

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

GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS COM A SIMULAÇÃO DE EVENTOS CRÍTICOS:
ANÁLISE DE LEGISLAÇÕES E MODELAGEM DE CHUVAS EXTREMAS EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA NO SUDESTE DO BRASIL, COM BASE NO MODELO NUMÉRICO MOHID

VINICIUS VANDERLEY MIGUEL DA SILVA

MACAÉ-RJ

2021

VINICIUS VANDERLEY MIGUEL DA SILVA

GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS COM A SIMULAÇÃO DE EVENTOS CRÍTICOS:
ANÁLISE DE LEGISLAÇÕES E MODELAGEM DE CHUVAS EXTREMAS EM UMA BACIA
HIDROGRÁFICA NO SUDESTE DO BRASIL, COM BASE NO MODELO NUMÉRICO MOHID

Relatório de dissertação apresentado 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. Luis Felipe Umbelino dos Santos

Coorientador: Dr. Jader Lugon Junior

MACAÉ-RJ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586g Silva, Vinicius Vanderley Miguel da, 1985-.
Gestão de bacias hidrográficas com a simulação de eventos críticos: análise de legislações e modelagem de chuvas extremas em uma bacia hidrográfica no sudeste do Brasil, com base no modelo numérico MOHID. / Vinicius Vanderley Miguel da Silva. — Macaé, RJ, 2021.
xv, 76 f.: il. color.

Orientador: Luís Felipe Umbelino dos Santos, 1978-.
Coorientador: Jader Lagon Júnior, 1962-.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2021.
Inclui referências.
Área de concentração: Sustentabilidade Regional.
Linha de Pesquisa: Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental.

1. Escoamento urbano – Macaé, Rio, Bacia (RJ). 2. Controle de inundações – Legislação – Brasil. 3. Águas pluviais – Macaé, Rio, Bacia (RJ). 4. Hidrologia urbana. 5. Drenagem – Macaé, Rio, Bacia (RJ). 6. Hidrometeorologia. 7. MOHID Water Modelling System (software) – modelagem computacional. I. Santos, Luís Felipe Umbelino dos, 1978-, orient. II. Lagon Júnior, Jader, 1962-, coorient. III. Título.

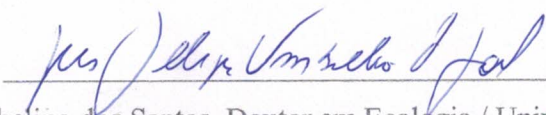
CDD 628.21098153

(23. ed.)

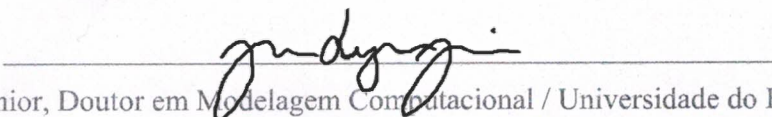
Relatório de Dissertação intitulado GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS COM A SIMULAÇÃO DE EVENTOS CRÍTICOS: ANÁLISE DE LEGISLAÇÕES E MODELAGEM DE CHUVAS EXTREMAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUDESTE DO BRASIL, COM BASE NO MODELO NUMÉRICO MOHID, elaborado por **Vinicius Vanderley Miguel da Silva** e apresentado, 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 07/07/2021.


Banca Examinadora:



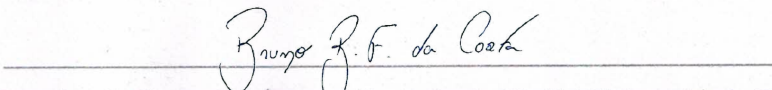
Luís Felipe Umbelino dos Santos, Doutor em Ecologia / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) – Orientador



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



Marcos Antônio Cruz Moreira, Doutor em Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)



Bruno Barzellay Ferreira da Costa, Doutor em Engenharia Civil / Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade Federal do Rio de Janeiro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à todas as pessoas que diretamente ou indiretamente fizeram parte dessa conquista. Em especial minha esposa, que com seu apoio incansável nos momentos difíceis, tornou possível a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por acompanhar toda minha trajetória e abençoar-me com uma segunda chance de vida, sem ele não seria possível a realização deste sonho.

Aos meus pais, Marcia e Walter, por fornecerem as bases para que eu chegasse até aqui, mesmo diante de tantas dificuldades e imprevistos da vida.

Agradeço ao meu avô Antônio Miguel (*in memoriam*) e ao meu tio Marco da Silva (*in memoriam*), pelos ensinamentos e conhecimentos ao longo da vida, foram de extrema importância na minha formação como cidadão e pesquisador.

À minha esposa Tamyres, pelo apoio incansável e compreensão por todos esses anos de estudo. E, por acima de tudo compartilhar sua vida comigo.

Ao meu orientador professor Umbelino e ao meu coorientador professor Jader Lugon, pela atenção, apoio e disponibilidade em ajudar. Companheiros imprescindíveis para a concretização dessa etapa acadêmica.

Ao Instituto Federal Fluminense e a toda docência do programa de pós graduação em Engenharia Ambiental por proporcionar toda infraestrutura e ensinamentos para realização desta pesquisa.

A todos meus colegas de turma por ajuda nos momentos de dificuldade.

Agradecimento ao meu colega de trabalho e amigo pessoal Edson, sempre incentivador para a continuidade dos estudos.

E por fim, agradeço a oportunidade de evoluir e estudar em uma instituição pública e de qualidade.

EPÍGRAFE

"O único homem que está isento de erros é aquele que não arrisca acertar"

Albert Einstein

LISTA DE FIGURAS

APRESENTAÇÃO	
Figura 1 – 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	02
Figura 2 – Distribuição por continente dos desastres naturais ocorridos no mundo (1900-2006)	03
Figura 3 – Tipos de desastres naturais ocorridos no Brasil (1900-2006)	04
ARTIGO CIENTÍFICO 1	
<i>Figure 1 – Medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro – Brazil</i>	14
ARTIGO CIENTÍFICO 2	
Figura 1 – Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) - Municípios abrangidos	29
Figura 2 – Sistema de equações resolvido pelo MOHID Land.....	30
Figura 3 – <i>Delineation of the watershed (Software MOHID Studio)</i>	31
Figura 4 – <i>[channel flow] [MOHID Land Model] – Node_RioMacaé_FOZ (Software MOHID Studio)</i>	32
Figura 5 – Resultado final da simulação, mapa <i>Watershed a Macaé River RunOff (Software MOHID Studio)</i>	33
ARTIGO CIENTÍFICO 3	
Figura 1 – Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) em destaque na cor verde	39
Figura 2 – Carta-Imagem de Macaé-RJ: Bairros e Drenagem	40
Figura 3 – Equações do MOHID Land	41
Figura 4 – <i>Delineation of the watershed</i>	44
Figura 5 – Classificação dos canais de uma rede de drenagem segundo Strahler	45
Figura 6 – Características da bacia hidrográfica que influenciam no tempo de concentração.	51
Figura 7 – Relevo Sombreado da região do estuário do rio Macaé - IHS_RGB - Satélite LandSat 8	52
Figura 8 – Formato de “sino” em chuva de projeto, após aplicação da metodologia SCS	55
Figura 9 – Assentamentos precários no entorno do Estuário do Rio Macaé, braço novo e antigo do rio	58
Figura 10 – <i>[channel flow] [MOHID Land Model] – Node_RioMacaé_LinhaAzul. Simulação 1</i>	59

Figura 11 – Uso e Cobertura do Solo – INEA – recorte da área de interesse. (<i>Software QGIS</i>)	60
Figura 12 – Uso e Cobertura do Solo – INEA – recorte da área de interesse. (<i>Software QGIS</i>)	60
Figura 13 – Distribuição do <i>Manning</i> ao longo da Bacia Hidrográfica	62
Figura 14 – Distribuição do <i>Curve Number</i> ao longo da Bacia Hidrográfica	64
Figura 15 – [<i>channel flow</i>] [<i>MOHID Land Model</i>] – Node_RioMacaе_LinhaAzul. Simulações 1 e 2	65
Figura 16 – [<i>channel flow</i>] [<i>MOHID Land Model</i>] – Node_RioMacaе_LinhaAzul. Simulações 1, 2 e 3	66
Figura 17 – Variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 50 anos	67
Figura 18 – Gráfico da variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 50 anos	67
Figura 19 – [<i>channel flow</i>] [<i>MOHID Land Model</i>] – Node_RioMacaе_LinhaAzul. Simulações 1, 2, 3 e 4	68
Figura 20 – Variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 20 anos	68
Figura 21 – Gráfico da variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 20 anos	69
Figura 22 – [<i>channel flow</i>] [<i>MOHID Land Model</i>] – Node_RioMacaе_LinhaAzul. Simulações 1, 2, 3, 4 e 5	70
Figura 23 – Variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 10 anos	70
Figura 24 – Gráfico da variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 10 anos	71
Figura 25 – [<i>channel flow</i>] [<i>MOHID Land Model</i>] – Node_RioMacaе_LinhaAzul. Simulações 1, 2, 3, 4, 5 e 6	72

LISTA DE TABELAS

APRESENTAÇÃO	
Tabela 1 – Evolução populacional urbana - Brasil.....	01

ARTIGO CIENTÍFICO 3	
Tabela 1 – Características do tipo de solo ou Grupo Hidrológico do Solo (GHS). Adaptado de Schwab, (1993)	48
Tabela 2 – Valor da CN na condição II de chuva antecedente e $I_a = 0,2S$	49

LISTA DE QUADROS

ARTIGO CIENTÍFICO 1	
Quadro 1: <i>Panorama of medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro – Brazil</i>	15
Quadro 2 – <i>Specific legislation existing in medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro – Brazil</i>	18
ARTIGO CIENTÍFICO 3	
Quadro 1 – Variações da equação de Saint Venant	42
Quadro 2 – Estações meteorológicas ANA - Região Hidrográfica VIII - Estado do Rio de Janeiro	50
Quadro 3 – Parâmetros de regionalização de chuvas intensas	53
Quadro 4 – Reordenamento da distribuição de chuvas, método SCS	55
Quadro 5 – Manning atribuído para cada classe de uso do solo	61
Quadro 6 – <i>Curve Number</i> (CN) atribuído para cada classe de uso do solo	63

LISTA DE FOTOGRAFIAS

ARTIGO CIENTÍFICO 3	
Fotografia 1 – Rio Macaé próximo a região da “linha azul”	56
Fotografia 2 – Rio Macaé próximo a região da “linha azul”, detalhe para a rodovia municipal	57
Fotografia 3 – Rio Macaé próximo a região da “linha azul”, detalhe para construções irregulares próximas ao rio	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica.

CERHI – Conselho Estadual de Recursos Hídricos.

CN – *Curve Number*.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

DER – Departamento de Estradas e Rodagem.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

EM-DAT – *Emergency Events Database*.

FISRWG – *Federal Interagency Stream Restoration Working Group*.

GHS – Grupo Hidrológico de Solos.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano.

IFFluminense – Instituto Federal Fluminense.

IHS – *Intensity Hue Saturation*.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente.

IST – Instituto Superior Técnico.

MARETEC – *Marine and Environmental Technology Research Center*.

MDT – Modelo Digital de Terreno.

MOHID – *Water Modelling System*.

ODS – Objetivo do desenvolvimento sustentável.

ONU – Organização das Nações Unidas.

OPP - *Object-oriented programing*.

OUC – Operação Urbana Consorciada.

PIB – Produto Interno Bruto.

PND – Plano Nacional de Desenvolvimento.

PNPDEC – Política Nacional de Proteção e Defesa Civil.

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos.

PNSB – Política Nacional de Saneamento Básico.

RGB – *Red Green Blue*.

RH-VIII – Região Hidrográfica VIII.

SCS – *Soil Conservation Service*.

SWAT – *Soil and Water Assessment Toll*.

TC – Tempo de Concentração.

TR – Tempo de Retorno.

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

USDA - *United States Department of Agriculture.*

GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS COM A SIMULAÇÃO DE EVENTOS CRÍTICOS: ANÁLISE DE LEGISLAÇÕES E MODELAGEM DE CHUVAS EXTREMAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUDESTE DO BRASIL, COM BASE NO MODELO NUMÉRICO MOHID

RESUMO

Enchentes e inundações são problemas recorrentes em várias cidades brasileiras e no mundo, que frequentemente enfrentam desenvolvimento desordenado. Este cenário é devido a várias causas como o aumento de áreas impermeáveis, mudanças climáticas, ineficiência dos sistemas de drenagem, obstrução de canais, além da não conservação da mata ciliar de rios e córregos causando assoreamento e o rápido escoamento superficial das águas. Nesta pesquisa, apresentaremos uma análise das legislações sobre inundações em municípios do estado do Rio de Janeiro e a elaboração de modelos computacionais capaz de simular chuvas intensas em uma bacia hidrográfica localizada entre os municípios de Carapebus, Nova Friburgo, Conceição de Macabu e Macaé. A maior parte da bacia hidrográfica está localizada no município de Macaé, conhecida também como a “Capital Nacional do Petróleo”, devido a um grande número de empresas e indústrias ligadas ao setor petrolífero, sendo uma cidade de extrema relevância no interior do estado do Rio de Janeiro. Na primeira parte desta pesquisa foi realizada revisão bibliográfica sobre o tema inundações além de analisar as respectivas legislações aplicada à gestão desse fenômeno em municípios de médio porte no estado do Rio de Janeiro. Na segunda etapa desta pesquisa foi realizada uma análise, mais específica, da forma como a modelagem computacional pode contribuir para uma melhor gestão das águas e previsão de eventos críticos. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi necessário a realização de simulações matemáticas e criação de modelos computacionais para uma melhor representação da realidade. Estudos avançados do uso do solo, modelos hidrológicos e topográficos, também foram de extrema importância para compreender o escoamento das águas e o comportamento das redes de drenagem da bacia hidrográfica. Com os resultados obtidos no modelo computacional, será possível determinar melhorias, inclusive em legislações existentes, que podem ajudar a reduzir o risco e os danos das inundações. Os eventos de mudanças climáticas, no entanto, impõem uma ameaça significativa e precisam de atenção imediata dos gestores das cidades, na implementação rápida de soluções e alternativas para um desenvolvimento mais sustentável das cidades.

Palavras-chave: Chuvas Intensas. Legislações. Modelos matemáticos e hidrológicos. Bacias Hidrográficas.

WATERSHED MANAGEMENT WITH CRITICAL EVENT SIMULATION: ANALYSIS OF LAWS AND RAINFALL MODELING EXTREME IN A WATERSHED IN SOUTHEAST BRAZIL, BASED ON NUMERICAL MODEL MOHID

ABSTRACT

Floods and floods are recurrent problems in several Brazilian cities and in the world, which often face disorderly development. This scenario is due to several causes such as the increase of impermeable areas, climatic changes, inefficiency of the drainage systems, obstruction of channels, in addition to the non-conservation of the riparian forest of rivers and streams causing silting and the rapid runoff of the waters. In this research, we will present an analysis of the flood legislation in municipalities in the state of Rio de Janeiro and the development of computational models capable of simulating intense rainfall in a hydrographic basin located between the municipalities of Carapebus, Nova Friburgo, Conceição de Macabu and Macaé. Most of the hydrographic basin is located in the municipality of Macaé, also known as the “National Petroleum Capital”, due to a large number of companies and industries linked to the oil sector, being a city of extreme relevance in the interior of the state of Rio of January. In the first part of this research, a bibliographic review on the theme of floods was carried out, in addition to analyzing the respective legislation applied to the management of this phenomenon in medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro. In the second stage of this research, a more specific analysis will be carried out of how computational modeling can contribute to better water management and forecasting of critical events. For the development of this research it will be necessary to carry out mathematical simulations and create computational models for a better representation of reality. Advanced land use studies, hydrological and topographic models, are also extremely important to understand the runoff and the behavior of drainage networks in the hydrographic basin. With the results obtained in the computational model, it will be possible to determine improvements, including in existing legislation, which can help to reduce the risk and damage of floods. The events of climate change, however, pose a significant threat and need immediate attention from city managers, in the rapid implementation of solutions and alternatives for a more sustainable development of cities.

Keywords: *Intense rains.. Legislation. Mathematical and hydrological models. Watersheds.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FOTOGRAFIAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	viii
RESUMO.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xii
APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	1
ARTIGO CIENTÍFICO 1: A BRIEF SURVEY ON THE LEGISLATION APPLIED TO FLOODS AND INUNDATIONS IN MEDIUM-SIZED MUNICIPALITIES IN THE STATE OF RIO DE JANEIRO - BRAZIL.....	07
1. INTRODUCTION.....	08
2. LITERATURE REVIEW.....	09
2.1 Urban drainage and the problems of floods, inundations and overflows.....	09
2.2. Legislation applied to urban floods and inundations.....	12
3. MATERIALS AND METHODS.....	13
4. RESULTS AND DISCUSSION.....	13
5. CONCLUSION.....	20
6. BIBLIOGRAPHIC REFERENCES.....	20
ARTIGO CIENTÍFICO 2: MODELAGEM COMPUTACIONAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACAÉ: SIMULAÇÃO DE EVENTOS CRÍTICOS ATRAVÉS DA FERRAMENTA MOHID LAND.....	27
1. INTRODUÇÃO.....	27
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4. CONCLUSÃO.....	33
5. REFERÊNCIAS.....	33
ARTIGO CIENTÍFICO 3: MODELAGEM DE CHUVAS INTENSAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUDESTE DO BRASIL, COM BASE NO MODELO NUMÉRICO MOHID.....	35
RESUMO.....	35
ABSTRACT.....	36
1. INTRODUÇÃO.....	37
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38

2.1 Caracterização da Área de Estudo: Bacia do Rio Macaé.....	38
2.2 Modelagem Computacional.....	40
2.3 Construção do modelo Digital do Terreno.....	43
2.3.1 Número de Strahler.....	44
2.3.2 Coeficiente de Manning.....	45
2.3.3 Escoamento e infiltração - Método do <i>Curve Number</i> (CN).....	46
2.3.4 Modelagem de chuvas extremas - Chuvas de projeto.....	49
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
3.1 Simulações.....	56
4. CONCLUSÕES.....	72
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	76

APRESENTAÇÃO

O surgimento das cidades ocorreu no Oriente Médio, por volta do período compreendido entre os anos de 4.000 a 3.000 a.C., que remontam à Revolução Neolítica. No começo, as cidades surgiram nas margens de rios, como pequenas aldeias e tinham por objetivo ser centro de comércio e/ou também como fortificações de guerra (PINTO, 2020). Segundo Lefebvre (2001) o conjunto de pessoas, suas relações interpessoais, processos sociais, suas atividades econômicas e costumes da cidade sobre os do campo constituem o espaço denominado urbano.

O processo de crescimento das cidades se acelerou, a partir da revolução industrial, por duas razões: a redução do número de trabalhadores do campo a partir da necessidade de mão-de-obra nas fábricas e indústrias. Anteriormente à revolução industrial em todos os países do mundo a população era predominantemente do campo (PACHECO et al., 2014). A industrialização promoveu de modo simultâneo os dois eventos, um de atração pela cidade, outro de expulsão do campo (DEAK; SCHIFFER, 1999).

Posteriormente com a consolidação da nova nação-estado finalmente teve o início do processo de urbanização do Brasil, a partir da dominação dos movimentos separatistas e/ou republicanos de norte a sul do Brasil (DEAK; SCHIFFER, 1999). No Brasil, tradicionalmente, o fenômeno do êxodo rural sempre atraiu grandes massas de pessoas para os espaços urbanos na busca de melhores condições de vida, principalmente do Nordeste para o Sudeste. Com a primeira era Vargas (1930-1945) e o 1º e 2º Plano Nacional de Desenvolvimento – PND (anos 70), o Brasil passou por profundas transformações. Nas décadas de 1940 a 1980 sua população urbana cresceu em uma taxa muito maior que a população rural, conforme demonstrado na tabela abaixo.

BRASIL - 1940-1980

Taxas de Crescimento das Populações Rural e Urbana e Taxas de Urbanização

Total	Taxas de Crescimento Anual				Taxa de Urbanização*	% Urb. (20.000 e +)	% Urb. (Oficial)
	Urbano	Rural	Total	U/R			
1940-1950	4,60	1,71	2,34	2,69	2,21	19,5	31,2
1950-1960	6,18	1,82	3,04	3,39	3,05	24,3	36,2
1960-1970	5,37	1,45	2,89	3,70	2,42	32,7	44,7
1970-1980	4,84	0,44	2,48	11,00	2,31	41,6	55,9
						52,2	67,6

Tabela 1: Evolução populacional urbana – Brasil

Fonte: Modificado de Martine et al. (2016)

Atualmente o fenômeno de chuvas intensas e consequentemente as inundações tem expandindo-se rapidamente por diversas cidades do mundo, devido a uma série de fatores como por exemplo, a urbanização, o aumento populacional e a impermeabilização dos solos, alterando assim as áreas originalmente permeáveis. Em paralelo milhões de pessoas sofrem com a falta de água potável e acesso ao saneamento básico. Este trabalho está em consonância com os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável da agenda 2030 da Organização das Nações Unidas - ONU, que podem ser melhor observados através da Figura 1.

Figura 1: 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

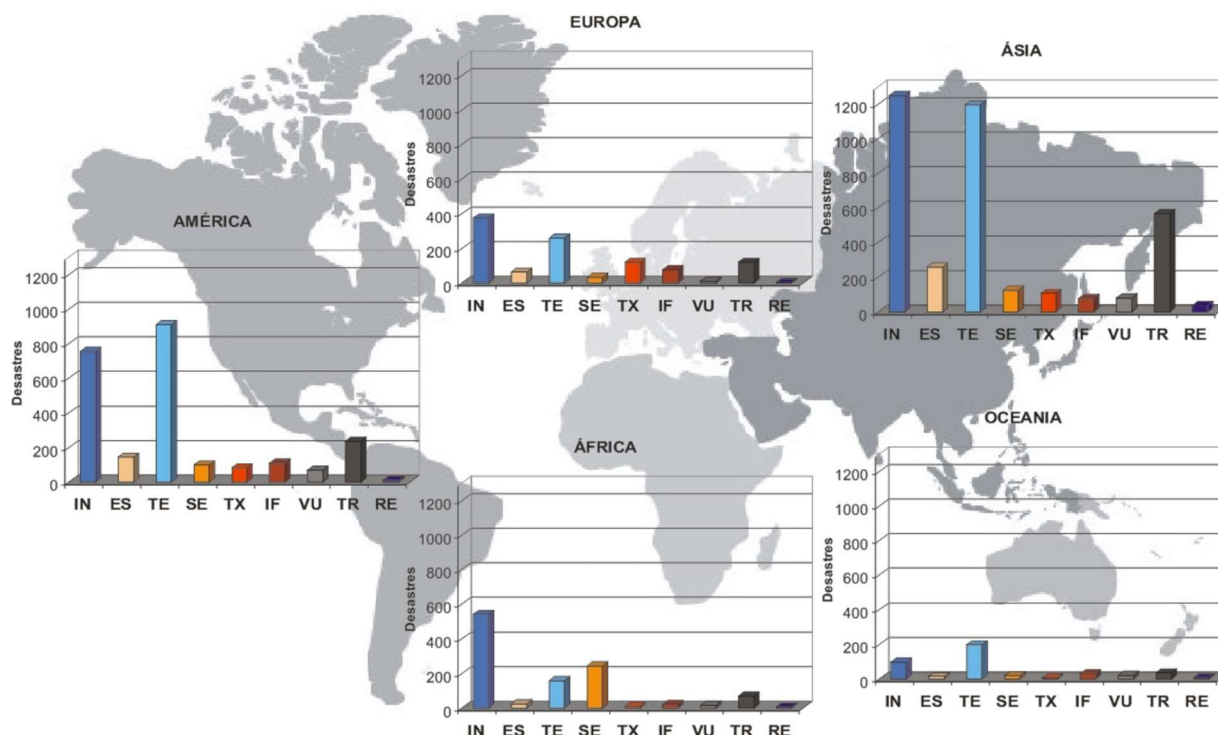


Fonte: ONU (2019).

Podemos destacar o objetivo do desenvolvimento sustentável - ODS 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos (ONU, 2019). Portanto é de extrema relevância para o estado do Rio de Janeiro e para o Brasil, estudos e pesquisas que contribuam para alcançar de forma satisfatória os compromissos assumidos junto a ONU.

Em todo o planeta, milhões de dólares são gastos todos os anos para reparar os prejuízos causados pelas cheias, inundações e chuvas intensas. Conforme Marcelino (2008), é possível verificar a ocorrência de desastres naturais em todos os continentes. Todavia, algumas regiões são mais afetadas em função da magnitude e frequência dos fenômenos e da vulnerabilidade do sistema social. Utilizando os dados de desastres do banco internacional *Emergency Events Database* - EM-DAT, período 1900-2006, o continente que apresentou o maior número de registros foi o asiático (Figura 2), com 3.699 registros, seguido pelo americano, com 2.416 registros (EM-DAT, 2007). Destaca-se também que, em todo o mundo, os tipos de desastres que mais ocorreram foram as inundações (35%) e as tempestades (31%), que é a soma dos eventos associados a vendavais, furacões e tornados. Deste modo, aproximadamente 66% dos desastres naturais ocorridos no mundo estão vinculados às instabilidades atmosféricas severas e chuvas intensas.

Figura 2: Distribuição por continente dos desastres naturais ocorridos no mundo (1900-2006). Legenda: IN – Inundação, ES – Escorregamento, TE – Tempestade, SE – Seca, TX – Temperatura Extrema, IF – Incêndio Florestal, VU – Vulcanismo, TR – Terremoto e RE – Ressaca.

