio da conservação, a qual define que, a taxa de acumulação dentro de um volume de controle (VC) equilibra os fluxos de entrada e saída mais a diferença entre fonte e sumidouro:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\iiint_{VC} \beta dV) = - \iint_{superfície} [(\beta \vec{u} \cdot \vec{n}) + (-v \vec{\nabla} c \cdot \vec{n})] dA + \iiint_{VC} (S_0 - S_i) dV \quad (1)$$

onde, u é a velocidade relativa para o volume superficial, v é a difusividade, β é a concentração da propriedade por unidade de volume, S_0 é a fonte, S_i é o sumidouro, ∂t é a variante infinitesimal do tempo, V é o volume e A a área superficial.

Aplicando o teorema de Gauss na Eq. 1 obtém-se a equação diferencial para conservação:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i \beta - v \frac{\partial \beta}{\partial x_i} \right) + (S_0 - S_i) \quad (2)$$

visto que, a Eq. 2 apresenta uma taxa de variação de uma propriedade em um ponto, x_i , e também faz o balanço dos fluxos de advecção e difusão neste mesmo ponto, somado a diferença entre fonte e sumidouro. Manipulando a equação diferencial de conservação é possível escrever a Eq. 3 como uma referência lagrangiana, onde avalia-se ao longo do tempo a taxa pontual de alteração das propriedades em um ponto e o balanço difusivo através do contorno, somado a diferença entre fonte e sumidouro (Neves, 2013).

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(v \frac{\partial \beta}{\partial x_i} \right) + (S_0 - S_i) \quad (3)$$

A conservação de movimento é dada pelo somatório de forças aplicado à 2ª Lei de Newton escrita em termos da densidade:

$$\rho \times V \times \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \sum F \quad (4)$$

onde, x_j são todas as direções espaciais que interagem com a transmissão de momento. As principais forças que atuam num corpo hídrico são o gradient hidráulico, a resistencia oferecida pelo leito e parede dos canais, e a força gravitacional. Desta forma a somatório de forças que atuam na superfície de uma coluna d'água são descritas na Eq. 5:

$$\sum F = -\rho \times V \times g \times \left(\frac{\partial H}{\partial x_i} + S_{fi} \right) \quad (5)$$

onde, S_{fi} é a perda linear de carga hidráulica (MOHID WIKI, 2021).

Combinando as Eq. 4 e Eq. 5 chega-se à equação de momento, do princípio de St. Venant:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -g \left(\frac{\partial H}{\partial x_i} + S_{fi} \right) \quad (6)$$

onde, $-g \frac{\partial H}{\partial x_i}$ representa a pressão hidrostática na direção x_i , $-gS_{fi}$ representa a perda de carga pelo atrito com fundo e $\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ representam a taxa de variação espacial do fluxo por unidade de massa na direção x_j (MOHID WIKI, 2021).

O MOHID utiliza algoritmos semi-implícitos para computar os processos com maiores restrições de estabilidade e algoritmos explícitos para outros. Ondas de gravidade, advecção e difusão vertical, e a sedimentação de partículas estão entre os processos mais restritivos e são calculados usando algoritmos implícitos (NEVES, 2013).

2.3. Analogia do transporte de sedimentos coesivos com o fluxo de MP

O transporte de sedimentos é um campo de estudo complexo que envolve experimentos empíricos, e análises teóricas que, na maioria das vezes, são baseadas na idealização e simplificação dos assuntos. Os estudos teóricos são determinados por um ou dois fatores relevantes, tais como, descarga de água, velocidade de fluxo, energia potencial e tensão de cisalhamento (YANG, 1977). Sedimentos podem ser classificados como não coesivos, formados por areia, pedras e partículas grosseiras, e coesivos, formados por grãos mais finos como argilas e siltes (ESTIGONI et al., 2012).

Os sedimentos coesivos são formados por material granular, que se depositam na água por efeitos da gravidade. Os fatores de comportamento mecânico estão relacionados a distribuição granulométrica e composição dos sedimentos, onde a granulometria está relacionada com a resistência ao escoamento e a composição ligada a capacidade de ligação com outros compostos (ESTIGONI et al., 2013). A figura 2 apresenta a representação esquemática do transporte de sedimentos.