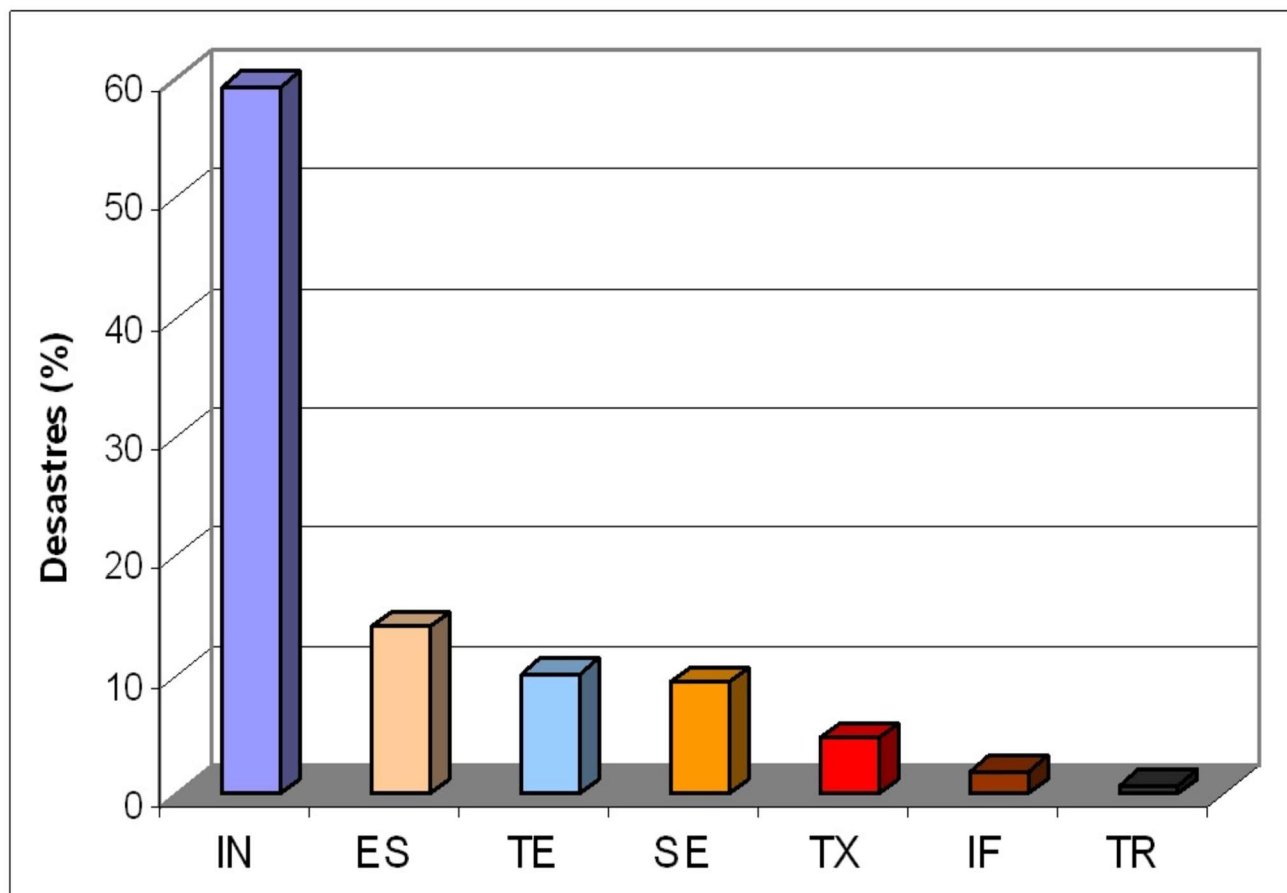


Fonte: Geodesastres – Sul INPE- CRS, 2008 e EM-DAT.

No Brasil, segundo os dados do EM-DAT (2007), ocorreram 150 registros de desastres no período 1900-2006. Deste total, 84% foram computados a partir dos anos 70, demonstrando um aumento excessivo de desastres nas últimas décadas. Como consequência, foram contabilizados prejuízo de aproximadamente 10 bilhões de dólares e 8.183 vítimas fatais. Os tipos de desastres mais comuns foram as inundações (59%), representadas pelas graduais e bruscas, e escorregamentos (14%), conforme demonstrado na Figura 3.

Mais de 80% dos desastres no Brasil, estão associados às instabilidades atmosféricas severas e chuvas intensas, que são responsáveis pelo desencadeamento de inundações, vendavais, tornados, granizos e escorregamentos (MARCELINO, 2008).

Figura 3: Tipos de desastres naturais ocorridos no Brasil (1900-2006). Legenda: IN – Inundação, ES – Escorregamento, TE – Tempestades, SE – Seca, TX – Temperatura Extrema, IF – Incêndio Florestal e TR – Terremoto.



Fonte: Geodesastres – Sul INPE- CRS, 2008 e EM-DAT.

Atualmente a construção de modelos matemáticos e hidrológicos representa uma ferramenta importante na gestão de recursos hídricos. Além de auxiliar a compreensão da dinâmica hidrológica dos corpos hídricos, a utilização de modelos computacionais permite a simulação de diversos cenários de interesse. Ademais podem auxiliar os gestores das cidades e os gestores ambientais, na construção de cenários de disponibilidade da água em bacias hidrográficas, e na previsão e antecipação de eventos extremos, causados pelas constantes mudanças climáticas (FLECK; TAVARES; EYNG, 2013; HORA *et al.*, 2011).

No estado do Rio de Janeiro na cidade de Macaé, o crescimento populacional e urbano, aumentou significativamente a partir da década de 1970. O principal motivo que gerou esse crescimento da população foi a instalação da empresa Petrobras, juntamente com a cadeia produtiva do petróleo que atraiu milhares de trabalhadores de todo o Brasil e do exterior, motivados a trabalhar

numa indústria de tecnologia, com oferta de empregos e salários atrativos. Porém, junto com o crescimento, a cidade viu crescer a violência, a favelização, a informalidade e o desemprego e uma ampla transformação do espaço urbano (DE ABREU; FARIA, 2011). O forte crescimento populacional e urbano nas regiões de Macaé e Rio das Ostras desencadeou uma excessiva valorização imobiliária de áreas urbanas, diante deste cenário, ocorreu uma forte migração da população de baixa renda a buscar moradia nas periferias (GUIMARÃES, 2019).

É de responsabilidade do poder público federal, estadual e municipal, a gestão das águas, bem como mitigar os riscos dos eventos extremos. Problemas desafiadores que surgem neste contexto: quais são as políticas públicas locais na gestão dos problemas das inundações? Como os modelos matemáticos e computacionais podem contribuir para na tomada de decisões dos gestores das cidades e conseqüentemente uma melhor gestão das águas?

O objetivo geral desta pesquisa é estudar como as legislações no âmbito federal, estadual e municipal, podem colaborar para uma melhor gestão das águas em bacias hidrográficas e diminuição dos riscos de inundações e eventos extremos em cidades de médio porte em especial o município de Macaé - RJ. No entanto, para atingir o objetivo geral proposto, faz-se necessário alcançar os seguintes objetivos específicos: mapear quais legislações, no âmbito local, atuam na gestão de inundações; mapear quais legislações, no âmbito estadual e federal, atuam na gestão das águas e mitigações de inundações; desenvolver e analisar modelos matemáticos e computacionais que simulam a atual realidade das bacias hidrográficas; simular através de modelos matemáticos e computacionais diversos cenários, inclusive de chuvas intensas e verificar o seu comportamento nos rios e córregos, para uma melhor gestão das águas em bacias hidrográficas, conforme preconiza a Agenda 2030.

Este relatório de dissertação está estruturado na forma de artigo científico e dividido em três artigos. O primeiro artigo, submetido e aceito para publicação no periódico: Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego e-ISSN 2177-4560 em língua inglesa, contemplando os seguintes tópicos: Resumo; Abstract; 1 Introdução; 2 Revisão da literatura; 2.1 Drenagem urbana e os problemas das cheias, inundações e alagamentos; 2.2 Legislações aplicada a cheias urbanas e inundações; 3 Material e método; 4 Resultados e discussão; 5 Conclusão e 6 Referências.

O segundo artigo científico submetido, aceito e já apresentado no evento científico 9º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade ISSN 2525-4928, contemplando os seguintes tópicos: 1. Introdução; 2. Material e Métodos; 3. Resultados e Discussão; 4. Conclusão e 5. Referências.

O terceiro artigo científico já finalizado e em fase de tradução para língua inglesa, contemplando os seguintes tópicos: 1 Introdução; 2 Materiais e Métodos; 2.1 Caracterização da Área de Estudo: Bacia do Rio Macaé; 2.2 Modelagem Computacional; 2.3 Construção do modelo Digital do Terreno; 2.3.1 Número de Strahler; 2.3.2 Coeficiente de Manning; 2.3.3 Escoamento e infiltração

- Método do Curve Number (CN); 2.3.4 Modelagem de chuvas extremas - Chuvas de projeto; 3 Resultados e Discussões; 3.1 Simulações; 4 Conclusões e 5 Referências Bibliográficas.

O artigo científico 1 se propôs a comparar como as cidades de médio porte do estado do Rio de Janeiro, gerenciam do ponto de vista das legislações municipais as questões de inundações e cheias, buscou-se correlacionar essas leis com características: econômicas, sociais e índices pluviométricos. Foi realizada também revisão bibliográfica sobre a legislação e as medidas estruturais e não-estruturais utilizadas para a mitigação das cheias e inundações urbanas existente na literatura.

O artigo científico 2 se propôs a realizar de maneira mais objetiva uma simulação computacional da bacia hidrográfica do Rio Macaé, localizada na Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) no estado do Rio de Janeiro.

Para finalizar este relatório de dissertação o artigo científico 3 se propôs a realizar de maneira mais profunda e sistemática uma simulação computacional que represente o comportamento da bacia hidrográfica do Rio Macaé. Neste trabalho foi desenvolvido mapas do uso e ocupação do solo. Além de mapas do escoamento superficial ao longo da bacia através do coeficiente de *Manning*. Foi elaborado também mapas que representam a infiltração de água no solo através do método do *Curve Number*, e sua variação ao longo de toda a bacia hidrográfica. Foram simuladas diversas chuvas extremas, com tempos de retorno estimados em 50, 20 e 10 anos, e verificados seus efeitos na região do estuário do Rio Macaé.

Na seção pós-textual, ao final desse relatório de dissertação, encontram-se as referências bibliográficas desta apresentação.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

A BRIEF SURVEY ON THE LEGISLATION APPLIED TO FLOODS AND INUNDATIONS IN MEDIUM-SIZED MUNICIPALITIES IN THE STATE OF RIO DE JANEIRO - BRAZIL

UMA BREVE PESQUISA SOBRE LEGISLAÇÃO APLICADA A CHEIAS E INUNDAÇÕES EM MUNICÍPIOS DE MÉDIO PORTE NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO – BRASIL

Vinicius Vanderley Miguel da Silva - IFFluminense/PPEA

Luis Felipe Umbelino dos Santos - IFFluminense/PPEA

Jader Lugon Júnior - IFFluminense/PPEA

Bruno Barzellay Ferreira da Costa – UFRJ

ABSTRACT

This work aims to carry out a survey on municipal legislation and other legal management instruments, related to the control and mitigation of urban floods and inundations in medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro. In this context, 22 municipalities in the range between 100 and 500 thousand inhabitants were surveyed. Among the results obtained, it was found that only 13 municipalities had specific municipal legislation to mitigate the effects of inundations and urban floods. Approximately 59% of the analyzed municipalities had municipal legislation oriented to the local reality. There is a need to increase public policies and government incentives for the expansion of legal provisions in the municipalities analyzed.

Keywords: Public policies. Legislation. Inundations. Urban floods. Cities environmental management.

RESUMO

Este trabalho, tem por objetivo, realizar um levantamento acerca da legislação municipal e dos demais instrumentos legais de gestão, relacionados ao controle e mitigação de cheias urbanas e inundações em municípios de médio porte no estado do Rio de Janeiro. Neste contexto, foram pesquisados 22 municípios situados na faixa entre 100 a 500 mil habitantes. Dentre os resultados obtidos, constatou-se que apenas 13 municípios possuíam legislação municipal específica para mitigar os efeitos das inundações e cheias urbanas. Aproximadamente 59 % dos municípios analisados, possuíam legislação municipal orientada à realidade local. Nota-se a necessidade do

aumento das políticas públicas e incentivos governamentais para a ampliação de dispositivos legais nos municípios analisados.

Palavras-chave: Políticas públicas. Legislações. Inundações. Cheias Urbanas. Gestão ambiental das cidades.

1. INTRODUCTION

The occupation and waterproofing of soils as a result of urbanization collaborate with the aggravation of urban flood events and the urban environment degradation (TUCCI, 2007a; MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015). In Brazil, traditionally, plumbing works are employed to solve the problem of decreasing the natural storage of rainwater. These represent the classic drainage systems (CANHOLI, 2015). However, since the 1970s, new methods have emerged. Known as compensatory techniques, these basically aim to neutralize the urbanization effects on the hydrological cycle, based mainly on rainwater storage and infiltration (BAPTISTA; DE OLIVEIRA NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

The responsibility to manage public policies and adopt necessary measures for disaster reduction, as well as facing floods, relies on all levels of the federation, that is, at the federal, state and municipal levels (BRAZIL, 2010, 2012). These management instruments must contain general aspects and local characteristics of each municipality or region for the best applicability of each legislation. A challenging question that arises in this area is to verify what the existing local public policies are related to flood problem management. A study shows that more than half (59.4%) of Brazilian municipalities lacked tools to plan and manage risks in 2017. Only 25% of municipalities have a master plan that includes flood prevention measures and only 26% of the municipalities declared to have a Land Use and Occupation Law foreseeing these occurrences (IBGE, 2018). Given this scenario, it is extremely important to know the legal management instruments in Brazilian states and municipalities. There are limited studies on the panorama of municipal management in relation to flood mitigation and, normally, their main focus are metropolises and large municipalities, having as examples the works of Fonseca et al (2006) and Fontes da Luz et al (2020). Generally, these works deal only with structural flood mitigation techniques, such as rainwater reservoirs. It is necessary to address the issue in medium-sized municipalities that present increasing urbanization and, at the same time, low growth in its infrastructure, such as basic sanitation and macro drainage works.

In this study, medium-sized Fluminense municipalities that already face the same problems as large cities were considered. Rio de Janeiro is the state with the second highest number of floods in the southeast region, according to the Atlas of Natural Disasters (CEPED-UFSC, 2013). Disasters caused by floods, runoff and mass movement correspond, respectively, to 35%, 26% and 21% of the total disasters in the entire state of Rio de Janeiro, totaling 82% of the events (CEPED-UFSC, 2013). The characteristics of the physical environment, such as the rain regime and the relief with great unevenness in some regions of the state of Rio de Janeiro, results in more susceptible conditions to these natural events, which become disasters when harm the population.

The objective of this work is to conduct a documentary research on legal management instruments related to the control and mitigation of urban floods, in addition to perform an investigation on the use of structural compensatory techniques in medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro. Firstly, this article will address urban drainage and hydrological event mitigation measures as well as their legal structure. Secondly, information resulting from research on municipal legislation will be discussed.

2. LITERATURE REVIEW

2.1. Urban drainage and the problems of floods, inundations and overflows

The growth of cities in an accelerated and disordered way aggravated the problems of urban floods, since urbanization processes tend to waterproof the soil, occupying infiltration areas and altering the natural hydrological cycle. Urbanization is one of the anthropic actions that most generate environmental impacts, as they change the water, air and especially soil properties (TUCCI; CLARKE, 1997; TUCCI, 1997a; MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015).

According to Licco and Mac Dowell (2015), urban floods or inundations can be understood as natural processes, as these occur when the maximum level of a drainage channel is reached due to increased flow, however, the waters do not overflow. The term inundation is used to characterize the overflow of water from a stream, this occurs when river drainage is not able to contain the rain flow. The process is aggravated due to the river rectification and waterproofing of their banks. Overflow is a momentary situation generated in areas where the drainage system does not support the precipitation volume (LICCO; MAC DOWELL, 2015). In turn, flash flood can be characterized as a large volume of water that superficially seeps, usually very strongly (LICCO; MAC DOWELL, 2015).

According to Tucci (1997a; 2003; 2008), floods in urban areas are the result of two processes that occur in an integrated or isolated way:

Floods due to urbanization: represents the increase in floods frequency and magnitude due to the soil occupation with impermeable surfaces and flow ducts. In addition, urban development can produce flow obstructions, such as landfills and bridges, inadequate drainage and silting up. (our translation)

Floods in riverside areas: natural floods that affects the population that occupies the largest riverbed. These floods occur mainly due to the natural process in which the river occupies its largest bed, according to extreme events, on average with a recurrence interval of 2 years. (our translation)

The main conception of urban drainage in Brazil is still based on the “classic system”, that is, the principle of conducting rainwater through underground ducts, pushing water away from man, historically linked as a means of proliferating diseases and vectors (NUCASE, 2007). To mitigate the effects of floods, engineers around the world have researched numerous techniques and measures. These techniques were mapped and brought together in two large groups: structural and non-structural measures (CHRISTOFIDIS; ASSUMPÇÃO; KLIGERMAN, 2019). In general, structural measures are engineering work that can be extensive or intensive. Non-structural measures, in turn, are those in which losses are reduced to guarantee a better coexistence of the population with the floods, such as the land use regulation or flood zoning (TUCCI, 2007b).

Baptista, de Oliveira Nascimento and Barraud (2011), divided the use of measures to try to control and mitigate the urban drainage problem into two large groups. First group, non-structural compensatory techniques: legislation, environmental education and better urban land use. Second group, structural compensatory techniques: One-off works (infiltration wells and roofs), linear works (paving and infiltration trenches) and basin works (detention, retention and infiltration).

Around the world, several researchers have been working in this urban drainage context, trying to mitigate cities flood and inundation problems, using manifold techniques, whether structural or non-structural compensatory.

A recent study reveals the use of large containment tanks and individual rainwater reservoirs to control flooding in highly developed urban watersheds (FRENI; LIUZZO, 2019), to mitigate risks of urban floods. In recent years, control measures such as green roofs, permeable pavements, rain

gardens and vegetation ditches, have been implemented to deal with flooding in urban environments and have proven to be economical and sustainable. (MEI et al., 2018).

In addition, advanced real-time automation techniques for these centralized and decentralized reservoirs have shown satisfactory and significant effects, increasing the system's resilience, with small investments in existing reservoirs (LEE; CHOI; KIM, 2019; LIANG et al., 2019). The simultaneous application of techniques, such as the use of rainwater reservoirs, distributed storage systems and low-impact development techniques, show satisfactory results in mathematical simulations, that way, greater investments in more complete drainage systems can reduce the flood risks and damage (DA SILVA et al., 2018).

In parallel with the detention reservoir techniques, current researches execute work on rivers and channels using advanced hydrological, computational and mathematical models in software such as MOHID LAND, aimed at flood mitigation and control (TAVARES et al., 2017, 2018; JUSTINA et al., 2019; LUGON JUNIOR et al., 2019). Remote sensing techniques help to understand the geomorphological behavior of rivers and channels and to acknowledge the functioning of the hydrographic basin in its entirety (SALES; OLIVEIRA; LUGON JUNIOR, 2020).

Seeking to improve the hydrological cycle balance in urbanized areas, sustainable hydrology uses low-impact development technologies, flow control systems installed in roofs, for example, can contribute to runoff reduction and, consequently, mitigate frequent flooding. (SCHELLIN; LEINIG, 2018).

As we can see in the previous paragraphs, several studies in different areas are carried out to try to mitigate floods in urban areas. Including research on flood forecasting techniques, considering the intensity and duration of rainfall (CHOO et al., 2019).

Medium-sized cities have assumed a prominent role due to the continuous urbanization process. Characteristics such as a greater concentration of equipment, goods and services in its intra-urban space and a greater offer of jobs contributed to the rapid population growth, governments began to encourage a migration movement towards medium-sized cities, so that they work as retention places of flow, this one previously directed to large cities, at the same time contributing to regional development (COSTA; LOBO; SOARES, 2020).

There is a need to think about the environmental management of cities, and legislation is the main instrument to assist and guide in this task, provided it is adapted to the local reality of each

municipality. Since medium-sized municipalities have characteristics, problems and challenges similar to those of large cities, they acquire singular relevance for this public policy.

2.2. Legislation applied to urban floods and inundations

The National Water Resources Policy (Law No. 9433/1997) is the Brazilian federal legislation that indirectly addresses the urban floods and inundations issue. Among its objectives, it is interesting to highlight: ensure current and future generations necessary water availability, in quality standards appropriate to their respective uses; prevention and defense against hydrological events due to the inappropriate use of natural resources; and encourage rainwater capture, preservation and use (BRAZIL, 1997). In agreement with Brazilian Federal Constitution (BRAZIL, 1988), we can quote Law No. 10257/2001, which sets general urban policy guidelines, whose objective is to order the development of the social functions of cities and urban properties (BRAZIL, 2001).

The National Basic Sanitation Policy was instituted by Law No. 11445/2007, which considers that rainwater management and the drainage, cleaning and preventive inspection of urban networks are part of basic sanitation. Among its fundamental principles, it can be highlighted the adoption of methods, techniques and processes that consider local and regional peculiarities (BRAZIL, 2007), where municipal legislation plays an extremely important role in meeting these objectives.

In 2012, the National Policy for Civil Protection and Defense was created by Law No. 12608. Its main objectives are: stimulate urban and rural land use planning, considering its conservation and the protection of native vegetation, water resources and human life; monitor meteorological, hydrological, geological, biological, nuclear, chemical and other potentially disruptive events; stimulate the development of resilient cities and sustainable urbanization processes (BRAZIL, 2012).

In the Rio de Janeiro state, the main legislation on the subject is Law No. 7463/2016, which mainly addresses procedures regulation for rainwater and greywater storage, aiming at its use or discharge delay in the public network. From the date of its publication, all private or public buildings that presents over five hundred square meters of waterproofed area, must dispose a greywater and rainwater reservoir, as well as recycling the greywaters of buildings, thus creating a regulatory framework across the state of Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2016). However, each municipality presents distinct characteristics among themselves in different economic, social, demographic and pluviometry aspects. Thus, regardless of the aforementioned State Law, these characteristics constitute the need for more specific legislation for each municipality, that is, appropriate to their local reality.

Municipal legislation manifests itself as a structure/base that must be proportional to the locally observed problems scale, always respecting regional and local peculiarities (BRAZIL, 2007). Management and regulatory instruments such as the Master Plan can guarantee less costly preventive measures and provide subsidies to improve human life conditions (TUCCI, 1997b). Combined with other normative instruments such as the Land Use and Occupation Law and the Organic Municipality Law, they are moving towards more satisfactory public and urban policies (MINAKI; AMORIM, 2012). The public manager must have the ability to promote urban and environmental planning organized in a multisectoral way. That is, elaborate and develop the planning considering the city, in an integrated and systemic way (TAMPOROSKI; ALVES, 2012).

3. MATERIALS AND METHODS

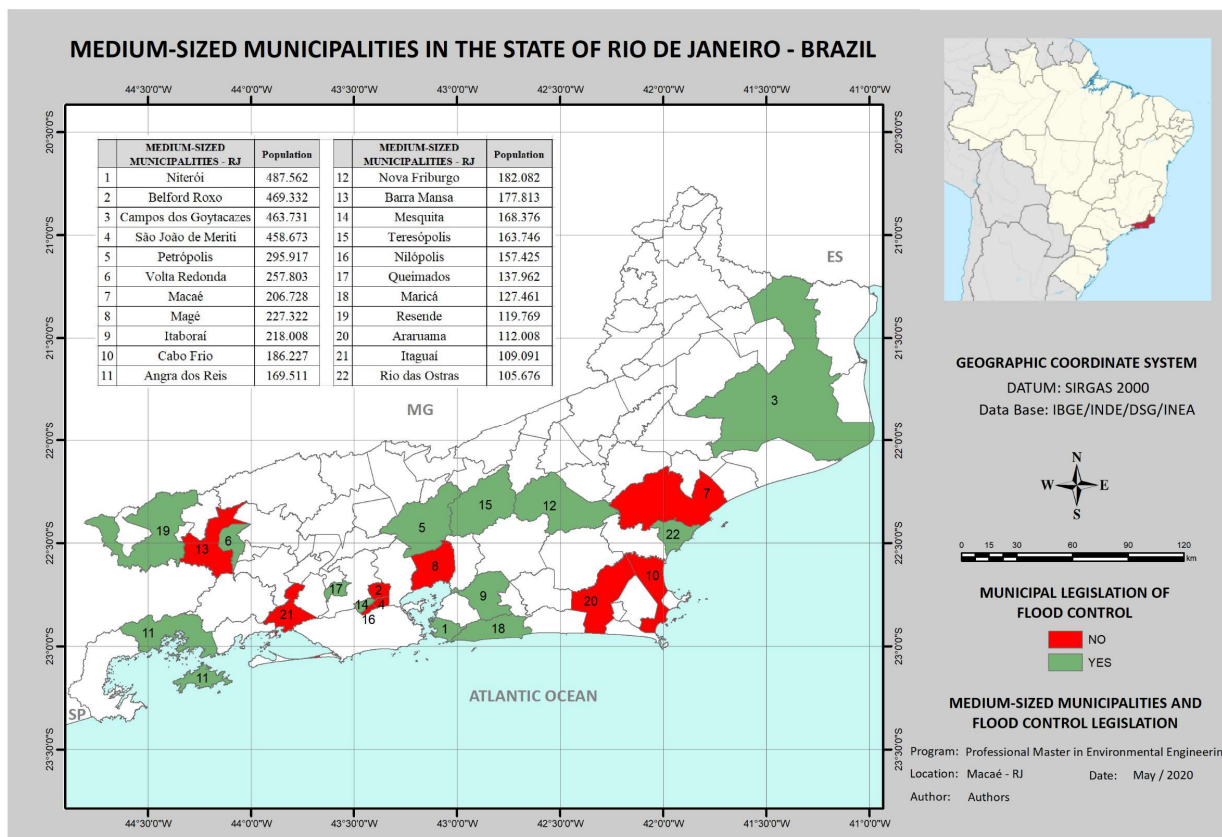
For the present study, a bibliographic review was carried out on the legislation and structural and non-structural measures used to mitigate urban floods and inundations in the literature. The research was performed by consulting renowned databases, such as: Scopus, Elsevier, Web of Science, Capes Journal Portal and Google Scholar. Subsequently, a survey was carried out on the legislation and legal instruments of management related to the control and mitigation of urban floods and inundations, and the use of structural compensatory techniques in medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro. Searches were carried out, preferably, in the last ten years in the bases. Because the literature is a little scarce, we tried to expand the research to previous years. Medium-sized Fluminense municipalities with a population between 100 and 500 thousand inhabitants in the state of Rio de Janeiro were selected. Thus, socioeconomic information from the last demographic census (IBGE, 2010a) was analyzed and scientific information from government documents made available, through of each municipalities Transparency Portal was selected.

The Zotero version 5.0 software was used for the organization and classification of scientific articles and the QGIS version 3.12 software for mapping information. Both software used in free versions.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Twenty-two medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro were selected (IBGE, 2010b), as shown in Figure 1, and their respective urban flood mitigation laws have been identified. Thirteen municipalities (59%) have municipal legislation aimed specifically at flood control.

Figure 1: Medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro – Brazil.



Source: Authors (2020).

Socioeconomic, geographic and rainfall data from the municipalities were also described, for better understanding and comparison between them. Table 1 shows the results obtained, in decreasing order of population.

In this research, only specific legislation was found, mostly focused on residential works and commercial or industrial enterprises.