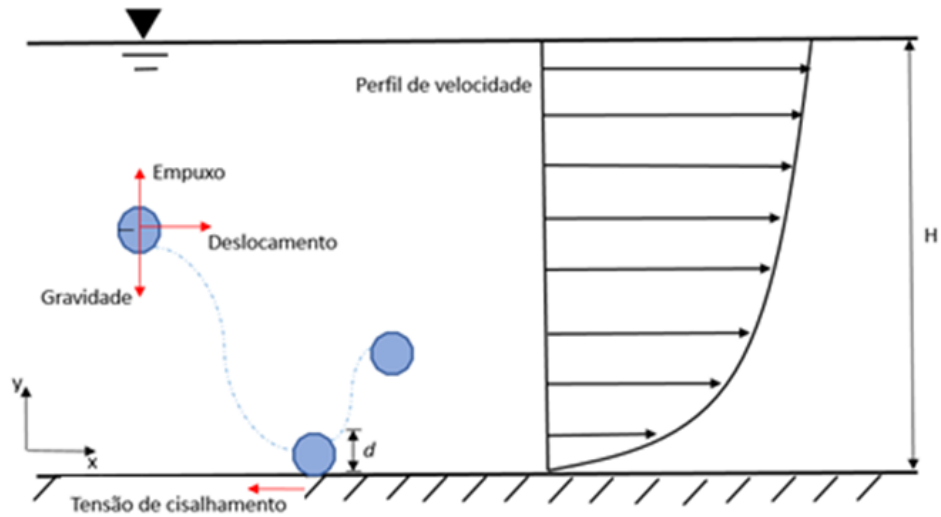


Figura 2: Representação esquemática do transporte de sedimentos

De maneira análoga ao sedimento coesivo, os MPs podem sofrer variações de geometria ao longo da rede de drenagem. Processos mecânicos ao longo do movimento fragmentam as partículas que sofrem os mesmos processos de deposição e erosão dos sedimentos. Alguns MP possuem densidade maior do que da água, e por isso tendem a se depositar por efeitos da gravidade, de acordo com Crawford e Quinn (2017), partículas de PP, PTFE, PET, PVC, Nylon® 6 e Nylon® 6.6 estão na lista dos materiais que possuem esta característica.

Esta analogia foi a proposta do trabalho experimental de Pohl et al. (2020), onde foi analisado transporte de MP em águas marinhas profundas através de processos de turbidez em canions. Enders et al. (2019) avaliaram a relação sedimento e MP através das condições de movimento dos fluidos e discutiram sobre a compensação em tamanho, por ordem de grandeza, entre estes materiais.

Os módulos utilizados no OpenFlows FLOOD® para avaliar as propriedades coesivas são o RunOff Properties e Drainage Network. A condição de erosão e deposição são as que oferecem maior impacto na permanência de MP na bacia hidrográfica. A erosão está apresentada na Eq. 7 e a deposição na Eq. 8.

$$\begin{cases} E_s = E \times P_{enr} \times \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) & \text{se } \tau_b > \tau_{ce} \\ E_s = 0 & \text{se } \tau_b \leq \tau_{ce} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} D_s = C \times W_s \times 1E - 3 \times \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right) & \text{se } \tau_b < \tau_{cd} \\ D_s = 0 & \text{se } \tau_b \geq \tau_{cd} \end{cases} \quad (8)$$

Para a erosão E_s é o fluxo da propriedade erodida, E é o fator de erosão, P_{enr} é a razão de enriquecimento da propriedade para sedimento coesivo existente no leito do rio, τ_b é a tensão de cisalhamento no leito e τ_{ce} é a tensão de cisalhamento mínima para a erosão. E para deposição, D_s é o fluxo da propriedade depositada, C é a concentração da propriedade, W_s é a velocidade de deposição da propriedade, $1E - 3$ é a conversão de unidades [g \rightarrow kg], τ_b é a tensão de cisalhamento no leito e τ_{cd} é a tensão de cisalhamento máxima para deposição (MOHID WIKI, 2021).

2.4. Entrada de MP na bacia hidrográfica

A quantidade de MP que ingressa no rio pode ser através de uma fonte pontual e de uma fonte difusiva. A fonte pontual está ligada ao uso de produtos que contenham MP, tais como roupas e cosméticos, que são conhecidas como fontes primárias. A fonte difusiva está associada a fragmentação do macrolplástico ao nível micro. O cálculo analítico de pré-processamento é adaptado da metodologia apresentada por Van Wijnen et al. (2019) para definir a entrada de MP por fontes pontuais e difusivas.

A análise inicia-se com o balanço entre as fontes de entrada e está apresentado na Eq. 9:

$$Yld_{MP} = (\sum RSpnt_i + \sum RSdiff_j) \quad (9)$$

onde Yld_{MP} é a exportação de MP na bacia por ano, $RSpnt_i$ é a entrada de MP no rio através de uma fonte pontual, $RSdiff_j$ é a entrada de MP no rio através de uma fonte difusiva.

A parcela de fonte pontual é apresentada na Eq. 10:

$$RSpnt_i = WSin_i \times Pden \quad (10)$$

onde, $WSin_i$ é a entrada per capita de MP por uma fonte pontual, $Pden$ é a densidade populacional da bacia hidrográfica.

A parcela de fonte difusiva é apresentada na Eq. 11:

$$RSdiff_j = F_{macro} \times WS_f \times t_r \quad (11)$$

onde, F_{macro} é a taxa de macrolplástico que se transformam em MP, WS_f é a entrada anual de macrolplástico, t_r é o tempo médio de residência.

A entrada anual de macroplástico foi obtida através dos dados de consumo nacional de plásticos nos anos de 2009 e 2019. Este montante foi distribuído igualmente pela população brasileira no mesmo ano de referência, e assim assumindo a premissa de que cada habitante possui o mesmo consumo médio deste material. Em seguida, foi obtido dados populacionais de Macaé, e com isso, definido quanto de macroplástico foi consumido no município.