Table 1: Panorama of medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro – Brazil

	Medium-sized municipalities, RJ	Last census population	Is there legislation applied to flood control?	Specific municipal legislation	Area of territorial unit (Km²)	Average annual rainfall (mm)	GDP per capita (2017) R\$	HDI (2010)
1	Niterói	487,562	YES	Law No. 1620/1997; Law No. 2626/2008; Law No. 2630/2009; Law No. 3061/2013	133.76	1,204	55,049.66	0.837
2	Belford Roxo	469,332	NO	-	78.99	1,363	16,514.03	0.684
3	Campos dos Goytacazes	463,731	YES	Law No. 8096/2009; Act 63/2015	4,031.99	1,073	43,013.04	0.716
4	São João de Meriti	458,673	NO	-	35.216	1,255	19,968.09	0.719
5	Petrópolis	295,917	YES	Law No. 6439/2007	791.144	1,929	42,958.85	0.745
6	Volta Redonda	257,803	YES	Law No. 5216/2016	182.105	1,366	42,626.52	0.771
7	Macaé	206,728	NO	-	1,215.49	1,126	62,961.48	0.764
8	Magé	227,322	NO	-	390.775	1,392	16,240.43	0.709
9	Itaboraí	218,008	YES	Law No. 2448/2013	430.438	1,267	18,012.86	0.693
10	Cabo Frio	186,227	NO	-	413.575	843	39,781.41	0.735
11	Angra dos Reis	169,511	YES	Law No. 2093/2009; Law No. 2087/2009	813.21	1,791	51,893.01	0.724
12	Nova Friburgo	182.082	YES	Law No. 3046/1999; Law No. 3227/200; Law No. 4062/201; Law No. 4093/2012	935,429	1.372	27,048.70	0.745

(Continuation)

Table 1: Panorama of medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro – Brazil

	Medium-sized municipalities, RJ	Last census population	Is there legislation applied to flood control?	Specific municipal legislation	Area of territorial unit (Km ²)	Average annual rainfall (mm)	GDP per capita (2017) R\$	HDI (2010)
13	Barra Mansa	177,813	NO	-	547.133	1,394	27,211.05	0.729
14	Mesquita	168,376	YES	Law No. 929/2015	41.49	1,349	13,505.21	0.737
15	Teresópolis	163,746	YES	Law No. 79/2006; Law No. 105/2007	773.338	1,721	28,882.28	0.73
16	Nilópolis	157,425	NO	-	19.393	1,290	16,698.88	0.753
17	Queimados	137,962	YES	Law No. 35/2006; Law No. 64/2013	75.701	1,486	25,476.94	0.68
18	Maricá	127,461	YES	Law No. 2272/2008	361.572	1,181	74,760.02	0.765
19	Resende	119,769	YES	Law No. 3048/2013	1,099.34	1,488	60,915.10	0.768
20	Araruama	112,008	NO	-	638.15	993	19,840.12	0.718
21	Itaguaí	109,091	NO	-	273.414	1,308	61,819.73	0.715
22	Rio das Ostras	105,676	YES	Law No. 1402/2009; Act 015/2010; Law No. 1489/2010; Law No. 1727/2012	228.044	1,056	39,667.24	0.773

Source: Authors (2020).

It can be observed that Niterói presented the highest Human Development Index – HDI (0.837), among the twenty-two analyzed cities. Despite the high per capita Gross Domestic Product – GDP, of cities like Macaé (R\$ 62,961.48) and Itaguaí (R\$ 61,819.73), no specific legislation on the topic was found on the respective Transparency Portals.

To better detail each local strategy, in mitigating the effects of inundations and urban floods, Table 2 was prepared with a brief description of each municipal legislation found in this research.

As can be seen in Table 2, the municipal legislation of the vast majority of municipalities makes it mandatory to adopt structural compensatory techniques, such as the use of rainwater reservoirs, as a way of reducing the impacts caused by rains and favoring the urban drainage system.

In Volta Redonda, the current municipal legislation provides for rainwater harvesting only in public sectors, thus reducing these systems covered area in the municipality.

The municipalities of Nova Friburgo, Niterói, Rio das Ostras have the largest number of specific laws, with four each, but the municipality of Nova Friburgo stands out from the others because it has a broader and more comprehensive legislation. With several compensatory techniques of structural character in the management and mitigation of floods. An example is the program for recovery and preservation of soil permeability. Its objective is to reduce impermeable areas, promoting decrease of runoff volumes and flooding risk, increase soil infiltration and life quality. It also creates the obligation to reserve a permeable area in the building field, in a percentage defined by the City Hall. In addition, it establishes that every property built on or after January 1, 2000 must have planned a rainwater harvesting and storage project.

Numerous problems are generated through public policies late implementation to mitigate urban floods and inundations. Examples are loss of human lives, incalculable material damage, real estate devaluation, vectors and diseases proliferation, public health system overload, drastic decrease in local development, soil deterioration, among other losses (SANSEVERINO-GODFRIN, 2016).

In countries such as South Korea, Italy, Australia and China, advanced techniques for urban floods mitigation and control, are object of constant study and application in several cities (URSINO; GRISI, 2017; MEI et al., 2018; CHOO et al., 2019; FRENI; LIUZZO, 2019; LEE; CHOI; KIM, 2019; LIANG et al., 2019). However, for developing countries, such as Brazil, the wider use of these measures, whether structural or non-structural, is still a challenge to be overcome (TUCCI, 2004; BARBOSA DOS SANTOS; BORGES MAMEDE, 2013). Legislation implementation and its mandatory enforcement plays an extremely important role in cities urban floods management and mitigation.

Table 2: Specific legislation existing in medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro - Brazil.

	City	Specific municipal legislation	Description
1	Niterói	Law No. 1620/1997	Establishes the maximum Waterproofing Rate of 90% (ninety percent) for single-family residential buildings located in the Urban Area, except in places where specific legislation determines a higher rate.
2		Law No. 2626/2008	Addresses solar water heating systems installation and rainwater use in public and private constructions situated in the municipality of Niterói and creates the municipal commission for urban sustainability.
3		Law No. 2630/2009	Disciplines procedures related to rainwater storage for reuse and its discharge delay in the public network.
4		Law No. 3061/2013	Central Area Consortium Urban Operation- CUO, releases new buildings, within the CUO perimeter, from complying with the Waterproofing Rate requirement if the clearance strip adjacent to the sidewalk holds 60% of the permeable area, observing the defined criteria.
5	Campos dos Goytacazes	Law No. 8096/2009	Institutes the municipal program for water conservation and rational use in buildings and establishes, for collective building projects, the requirement for a water meter in each autonomous unit.
6		Act 63/2015	Regulates the Municipal Law No. 8096/2009, with the aim of instituting measures that induce the conservation, rational use and usage of alternative sources to rainwater capture and use in new buildings, as well as adapting existing ones.
7	Petrópolis	Law No. 6439/2007	Requires the design of rainwater collection devices for construction of new buildings with over five floors.
8	Volta Redonda	Law No. 5216/2016	Obliges Government to install rainwater collection systems in all related public sectors in Volta Redonda.
9	Itaboraí	Law No. 2448/2013	Creates the rainwater harvesting program, whose objectives are the rainwater capture, storage and use by public and private buildings, in urban and rural areas, in residential, commercial and industrial buildings.
10	Angra dos Reis	Law No. 2087/2009	Fields, when receiving buildings, should be prepared to drain rainwater and water infiltration with the adoption of control erosion measures. Prohibits rainwater or wastewater dumping, including that from equipment operation, on sidewalks, neighboring buildings and sewage collection networks. These must be connected by piping under the sidewalk to the gutter and/or its own collection network, in accordance with the rules issued by the sanitation competent institution. In sloping situations rainwater and sewage piping from upstream lots may pass through downstream neighboring properties, when it is not possible to route them to the streets on which they are located and if there is no other alternative by public domain area.
11		Law No. 2093/2009	No land parceling modality will be allowed in fields subject to flooding, before performing works and services that ensure adequate water drainage are carried out.
12		Law No. 3751/2018	Institutes Municipal Policy for Conservation, Rational Use and Water Reuse, which aims to promote necessary measures for conservation, reduction of waste and alternative sources use for water capture in buildings, as well as to make users aware of its importance for life.

(Continuation)

Table 2: Specific legislation existing in medium-sized municipalities in the state of Rio de Janeiro - Brazil.

	City	Specific municipal legislation	Description
13	Nova Friburgo	Law No. 3046/1999	Establishes that every property built on or after January 1, 2000 must have planned a rainwater harvesting and storage project, with a third of the volume of stored treated water to be stored.
14		Law No. 3227/2002	Makes mandatory in residential, commercial and industrial projects (new constructions, renovations or extensions), the reservation of permeable area in the perimeter of the land, at the choice of the owner and in a percentage to be defined by the City Hall. Condition the occupation certificate receivment to the plant of at least one tree on the public sidewalk, to be defined by the Municipal Environment Department.
15		Law No. 4062/2012	Creates the Soil Permeability Recovery and Preservation Program, with the objective of reducing impermeable areas, promoting, among other factors: the reduction of drained volumes and risk of floods and the increase of soil infiltration and quality of life, through the implementation of green sidewalks, draining floors and paving streets with draining materials, when possible. Establishes existence of no paving flower beds on sidewalks or public rides.
16		Law No. 4093/2012	Creates the ecologically correct sidewalk, to be installed in the main corridors of the city and that have few areas for rainwater evacuation.
17	Mesquita	Law No. 929/2015	Authorizes the Municipal Program for the Conservation and Rational Use of Water in public and private buildings, which aims to induce its conservation and reuse, and encouraging the use of alternative sources to collect water.
18	Teresópolis	Law No. 79/2006	Prohibits buildings existence in areas that pose a risk to health or life, in particular: on land subject to flooding, except for those objects of intervention that ensure water drainage.
19		Law No. 105/2007	Makes mandatory the implementation of systems for capture and retention of rainwater collected by roofs, terraces and discovered pavements in buildings with waterproofed areas sum greater than 500m ² (five hundred square meters).
20	Queimados	Law No. 035/2006	Determines that public buildings at different government levels are obliged to capture, reserve and reuse rainwater.
21		Law No. 064/2013	Establishes for all constructions the mandatory reserve of free area, which will be used as a permeable and/or green planted area, defined by the government. If total or partial impossibility of reserving a permeable area and/or planting seedling in the construction lot is proven, a technical study must be prepared with the municipal environmental agency for environmental compensation defined in specific legislation.
22	Maricá	Law No. 2272/2008	Land parceling on fields that, in City Hall point of view, deemed unfit for building or inconvenient for housing, will not be allowed
23	Resende	Law No. 3048/2013	Establishes the Conservation and Rational Use of Water in Buildings Program, that aims to institute measures that induce the conservation, rational use and use of alternative sources to capture water in new buildings, as well as raising users' awareness of the importance of water conservation.
24	Rio das Ostras	Law No. 1402/2009	Creates the Rainwater Harvesting and Reuse Program, whose main objectives are the rainwater capture, storage and use by urban buildings, in addition to: A. Awaken ecological awareness in order to conserve this environmental resource; B. Foster water conservation and self-sufficiency for supply; C. Reduce drinking water consumption from public network; D. Avoid using drinking water where it is not needed; E. Promote savings in fees by reducing drinking water consumption from public network; F. Helping to contain possible floods, damping part of the rainwater that drains into water bodies.
25		Act 015/2010	Regulates Law No. 1402/2009, and provides for rainwater capturing, storing and using criteria in buildings.
26		Law No. 1489/2010	Discourse on the amendment of the Law No. 1402/2009, that addresses the Rainwater Harvesting and Reuse Program.
27		Law No. 1727/2012	Amends the provisions of Laws No. 1402/2009 and 1489/2010, that addresses the Rainwater Harvesting and Reuse Program.

Source: Authors (2020).

5. CONCLUSION

Among the twenty-two medium-sized municipalities analyzed in the state of Rio de Janeiro, only thirteen have specific municipal legislation to mitigate the effects of urban floods. The requirement for buildings rainwater reservoirs was instituted in most of these municipalities. A worrying aspect was detected in approximately 41% of the municipalities, where no specific legislation directed to urban floods mitigating was found.

There is a need for a greater number of public policies aimed at the development of legal instruments in the municipalities analyzed. These devices expansion will favor the inclusion of several structural and non-structural compensatory techniques in municipal legislation. When applied together, these techniques obtain a more satisfactory result in urban floods mitigation and control, when compared to isolated measures.

Based on the results, it is concluded that this research objectives were achieved. Such findings enable a greater understanding of municipalities laws and local characteristics. However, it is suggested to carry out further studies considering other variables, for example: the impact of simultaneous structural compensatory techniques on rivers and watersheds, in order to measure its flood control efficiency, mitigate inundations and improve cities water management.

6. BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

ANGRA DOS REIS. **Law No. 2087, of January 23, 2009.** (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/a/angra-dosreis/lei-ordinaria/2009/210/2093/lei-ordinaria-n-2093-2009-dispoe-sobre-o-parcelamento-dosolo-no-municipio-de-angra-dosreis?q=2.093>>. Accessed on: May. 3, 2020a.

ANGRA DOS REIS. **Law No. 2093, of January 23, 2009.** (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/a/angra-dosreis/lei-ordinaria/2009/209/2087/lei-ordinaria-n-2087-2009-dispoe-sobre-o-codigo-de-obrasdo-municipio-de-angra-dos-reis?q=2.087>>. Accessed on: May. 3, 2020b.

ANGRA DOS REIS. **Law No. 3751, of June 4, 2018.** (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/a/angra-dosreis/lei-ordinaria/2018/376/3751/lei-ordinaria-n-3751-2018-autoriza-a-prefeitura-municipal-ainstituir-a-politica-municipal-de-conservacaouso-racional-e-reaproveitamento-de-aguas-nomunicipio-de-angra-dos-reis-e-da-outras-providencias?q=3.751%20>>. Accessed on: May. 3, 2020.

BAPTISTA, M. B.; DE OLIVEIRA NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Compensatory techniques in urban drainage.** (In Portuguese). Porto Alegre: ABRH, 2011.

BARBOSA DOS SANTOS, L.; BORGES MAMEDE, B. **Automation in pluvial drainage and flood control: Use of water in large urban centers.** (In Portuguese). Electronic Magazine of the Environmental Forum of Alta Paulista, v. 9, n. 2, Nov. 10, 2013.

BRAZIL. **Constitution of the Federative Republic of Brazil**, 1988. (In Portuguese). Available at: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Accessed on: Nov. 9, 2019.

BRAZIL. **Law No. 9433, of January 8, 1997.** (In Portuguese). Available at: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Accessed on: Apr. 7, 2020.

BRAZIL. **Law No. 10257, of July 10, 2001.** (In Portuguese). Available at: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm>. Accessed on: Apr. 15, 2020.

BRAZIL. **Law No. 11445, of January 5, 2007.** (In Portuguese). Available at: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm>. Accessed on: Apr. 15, 2020.

BRAZIL. **Decree No. 7257, of August 4, 2010.** (In Portuguese). Available at: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7257.htm>. Accessed on: Apr. 6, 2020.

BRAZIL. **Law No. 12608, of April 10, 2012.** (In Portuguese). Available at: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Accessed on: Apr. 7, 2020.

CAMPOS DOS GOYTACAZES. **Law No. 8096 of 14 July 2009.** (In Portuguese). Available at: <<<https://leismunicipais.com.br/a/rj/c/camposdos-goytacazes/leiordinaria/2009/810/8096/lei-ordinaria-n-8096-2009-institui-o-programa-municipal-deconservacao-e-uso-racional-da-agua-emedificacoes-e-estabelece-para-projetos-deedificacoes-coletivas-a-exigencia-dehidrometro-em-cada-unidadeautonoma?q=8096>>>. Accessed on: May. 7, 2020.

CAMPOS DOS GOYTACAZES. **Decree No. 63 of 23 March 2015.** (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/c/campos-dos-goytacazes/decreto/2015/7/63/decreto-n-63-2015-regulamenta-a-lei-municipal-n-8096-de-14-de-julho-de-2009-com-o-objetivo-de-instituir-medidas-que-induzam-a-conservacao-uso-racional-e-utilizacao-de-fontes-alternativas-para-captacao-e-aproveitamento-de-agua-de-chuva-nas-novas-edificacoes-bem-como-adaptacao-das-ja-existentis?q=Decreto+63+de+2015>>. Accessed on: May. 3, 2020.

CANHOLI, A. **Urban drainage and flood control.** (In Portuguese). São Paulo: Oficina de textos, 2015.

CEPED-UFSC. **Brazilian Atlas of Natural Disasters.** (In Portuguese). 2. ed. Florianópolis: University Center for Disasters Studies and Research – Federal University of Santa Catarina, 2013.

CHOO, Y. M.; JO, D. J.; YUN, G. S.; LEE, E. H. **A Study on the Improvement of Flood Forecasting Techniques in Urban Areas by Considering Rainfall Intensity and Duration.** Water, v. 11, n. 9, p. 1883, Sep. 10, 2019.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. DOS S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. **The historical evolution of urban drainage: from traditional drainage to tuning in with nature.** (In Portuguese). *Health in Debate*, v. 43, n. spe3, p. 94–108, Dec. 2019.

COSTA, T. G. N.; LOBO, C. F. F.; SOARES, W. **Conditions and projections of access to basic sanitation in brazilian medium cities.** (In Portuguese). *Terr Plural*, v. 14, p. 1–22, 2020.

DA SILVA, C.; SCHARDONG, A.; GARCIA, J.; OLIVEIRA, C. **Climate Change Impacts and Flood Control Measures for Highly Developed Urban Watersheds.** *Water*, v. 10, n. 7, p. 829, Jun. 23, 2018.

FONSECA, P. L. DA; NASCIMENTO, E. A. DO; LONGO, O. C. **Environmental management of river basins: unconventional measures to control urban floods – main aspects, considerations and integrated actions.** (In Portuguese). XIII SIMPEP - Bauru, SP, 2006.

FONTES DA LUZ, A. C.; MIRANDA PINTO, A. E.; UMBELINO DOS SANTOS, L. F.; LUGON JUNIOR, J. **Analysis of legislations relating to urban floods management in the Rio de Janeiro state.** (In Portuguese). *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão* (ISSN: 2525-4782), v. 4, n. 6, Jan. 8, 2020.

FRENI, G.; LIUZZO, L. **Effectiveness of Rainwater Harvesting Systems for Flood Reduction in Residential Urban Areas.** *Water*, v. 11, n. 7, p. 1389, Jul. 6, 2019.

IBGE. Brazilian Institute of Geography and Statistics. **2010 Demographic Census.** (In Portuguese). Available at: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Accessed on: Apr. 14, 2020a.

IBGE. Brazilian Institute of Geography and Statistics. **2010 Demographic Census.** (In Portuguese). Available at: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Accessed on: Apr. 15, 2020b.

IBGE. Brazilian Institute of Geography and Statistics. **Natural disasters: 59.4% of the municipalities do not have a risk management plan. July 5, 2018.** (In Portuguese). Available at: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/21633-desastres-naturais-59-4-dos-municipios-nao-tem-plano-de-gestao-de-riscos>>. Accessed on: Apr. 7, 2020.

ITABORAÍ. **Law No. 2448, of December 17, 2013.** (In Portuguese). Available at: <<https://www.legislaitaborai.com.br/leis/2013/2448.pdf>>. Accessed on: May. 3, 2020.

JUSTINA, C. R. V. D.; LUGON JUNIOR, J.; FERREIRA, M. I. P.; RODRIGUES, P. P. G. W. **Diagnosis of the rectilined stretch of the Macaé river aiming at flood control with the use of solutions based on nature.** (In Portuguese). VII Project Sustainability Meeting 2019, n. 2019, p. 12, 2019.

LEE, E. H.; CHOI, Y. H.; KIM, J. H. **Real-Time Integrated Operation for Urban Streams with Centralized and Decentralized Reservoirs to Improve System Resilience.** *Water*, v. 11, n. 1, p. 69, Jan. 2, 2019.

LIANG, R.; DI MATTEO, M.; MAIER, H.; THYER, M. **Real-Time, Smart Rainwater Storage Systems: Potential Solution to Mitigate Urban Flooding**. *Water*, v. 11, n. 12, p. 2428, Nov. 20, 2019.

LICCO, E. A.; MAC DOWELL, S. F. **Waterloggings, Spates, Flash floods, and Inundations: Digressions about its socio-economic impacts and governance**. (In Portuguese) *Initiation - Journal of Scientific, Technological and Artistic Initiation. Thematic Edition: Sustainability*, v. 5, n. 3, p. 16, 2015.

LUGON JUNIOR, J.; TAVARES, L. P. DA S.; KALAS, F. D. A.; RODRIGUES, P. P. G. W.; WASSERMAN, J. C. A. **Reservoir implantation for flood dampening in the Macaé River basin using the Mohid Land model**. *Ciência e Natura*, v. 41, p. e29, 4 out. 2019.

MARICÁ. **Law No. 2272, of November 14, 2008**. (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/m/marica/lei-ordinaria/2008/228/2272/lei-ordinaria-n-2272-2008-estabelece-as-condicoes-de-uso-ocupacao-e-parcelamento-do-solo-para-o-municipio-de-marica-e-da-outras-providencias?q=2.272>>. Accessed on: May. 3, 2020.

MEI, C.; LIU, J.; WANG, H.; SHAO, W.; XIA, L.; XIANG, C.; ZHOU, J. **Modelling the ability of source control measures to reduce inundation risk in a community-scale urban drainage system**. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, v. 379, p. 223–229, Jun. 5, 2018.

MESQUITA. **Law 929, of October 14, 2015**. (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/m/mesquita/lei-ordinaria/2015/93/929/lei-ordinaria-n-929-2015-fica-autorizado-no-municipio-de-mesquita-o-programa-de-conservacao-e-uso-racional-da-agua-nas-edificacoes-publicas-e-privadas?q=Lei+n%C2%BA+929+de+2015>>. Accessed on: May. 3, 2020.

MIGUEZ, M.; REZENDE, O.; VERÓL, A. **Urban drainage: from traditional design to sustainability**. (In Portuguese). Rio de Janeiro: Elsevier Brazil, 2015.

MINAKI, C.; AMORIM, M. C. DE C. T. **Urban environmental quality in municipal legislation: Example of Araçatuba-SP director's plan**. (In Portuguese). *Raega – The Geographic Space in Analysis*, v. 25, Jul. 6, 2012.

NITERÓI. **Law No. 1620, of December 24, 1997**. (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/n/niteroi/lei-ordinaria/1997/162/1620/lei-ordinaria-n-1620-1997-define-disposicoes-relativas-a-aprovacao-de-edificacoes-residenciais-unifamiliares.html>>. Accessed on: May. 3, 2020.

NITERÓI. **Law No. 2626, of December 30, 2008**. (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/n/niteroi/lei-ordinaria/2008/262/2626/lei-ordinaria-n-2626-2008-dispoe-sobre-a-instalacao-de-sistemas-de-aquecimento-solar-de-aguas-e-do-aproveitamento-de-aguas-pluviais-na-construcao-publica-e-privada-no-municipio-de-niteroi-e-cria-a-comissao-municipal-de-sustentabilidade-urbana>>. Accessed on: May. 3 2020.

NITERÓI. **Law No. 2630, of January 7, 2009**. (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/n/niteroi/lei-ordinaria/2009/263/2630/lei-ordinaria-n-2630-2009-disciplina-os-procedimentos-relativos-ao-armazenamento-de-aguas-pluviais-para-reaproveitamento-e-retardo-da-descarga-na-rede-publica>>. Accessed on: May. 3, 2020.

NITERÓI. Law No. 3061, of December 3, 2013. (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/n/niteroi/lei-ordinaria/2013/306/3061/lei-ordinaria-n-3061-2013-autoriza-o-poder-executivo-a-instituir-a-operacao-urbana-consorciada-da-area-central-de-niteroi-e-da-outras-providencias.html>>. Accessed on: May. 3, 2020.

NOVA FRIBURGO. Law No. 3046, of December 21, 1999. (In Portuguese). Available at: <<https://novafriburgo.cespro.com.br/visualizarDiploma.php?cdMunicipio=6811&cdDiploma=3155&NroLei=3.046&Word=&Word2=>>>. Accessed on: May. 3, 2020.

NOVA FRIBURGO. Law 3227, of December 5, 2002. (In Portuguese). Available at: <<https://novafriburgo.cespro.com.br/visualizarDiploma.php?cdMunicipio=6811&cdDiploma=6405&NroLei=3.227&Word=&Word2=>>>. Accessed on: May. 3, 2020.

NOVA FRIBURGO. Law No. 4062, of May 4, 2012. (In Portuguese). Available at: <<https://novafriburgo.cespro.com.br/visualizarDiploma.php?cdMunicipio=6811&cdDiploma=6847&NroLei=4.062&Word=&Word2=>>>. Accessed on: May. 3, 2020a.

NOVA FRIBURGO. Law No. 4093, of June 18, 2012. (In Portuguese). Available at: <<https://novafriburgo.cespro.com.br/visualizarDiploma.php?cdMunicipio=6811&cdDiploma=5579&NroLei=4.093&Word=&Word2=>>>. Accessed on: May. 3, 2020b.

NUCASE. Rainwater: compensatory techniques for urban flood control: guide of the professional in training: level 2 and 3. (In Portuguese). Belo Horizonte: Ministry of Cities. National Secretariat for Environmental Sanitation, 2007.

PETROPOLIS. Law No. 6439, of May 16, 2007. (In Portuguese). Available at: <<https://petropolis.cespro.com.br/visualizarDiploma.php?cdMunicipio=6830&cdDiploma=20076439&NroLei=6.439&Word=&Word2=>>>. Accessed on: May. 3, 2020.

QUEIMADOS. Law No. 035, of December 21, 2006. (In Portuguese). Available at: <<https://www.queimados.rj.leg.br/leis/legislacao-municipal/leis-complementares/lc-035-06-plano-diretor.pdf/view>>. Accessed on: May. 3, 2020.

QUEIMADOS. Law No. 064, of June 5, 2013. (In Portuguese). Available at: <<https://www.queimados.rj.leg.br/leis/legislacao-municipal/leis-complementares/lc-064-13-codigo-de-zoneamento-municipal.pdf/view>>. Accessed on: May. 3, 2020.

RESENDE. Law No. 3048, of October 23, 2013. (In Portuguese). Available at: <http://resende.rj.gov.br/conteudo/boletim_oficial/2013/Bo_043_1_2_3_4.pdf>. Accessed on: May. 5, 2020.

RIO DAS OSTRAS. Law No. 1402, of December 16, 2009. (In Portuguese). Available at: <<https://www.riodasostras.rj.gov.br/wp-content/themes/pmro/download/leis-e-codigos/luem/1402-2009.pdf>>. Accessed on: May. 3, 2020.

RIO DAS OSTRAS. Decree No 015, of January 29, 2010. (In Portuguese). Available at: <<https://www.riodasostras.rj.gov.br/wp-content/themes/pmro/download/leis-e-codigos/luem/015-2010.pdf>>. Accessed on: May. 3, 2020a.

RIO DAS OSTRAS. **Law No. 1489, of December 10, 2010.** (In Portuguese). Available at: <<https://www.riodasostras.rj.gov.br/wp-content/themes/pmro/download/leis-e-codigos/luem/1489-2010.pdf>>. Accessed on: May. 3, 2020b.

RIO DAS OSTRAS. **Law No. 1727, of September 21, 2012.** (In Portuguese). Available at: <<https://www.riodasostras.rj.gov.br/wp-content/themes/pmro/download/leis-e-codigos/luem/1727-2012.pdf>>. Accessed on: May. 3, 2020.

RIO DE JANEIRO. **Law No. 7463, of October 18, 2016.** (In Portuguese). Available at: <<http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/c8aa0900025feef6032564ec0060dfff/186e9070198174dd83257ff10059d9d9?OpenDocument&Highlight=0,746>>. Accessed on: Apr. 21, 2020.

SALES, D. D. S.; OLIVEIRA, V. D. P. S. DE; LUGON JUNIOR, J. **Geotechnologies as a support for the diagnosis of the geomorphological-fluvial dynamics of the low course of the Paraíba do Sul river.** (In Portuguese). *MIX Sustentável*, v. 6, n. 1, p. 91–103, May. 3, 2020.

SANSEVERINO-GODFRIN, V. **The problems of the late implementation of the legal prevention measures for flood risk.** *E3S Web of Conferences*, v. 7, p. 13010, 2016.

SCHELLIN, L. M.; LEINIG, A. K. G. **Contributions to the legislation for rooftop detention systems.** *Brazilian Journal of Development*, v. 4, n. 1, p. 31–53, 2018.

TAMPOROSKI, B. R. F.; ALVES, M. A. M. **Urban planning and flooding in Dourados: the gap between reality and legality.** (In Portuguese). *São Paulo*, v. 14, n. 27, p. 16, 2012.