O valor da descarga foi obtido aplicando o método da descarga sólida total, também conhecido como método de Colby. O procedimento de análise consiste na utilização de três ábacos e dados de descarga líquida, velocidade média, profundidade, largura e descarga sólida (PEIXOTO, 2019).

O método a descarga sólida é calculado através da Eq. 12 e medida em T/d:

$$Q_{st} = Q_{ss} + Q_{nm} \quad (11)$$

A descarga em suspensão Q_{ss} é calculada por:

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_{ss} \quad (12)$$

onde, Q é a vazão e C_{ss} é a concentração de sedimentos suspensos em mg/L.

E a descarga não medida Q_{nm} é calculada por:

$$Q_{nm} = q_{nm} \cdot K \cdot L \quad (13)$$

onde q_{nm} é a descarga sólida não medida aproximada por metro de largura, K é um fator de correção, e L é a largura da seção.

2.5. Condições iniciais e de contorno

A área de drenagem obtida com a construção do terreno digital abrange exclusivamente a parte urbana da cidade e está completamente inserida na região de baixo curso do rio. Não está sendo considerado a entrada de MP através da fronteira da rede de drenagem visto que o entorno é basicamente composto por vegetação e possui baixos índices populacionais.

Neste trabalho é avaliado duas hipóteses para o comportamento das partículas de sedimentos submetidas a chuvas torrenciais na rede de drenagem da cidade de Macaé. A primeira referente ao MP

primário que entra na rede de drenagem diretamente, implementadas através de descargas de material. A segunda é referente ao MP secundário que está depositado no solo da cidade, que é erodido com a velocidade da correnteza formada pela água da chuva, e são implementados através do estudo de diferentes tensões de cisalhamento.

A erosão de sedimentos ocorre quando a tensão de cisalhamento presente no fundo, τ_b , excede a tensão crítica de cisalhamento para erosão, τ_{ce} , analogamente, para existir a ocorrência de deposição é necessário que seja atendido o critério $\tau_{cd} < \tau_{ce}$. A fim de representar materiais com diferentes densidades, sob regime de chuva constante, foram implementados valores de incremento da tensão de cisalhamento de deposição e erosão, conforme valores apresentados na tabela 1.

Tabela 1- Tensão crítica de cisalhamento

Sim	Tensão crítica para erosão [N.m⁻²]	Tensão crítica para deposição [N.m⁻²]
#1	0,2	0,05
#2	0,4	0,2
#3	0,6	0,4
#4	1,0	0,8

Valores médios de longo termo de vazão (QMLT) foram obtidos do relatório de Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas (Inea, 2014). As simulações de descarga levaram em consideração valor de precipitação constante para os anos de 2009 e 2019, e também utilizando séries históricas obtidas em estação meteorológica do INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, localizada na cidade de Macaé. De acordo com características hidrossedimentológicas apontadas por Souza (2013), taxas apontadas por Sundt et al. (2014) e Franz et al. (2014), e climáticas da região, adotou-se como premissas os dados da tabela 2.

Tabela 2- Parâmetros utilizados no modelo

Parâmetro	Valor	Unidade
Taxa de erosão	5×10^{-5}	kg.m ⁻² .s ⁻¹
Vazão (Q _{MLT})	50	m ³
Precipitação constante	10	mm.h ⁻¹
Taxa de fragmentação do plástico	3%	ano ⁻¹

O ponto de análise da simulação está situado na foz do rio Macaé conforme mostrado na figura



Figura 3: Ponto de análise na foz do rio Macaé

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da simulação de descarga na rede de drenagem para o ano de 2009 e 2019 podem ser observados na figura 4, onde é apresentado o comportamento da concentração de particulados ao longo de dias, submetidos a uma chuva intensa. A semelhança demonstra um comportamento esperado, uma vez que, a descarga em suspensão Q_{st} , que representa a concentração de MP suspenso, calculado para o ano de 2009, foi de 38,06 mg/L e no ano de 2019 foi de 30,80 mg/L.

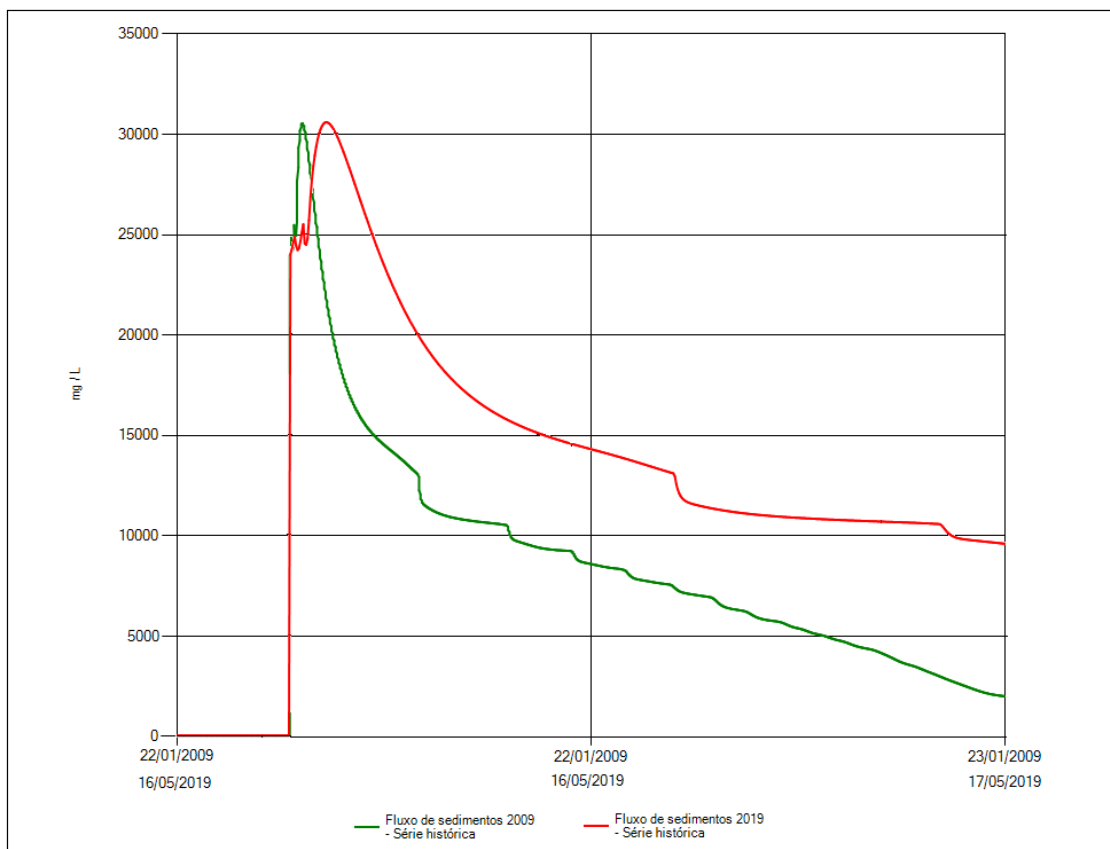


Figura 4: Fluxo de sedimentos a partir de séries históricas de chuva

É possível observar que apesar da semelhança entre as curvas de concentração, o ano de 2009 possui maior intensidade, e para o ano de 2019 há maior suavidade. Isto deve-se ao fato da diferença de precipitação entre os anos, que pode ser observado nas figuras 5 e 6, e assim explica a diferença entre a taxa de decaimento da concentração entre os gráficos.