TAVARES, L. P. DA S.; COSTA, J. B. DA; KALAS, F. D. A.; LUGON JUNIOR, J. **Hydrological modeling of the Macaé River basin using MOHID Land.** (In Portuguese). *Alberto Ribeiro Lamego Environmental Observatory Bulletin*. v. 11, n. 1, p. 169, Oct. 30, 2017.

TAVARES, L. P. DA S.; LUGON JUNIOR, J.; SILVA, J. A. F. DA; WASSERMAN, J. C.; RODRIGUES, P. P. G. W. **Water management and urban flood mitigation: Studies and proposals for the Macaé river basin in Brazil.** *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v. 12, n. 2, p. 188–200, 2018.

TERESÓPOLIS. **Law No. 79, of October 20, 2006.** (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/t/teresopolis/lei-complementar/2006/8/79/lei-complementar-n-79-2006-dispoe-sobre-o-plano-diretor-de-desenvolvimento-sustentavel-de-teresopolis-e-da-outras-providencias?q=Lei+n%C2%BA+79+de+2006>>. Accessed on: May. 3, 2020.

TERESÓPOLIS. **Law 105, of December 19, 2007.** (In Portuguese). Available at: <<https://leismunicipais.com.br/a/rj/t/teresopolis/lei-complementar/2007/11/105/lei-complementar-n-105-2007-dispoe-sobre-o-codigo-de-obras-e-edificacoes-do-municipio-de-teresopolis-e-da-outras-providencias?q=Lei+n%C2%BA+105+de+2007>>. Accessed on: May. 3, 2020.

TUCCI, C. E. M. **Urban water. Freshwater Book.** (In Portuguese). p. 1–40, 1997a.

TUCCI, C. E. M. **Urban drainage master plan: principles and design.** (In Portuguese). *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 2, n. 2, p. 5–12, 1997b.

- TUCCI, C. E. M. **Flooding and urban drainage. Urban flooding in South America.** (In Portuguese). Porto Alegre: Brazilian Water Resources Association, p. 45–141, 2003.
- TUCCI, C. E. M. **Integrated management of urban floods in Brazil.** (In portuguese). Latin America Water Management Magazine, v. 1, n. 1, p. 59–73, 2004.
- TUCCI, C. E. M. **Urban flooding.** (In Portuguese). Porto Alegre: ABRH/RHAMA, v. 11, 2007a.
- TUCCI, C. E. M. **Hydrology: science and application.** (In Portuguese). Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007b.
- TUCCI, C. E. M. **Urban waters.** (In Portuguese). Advanced Studies, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. **Impact of changes in vegetation cover on runoff: a review.** (In Portuguese). Brazilian Journal of Water Resources, v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997.
- URSINO, N.; GRISI, A. **Reliability and efficiency of rainwater harvesting systems under different climatic and operational scenarios.** International Journal of Sustainable Development and Planning, v. 12, n. 01, p. 194–199, Jan. 1, 2017.
- VOLTA REDONDA. **Law No. 5216, of April 7, 2016.** (In Portuguese). Available at: <http://www.portalvr.com/smg/leis/mod/cadastro_2/uploads/lei/2016/lei_5216_2016.pdf>. Accessed on: May. 3, 2020.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MACAÉ: SIMULAÇÃO DE EVENTOS CRÍTICOS ATRAVÉS DA FERRAMENTA MOHID LAND *COMPUTATIONAL MODELING OF THE MACAÉ RIVER HYDROGRAPHIC BASIN: SIMULATION OF CRITICAL EVENTS THROUGH THE MOHID LAND TOOL*

Vinicius Vanderley Miguel da Silva - IFFluminense/PPEA

Isabel Cristina Tomaz Firme - IFFluminense/PPEA

Jader Lugon Júnior - IFFluminense/PPEA

Luis Felipe Umbelino - IFFluminense/PPEA

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), é de responsabilidade do poder público em todos os níveis da federação a prevenção e proteção contra eventos de origem hidrológica natural ou resultantes de uso inadequado dos recursos naturais (Brasil 1997). Esta lei também ficou conhecida como Lei das Águas e estabelece instrumentos para a gestão dos recursos hídricos de domínio federal.

O ciclo hidrológico está diretamente ligado ao clima. Assim, mudanças no clima que alterem o regime de chuvas podem provocar o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações e longos períodos de seca. Esses eventos afetam a oferta de água, ameaçando o suprimento de recursos hídricos para todos (ANA 2020).

Atualmente, o mundo sofre constantemente com os efeitos das mudanças climáticas, por isso tornam-se extremamente importante estudos e pesquisas que simulem diversos cenários de chuvas intensas. A partir dessas pesquisas, a compreensão destes fenômenos naturais é de extrema relevância para auxiliar os gestores das cidades na mitigação dos impactos decorrentes destes através de adoção de legislações específicas. Esta pesquisa destaca-se pela relevância social, ambiental e econômica.

Ao tratar sobre os impactos das cheias, Miguez *et al.* (2015) relatam a importância da implementação de projetos de drenagem adequados às características de cada bacia hidrográfica. Os autores percebem diferentes abordagens, das tradicionais às medidas mais atuais, como a manipulação sustentável de águas urbanas e projeto de cidades (Miguez *et al.* 2015). Cidades podem ser projetadas respeitando o ciclo hidrológico natural da água e, ao mesmo tempo, considerando o uso racional dos recursos hídricos, como a utilização de fontes alternativas para captação e aproveitamento de água de chuva nas construções, dentre outras soluções.

Há algumas décadas a simulação desses fenômenos naturais era praticamente impossível, devido a limitações dos computadores e *softwares* existentes. Com o avanço tecnológico neste setor, foi possível a criação de diversos *softwares*, cada vez mais avançados, que simulam o comportamento da água em vários fenômenos na natureza, como o HMS, HEC-RAS, HEC-GeoRAS, HEC-HMS, entre outros (Cabral *et al.* 2015, Oliveira & Salla 2017).

O simulador MOHID (*Water Modelling System*©) vem sendo desenvolvido desde 1985 por equipes de pesquisadores do *Marine and Environmental Technology Research Center* (Maretec), pertencente ao Instituto Superior Técnico (IST) da Escola de Engenharia da Universidade Técnica de

Lisboa, tendo a cooperação da empresa Hidromod Ltda. A partir do ano 2000 inicia-se o desenvolvimento do MOHID Land com um modelo 1D-Soil que se expande para incluir outros processos de Bacias Hidrográficas, tais como: aquífero, rio, escoamento superficial e o crescimento da vegetação (Maretec 2012).

Dessa maneira, este estudo tem como objetivo principal realizar uma simulação computacional que represente o comportamento da bacia hidrográfica do Rio Macaé, localizada na Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) no estado do Rio de Janeiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

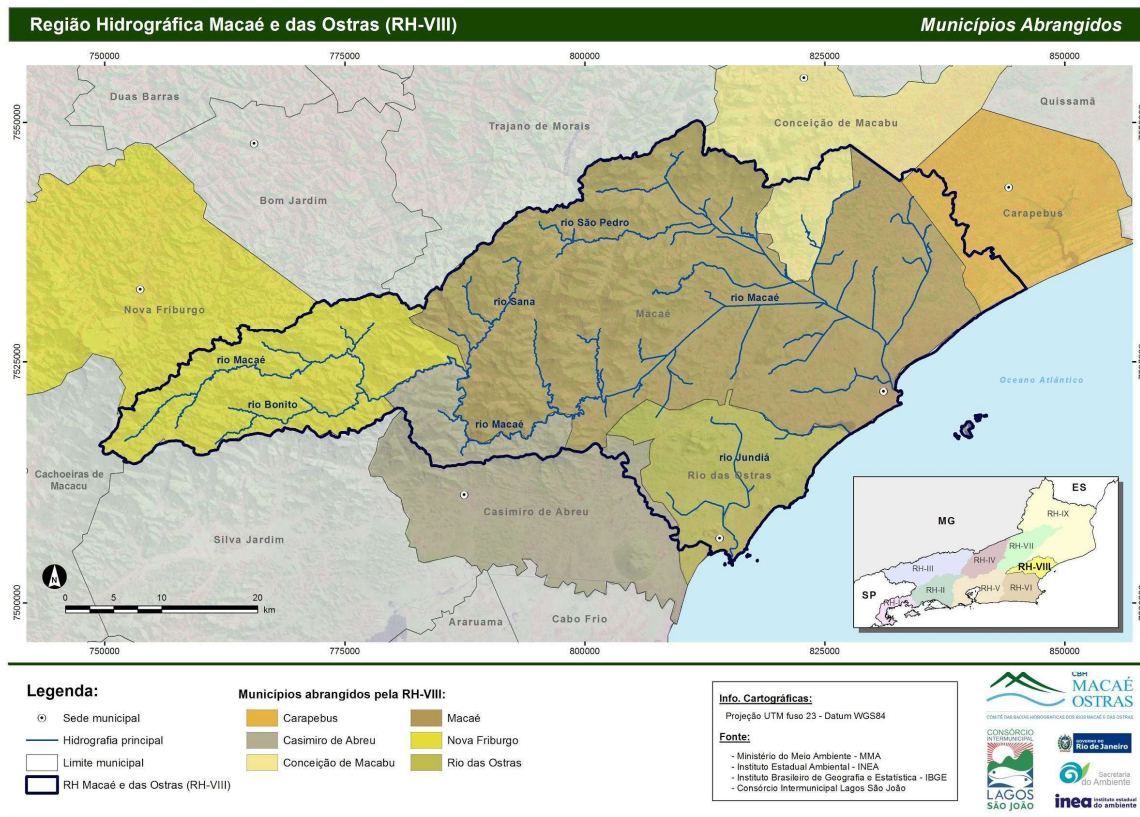
O presente trabalho apresenta a descrição metodológica da construção do modelo digital de terreno (MDT), delineamento da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Macaé (RJ) e breve descrição de demais parâmetros considerados, através da ferramenta numérica MOHID Land, por meio da interface gráfica MOHID Studio. Essa interface constitui um sistema integrado que permite gerir e criar arquivos de dados, gerar simulações e analisar os resultados do modelo (Maretec 2012).

Área de estudo: Bacia do Rio Macaé

De acordo com a Resolução N° 107/2013 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERHI-RJ), a Região Hidrográfica VIII do estado do Rio de Janeiro é formada pelas bacias hidrográficas do Rio Macaé, do Rio das Ostras e da Lagoa Imboassica, na faixa costeira central-norte do estado. A bacia do Rio Macaé é a de maior extensão, sendo a sua área de drenagem, aproximadamente, 157 km², considerando as bacias que estão dentro do estado (CBH Macaé Ostras 2020).

Dentre os seis municípios que a bacia do Rio Macaé abrange, está o município de Macaé com cerca de 82% (1448 km²) do seu território na bacia. Já os demais municípios, Nova Friburgo, Casimiro de Abreu, Rio das Ostras, Conceição de Macabu e Carapebus, totalizam 317 km² (18%). A transposição das águas da bacia do Rio Macabu, através da Usina Hidrelétrica Macabu colabora com a bacia do Rio Macaé (sub-bacia do Rio São Pedro). É importante destacar que o Rio Macaé, nasce na Serra Macaé de Cima, em Nova Friburgo, fluindo na direção leste-sudeste e percorrendo cerca de 136 km, desaguando no oceano Atlântico junto à cidade de Macaé (CBH Macaé Ostras 2020).

Figura 1: Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) - Municípios abrangidos.



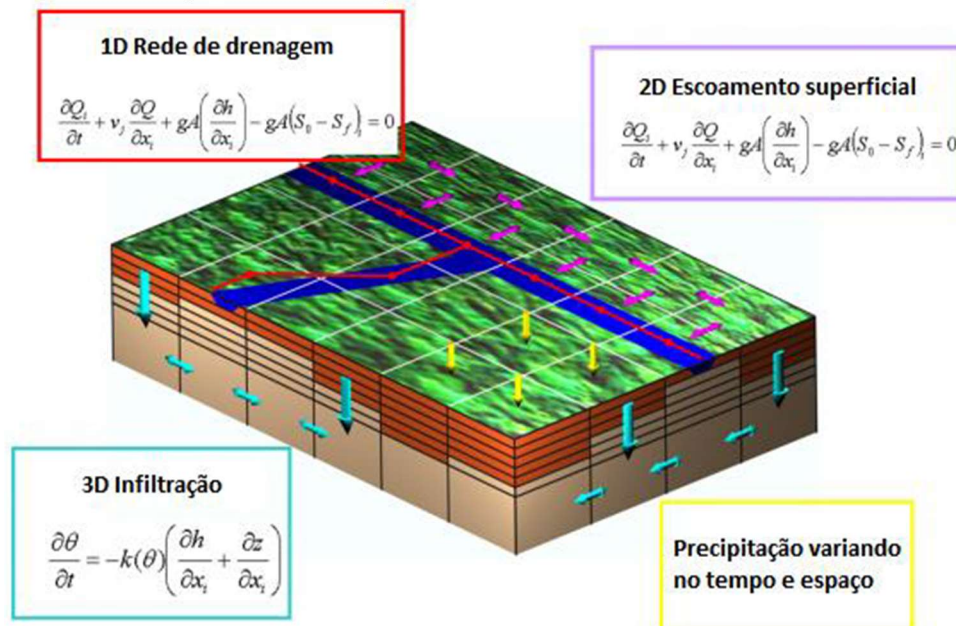
Fonte: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Macaé e das Ostras - CBH Macaé Ostras.

Modelagem Computacional: MOHID Land

O *software* Mohid Land é um modelo 3D capaz de simular as diferentes fases do ciclo hidrológico, espacialmente distribuído de forma variável ou contínua. O *software* é de código aberto e livre. Uma das características do *software* é que permite estudar o ciclo da água em uma abordagem integrada, possibilitando inclusive a gestão da bacia e a simulação de inundações.

A Figura 2 indica as equações resolvidas pelo *software* em diferentes fases do ciclo hidrológico, onde a rede de drenagem é unidimensional, o escoamento superficial é bidimensional e o processo de infiltração é tridimensional.

Figura 2: Sistema de equações resolvido pelo MOHID Land.



Fonte: adaptado de MOHID Wiki (2020).

O Sistema de Modelagem de Água MOHID foi construído usando uma abordagem orientada para facilitar a integração de novos processos e modelos. Os algoritmos numéricos são baseados em uma abordagem de volume finito, uma estratégia impulsionada pelo fluxo que facilita o acoplamento de diferentes processos e permite a conservação de massa e continuidade do movimento (Trancoso *et al.* 2009, Iona 2013).

O MOHID Land possui diversas aplicações, uma delas foi capaz de simular a dinâmica da água no solo e na pastagem, levando em consideração a variabilidade climática ao estimar o balanço de água do solo e crescimento da biomassa em dois regimes diferentes de pastagem (Simionesei *et al.* 2018).

Os principais processos resolvidos pelo *software* estão listados abaixo (MOHID “Wiki” 2020):

- 3D Porous Media resolvendo as equações de Richard;
- Rede de Drenagem 1D resolvendo Onda Cinemática, *DiffusionWave* ou equações completas de St. Venant (onda dinâmica);
- Fluxo Overland 2D (resolvendo Onda de Difusão);
- Evapotranspiração usando Penman *Motheith* e disponibilidade de água no solo;
- O crescimento da planta e as práticas agrícolas (plantio, colheita, abate, fertilização, aplicação de pesticidas, etc.) incluindo dormência e banco de dados de colheita *SWAT - Soil and Water Assessment Tool*;
- Interação de mídia porosa com escoamento em infiltração usando continuidade (equação de Richard com gradiente de cabeça);
- Interação de meios porosos e escoamento com rede de drenagem usando continuidade (gradiente de superfície entre o escoamento e a rede de drenagem. Equação de Richard com gradiente de nível entre meios porosos e rede de drenagem);
- Rede de drenagem e interação do reservatório para contabilizar o impacto do fluxo do rio devido às infraestruturas hidráulicas manuais;
- Transporte de propriedade em todos os meios e transformação em solo e rio (modelos de qualidade de água podem ser acoplados);

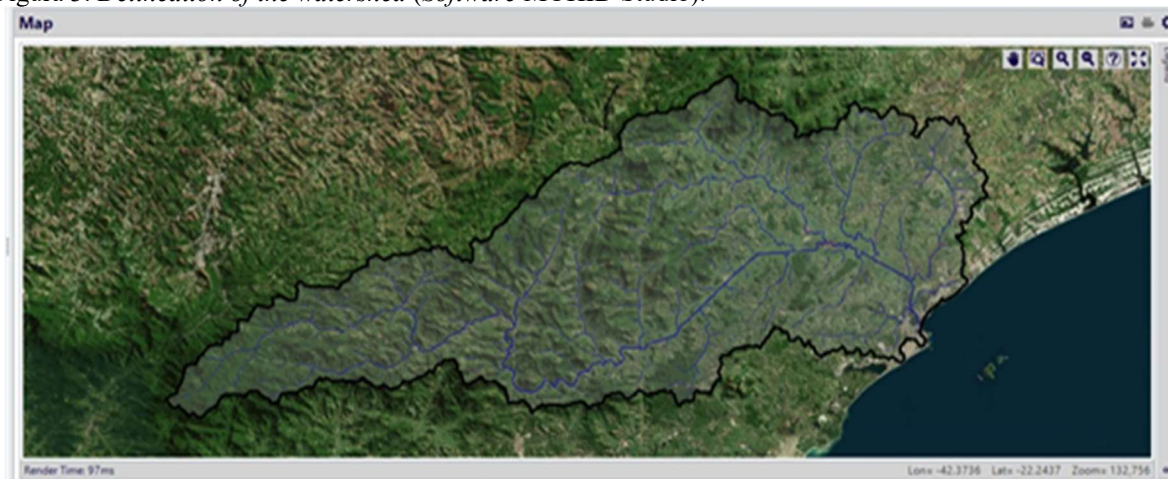
- Reações biológicas e químicas no solo como mineralização, nitrificação, desnitrificação, imobilização, equilíbrio químico, decadência de propriedades e processos no rio como produção primária, assimilação de nutrientes, decadência de propriedades, etc;
- Ligação à água do MOHID por descargas de módulo.

Construção do Modelo

Neste modelo computacional da bacia hidrográfica foi simulado um evento crítico de chuva durante um período de 48 horas seguidas e seus efeitos na bacia hidrográfica, como escoamento superficial e vazão. Para a realização desta simulação, foi utilizado o *Software* MOHID Land de código aberto e livremente distribuído. Vale ressaltar que os procedimentos descritos para a realização da modelagem foram baseados no Tutorial MOHID Land. Sendo assim, foram realizadas as seguintes etapas:

- Após definida a área de estudo correspondente a bacia hidrográfica do Rio Macaé, localizada na Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH VII), os dados de altitude das regiões denominadas 22_42 e 22_435 disponibilizadas pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (Topodata) foram importados (Importação do Arquivo XYZ).
- Em seguida, o terreno digital foi estruturado em grid horizontal com células de 0.100 minutos. Estudos recentes de modelagem matemática da bacia Hidrográfica do Rio Macaé, utilizaram células no tamanho de 250 x 250 metros (Tavares *et al.* 2017, Tavares *et al.* 2018, Lugon Junior *et al.* 2019). Neste trabalho, com o objetivo de atualizar o modelo para as condições atuais da bacia e aumentar a sua resolução, utilizaremos um tamanho menor de células, de aproximadamente, 100 x 100 metros. Como consequência na redução do grid, iremos obter resultados mais refinados.
- Após definidas as especificações de tamanho das células, o grid foi então projetado sobre a área de interesse através da ferramenta *Constant Spaced Grid*. Posteriormente, houve a exclusão da Costa do modelo através da ferramenta *Construct Named Polygons*.
- A topografia com as informações de altitude da bacia Hidrográfica do Rio Macaé, que foram obtidas por meio da série de dados disponibilizadas no site do Topodata, foi criada através da ferramenta *Construct From Points*. E, a fim de suavizar o terreno digital, ou seja, para verificar se o terreno digital possui ruídos, foi criado o *Smooth the digital terrain*.
- Depois que foi definido o trecho retilíneo do Rio Macaé, houve a criação do *Burn In River* com a finalidade de “escavar” o rio no trecho definido anteriormente. No próximo passo, as depressões do terreno digital foram removidas. Para finalizar a delimitação da bacia, realizou-se o delineamento da bacia hidrográfica (*Delineation of the watershed*), conforme a Figura 3.

Figura 3: *Delineation of the watershed* (Software MOHID Studio).



Fonte: Elaborada pelos autores.

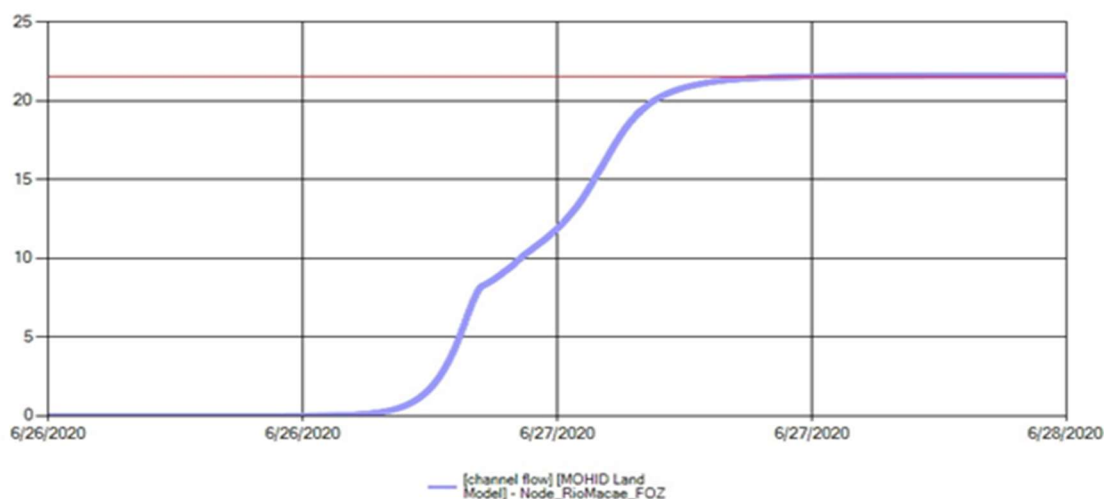
Após a realização das etapas anteriores responsáveis pela elaboração do Modelo Digital da Bacia, iniciou-se a fase de configuração da primeira simulação. Destaca-se que houve a definição do início e do fim da simulação *Model_1 (Time Options)* com a definição de um período de 48 horas seguidas de chuva. Em seguida, ocorreu a configuração da precipitação (*Precipitation – Atmosphere_1.dat*), com o valor constante de 3mm/H (72mm/dia), totalizando 144mm em 48 horas.

O valor do Coeficiente de Manning utilizado tanto no fluxo do rio (rede de drenagem - *Drainage Network*) quanto no fluxo terrestre (escoamento superficial - *Runoff*) neste modelo foi constante (*Default Value* 0.035) ao longo de toda bacia hidrográfica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 demonstra a evolução da vazão durante um período de 48 horas de chuva ininterrupta, nota-se que após, aproximadamente, 24 horas há um aumento significativo na vazão do Rio Macaé na região da sua foz.

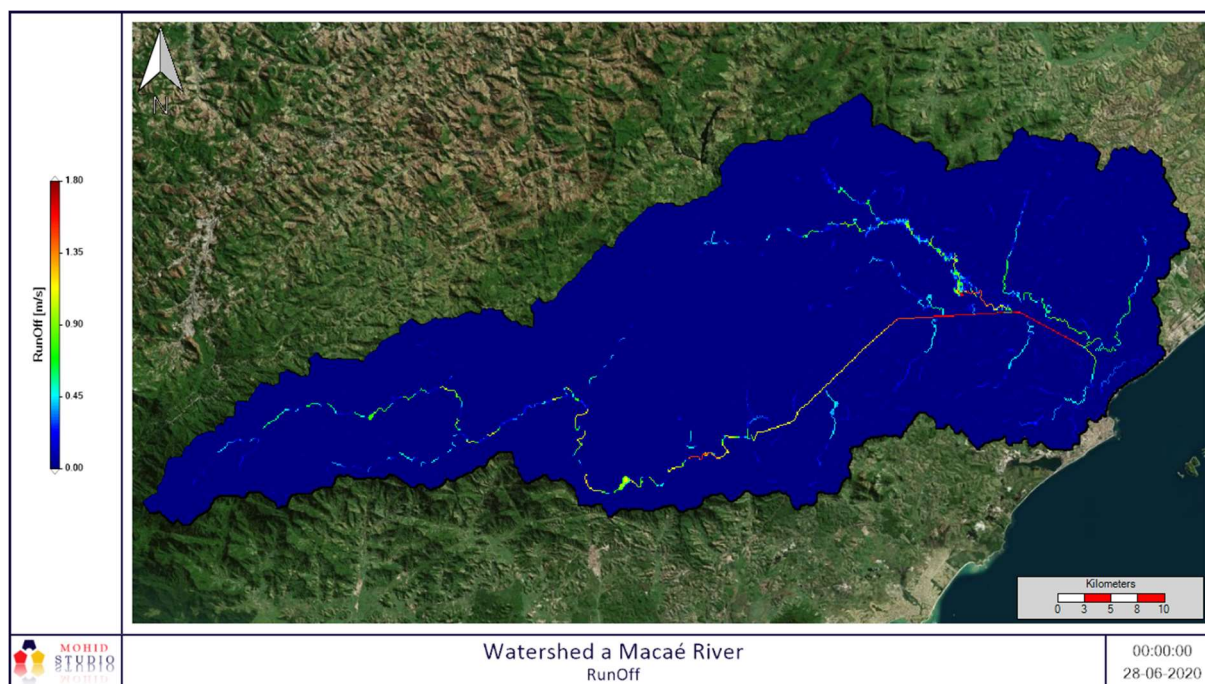
Figura 4: [channel flow] [MOHID Land Model] – Node_RioMacaee_FOZ (Software MOHID Studio).



Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 5 apresenta o resultado final da simulação realizada, demonstrando o comportamento do escoamento superficial (*RunOff*) ao longo da bacia hidrográfica. Nota-se um escoamento superficial mais elevado nas áreas destacadas na cor vermelha.

Figura 5: Resultado final da simulação, mapa *Watershed a Macaé River RunOff* (Software MOHID Studio).



Fonte: Elaborada pelos autores.

O modelo computacional elaborado mostrou-se adequado na primeira simulação e apresentou resultados satisfatórios. Pode-se ressaltar que os dados utilizados na simulação podem ser refinados com estudos mais profundos do uso e cobertura do solo, alterando assim o Coeficiente de *Manning* ao longo da rede de drenagem e da bacia hidrográfica. Quanto ao dado de precipitação utilizado no modelo (constante no valor de 3mm/H), foi satisfatório para simulação de um evento crítico de chuva no período de 48 horas. Porém, estudos mais avançados da precipitação podem gerar resultados mais próximos da realidade, com modelos de chuva variando no tempo e no espaço.

4. CONCLUSÃO

Os resultados alcançados indicam a viabilidade técnica de aplicação da simulação computacional com uso do *software* MOHID Land, como ferramenta de análise do escoamento de chuvas extremas em bacias hidrográficas com formação complexa. Considerando-se a diversidade da rede de canais e das características do relevo, no caso estudado de Macaé, conclui-se também que a técnica pode ser aplicada em qualquer bacia hidrográfica, com características semelhantes.