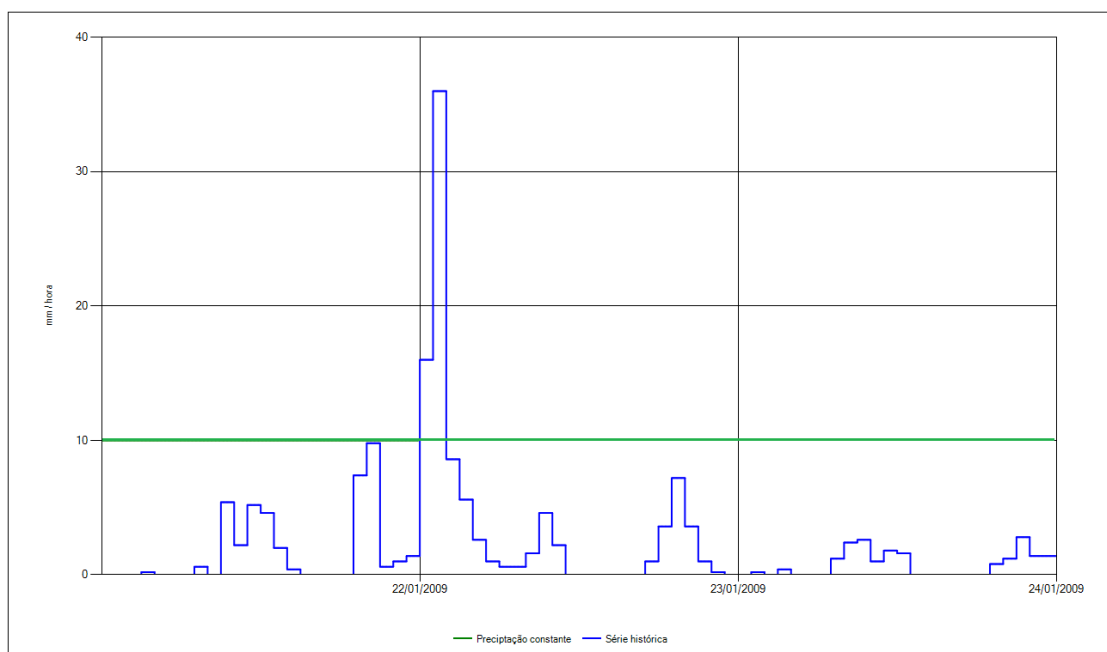


Figura 5: Precipitação implementada para o ano de 2009

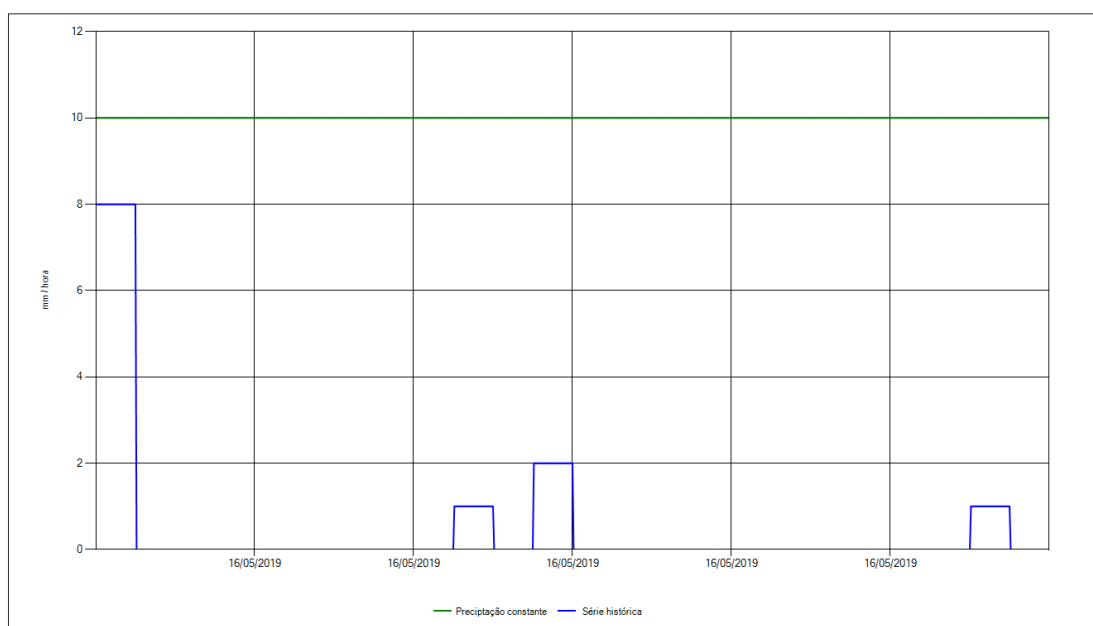


Figura 6: Precipitação implementada para o ano de 2019

Os resultados obtidos nas simulações com diferentes tensões de cisalhamento mostram que a concentração de sedimentos de fundo varia de acordo com o incremento de tensão. A medida que a tensão de erosão aumenta, diminui a quantidade de particulados, o que pode ser observado na figura 7. Como estas simulações foram realizadas com chuva constante, a velocidade do runoff incidiu de

forma homogênea em todas as simulações, evidenciando o potencial impacto das tensões de deposição e erosão.

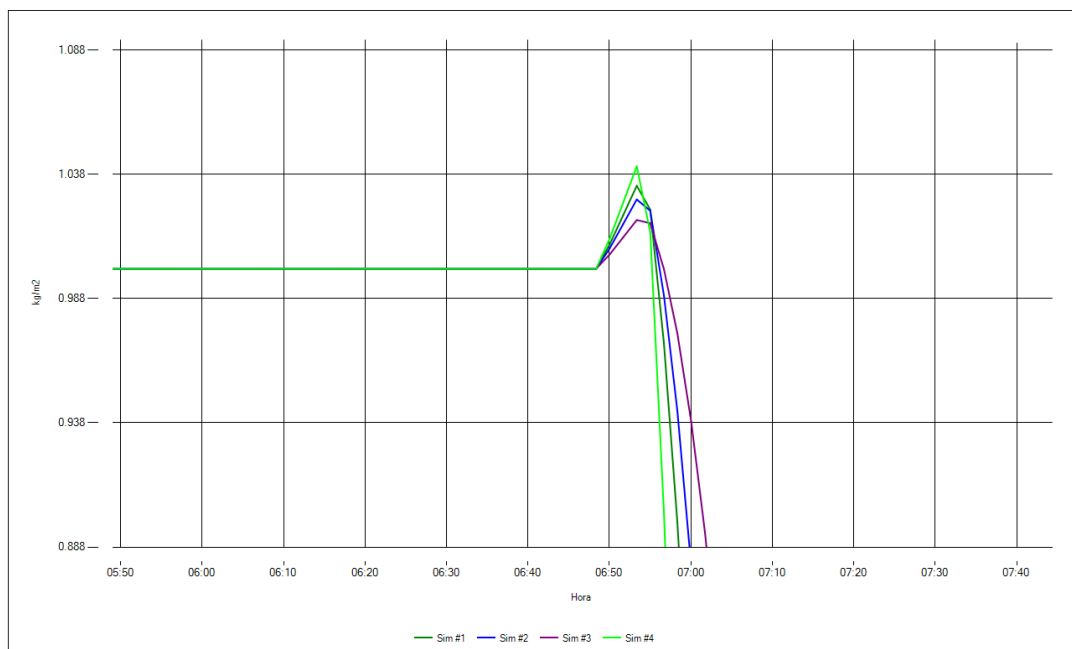


Figura 7: Sedimentos de fundo

Observa-se na figura 8 que apesar da diferença de tensão o pico de sedimentos passa pelo de análise, indicando que as partículas entram na corrente marítima.

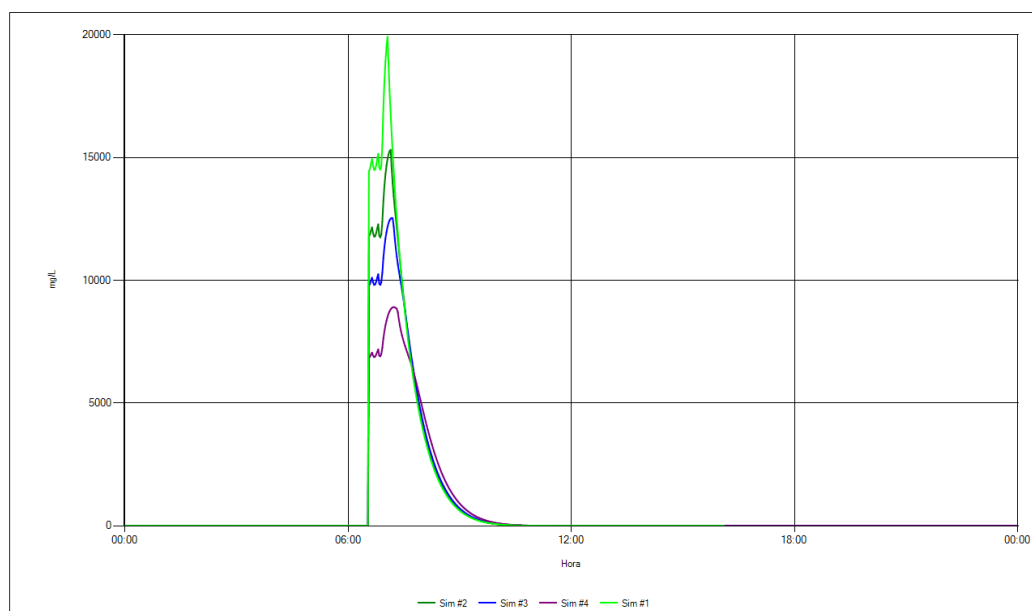


Figura 8: Fluxo de sedimentos

Roy et al. (2021), apresentaram estudo que demonstram como as propriedades das partículas de MP e a geometria dos obstáculos podem afetar o efeito da deposição. Segundo os autores a sedimentação depende da posição inicial da partícula, e a deposição ocorre quando a velocidade tende a zero.

Stocchino et al. (2019), realizaram estudos do efeito de ondas e marés, onde consideram ser fundamental levar em consideração o caráter inercial das partículas de MP. Para estes autores é relevante as análises em águas rasas, onde a combinação de disponibilidade de partículas e ondas do mar podem acelerar a deposição de partículas mais pesadas.

As discussões levantadas pelos autores reforçam os resultados encontrados nesta pesquisa, onde a representatividade qualitativa de MP na foz do rio Macaé é demonstrada através da implementação do modelo hidrológico.

5. CONCLUSÃO

A analogia apresentada representou um comportamento esperado para o transporte de sedimentos, pois, a descarga hipotética de partículas não afetou o comportamento hidrossedimentológico da área estudada. O modelo não demonstrou alteração das propriedades no volume de controle, uma vez que não foi verificado a não convergência ou falha nas simulações.

A representatividade de materiais com diferentes densidades, sob regime de chuva constante, foram implementados através de valores de incremento da tensão de cisalhamento de deposição e erosão. No entanto, fatores como a relação entre velocidade e vazão do leito principal, bem como sedimentos de fundo e tensão de cisalhamento não tiveram alteração dos padrões.

Apesar das premissas adotadas, e da modelagem implementada, convergirem para um comportamento desejado, o tempo de simulação se apresentou demasiadamente logo para um período curto de dias analisados. Este fato indica que é interessante avaliar outras condições de contorno e inicial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria de Plástico, São Paulo: Perfil 2019. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/>, acesso em 07 novembro de 2020.

Auta, H.S.; Emenike, C.U.; Fauziah, S.H.; (2017), "Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions", *Environment International*, v. 102, p. 165-176.

Bentley, Bentley Communities, OpenFlows FLOOD. Disponível em https://communities.bentley.com/products/hydraulics___hydrology/f/haestad-hydraulics-and-hydrology-forum/171701/new-product-release-openflows-flood, acessado em 19 de setembro de 2021.

Caruso, G.; (2019), “Microplastics as vectors of contaminants”, *Marine Pollution Bulletin*, v. 146, p. 921-924.

CBH Macaé, Comitê de Bacia do rio Macaé e das Ostras. Disponível em <https://cbhma-cae.eco.br/a-bacia/publicacoes/>, acessado em 9 de Agosto de 2020.

Cole, M.; Lindeque, P.; Halsband, C.; Galloway, T.S.; (2011), “Microplastics as contaminants in the marine environment: A review”, *Marine Pollution Bulletin*, v. 62, n. 12, p. 2588–2597.