É importante destacar que a modelagem apresentada está em fase de aperfeiçoamento para uma pesquisa de mestrado voltada para a área urbana do município de Macaé e os dados utilizados na simulação podem ser refinados, a fim de atender melhor o interesse de uma futura pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

ANA (2020) **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos>>. Acesso em: 02 de setembro 2020.

Brasil (1997) **Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 16 de agosto de 2020.

Cabral SL, Campos JNB, Silveira CDS, Teixeira FADA (2015) **Hydrologic and Hydraulic Modelling Integrated With Gis: A Study of the Acaraú River Basin - CE**. Journal of Urban and Environmental Engineering, p. 167–174, 9 jun. 2015.

CBH Macaé Ostras. **Comitê das bacias hidrográficas dos rios macaé e das ostras - CBH MACAÉ OSTRAS - Bacia Hidrográfica**. Disponível em: <<https://cbhmacae.eco.br/a-bacia/>>. Acesso em: 02 de setembro de 2020.

Iona P (2013) **Modeling Floods In Enxoé Watershed**. IST Technical University Of Iasi, Roménia.

Lugon Junior J, Tavares LPDS, Kalas FDA, Rodrigues PPGW, Wasserman JCA (2019) **Reservoir implantation for flood dampening in the Macaé River basin using the Mohid Land model**. Ciência e Natura, v. 41, p. e29, 4 out. 2019.

Maretec (2012) **Descrição do Mohid**. Campos dos Goytacazes: Essentia.

Miguez, M, Rezende, O, Veról, A (2015) **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. Elsevier Brasil.

MOHID Wiki. **Mohid Land**. Disponível em: <http://wiki.mohid.com/index.php?title=Mohid_Land>. Acesso em 01 setembro de 2020.

Oliveira JMS, Salla MR (2017) **Modelling the Impacts of Wildfire on Surface Runoff in the Upper Uberabinha River Watershed Using HEC-HMS**. Journal of Urban and Environmental Engineering, p. 88–98, 21 maio 2017.

Simionesei L, Ramos TB, Oliveira AR, Jongen M, Darouich H, Weber K, Proença V, Domingos T, Neves R (2018) **Modeling Soil Water Dynamics and Pasture Growth in the Montado Ecosystem Using MOHID Land**. Water, v. 10, n. 4, p. 489, 16 abr. 2018.

Tavares LPDS, Costa JBD, Kalas FDA, Lugon Junior J (2017) **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Macaé utilizando o MOHID Land**. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v. 11, n. 1, p. 169, 30 out. 2017.

Tavares LPDS, Lugon Junior J, Silva JAFD, Wasserman JC, Rodrigues PPGW (2018) **Water Management and Urban Flood Mitigation: Studies and Proposals for the Macaé River Basin in Brazil**. Journal of Urban and Environmental Engineering, v. 12, n. 2, p. 188–200, 31 dez. 2018.

Topodata. **Arquivos em colunas xyz (ASCII, extensão .txt)**. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/data/txt/>. Acesso em: 01 de agosto de 2020.

Trancoso AR, Braunschweig F, Leitão PC, Obermann M, Neves R (2009) **An advanced modelling tool for simulating complex river systems**. Science of The Total Environment, v. 407, n. 8, p. 3004–3016, abr. 2009.

Tutorial MOHID. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/326564608/MOHID-Land-Quick-Start-Guide-v3-1>. Acesso em: 01 de agosto de 2020.

ARTIGO CIENTÍFICO 3

MODELAGEM DE CHUVAS INTENSAS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUDESTE DO BRASIL, COM BASE NO MODELO NUMÉRICO MOHID.

*MODELING OF EXTREME RAINS IN A HYDROGRAPHIC BASIN IN SOUTHEAST BRAZIL,
BASED ON THE MOHID NUMERICAL MODEL.*

Vinicius Vanderley Miguel da Silva - IFFluminense/PPEA

Luís Felipe Umbelino dos Santos - IFFluminense/PPEA

Jader Lugon Júnior - IFFluminense/PPEA

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo realizar simulações de chuvas intensas em uma bacia hidrográfica no sudeste do Brasil, e verificar os efeitos na rede de drenagem da bacia e no seu principal afluente o Rio Macaé. Foi elaborado um modelo digital do terreno para representação da bacia hidrográfica estudada. Para a realização desta simulação foi necessário o estudo do uso e ocupação do solo e topografia da região. Foi necessário também a criação de mapas que representassem, a distribuição da rede de drenagem e a infiltração do solo, que foi modelado através do método do *Curve Number*, variando ao longo de toda a bacia hidrográfica. Foi considerado também nas simulações o escoamento superficial (*runoff*) que utilizou a metodologia do coeficiente de *Manning*, para a representação deste fenômeno. Para uma melhor representação da realidade o *runoff* utilizado variou ao longo da bacia hidrográfica, conforme uso e cobertura do solo. Por fim a representação da precipitação foi realizada diversos tipos de chuvas, dentre elas chuvas intensas de projeto com tempo de retorno estimado em 50, 20 e 10 anos. Os resultados apontam que o modelo numérico do MOHID, pode reproduzir o movimento da água no solo em uma simulação 1D, 2D e 3D, mas é necessário que os dados de entrada como precipitação e características do solo sejam representativos para o estudo da área. Para um cenário de chuvas intensas, conforme simulações, tem-se um efeito imediato e rápido no aumento das vazões, circunstância de extremo perigo para as localidades próximas ao leito do rio. Estudos mais profundos dos fenômenos atmosféricos, principalmente ligados à precipitação, são de extrema importância para a compreensão dos fenômenos naturais. Sistemas de tomada de decisões podem ser elaborados a partir das simulações e resultados encontrados, auxiliando assim os gestores das cidades na prevenção e mitigação dos efeitos de eventos hidrológicos críticos.

Palavras-chave: Chuvas intensas. escoamento superficial. Infiltração no Solo. Eventos Críticos. Modelagem Matemática. Bacias Hidrográficas.

ABSTRACT

This work aims to carry out simulations of intense rain in a hydrographic basin in southeastern Brazil, and to verify the effects on the drainage network of the basin and its main tributary, the Macaé River. A digital terrain model was developed to represent the studied hydrographic basin. In order to carry out this simulation, it was necessary to study the use and occupation of the soil and the topography of the region. It was also necessary to create maps that represented, the distribution of the drainage network and the infiltration of the soil, which was modeled using the Curve Number method, varying throughout the hydrographic basin. Runoff was also used in the simulations, which used the Manning coefficient methodology to represent this phenomenon. For a better representation of reality, the runoff used varied along the watershed, according to land use and coverage. Finally, the representation of precipitation was carried out by various types of rain, including heavy project rains with estimated return times of 50, 20 and 10 years. The results show that the numerical model of MOHID, can reproduce the movement of water in the soil in a 1D simulation, but it is necessary that the input data such as precipitation and soil characteristics are representative for the study of the area. For a scenario of intense rain, according to simulations, there is an immediate and rapid effect in the increase of flows, a circumstance of extreme danger for the populations of the riverside areas. Deeper studies of atmospheric phenomena, mainly linked to precipitation, are extremely important for the understanding of natural phenomena. Decision-making systems can be developed based on the simulations and results found, thus assisting city managers in preventing and mitigating the effects of critical hydrological events.

Keywords: *Intense Rains. Surface runoff. Soil infiltration. Critical Events. Mathematical Modeling. Watersheds.*

1. INTRODUÇÃO

Os estudos hidrológicos de bacias hidrográficas, são de extrema importância para compreender o comportamento do balanço hídrico e os processos que controlam o movimento da água, bem como os impactos das mudanças do uso do solo acerca da quantidade e qualidade da água. Tem-se a bacia hidrográfica como uma unidade hidrológica de estudo e também como unidade de organização e planejamento, devido suas características estarem diretamente ligadas à produção de água (RENNÓ; SOARES, 2003).

O estudo de modelos hidrológicos integra ferramentas muito úteis para a compreensão dos fatores que afetam o balanço hídrico e a formação de fluxos dentro de uma bacia hidrográfica. Na década de 30 os primeiros estudos quantitativos de Horton sobre os mecanismos de formação do escoamento, viabilizaram a identificação, pelo menos parcial, dos diversos fatores altamente relacionados aos processos de transformação da chuva em escoamento superficial e suas interações (FRANCHINI et al., 1996).

Posteriormente na década de 60, pesquisadores e hidrólogos desenvolveram o conceito de área variável de contribuição com base na constatação que nem o escoamento básico e nem o escoamento direto são uniformes em toda a superfície (ou subsolo) da bacia. De fato, o fluxo de água numa rede de drenagem é resultado dos processos dinâmicos que ocorrem numa área de contribuição que se expande ou encolhe, conforme a variação de umidade no solo (HEWLETT, 1982).

A modelagem matemática é uma ferramenta significativa de apoio à gestão e auxilia os gestores públicos na tomada de decisões sobre o uso do solo e da água. Com a modelagem é possível representar processos físicos de um determinado sistema e obter informações normalmente indisponíveis (ANDRADE et al., 2017).

Um modelo hidrológico relevante, é capaz de reunir informações hidrológicas importantes e essenciais, para a tomada de decisão, dentro da finalidade do gerenciamento e planejamento de recursos hídricos (KLEMEŠ, 1986).

Mudanças no regime de precipitação têm reflexo no regime de vazões, alterando a resposta hidrológica de uma bacia. A precisão dos modelos depende muito da precisão da entrada dos dados, especialmente a precipitação, que é um dos principais componentes do processo hidrológico. Assim, o aumento gradual da precipitação em bacia hidrográfica altera as taxas de vazão ao longo do tempo e aumenta as potenciais áreas de inundação a jusante das bacias (HEWLETT, 1982).

Nascimento (2010) relacionou dados de pluviometria e vazão na bacia do rio Macaé entre os anos 1950 e 2005 e seus resultados apontam que os eventos pluviométricos máximos interanuais estão ficando mais intensos no baixo curso enquanto que no alto curso apresentam estabilidade. As tendências pluviométricas sazonais apontam para uma similaridade de comportamento entre o baixo e o alto curso onde há um aumento nos totais acumulados do verão e diminuição no período do inverno (SOUZA; MARÇAL, 2015).

Problemas desafiadores que surgem neste contexto: Como as chuvas intensas se comportam em uma bacia hidrográfica extremamente complexa? Como os modelos matemáticos e computacionais podem contribuir para na tomada de decisões dos gestores das cidades e conseqüentemente uma melhor gestão das águas?

Este estudo tem como objetivo principal realizar uma simulação computacional que represente o comportamento da bacia hidrográfica do Rio Macaé, localizada na Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) no norte do estado do Rio de Janeiro – Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

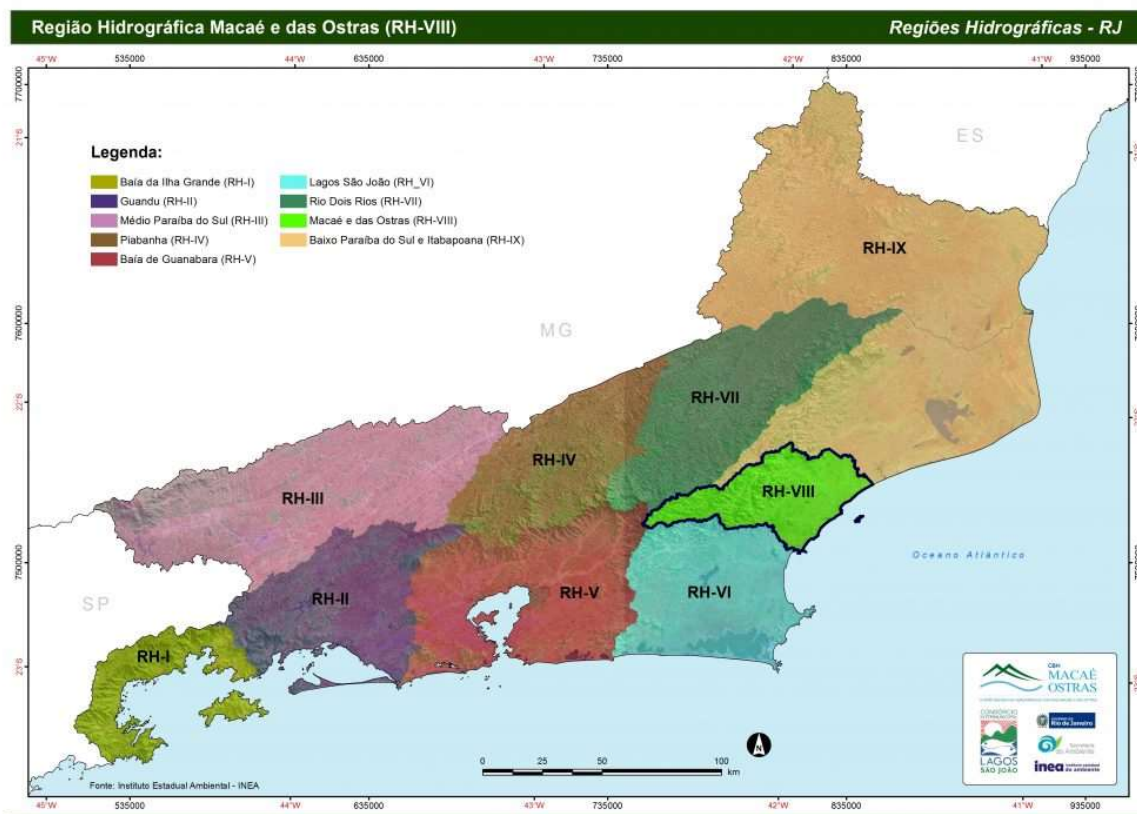
Este trabalho apresenta a descrição metodológica da construção do modelo digital de terreno (MDT), delineamento da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Rio Macaé (RJ), simulação de chuvas de projeto e descrição de demais parâmetros considerados, através da ferramenta numérica MOHID. Essa interface constitui um sistema integrado que permite gerir e criar arquivos de dados, gerar simulações e analisar os resultados do modelo (MARETEC, 2012).

2.1 Caracterização da Área de Estudo: Bacia do Rio Macaé

Na faixa costeira norte do Estado do Rio, Macaé está localizada a Bacia Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII), entre a Região Hidrográfica Lagos São João e a Região Hidrográfica Baixo Paraíba do Sul. É formada pelas bacias hidrográficas da Lagoa de Imboassica, dos rios Macaé, das Ostras e de pequenas lagoas e córregos. Dentre as bacias hidrográficas contidas unicamente dentro do Estado, a bacia do Rio Macaé possui maior extensão, com uma área de drenagem de aproximadamente 1765 km², seguida da bacia do Rio das Ostras com cerca de 157 km², e da bacia da Lagoa Imboassica com cerca de 56 km², totalizando uma área de 1978 km² (CBH MACAÉ OSTRAS, 2020).

A bacia do Rio Macaé abrange seis municípios, Nova Friburgo, Casimiro de Abreu, Rio das Ostras, Conceição de Macabu e Carapebus, dentre os quais se destaca o município de Macaé, com cerca de 1448 km² (82%) do seu território na bacia. O Rio Macaé, que já foi conhecido como rio dos Bagres, nasce na Serra Macaé de Cima, próximo ao pico do Tinguá (1560 m), em Nova Friburgo, fluindo na direção leste-sudeste e percorrendo cerca de 136 km, desaguando no oceano Atlântico junto à cidade de Macaé. Seus principais afluentes pela margem direita são os rios Bonito, Purgatório e Pedrinhas; os córregos Abacaxi e Carão; o rio Teimoso, os córregos Roça Velha e Belarmino e o rio Três Pontes e, pela margem esquerda, os rios Sana, Atalaia, São Domingos, Santa Bárbara, Ouro, Macaé, São Pedro e Jurumirim, e os córregos Genipapo, Guanandirana e Sabiá (CBH MACAÉ OSTRAS, 2020). Na Figura 1 está representada, geograficamente, a região de interesse.

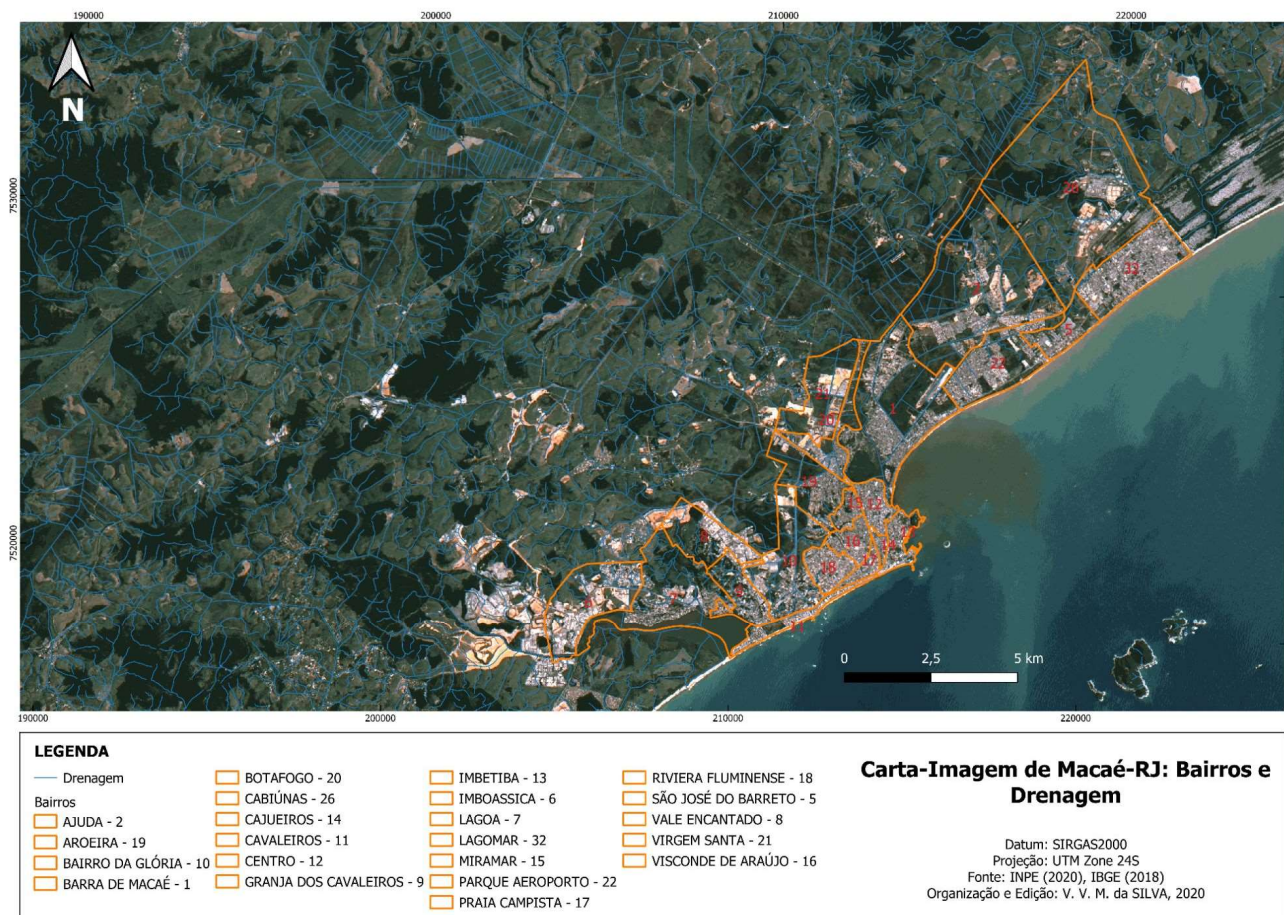
Figura 1: Regiões Hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RH-VIII) em destaque na cor verde.



Fonte: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Macaé e das Ostras - CBH Macaé Ostras, 2020.

A Bacia Hidrográfica do Rio Macaé é uma região extremamente heterogênea, em relação a sua rede de drenagem, com uma grande variedade de canais e rios ao longo dos seus 136 km de extensão. No exutório da bacia hidrográfica temos a Cidade de Macaé com elevada concentração populacional nas áreas ribeirinhas. Na Figura 2 podemos observar os bairros da cidade de Macaé além da rede de drenagem próximo ao exutório da Bacia Hidrográfica.

Figura 2: Carta-Imagem de Macaé-RJ: Bairros e Drenagem.



Fonte: Elaborada pelos autores.

2.2 Modelagem Computacional

Atualmente existem diversos modelos hidrológicos que são utilizados para simulação e previsão de diversos cenários do ciclo hidrológico. Eles são baseados principalmente em estruturas conceituais ou físicas, discretizados desde níveis de sub-bacias, regiões hidrológicamente homogêneas, até células associadas a peculiaridades topográficas (NETO et al., 2014).

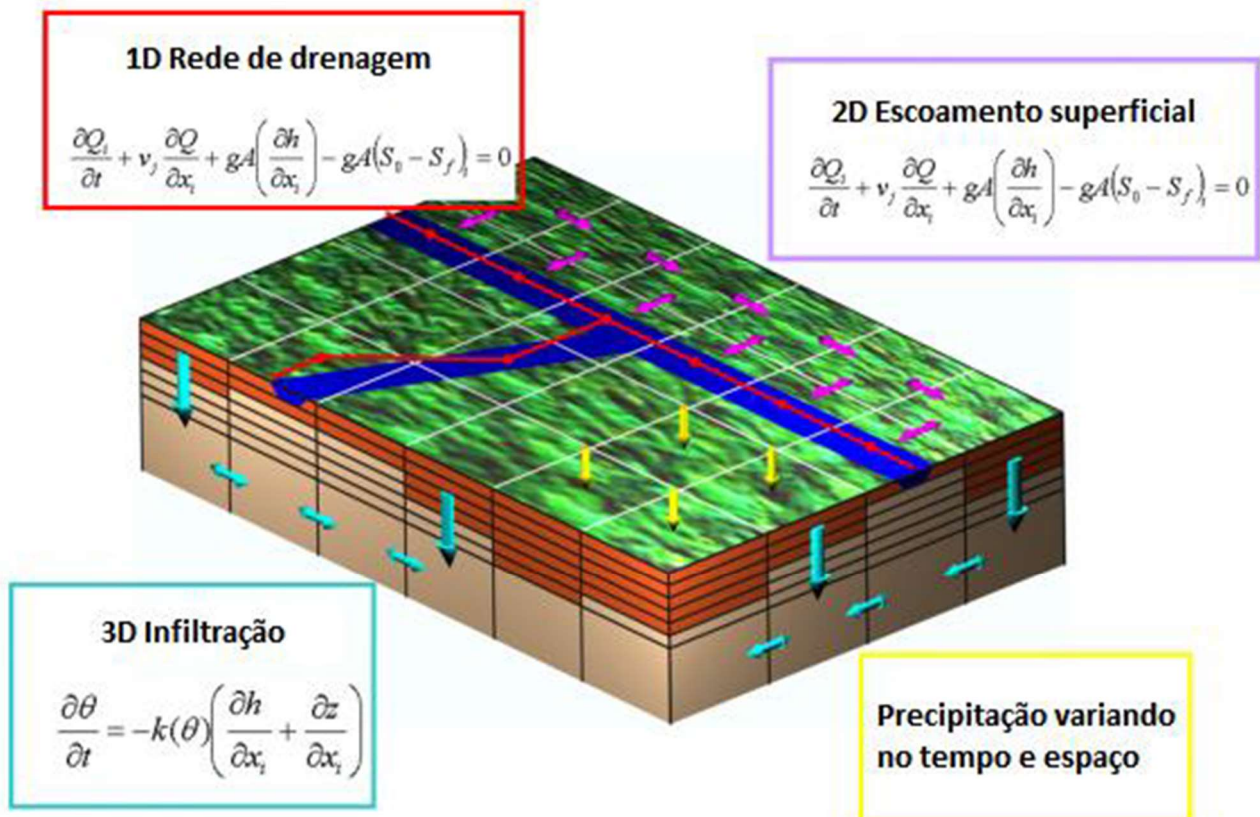
O MOHID (*Water Modelling System*), sistema de modelagem numérica tridimensional, vem sendo desenvolvido e aperfeiçoado desde 1985, pelo centro de investigação *Marine and Environmental Technology Research Center* (MARETEC), pertencente ao Instituto Superior Técnico integrado à Universidade Técnica de Lisboa. Anteriormente como um modelo bidimensional forçado pela maré, o MOHID contempla uma modelagem integrada, permitindo a utilização do modelo em suas abordagens uni, bi e tridimensional, com aplicações em diversas regiões costeiras e estuarinas (MARETEC, 2012; TELLES; NETO; RODRIGUES, 2012).

Os algoritmos do MOHID são baseados numa abordagem de volume finito, uma estratégia impulsionada pelo fluxo que facilita o acoplamento de diferentes processos e permite a conservação de massa e continuidade do movimento. O Sistema de Modelagem de Água MOHID foi construído usando uma abordagem orientada para facilitar a integração de novos processos e modelos (IOANA, 2013; TRANCOSO et al., 2009).

O MOHID Land foi desenvolvido e aperfeiçoado nos projetos europeus: EcoRiver, TempQsim e ICRew, nos quais simulou-se o fluxo de águas em bacias hidrográficas com atalhos para o rio e fluxo subterrâneo (TRANCOSO et al., 2009). Seu código foi desenvolvido em Fortran95, usando *object-oriented programming* – OOP, com uma organização em classes que permitem processos específicos em arquivos específicos (MARETEC, 2012).

As simulações realizadas podem ser em 1D para o escoamento na rede de drenagem, em 2D, representando somente o escoamento superficial, e em 3D quando conta também com a infiltração e transporte da água no solo (TRANCOSO et al., 2009). As equações empregadas estão ilustradas na Figura 3.

Figura 3: Equações do MOHID Land.



Fonte: MARETEC, 2012.

Na pesquisa em questão, a aplicação do *software* envolverá os módulos que correspondem a descrição dos processos do ciclo hidrológico, portanto, implicará na utilização dos módulos de 1D, 2D e 3D.

As principais possibilidades de atuação do MOHID Land são (MOHID WIKI, 2020):

- 3D *Porous Media* resolvendo as equações de Richard;
- Rede de Drenagem 1D resolvendo Onda Cinemática, *DiffusionWave* ou equações completas de St. Venant (onda dinâmica);
- Fluxo Overland 2D (resolvendo Onda de Difusão);
- Evapotranspiração usando *Penman Motheith* e disponibilidade de água no solo;

- O crescimento da planta e as práticas agrícolas (plântio, colheita, abate, fertilização, aplicação de pesticidas, etc.) incluindo dormência e banco de dados de colheita SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*;
- Interação de mídia porosa com escoamento em infiltração usando continuidade (equação de Richard com gradiente de cabeça);
- Interação de meios porosos e escoamento com rede de drenagem usando continuidade (gradiente de superfície entre o escoamento e a rede de drenagem. Equação de Richard com gradiente de nível entre meios porosos e rede de drenagem);
- Rede de drenagem e interação do reservatório para contabilizar o impacto do fluxo do rio devido às infraestruturas hidráulicas manuais;
- Transporte de propriedade em todos os meios e transformação em solo e rio (modelos de qualidade de água podem ser acoplados);
- Reações biológicas e químicas no solo como mineralização, nitrificação, desnitrificação, imobilização, equilíbrio químico, decadência de propriedades e processos no rio como produção primária, assimilação de nutrientes, decadência de propriedades, etc;
- Ligação à água do MOHID por descargas de módulo.