Crawford, C. B.; Quinn, B; (2017), “Microplastic pollutants”, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Enders, K.; Käppler, A.; Biniash, O; Feldens, P.; Stollberg, N.; Lange, X.; Fischer, D.; Eichhorn, K.J.; Pollehne, F.; Oberbeckmann, S.; Labrenz, M.; (2019), “Tracing microplastics in aquatic environments based on sediment analogies”, *Nature, Scientific Reports*, v. 9, 15207.

Estigoni, M.V.; Miranda, R.B.; Veronez, O.; Leite, C.B.; Botelho, D.A.; Dotto, F.R.L.; Bramorski, J.; Villela, S.M.; Mauad, F.F.; (2012), “Fundamentos teóricos sobre modelagem de transporte de sedimentos coesivos”, Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos.

Estigoni, M. V.; Botelho, D. A.; Teakle, I. A. L.; Miranda, R. B.; Veronez, O.; Mauad, F. F.; (2013), “Modelagem de transporte de sedimentos coesivos parte 1: Fundamentos teóricos”, Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos.

Franz, G.; Pinto L.; Ascione, I.; Mateus, M.; Fernandes, R.; Leitão, P.; Neves, R.; (2014), “Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 151, p. 34-44.

Inea, Instituto Estadual do Ambiente; (2014), “Estudos Hidrológicos e Vazões Extremas”, disponível em <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2021/03/Diagn%C3%B3stico-Estudos-Hidrol%C3%B3gicos.pdf>, acessado em 13 de setembro de 2021.

Jeronymo, C.A.L; Silva, E.R.; Fonseca, K.T.; Ferreira, M.I.P; (2016), “Sistemas de Informação Geográfica e a classificação de corpos hídricos: o caso de Macaé (RJ, Brasil)”, *Caderno de Geografia*, v.26, n.47.

Macaé, Prefeitura municipal de Macaé, RJ. Disponível em <http://www.macaee.rj.gov.br/buscagoogle?cx=009924012788200551023%3Aakc5b65jaqq&cof=FO-RID%3A9&ie=UTF8&q=Atlas+Ambiental+da+Bacia+do+Rio+Maca%C3%A9+2015>, acessado em 9 de Agosto de 2020.

MOHID WIKI, MOHID Land. Disponível em http://wiki.mohid.com/index.php?title=Mohid_Land, acessado em 19 de setembro de 2021.

MOHID WIKI, Equations in MOHID Land. Disponível em http://wiki.mohid.com/index.php?title=Equations_in_Mohid_Land#2D_descritization_.28Runoff.29, acessado em 19 de setembro de 2021.

MOHID WIKI, Module RunoffProperties. Disponível em http://wiki.mohid.com/index.php?title=Module_RunoffProperties#Erosion.2FDeposition, acessado em 19 de setembro de 2021.

Neves, R.; (2013), “The MOHID concept”, Ocean modelling for coastal management – Case studies with MOHID, p.1.

Peixoto, R.A.O.; (2019), “Estudo do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do rio Jordão - UPGRH-PN 1”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Pohl, F.; Eggenhuisen, J.T.; Kane, I.A.; Clare, M.A.; (2020), “Transport and Burial of Microplastics in Deep-Marine Sediments by Turbidity Currents”, Environmental Science & Technology, v. 54, p. 4180–4189.

Ribeiro, F.; O’Brien, J.W.; Galloway, T.; Thomas, K.V.; (2019), “Accumulation and fate of nano- and micro-plastics and associated contaminants in organisms”, Trends in Analytical Chemistry, v.111, p. 139-147.

Rodrigues, J.P.; Duarte, A.C.; Echeandía, J.S.; Santos, T.R.; (2019), “Significance of interactions between microplastics and POPs in the marine environment: A critical overview”, Trends in Analytical Chemistry, v. 111, p. 252-260.

Roy, N.; Wijaya, K. P.; Götz, T.; Sundar, S.; (2021), “A mathematical model governing the short-range transport of microplastic particles in a lid-driven cavity with an obstacle”, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, v. 101, p. 105893, 2021.

Souza, P.A.; (2013), “Dinâmica hidrossedimentológica e padrões de conectividade no rio Macaé (RJ)”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- Stocchino, A.; Leo, F.D.; Besio, G.; (2019), “Sea Waves Transport of Inertial Micro-Plastics: Mathematical Model and Applications”, *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 7, n. 12, p. 467, 2019.
- Sundt, P.; Schulze, P.E.; Syversen, F.; (2014), “Sources of microplastics-pollution to the marine environment”, Norwegian Environment Agency, Report no: M-321, North Sea, Norway.
- Van Wijnen, J.; Ragas, A. M. J.; Kroeze, C.; (2019), “Modelling global river export of microplastics to the marine environment: Sources and future trends”, *Science of The Total Environment*, v. 673, p. 392–401.
- Wu, P.; Huang, J.; Zheng, Y.; Yang, Y.; Zhang, Y.; He, F.; Chen, H.; Quan, G.; Yan, J.; Li, T.; Gao, B. (2019), “Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 184, 109612.
- Yang, C. T.; (1977) “The movement of sediment in rivers”, *Geophysical Surveys*, v. 3, n. 1, p. 39–68.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO

ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria de Plástico, São Paulo: Perfil 2020. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2021/08/Perfil2020_abiplast.pdf, acesso em 10 de outubro de 2021.