Os modelos de simulação hidráulica são fundamentados nas equações de continuidade completas, em contrapartida as equações de quantidade de movimento alguns termos são eliminados. Por fim, o modelo mais complexo é o de onda dinâmica, que considera a aceleração local, convectiva, e a pressão (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Para uma melhor visualização das equações segue abaixo um quadro resumo com as variações da equação de Saint Venant.

Quadro 1: Variações da equação de Saint Venant.

Equação da continuidade	
Forma conservativa	$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$
Forma não conservativa	$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$
Equação de quantidade de movimento	
Forma conservativa	$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$
Forma não conservativa	$\frac{\partial v}{\partial t} + V \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$ <p style="text-align: center;"> Onda cinemática Onda difusa Onda dinâmica </p>

Fonte: Adaptado de Chow, Maidment, Mays, (1988).

A empresa Action Modulers, desenvolveu o MOHID Studio que é uma interface gráfica de usuário para o sistema de modelagem de água MOHID. Com o MOHID Studio podemos utilizar o MOHID *Numerical Engines* de dentro de um ambiente mais amigável, gerenciando todas as tarefas necessárias para preparar, executar e analisar resultados de simulações numéricas feitas por MOHID *Numerical Engines* (MOHID STUDIO, 2021).

Desde o ano de 2018, a interface MOHID Studio foi vendida integralmente para o grupo Bentley Infraestrutura, que batizou essa nova versão do Mohid Studio de OpenFlows FLOOD, contendo integralmente as mesmas funcionalidades da interface MOHID Studio.

O *software* OpenFlows FLOOD é um modelo 3D capaz de simular as diferentes fases do ciclo hidrológico, espacialmente distribuído de forma variável ou contínua. Uma das características do *software* é que permite estudar o ciclo da água em uma abordagem integrada, possibilitando inclusive a gestão da bacia hidrográfica.

2.3 Construção do modelo Digital do Terreno

Na elaboração deste modelo da bacia hidrográfica foi simulado diversos eventos de chuva com diferentes tempos de recorrência e intensidade, variando ao longo do tempo. Esses eventos de chuva foram simulados num período de 72 horas e analisados seus efeitos na bacia hidrográfica, principalmente a vazão próxima a sua foz na cidade de Macaé. Para a execução destas simulações, foi utilizado o *Software* OpenFlows FLOOD. Segue abaixo etapas e procedimentos para realização desta modelagem.

Primeira etapa para realização da modelagem é o estudo da topografia na região de interesse. Para a bacia hidrográfica do Rio Macaé, foram utilizados os dados disponibilizados pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (Topodata). Os dados de altitude deste projeto estão numa resolução espacial de aproximadamente 30m x 30m e foram importados através de arquivos XYZ.

Para elaboração do terreno digital foi criado um grid constante de células com aproximadamente 100 x 100 metros. Estudos de modelagem matemática da bacia Hidrográfica do Rio Macaé, utilizaram células no tamanho de 250 x 250 metros (LUGON JUNIOR et al., 2019; TAVARES et al., 2017, 2018). Nesta pesquisa, com o objetivo de atualizar o modelo para as condições atuais da bacia e aumentar a sua resolução, utilizaremos um tamanho menor de células. Como consequência na redução do grid, iremos obter resultados mais apurados e refinados.

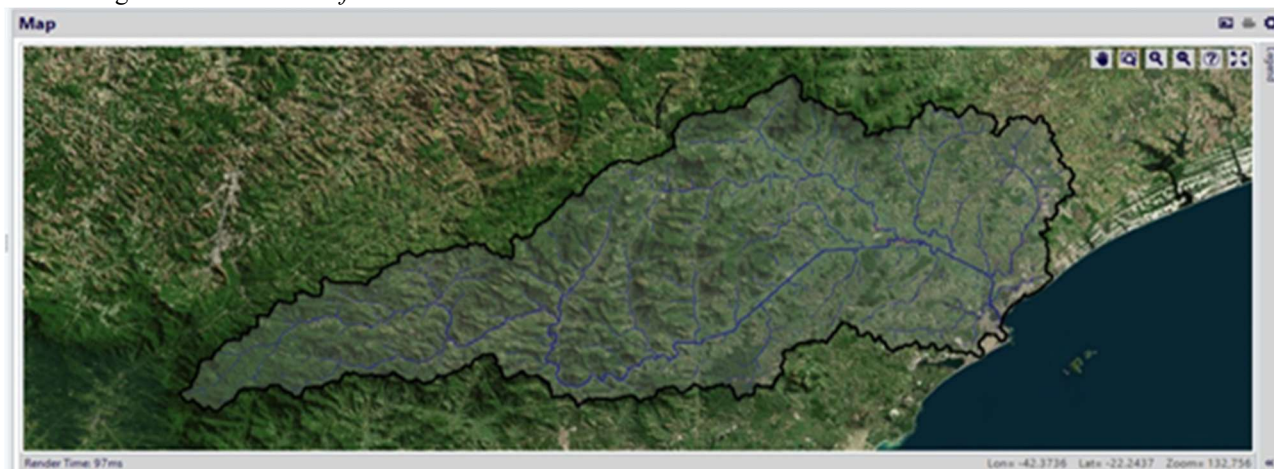
Logo após a etapa das células, o grid foi então projetado sobre a área da bacia hidrográfica através da ferramenta *Constant Spaced Grid*. Para a exclusão de áreas que não serão calculadas nesse modelo, como por exemplo toda a parte Oceano Atlântico, foi utilizado a ferramenta *Construct Named Polygons*.

Para a criação da primeira topografia foi utilizada a ferramenta *Construct From Points*, construindo assim uma topografia através de pontos importados do projeto Topodata. Logo após utilizar esta ferramenta foi utilizado o comando *Smooth the digital terrain*, o objetivo desta etapa é verificar se o terreno digital possui ruídos.

Para uma melhor delimitação das redes de drenagem e trechos retilíneos do Rio Macaé e Rio São Pedro, foi utilizado a ferramenta *Burn In River* com a finalidade de “escavar” o rio no trecho definido. Posteriormente foram removidas as depressões do terreno com a ferramenta: *Remove depressions from the digital terrain*. Para concluir a delimitação da bacia, utilizou a ferramenta *delineation of the watershed*, nesta etapa é necessário informar o exutório da bacia hidrográfica.

Após executar todas essas etapas, teremos como resultado a delimitação das redes de drenagem de toda a bacia hidrográfica, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: *Delineation of the watershed.*



Fonte: Elaborada pelos autores.

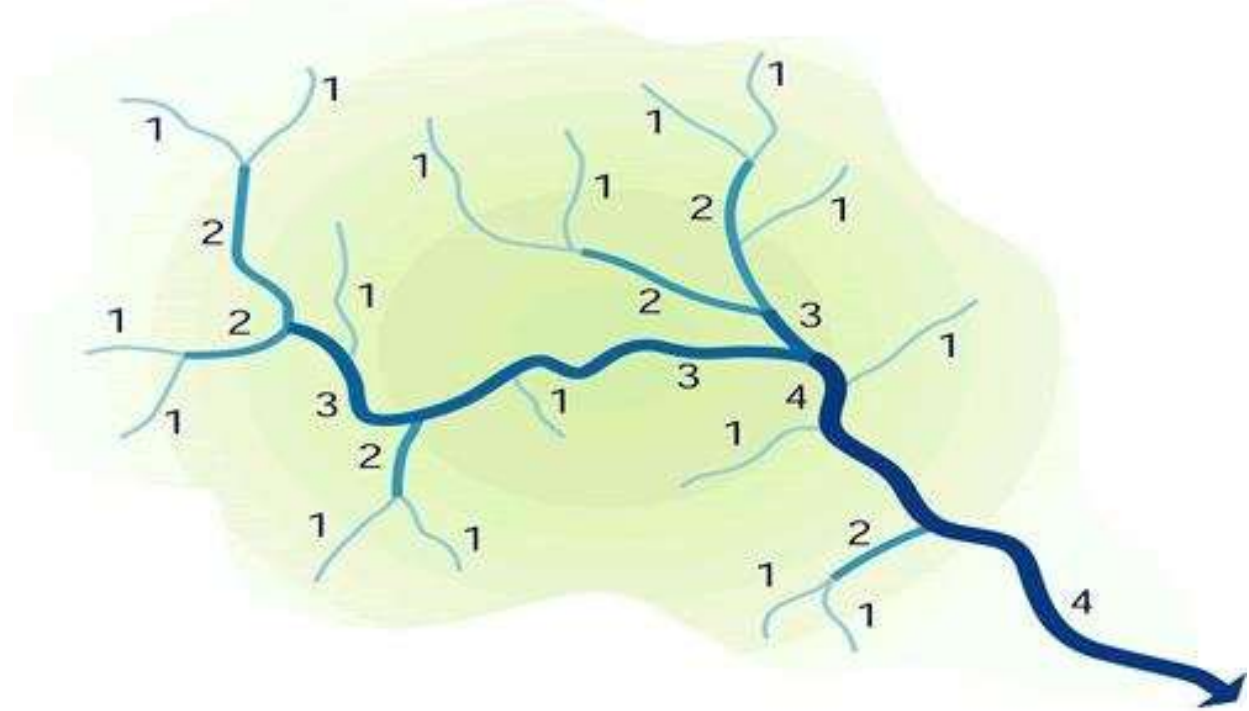
Antes de iniciar a fase das simulações no *software*, necessitamos configurar as seções das redes de drenagem, através da ferramenta *Define cross sections of the drainage network*. Nesta etapa definimos as seções através de duas formas diferentes: relacionada a área drenada ou ao número de *Strahler*, sendo sua geometria trapezoidal. Deve-se informar a largura do topo, do fundo e a altura para a seção de cada número de *Strahler*, contidos na rede. Como base para a presente pesquisa, foram utilizados os dados do Diagnóstico da Bacia Hidrográfica, elaborado pela Universidade Cândido Mendes e com apoio da Petrobras (FREITAS, 2011), onde foi estudado ao longo da bacia do Rio Macaé vinte e quatro seções transversais. O estudo destas seções transversais foi de suma importância para a configuração desta etapa da modelagem.

2.3.1 Número de Strahler

Desenvolvidos por Robert E. Horton (1945) e Arthur Newell Strahler (STRAHLER, 1952, 1957, 1964). Neste domínio é conhecida como ordem sequencial de Strahler e é usada para definir o tamanho de um trecho da rede fluvial, baseando-se na hierarquia dos afluentes. Em matemática, o número de Strahler ou número de Horton–Strahler de uma árvore (grafo conexo sem ciclos) é uma medida quantitativa da sua complexidade de ramificação.

Um fato importante do método de Strahler (1952) é que a classificação poderá ser alterada a depender da escala cartográfica trabalhada, pois, quanto maior escala, maior será o nível de detalhamento da área, logo maior quantidade de córregos a serem localizados. A Figura 5 mostra uma rede de drenagem segundo a classificação de Strahler (1952).

Figura 5: Classificação dos canais de uma rede de drenagem segundo Strahler - Imagem cortesia da FISRWG



Fonte: http://www.fgmorph.com/fg_4_8.php

2.3.2 Coeficiente de Manning

Robert Manning, engenheiro irlandês apresentou em 1889 resultados obtidos em estudos experimentais, alcançando a amplamente utilizada fórmula de Manning. Essa equação de resistência é utilizada em projetos hidráulicos e pesquisas envolvendo cursos d'água e canais projetados (SILVA; MASCARENHAS; MIGUEZ, 2003). Esta equação é válida para escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, onde o fundo do canal é paralelo às linhas de água e de energia, devido a este último detalhe a declividade do fundo do canal foi utilizada na equação 1.1.

$$V = \frac{R_h^{2/3} I_0^{1/2}}{n} \quad (1.1)$$

Sendo:

n : o coeficiente de rugosidade;

R_h : o raio hidráulico;

I_0 : a declividade do fundo do canal;

V : é a velocidade média na seção transversal.

No caso de canais naturais, não prismáticos, a declividade do fundo não é constante, ou seja, o regime é permanente e variado. Nesse caso, deve ser utilizada a declividade da linha de energia (I_f) na equação de Manning (1.2)

$$V = \frac{R_h^{2/3} I_f^{1/2}}{n} \quad (1.2)$$

Chow (1959), indica uma série de motivos que influenciam a rugosidade num canal natural: morfologia do canal, características da vegetação, obstruções como pontes, pilares, troncos, etc. Com o objetivo de estimar o número de Manning levando em conta os diferentes fatores que oferecem resistência ao escoamento num canal, foi desenvolvida uma metodologia que procura agrupar esses fatores, cujos valores podem ser obtidos em tabelas. Assim, uma vez levantadas as características, é possível calcular o valor composto do número de Manning (equação 1.3). O valor do coeficiente de resistência reflete o efeito causado por diferentes tipos de entraves ao escoamento. Chow apresentou tabelas extensas fornecendo valores numéricos para esses parâmetros.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (1.3)$$

- no: valor do coeficiente correspondente ao tipo de textura de contorno;
- n1: valor acrescentado para considerar irregularidades;
- n2: valor correspondente às variações de forma e dimensão;
- n3: valor relativo às obstruções;
- n4: valor correspondente à vegetação;
- m: correção para sinuosidade ($m \geq 1,0$).

Para o cálculo da rugosidade do canal, foi-se adotado um coeficiente (n) de 0,035. No módulo *runoff*, foram feitos os ajustes do coeficiente para as planícies de inundação e demais superfícies da bacia. Utilizou-se informações de uso dos solos fornecido pelo INEA. A definição dos coeficientes de *Manning* foram realizados com base na metodologia de Chow (1959).

2.3.3 Escoamento e infiltração - Método do *Curve Number* (CN)

O Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (USDA-SCS, 1972) desenvolveu um método, conhecido como método da curva-número (CN), que utiliza o total de precipitação e um índice de abstrações iniciais para calcular o volume total de água escoado na bacia hidrográfica. O método *Curve Number* é extensamente utilizado para estimar o escoamento superficial, e, por consequência, o fluxo de rios, a recarga de água, o volume de infiltração, a umidade do solo e o transporte de sedimentos.

A equação para determinação do volume total do escoamento superficial definido pelo modelo *Curve Number* é apresentada na equação (2):

$$Q = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad (2)$$

Onde:

Q - Corresponde ao volume total do escoamento superficial direto, em mm;

P - Representa a precipitação total, em mm;

S - é a retenção potencial do solo, isto é, diferença potencial máxima entre a precipitação e o escoamento superficial, na hora que começa a chuva, em mm (depende da água armazenada no solo e da infiltração na bacia).

Na equação (3), tem-se o valor da retenção ou armazenamento superficial (S) em função do parâmetro *Curve Number* (CN) que foi classificado de acordo com o tipo e uso do solo.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

O CN é um índice para escoamento adimensional baseado no grupo hidrológico de solos (GHS), Grupos: A, B, C ou D, uso e cobertura, condições hidrológicas e condições antecedentes de umidade. O método CN permite mostrar o efeito das mudanças no uso e cobertura do solo sobre o escoamento superficial. Os valores de CN variam entre 1 e 100 valores altos de CN indicam alto escoamento (MELESSE; SHIH, 2002; SANTOS; LOLLO, 2016). O CN deve ser ponderado em função do uso e cobertura do solo e dos tipos de solo da seguinte forma (Equação 4):

$$CN_p = \frac{\sum_{i=1}^n (CN_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4)$$

Onde:

CN_p é o valor de curva-número ponderado (adimensional);

CN_i é o valor da curva número de cada grupo de uso e cobertura e tipo do solo na bacia hidrográfica (adimensional);

A_i é a área de cada grupo de uso e cobertura e tipo do solo na bacia (km²);

A_t é a área total da bacia hidrográfica (km²).

Os valores CN variam conforme sua textura e comportamento hidrológico em quatro grupos de acordo com o *SCS*, ilustrado na tabela 1 e conforme as condições de uso e cobertura do solo, que são apresentados na tabela 2.

Tabela 1 - Características do tipo de solo ou Grupo Hidrológico do Solo (GHS).

Tipo de solo	Descrição do solo	Condutividade hidráulica (mm/h)
A	<i>Potencial de escoamento superficial baixo.</i> Solos com baixo potencial de escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos com pouco silte e argila e solos muito arenosos.	8-12
B	<i>Potencial de escoamento superficial moderadamente baixo.</i> Solos arenosos menos profundos que A. Com permeabilidade superior à média; moderado a baixo potencial de escoamento superficial.	4-8
C	<i>Potencial de escoamento superficial moderadamente alto.</i> Solos pouco profundos contendo percentagem significativa de argila. Moderado a alto potencial de escoamento superficial e capacidade de infiltração abaixo da média.	1-4
D	<i>Potencial de escoamento superficial alto.</i> Solos contendo argilas expansivas 2:1 e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.	0-1

Fonte: Adaptado de Schwab, (1993).

O modelo *Curve Number* leva em conta a condição média de umidade antecedente no solo. O CN-SCS distingue três condições de umidade antecedente do solo, onde a condição II é a mais utilizada para diferentes tipos de solo, conforme a Tabela 2.

Condição I - solos secos - as chuvas nos últimos dias não ultrapassam 15 mm.

Condição II - situação média na época de cheias - as chuvas nos últimos 5 dias totalizaram entre 15 e 40 mm.

Condição III - solo úmido (próximo da saturação) - as chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 40 mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

Tabela 2 - Valor da CN na condição II de chuva antecedente e Ia = 0,2S.

Uso do solo	Prática de Manejo	Condição Hídrica	Tipo de solo			
			A	B	C	D
Terra inculta Cultura em fileira	Em fileiras retas	-	77	86	91	94
	Em fileiras retas	Pobre	72	81	88	91
	Em fileiras retas	Boa	67	78	85	89
	Em curva de nível	Pobre	70	79	84	88
	Em curva de nível	Boa	65	75	82	86
	Terraceado em nível	Pobre	66	74	80	82
	Terraceado em nível	Boa	62	71	78	81
Grãos Pequenos	Em fileiras retas	Pobre	65	76	84	88
	Em fileiras retas	Boa	63	75	83	87
	Em curvas de nível	Pobre	63	74	82	85
	Em curvas de nível	Boa	61	73	81	84
	Terraceado em nível	Pobre	61	72	79	82
	Terraceado em nível	Boa	59	70	78	81
	Plantação de legumes ou Pastagem em rotação (Culturas anuais em fileiras)	Em fileiras retas	Pobre	66	77	85
Em fileiras retas		Boa	58	72	81	85
Em curvas de nível		Pobre	64	75	83	85
Em curvas de nível		Boa	55	69	78	83
Terraceado em nível		Pobre	63	73	80	83
Terraceado em nível		Boa	51	67	76	80
Campos de pastagem (Pastagem cultivada)			Pobre	68	79	86
		Razoável	49	69	79	84
		Boa	39	61	74	80
	Em curvas de nível	Pobre	47	67	81	88
	Em curvas de nível	Razoável	25	59	75	83
	Em curvas de nível	Boa	06	35	70	79
	Pastagem permanente Florestas (parcelas)		Boa	30	58	71
		Pobre	45	66	77	83
		Razoável	36	60	73	79
		Boa	25	55	70	77
Chácaras Estradas de terra		Normais	59	74	82	86
		Más	72	82	87	89
		De superfície dura	74	84	90	92

Fonte: Adaptado de Schwab, (1993).

Nesta pesquisa, os processos de escoamento e infiltração foram modelados na plataforma de acordo com o método *Curve Number* (CN), que considera as diferentes tipologias de solo e vegetação de uma região.

2.3.4 Modelagem de chuvas extremas - Chuvas de projeto

Para o desenvolvimento do modelo, foi necessária obtenção de dados das séries históricas das estações meteorológicas existentes na região de interesse. Foi realizada diversas consultas ao site da Agência Nacional de Águas - ANA, em pesquisas realizadas até dezembro de 2020 foram encontradas 41 (quarenta e uma) estações divididas entre fluviométricas e pluviométricas, porém apenas 9 (nove) estações possuíam dados disponíveis, conforme podemos observar no quadro 2 abaixo.

Quadro 2: Estações meteorológicas ANA - Região Hidrográfica VIII - Estado do Rio de Janeiro.

ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ANA - REGIÃO HIDROGRÁFICA VIII - ESTADO DO RIO DE JANEIRO							
N	NOME	TIPO	CODIGO	LATITUDE	LONGITUDE	DADOS DISPONÍVEIS ?	MUNICÍPIO
1	USINA QUISSAMA	Pluviométrica	2241002	-22,1081	-41,4711	sim	MACAÉ
2	MACAÉ	Pluviométrica	2241020	-22,3833	-41,8000	sim	MACAÉ
3	PRAIA CAMPISTA	Pluviométrica	2241035	-22,3900	-41,7800	não	MACAÉ
4	FRADE	Pluviométrica	2241034	-22,3700	-41,7900	não	MACAÉ
5	SEVERINA	Pluviométrica	2241030	-22,3000	-41,8800	não	MACAÉ
6	SEVERINA	Fluviométrica	59139100	-22,3000	-41,8800	não	MACAÉ
7	SEVERINA	Fluviométrica	59139200	-22,3000	-41,8800	não	MACAÉ
8	SÃO PEDRO	Pluviométrica	2241031	-22,2700	-41,8900	não	MACAÉ
9	SÃO PEDRO	Fluviométrica	59143000	-22,2700	-41,8900	não	MACAÉ
10	FAZENDA AIRIS	Pluviométrica	2241032	-22,3300	-41,9800	não	MACAÉ
11	FAZENDA AIRIS	Fluviométrica	59138800	-22,3300	-41,9800	não	MACAÉ
12	FAZENDA ORATÓRIO	Pluviométrica	2241004	-22,2592	-41,9842	sim	MACAÉ
13	PONTE DO BAIÃO	Fluviométrica	59136900	-22,3900	-42,0800	não	MACAÉ
14	PONTE DO BAIÃO	Pluviométrica	2242145	-22,3900	-42,0800	não	MACAÉ
15	BARRA DO SANA	Pluviométrica	2242147	-22,3700	-42,2100	não	MACAÉ
16	BARRA DO SANA	Fluviométrica	59134000	-22,3700	-42,2100	não	MACAÉ
17	SÃO ROMÃO	Pluviométrica	2242163	-22,3500	-42,2300	não	MACAÉ
18	SÃO ROMÃO	Fluviométrica	59133000	-22,3500	-42,2300	não	MACAÉ
19	GLICÉRIO	Pluviométrica	2242150	-22,2300	-42,0500	não	MACAÉ
20	GLICÉRIO	Fluviométrica	59139900	-22,2300	-42,0500	não	MACAÉ
21	PCH GLICÉRIO JUSANTE	Pluviométrica	2242439	-22,2400	-42,0600	não	MACAÉ
22	PCH GLICÉRIO JUSANTE	Fluviométrica	59139800	-22,2400	-42,0600	não	MACAÉ
23	PCH GLICÉRIO BARRAMENTO	Fluviométrica	59139700	-22,2400	-42,0800	não	MACAÉ
24	PCH MACABU JUSANTE	Fluviométrica	59139500	-22,2300	-42,1000	não	MACAÉ
25	GALDINÓPOLIS	Fluviométrica	59125100	-22,3700	-42,3800	não	MACAÉ
26	GALDINÓPOLIS	Pluviométrica	2242146	-22,3700	-42,3800	não	MACAÉ
27	GALDINÓPOLIS	Fluviométrica	59125000	-22,3689	-42,3792	sim	NOVA FRIBURGO
28	GALDINÓPOLIS	Pluviométrica	2242004	-22,3631	-42,3808	sim	NOVA FRIBURGO
29	PILLER	Fluviométrica	59135100	-22,4100	-42,3400	não	NOVA FRIBURGO
30	PILLER	Pluviométrica	2242149	-22,4100	-42,3400	não	NOVA FRIBURGO
31	PILLER	Fluviométrica	59135000	-22,4092	-42,3361	sim	NOVA FRIBURGO
32	PILLER	Pluviométrica	2242003	-22,4047	-42,3392	sim	NOVA FRIBURGO
33	NOVA FRIBURGO_Lumiar	Pluviométrica	2242377	-22,3500	-42,3300	não	NOVA FRIBURGO
34	NOVA FRIBURGO São Pedro da Serra	Pluviométrica	2242388	-22,3200	-42,3300	não	NOVA FRIBURGO
35	MACAÉ DE CIMA	Pluviométrica	2242119	-22,3700	-42,4600	não	NOVA FRIBURGO
36	MACAÉ DE CIMA	Pluviométrica	2242148	-22,3700	-42,4600	não	NOVA FRIBURGO
37	MACAÉ DE CIMA	Fluviométrica	59119800	-22,3700	-42,4600	não	NOVA FRIBURGO
38	MACAÉ DE CIMA	Fluviométrica	59120000	-22,3722	-42,4622	sim	NOVA FRIBURGO
39	FAZENDA SÃO JOÃO	Pluviométrica	2242005	-22,3903	-42,4947	sim	NOVA FRIBURGO
40	JUNDIÁ	Fluviométrica	59212500	-22,4700	-41,9200	não	RIO DAS OSTRAS
41	JUNDIÁ	Pluviométrica	2241036	-22,4700	-41,9200	não	RIO DAS OSTRAS

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para contornar esse “empecilho” na ausência de uma rede de acompanhamento mais robusta e com períodos longos de monitoramento pluvial e fluvial, foi elaborada uma chuva de projeto para avaliação do sistema de drenagem da bacia hidrográfica, esta chuva de projeto foi desenvolvida através de diversas fórmulas e etapas conforme descrito a seguir:

Etapas 1 - Tempo de concentração:

Utilizou-se a formulação de George Ribeiro, (1961) para o cálculo do Tempo de Concentração (t_c), expressa na equação (5):

$$t_c = \frac{16 \cdot L}{(1,05 - 0,2p)(100 \cdot I)^{0,04}} \quad (5)$$

Onde:

T_c : Tempo de concentração (min)

L : Comprimento do curso d'água (km)

P : Percentual da área da bacia coberta por vegetação

I : Declividade (m/m)

O tempo de concentração é uma medição do tempo necessário para o escoamento ocorrer do ponto mais remoto da bacia hidrográfica ao exutório da bacia. Cada bacia de drenagem tem seu próprio tempo de concentração, dependendo do tamanho, forma, declividade e condições do solo (GRIBBIN, 2014). Na figura 6, podemos visualizar as principais características que influenciam no tempo de concentração da bacia hidrográfica.

Figura 6: Características da bacia hidrográfica que influenciam no tempo de concentração.



Fonte: <http://www.hidromundo.com.br/tempo-de-concentracao>, (2016)

A determinação numérica do tempo de concentração depende principalmente do comprimento do curso d'água principal e da declividade deste. Nesta fórmula de George Ribeiro foi considerada também o percentual da área da bacia coberta por vegetação. Existem numerosas formas empíricas

utilizadas para calcular o tempo de concentração de uma bacia (DNIT, 2005). Neste trabalho de modelagem para o cálculo de P foi considerada uma área de abrangência de drenagem da bacia hidrográfica de 1.765 km² (CBH MACAÉ OSTRAS, 2020).

Devido a bacia hidrográfica do Rio Macaé ter um grande comprimento do curso de água, desde a sua nascente até a região de sua Foz em torno de aproximadamente 147 km, foi adotado no modelo matemático o conceito de declividade ponderada, pois além do grande comprimento de L até sua foz a declividade ponderada leva em consideração as características da bacia hidrográfica, como por exemplo as regiões de planície (baixa altitude) e serra (alta altitude) (BARBOZA, 2014). Esta metodologia de declividade ponderada, também é amplamente utilizada em estudos hidrográficos pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) - RJ.

Figura 7: Relevo Sombreado da região do estuário do rio Macaé - IHS_RGB - Satélite LandSat 8



Fonte: Elaborada pelos autores.

No canto superior à esquerda podemos visualizar a cadeia de montanhas com o início da grande elevação que a bacia hidrográfica tem como característica, à direita a região do seu estuário próximo do nível do mar em praticamente 0 de altitude. (Figura 7)

Etapa 2 - Equação da chuva de projeto:

A definição das equações de chuvas intensas apresenta, em muitos casos, grandes dificuldades em função da escassez de informações dessa natureza, da baixa densidade da rede de pluviógrafos e do pequeno período de observações disponíveis.

Para a implementação no modelo foi considerada a equação abaixo desenvolvida por Pruski *et al* (1999) e amplamente utilizada em trabalhos do Departamento de Estradas e Rodagem (DER) – RJ

(1989). Neste modelo foram utilizados apenas os critérios relativos à estação meteorológica de Macaé, para uma simplificação da modelagem e adotando um padrão de chuva homogênea, equação (6).

$$P = \frac{a \cdot TR^b}{(t \cdot 60 + c)^{d \cdot t}} \quad (6)$$

Onde:

P: Precipitação (mm)

TR: Tempo de recorrência definido (anos)

a, b, c e d: Parâmetros definidos para cada estação pluviométrica estudada.

t: Duração da precipitação (horas)

Etapa 3 - Parâmetros de Regionalização de Chuvas Intensas:

Neste modelo foi utilizado, o parâmetro de Regionalização de Chuvas Intensas, proposto pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, (2001), que é uma empresa governamental brasileira, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, que tem as atribuições de Serviço Geológico do Brasil.

O quadro 3 abaixo apresenta os valores de beta, gama e delta, para o cálculo do i_d .

Quadro 3: Parâmetros de regionalização de chuvas intensas.

	Para 5 min. ≤ d < 1 hora			Para 1 hora ≤ d ≤ 24 horas		
	$i_d = A \times d^\alpha \times P^\beta$			$i_d = B \times d^\gamma \times P^\delta$		
REGIÃO	A	α	β	B	γ	δ
1 e 4	44,888	-0,385	0,244	81,432	-0,771	0,371
2	39,445	-0,339	0,234	16,204	-0,761	0,564
3	36,301	-0,392	0,276	85,264	-0,789	0,367

Fonte: CPRM, (2001).

Etapa 4 - Duração Unitária e Duração Total do evento chuvoso (distribuição temporal da chuva):

Para o cálculo da distribuição temporal da chuva é utilizada como base o cálculo da Duração Unitária, calculada pela equação (7) abaixo:

$$Du = \frac{2}{15} \cdot Dt \quad (7)$$

Onde:

Du é a Duração Unitária e Dt é a duração total do evento chuvoso - igual ao tempo de concentração estabelecido para a bacia hidrográfica estudada.

A fração 2/15 representa a divisão da precipitação total em 7,5 intervalos, a distribuição de tempo para o cálculo da chuva é feita em 8 intervalos inteiros. Portanto, cada intervalo de tempo é um múltiplo - de 1 a 8 - da duração unitária e o último intervalo representa uma duração um pouco maior que o tempo de concentração da bacia estudada (BARBOZA, 2014).

Etapa 5 - Correção em função da área (distribuição espacial da chuva):

Importante enfatizar que a equação (8) abaixo ilustrada, é válida para bacias hidrográficas com áreas de drenagem maiores que 25 km², no caso estudado se aplica perfeitamente.

$$P_{\text{área}} = P_{\text{ponto}} \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \log\left(\frac{A}{25}\right)\right) \quad (8)$$

Onde A é a área de drenagem (km²).

Etapa 6 - Reordenamento da distribuição das chuvas, metodologia SCS:

Nesta etapa, consiste em reordenar a distribuição das chuvas, conforme quadro 4 abaixo.

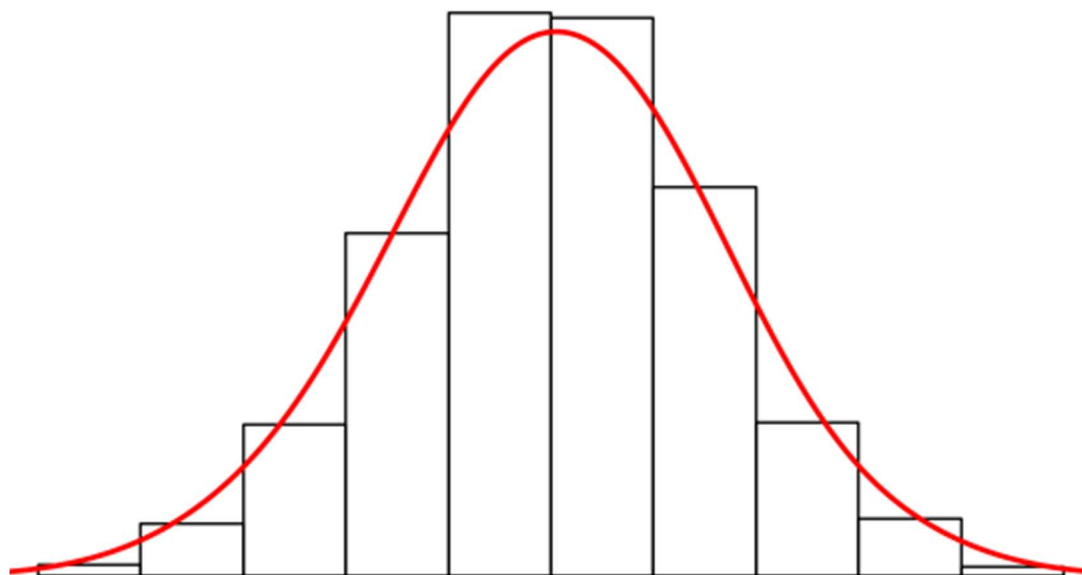
Quadro 4: Reordenamento da distribuição de chuvas, método SCS.

Ordem Real	Ordem SCS
1	5
2	3
3	1
4	2
5	4
6	6
7	7
8	8

Fonte: SCS, (1985)

Aplicando este método proposto pela SCS, a distribuição da pluviosidade irá variar ao longo do tempo. Podemos observar melhor este efeito através da Figura 8, com o efeito de “Sino” no gráfico. No eixo horizontal teremos os intervalos de tempos em horas e no eixo vertical teremos a precipitação em mm.

Figura 8: Formato de “sino” em chuva de projeto, após aplicação da metodologia SCS.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A metodologia das etapas acima descritas, seguem os parâmetros essenciais da chuva de projeto descritos por (MIGUEZ; REZENDE; VERÓL, 2015) que são: tempo de duração da chuva e a probabilidade de ocorrência e sua área de abrangência na bacia hidrográfica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Simulações

Serão realizadas 6 simulações com os parâmetros anteriormente descritos: Número de Strahler, Coeficiente de Manning, Escoamento e infiltração - Método do *Curve Number* (CN) e Modelagem de chuvas extremas - Chuvas de projeto. Os resultados e descrição detalhada de cada simulação serão expostos nesta seção.

Após a criação do modelo digital do terreno, foi realizado as configurações das simulações. É importante ressaltar que em todas as simulações aqui apresentadas foi utilizado o tempo de 3 dias (72 horas).

Foi escolhido como ponto de observação nas próximas 6 simulações o Rio Macaé próximo a região da “linha azul”, ilustrado pelas fotografias 1, 2 e 3. Conforme podemos observar na Figura 9, logo após a região da rodovia municipal, podemos visualizar diversos bairros que sofrem diretamente com a decorrência de chuvas intensas e seus diversos efeitos no Rio Macaé, gerando uma série de transtornos para a população ribeirinha desses bairros.

Fotografia 1: Rio Macaé próximo a região da “linha azul”.



Fonte: Autores.

Fotografia 2: Rio Macaé próximo a região da “linha azul”, detalhe para a rodovia municipal.



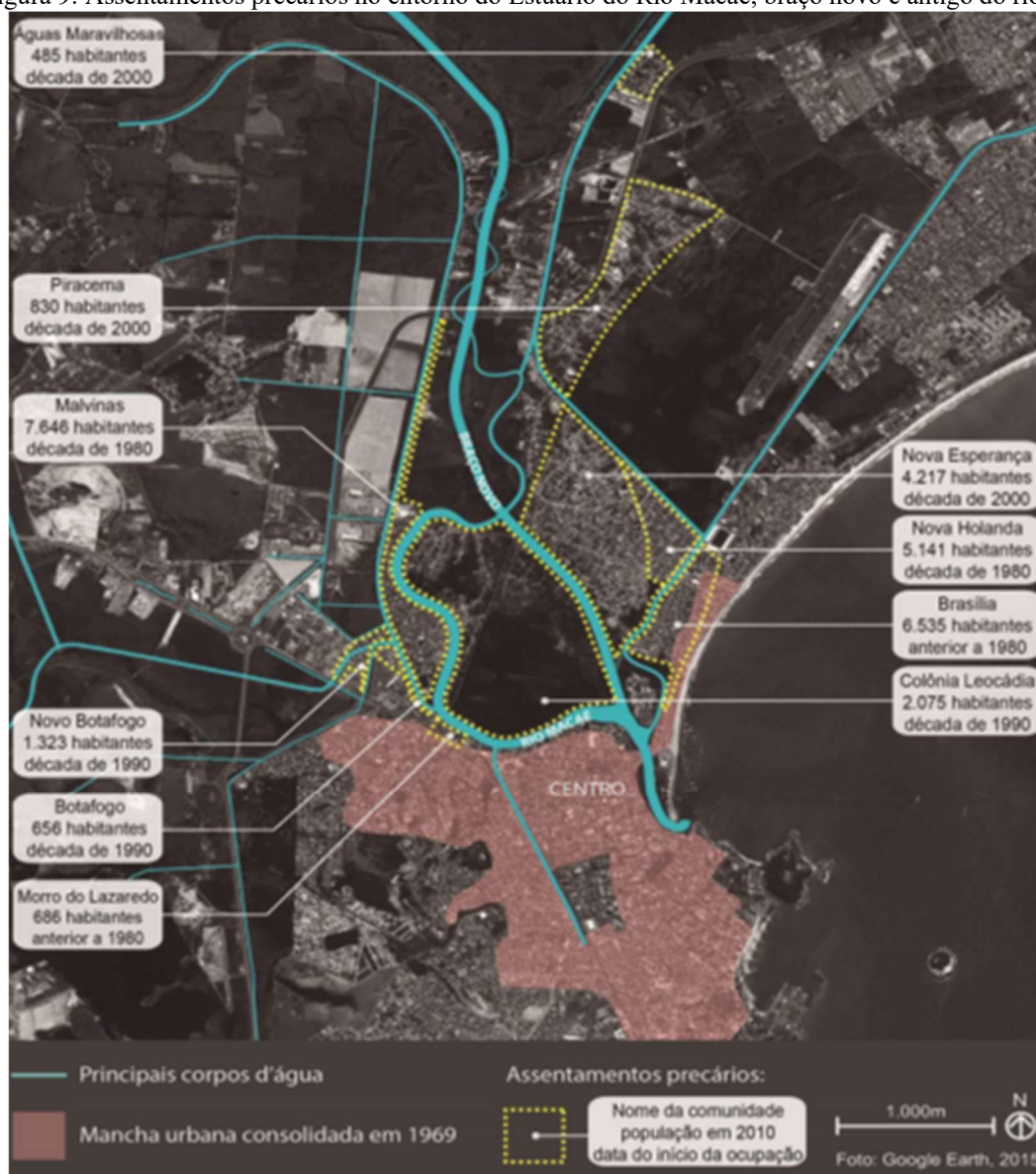
Fonte: Autores.

Fotografia 3: Rio Macaé próximo a região da “linha azul”, detalhe para construções irregulares próximas ao rio.



Fonte: Autores.

Figura 9: Assentamentos precários no entorno do Estuário do Rio Macaé, braço novo e antigo do rio.

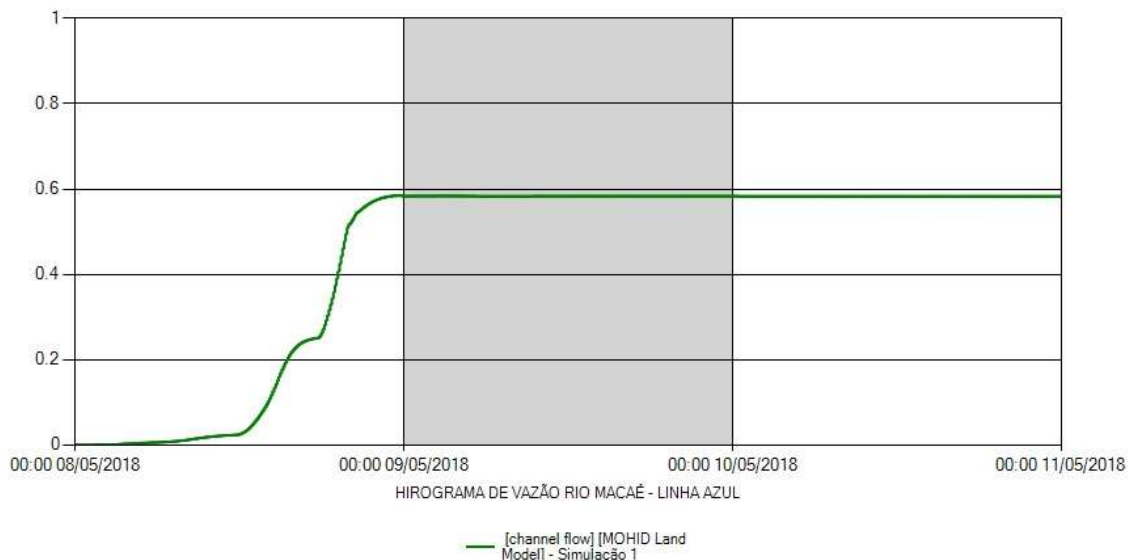


Fonte: Sayd; Britto, (2016)

Simulação 1: Primeiramente no módulo *Model_1* na opção *time options* configura-se o tempo da simulação, 72 horas. Posteriormente no módulo *BasinGeometry_1* definiu-se informações como o exutório e a área limite da bacia, que deve ser consistente com as opções usadas durante o processo de delineamento da bacia. No módulo *Atmosphere_1* podemos definir diversas opções sobre a atmosfera da simulação, como primeira simulação vamos definir apenas uma chuva constante, no tempo e no espaço, de 3mm/h, totalizando 216 mm em 72 horas. Para configurar o Coeficiente de Manning na rede de drenagem foi utilizado o módulo *Drainage Network_1*. E quanto ao escoamento superficial o módulo utilizou-se o *RunOff*. Nesta primeira simulação o valor utilizado é constante ao longo de toda bacia hidrográfica, (*Default Value 0.035*). A Figura 10 demonstra o progresso da vazão em um período de 72 de chuva ininterrupta, após 24 horas de simulação, há um aumento significativo na vazão do Rio Macaé, próximo a região da linha azul.

Resumo da primeira simulação: 1) Precipitação constante de 3mm/h, total de 216 mm; 2) Tempo de simulação 72 horas; 3) Coeficiente de Manning constante ao longo de toda bacia hidrográfica. 4) Modelo impermeável, toda a chuva gerada pelo modelo não gerou infiltração no solo.

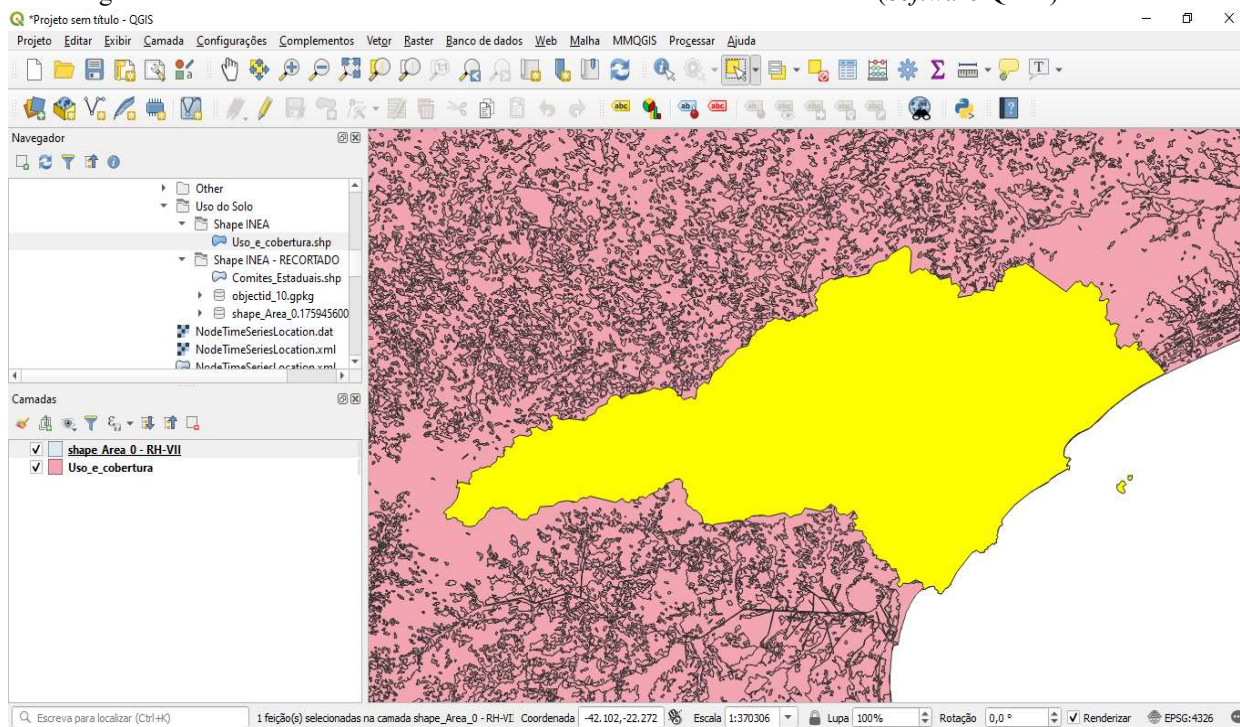
Figura 10: [channel flow] [MOHID Land Model] – Node_RioMacaé_LinhaAzul. Simulação 1.



Fonte: Elaborada pelos autores.

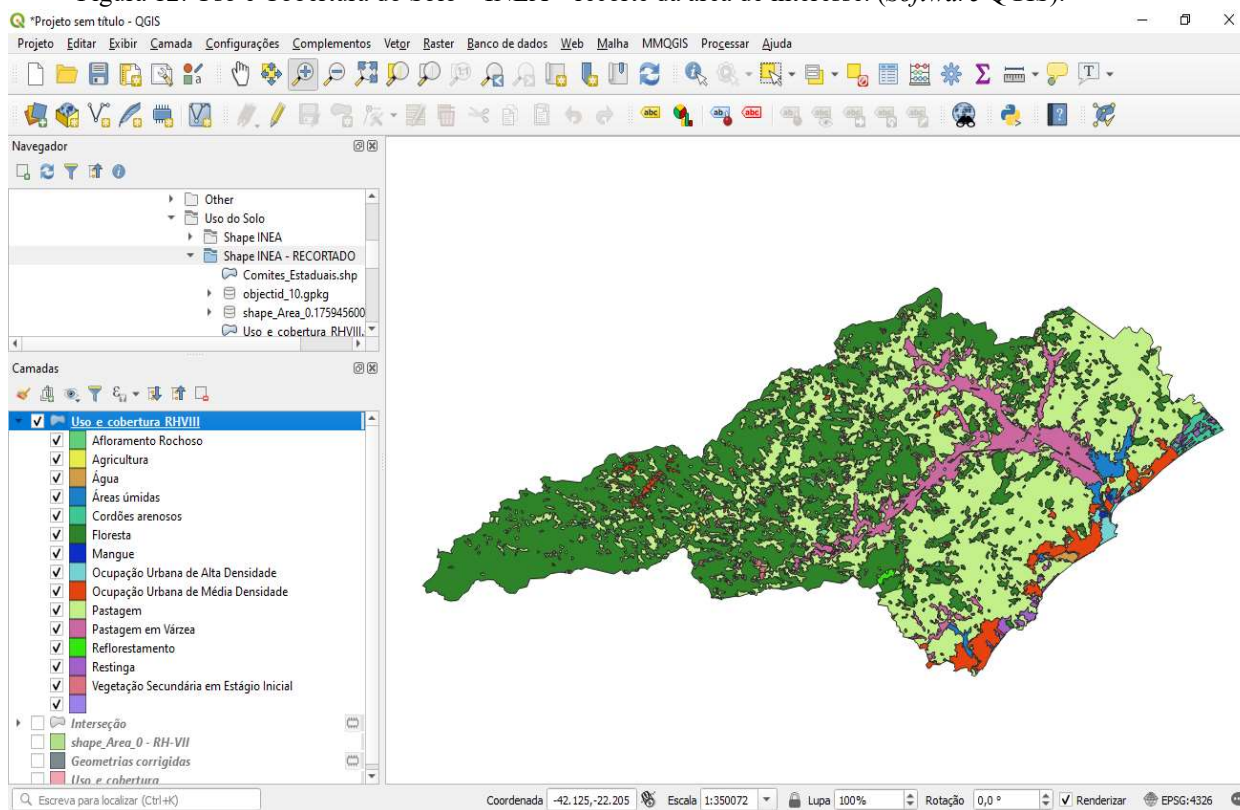
Simulação 2: Definida as opções iniciais como tempo de simulação e tipo de chuva, nesta simulação 2 foi realizado uma alteração no Coeficiente de Manning, tomando como base o uso e cobertura do solo (INEA). Nesta simulação foi adotado também a infiltração no solo através do método do *Curve Number*, tomando como base o uso e cobertura do solo (INEA). Primeiramente a fim de otimizar os cálculos matemáticos dentro do *software* foi recortado a região de interesse a Região Hidrográfica VIII, através de rotinas operacionais no *software* QGIS, conforme demonstrado na Figura 11 e Figura 12, abaixo.

Figura 11: Uso e Cobertura do Solo – INEA – recorte da área de interesse. (*Software QGIS*).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 12: Uso e Cobertura do Solo – INEA – recorte da área de interesse. (*Software QGIS*).



Fonte: Elaborada pelos autores.

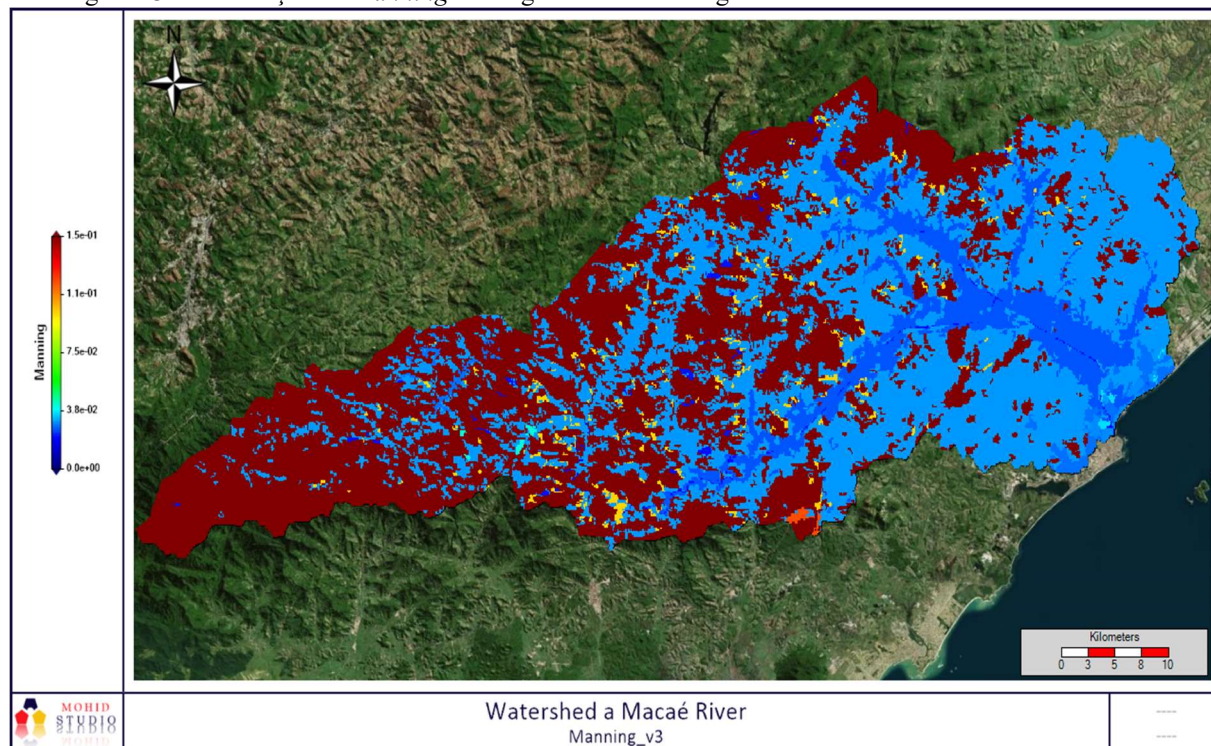
Com base nessas informações de Uso e Cobertura do Solo do INEA, foi atribuído valores de Manning para cada um dos 17 usos do solo encontrados na região hidrográfica VIII, conforme quadro 5, abaixo.

Quadro 5: Manning atribuído para cada classe de uso do solo.

	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO INEA	Manning atribuído para cada classe de Uso do Solo do INEA
1	Afloramento Rochoso	0.020
2	Agricultura	0.040
3	Agricultura (cana)	0.040
4	Água	0.020
5	Áreas úmidas	0.025
6	Cordões arenosos	0.025
7	Floresta	0.150
8	Mangue	0.035
9	Ocupação Urbana de Alta Densidade	0.029
10	Ocupação Urbana de Baixa Densidade	0.025
11	Ocupação Urbana de Média Densidade	0.027
12	Pastagem	0.030
13	Pastagem em Várzea	0.025
14	Reflorestamento	0.12
15	Restinga	0.035
16	Solo exposto	0.018
17	Vegetação Secundária em Estágio Inicial	0.100

Fonte: Elaborada pelos autores.

Após a definição desses valores foi possível a criação de um mapa temático com o coeficiente de Manning, conforme podemos observar na Figura 13. Com a finalização deste processo foi possível inserir na simulação 2 através do módulo *Basin_2* a variação do coeficiente de Manning ao longo da bacia hidrográfica.

Figura 13: Distribuição do *Manning* ao longo da Bacia Hidrográfica.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a implementação da infiltração no modelo, foram utilizadas as mesmas informações de uso e cobertura do solo disponibilizados pelo INEA, foi atribuído valores de *Curve Number*, para cada um dos 17 usos do solo, conforme ilustrado no quadro 6, abaixo.