COLE, M.; LINDEQUE, P.; HALSBAND, C.; GALLOWAY, T. S. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, v. 62, n. 12, p. 2588–2597, dez. 2011.

APÊNDICE

Uso e ocupação do solo										
Setores Administrativos	Bairros	Senso 2010			Estimativa 2020		Saneamento			Área [km ²]
		População [habitantes]	Total de domicílios	Densidade demográfica [habitantes/km ²]	População [habitantes]	Densidade demográfica [habitantes/km ²]	Abastecimento de água [% regular]	Esgoto Sanitário [% regular]	Destino do lixo [%regular]	
Azul - SA.1	Imboassica Lagoa Vale Encantado Cavaleiros Granja dos Cavaleiros Bairro da Glória	20132,00	9071,00	877,87	26964,00	1175,93	94,80	94,54	98,54	22,93
Amarelo - SA.2	Riviera Fluminense Visconde de Araújo Miramar Praia Campista	32384,00	12835,00	8756,41	38177,00	10318,11	98,18	97,32	99,92	3,70
Verde - SA.3	Virgem Santa Botafogo Aroeira	29660,00	10261,00	3469,88	34323,00	4014,39	96,52	79,77	99,61	8,55
Vermelho - SA.4	Centro Imbetiba Cajueiros	17337,00	7488,00	6420,40	16959,00	6281,11	98,52	98,18	99,95	2,70
Vinho - SA.5	Ajuda Barra de Macaé	44239,00	13206,00	1753,41	59362,00	2343,55	68,08	79,59	97,84	25,23
Marrom - SA.6	Cabiúnas Lagomar São José do Barreto Aeroporto	48864,00	17311,00	1650,73	68652,00	2319,32	57,31	84,45	98,45	29,60
Bege - SA.7	Sana Cachoeiros de Macaé	2867,00	2173,00	7,88	3105,00	8,53	14,36	57,33	89,63	364
Laranja - SA.8	Frade Glicério	4187,00	2273,00	15,98	4903,00	18,71	-	-	-	262
Cinza - SA.9	Córrego do Ouro	3992,00	1703,00	16,77	4935,00	20,74	-	-	-	238
(*) Não informado										

Quadro 1: Dados populacionais da cidade de Macaé (MACAÉ, 2020)

Entrada de MP Primário no rio através de uma fonte pontual [kg/km ²]			Entrada de MP Secundário no rio através de uma difusiva [kg/km ²]			Entrada total de MP no rio Macaé [kg/km ²]		
Setores Administrativos	2009	2019	Setores Administrativos	2009	2019	Setores Administrativos	2009	2019
<i>Epnt</i> _{SA1}	2.196,98	1.938,31	<i>Edif</i> _{SA1}	146,81	281,56	<i>Emp</i> _{SA1}	2.343,79	2.219,87
<i>Epnt</i> _{SA2}	22.558,41	17.507,69	<i>Edif</i> _{SA2}	1.396,27	2.367,35	<i>Emp</i> _{SA2}	23.954,68	19.875,04
<i>Epnt</i> _{SA3}	7.327,14	5.583,23	<i>Edif</i> _{SA3}	559,36	930,07	<i>Emp</i> _{SA3}	7.886,50	6.513,29
<i>Epnt</i> _{SA4}	16.686,50	10.751,92	<i>Edif</i> _{SA4}	1.022,69	1.439,75	<i>Emp</i> _{SA4}	17.709,20	12.191,67
<i>Epnt</i> _{SA5}	3.694,22	3.252,06	<i>Edif</i> _{SA5}	300,15	573,02	<i>Emp</i> _{SA5}	3.994,37	3.825,08
<i>Epnt</i> _{SA6}	3.714,28	3.414,98	<i>Edif</i> _{SA6}	276,90	406,21	<i>Emp</i> _{SA6}	3.991,19	3.821,18
<i>Epnt</i> _{SA7}	11,96	8,53	<i>Edif</i> _{SA7}	1,71	2,59	<i>Emp</i> _{SA7}	13,67	11,12
<i>Epnt</i> _{SA8}	42,30	32,63	<i>Edif</i> _{SA8}	14,09	22,13	<i>Emp</i> _{SA8}	56,39	54,76
<i>Epnt</i> _{SA9}	44,39	36,15	<i>Edif</i> _{SA9}	14,79	24,52	<i>Emp</i> _{SA9}	59,18	60,67
<i>Epnt</i> _{total}	56.276,18	42.525,49	<i>Edif</i> _{total}	3.732,78	6.047,20	<i>Emp</i> _{total}	60.008,96	48.572,68

Quadro 2: Resultado do cálculo da quantidade de MP que entra na bacia por ano