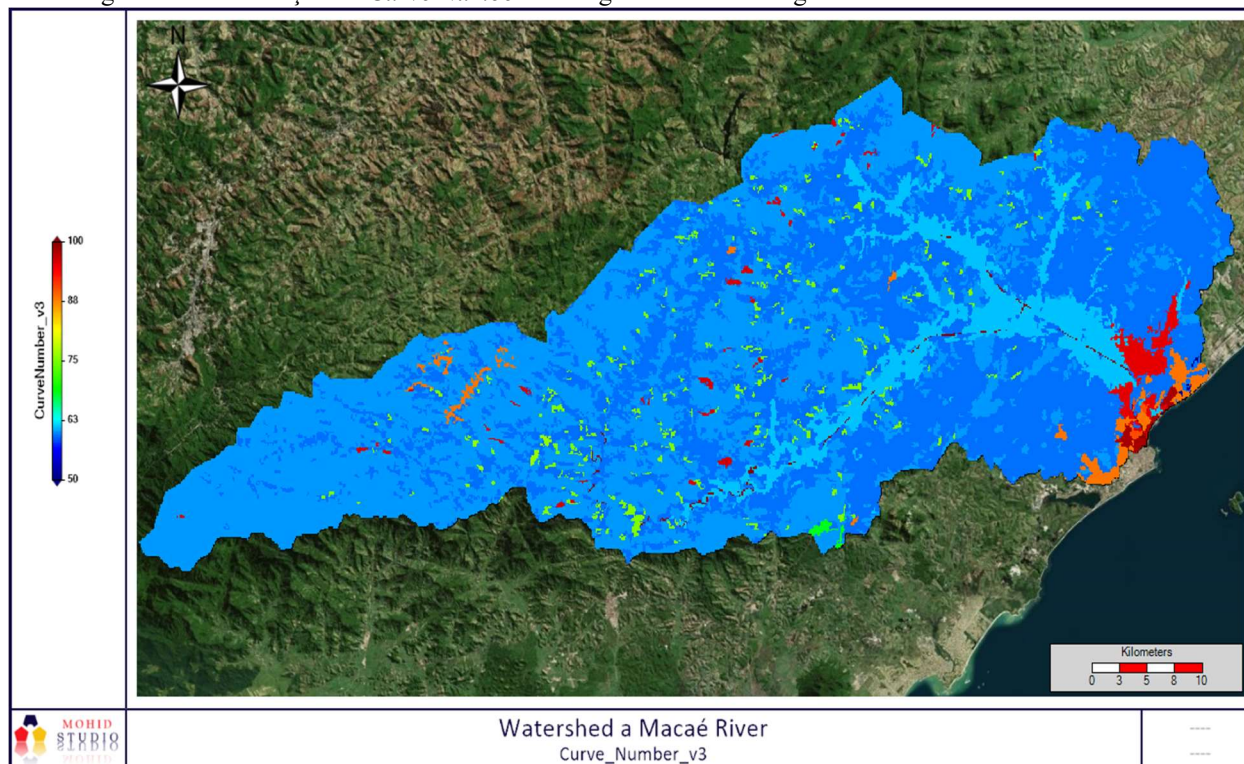
Quadro 6: *Curve Number* (CN) atribuído para cada classe de uso do solo.

	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO INEA	Curve Number atribuído para cada classe de Uso do Solo do INEA, considerando um solo de textura B.
1	Afloramento Rochoso	96
2	Agricultura	76
3	Agricultura (cana)	76
4	Água	100
5	Áreas úmidas	95
6	Cordões arenosos	32
7	Floresta	60
8	Mangue	90
9	Ocupação Urbana de Alta Densidade	98
10	Ocupação Urbana de Baixa Densidade	85
11	Ocupação Urbana de Média Densidade	88
12	Pastagem	59
13	Pastagem em Várzea	61
14	Reflorestamento	68
15	Restinga	30
16	Solo exposto	34
17	Vegetação Secundária em Estágio Inicial	75

Fonte: Elaborada pelos autores.

Após a definição desses valores foi possível a criação de um mapa temático com o *Curve Number*, conforme podemos observar na Figura 14. Com a finalização deste processo foi possível inserir na simulação 2 através do módulo *RunOff_2* a variação do *Curve Number* ao longo da bacia hidrográfica.

Figura 14: Distribuição do *Curve Number* ao longo da Bacia Hidrográfica.

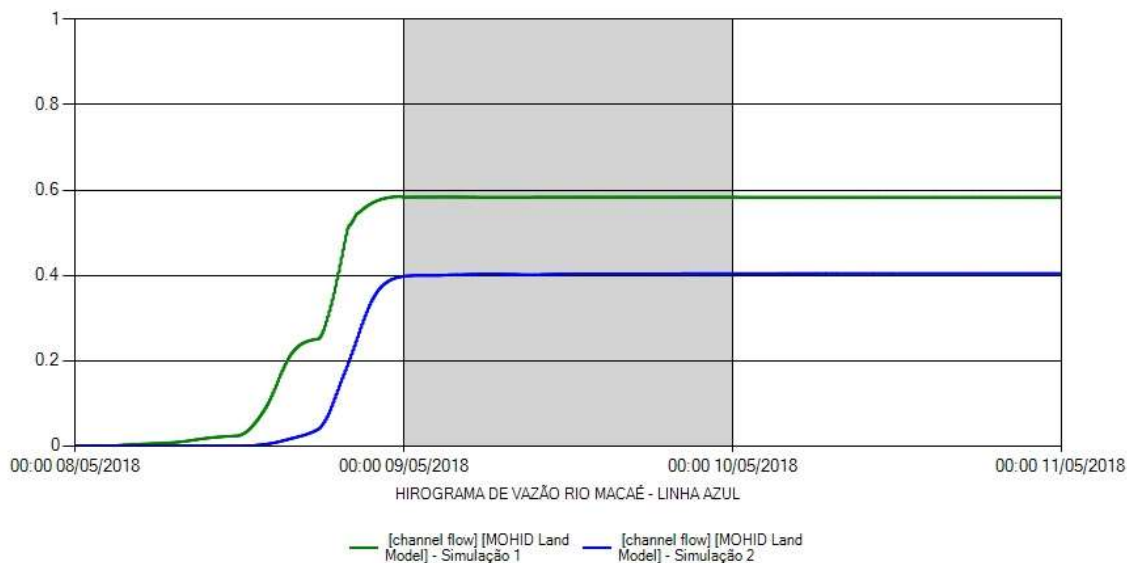


Fonte: Elaborada pelos autores.

A Figura 15 demonstra o progresso da vazão em um período de 72 de chuva ininterrupta, nota-se um comportamento diferente da vazão no Rio Macaé com a implementação desses novos parâmetros.

Resumo da segunda simulação: 1) Precipitação constante de 3mm/h, total de 216 mm; 2) Tempo de simulação 72 horas; 3) Coeficiente de *Manning* variando ao longo da bacia, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 4) Modelo permeável: Infiltração no solo através do método do *Curve Number*, conforme uso e cobertura do solo (INEA).

Figura 15: [channel flow] [MOHID Land Model] – Node_RioMacaé_LinhaAzul. Simulações 1 e 2.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Simulação 3: Esta simulação 3 é muito equivalente com a simulação 2. Todos os parâmetros como: Tempo de simulação, tipo de chuva, Coeficiente de *Manning* e infiltração através do método do *Curve Number* serão iguais. Nesta simulação 3 iremos inserir a variação da maré no modelo, inserindo dados da maré de maio de 2018.

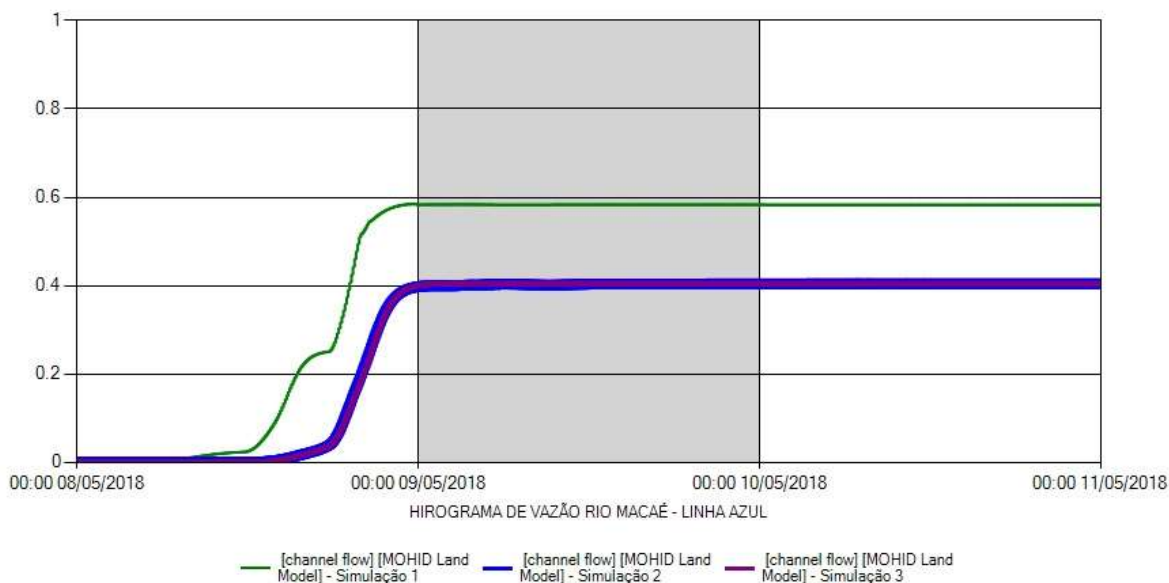
Para calcular essa variação e inserir no modelo foi considerada a variação astronômica da maré, causada pelos efeitos combinados da rotação da Terra com as forças gravitacionais exercidas pela Lua e pelo Sol, resultando na alteração cíclica do nível das águas do mar.

Para implementação desta variação foi realizado em série de rotinas operacionais no módulo *Drainage Network*, inserindo assim a variação da maré na região da foz do rio Macaé.

A Figura 16 demonstra o progresso da vazão em um período de 72 de chuva ininterrupta, nota-se quase nenhuma alteração da vazão no Rio Macaé com a implementação desses novos parâmetros, no ponto estudado.

Resumo da terceira simulação: 1) Precipitação constante de 3mm/h, total de 216 mm; 2) Tempo de simulação 72 horas; 3) Coeficiente de *Manning* variando ao longo da bacia, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 4) Modelo permeável: Infiltração no solo através do método do *Curve Number*, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 5) Implementação da variação astronômica da maré de maio/2018.

Figura 16: *[channel flow] [MOHID Land Model]* – Node_RioMacaé_LinhaAzul. Simulações 1, 2 e 3.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Simulação 4: Nesta simulação 4, iremos manter os mesmos parâmetros utilizados na simulação 3. O único parâmetro alterado nesta simulação foi o tipo de chuva, utilizou-se uma chuva de projeto com tempo de retorno estimado (TR) em 50 anos. Vale lembrar que esta chuva de projeto tem uma variação da sua intensidade ao longo do tempo. Para implementação desta chuva foi realizado em série de rotinas operacionais no módulo *Atmosphere_4*, inserindo assim a chuva de projeto com TR estimado em 50 anos.

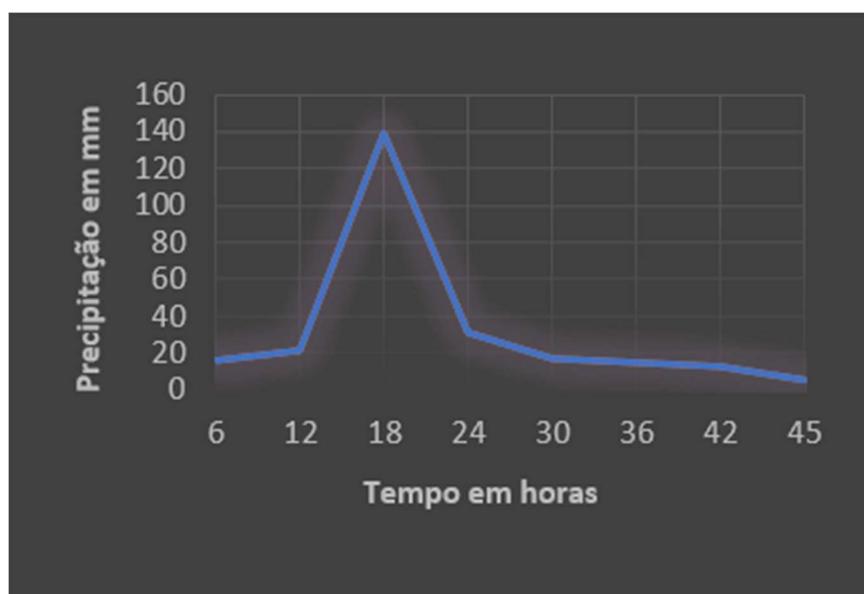
Para esta chuva de projeto foram considerados 8 intervalos de tempo: 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 e 45 horas. Uma precipitação total de 257,45 mm distribuída ao longo dos 8 períodos de tempo, conforme descrito anteriormente. As Figuras 17 e 18 demonstram a variação e distribuição temporal da chuva de projeto.

Figura 17: Variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 50 anos.

TR= 50 anos		
horas	segundos	mm
6	21600	16,5236397
12	43200	21,0737103
18	64800	138,618046
24	86400	30,7680066
30	108000	16,6909708
36	129600	14,611546
42	151200	13,0836303
45	162000	6,08291313

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 18: Gráfico da variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 50 anos.

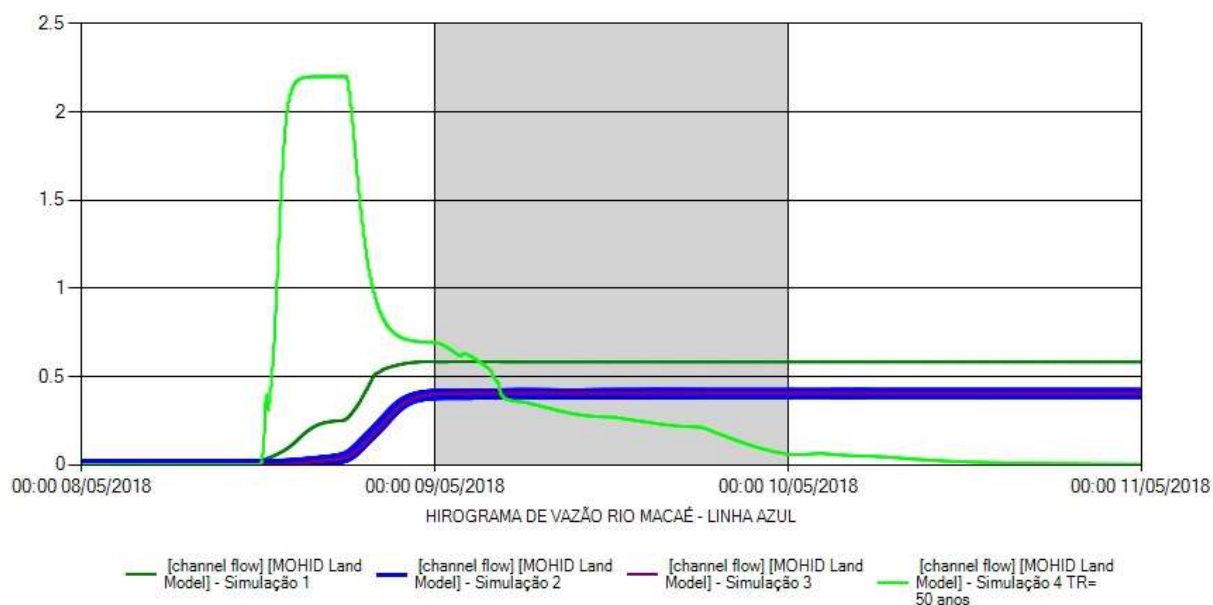


Fonte: Elaborada pelos autores.

Resumo da quarta simulação: 1) Chuva de projeto, com tempo de retorno estimado (TR) em 50 anos; 2) Tempo de simulação 72 horas; 3) Coeficiente de *Manning* variando ao longo da bacia, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 4) Modelo permeável: Infiltração no solo através do método do *Curve Number*, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 5) Implementação da variação astronômica da maré de maio/2018.

A Figura 19 demonstra o progresso da vazão em um período de 72 horas, nota-se uma alta extremamente considerável da vazão no Rio Macaé com a implementação desses novos parâmetros.

Figura 19: [channel flow] [MOHID Land Model] – Node_RioMacaé_LinhaAzul. Simulações 1, 2, 3 e 4.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Simulação 5: Nesta simulação 5, iremos manter os mesmos parâmetros utilizados na simulação 4. O único parâmetro alterado nesta simulação foi o tipo de chuva, utilizou-se uma chuva de projeto com tempo de retorno estimado (TR) em 20 anos. Vale lembrar que esta chuva de projeto tem uma variação da sua intensidade ao longo do tempo. Para implementação desta chuva foi realizado em série de rotinas operacionais no módulo *Atmosphere_4*, inserindo assim a chuva de projeto com TR estimado em 20 anos.

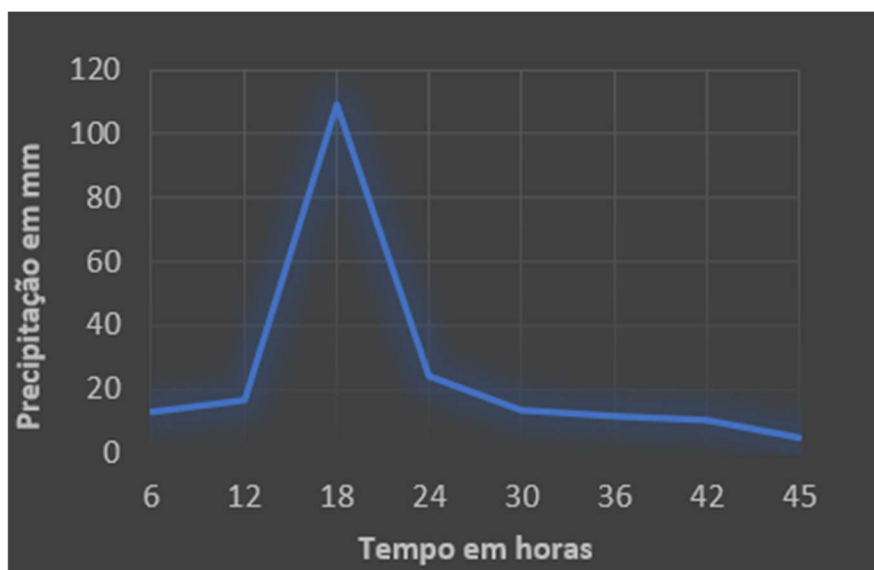
Para esta chuva de projeto foram considerados 8 intervalos de tempo: 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 e 45 horas. Uma precipitação total de 202,32 mm distribuída ao longo dos 8 períodos de tempo, conforme descrito anteriormente. As Figuras 20 e 21 demonstram a variação e distribuição temporal da chuva de projeto.

Figura 20: Variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 20 anos.

TR= 20 anos		
horas	segundos	mm
6	21600	12,9851656
12	43200	16,5608561
18	64800	108,933523
24	86400	24,179156
30	108000	13,1166634
36	129600	11,4825395
42	151200	10,2818211
45	162000	4,78028062

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 21: Gráfico da variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 20 anos.

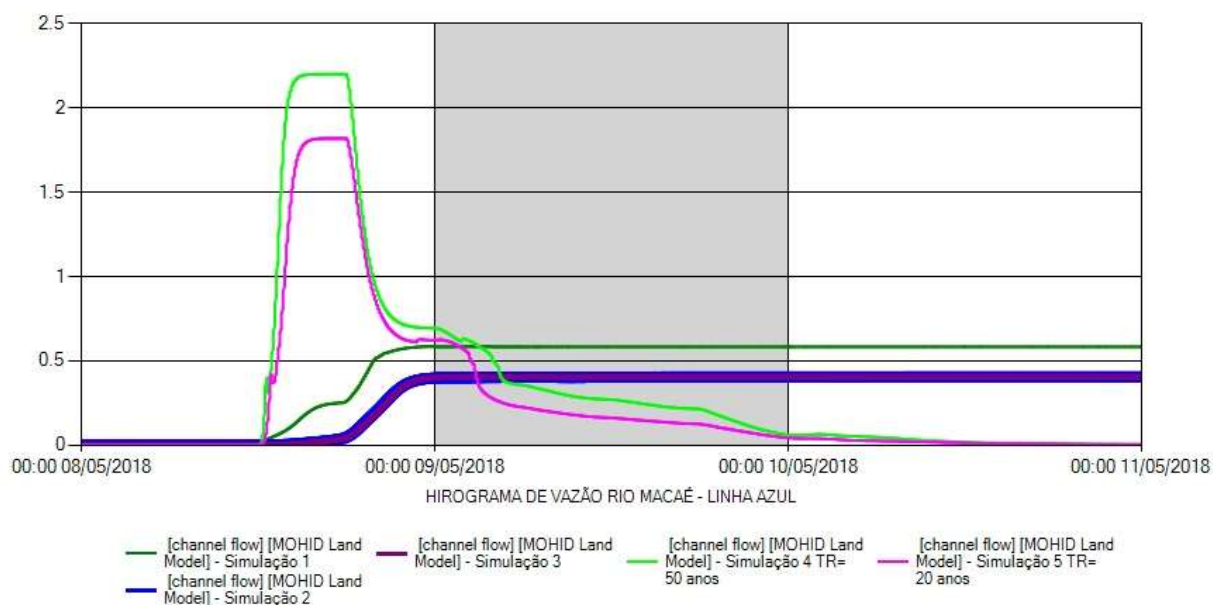


Fonte: Elaborada pelos autores.

Resumo da quinta simulação: 1) Chuva de projeto, com tempo de retorno estimado (TR) em 20 anos; 2) Tempo de simulação 72 horas; 3) Coeficiente de *Manning* variando ao longo da bacia, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 4) Modelo permeável: Infiltração no solo através do método do *Curve Number*, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 5) Implementação da variação astronômica da maré de maio/2018.

A Figura 22 demonstra o progresso da vazão em um período de 72 horas, nota-se uma alta extremamente considerável da vazão no Rio Macaé com a implementação desses novos parâmetros. Porém com uma pequena diminuição quando comparado com a chuva de TR de 50 anos.

Figura 22: [channel flow] [MOHID Land Model] – Node_RioMacaé_LinhaAzul. Simulações 1, 2, 3, 4 e 5.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Simulação 6: Nesta simulação 6, iremos manter os mesmos parâmetros utilizados na simulação 5. O único parâmetro alterado nesta simulação foi o tipo de chuva, utilizou-se uma chuva de projeto com tempo de retorno estimado (TR) em 10 anos. Vale lembrar que esta chuva de projeto tem uma variação da sua intensidade ao longo do tempo. Para implementação desta chuva foi realizado em série de rotinas operacionais no módulo *Atmosphere_4*, inserindo assim a chuva de projeto com TR estimado em 10 anos.

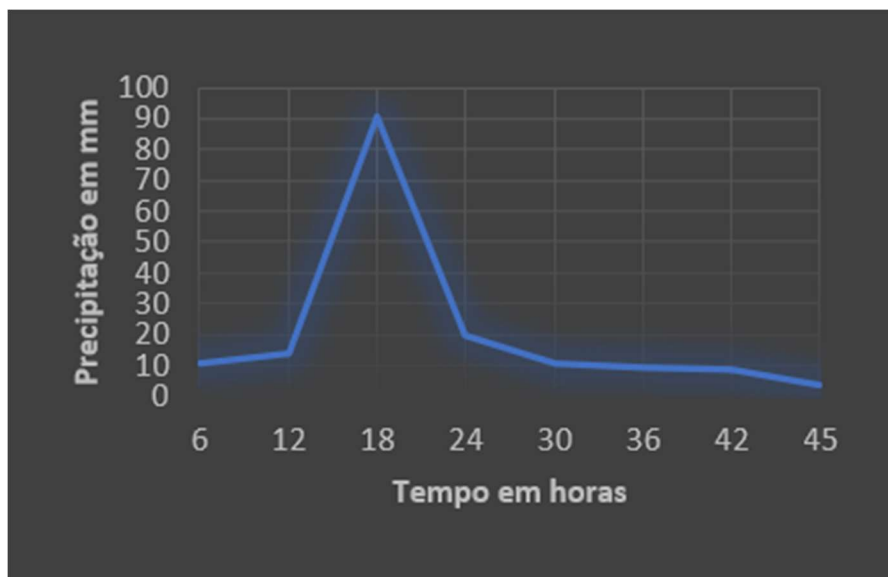
Para esta chuva de projeto, com TR= 10 anos, foram considerados também 8 intervalos de tempo: 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 e 45 horas. Uma precipitação total de 168,60 mm distribuída ao longo dos 8 períodos de tempo, conforme descrito anteriormente. As Figuras 23 e 24 demonstram a variação e distribuição temporal da chuva de projeto.

Figura 23: Variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 10 anos.

TR= 10 anos		
horas	segundos	mm
6	21600	10,8212294
12	43200	13,8010425
18	64800	90,7801008
24	86400	20,1497772
30	108000	10,9308135
36	129600	9,5690111
42	151200	8,56838858
45	162000	3,98366218

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 24: Gráfico da variação e distribuição temporal da chuva de projeto com tempo de retorno estimado em 10 anos.

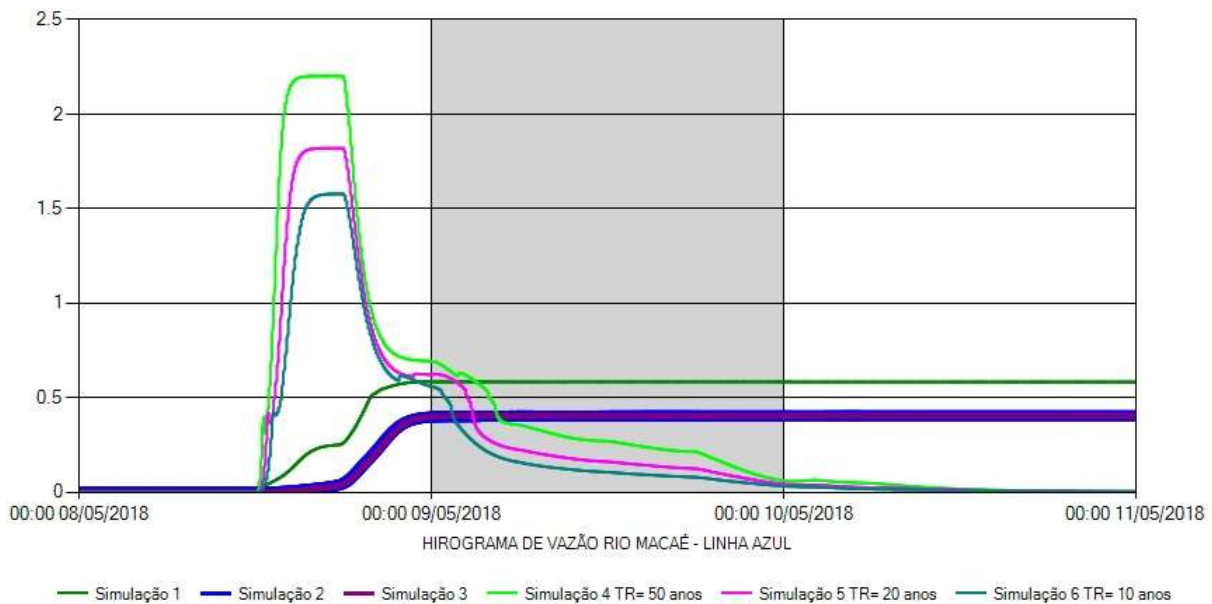


Fonte: Elaborada pelos autores.

Resumo da sexta simulação: 1) Chuva de projeto, com tempo de retorno estimado (TR) em 10 anos; 2) Tempo de simulação 72 horas; 3) Coeficiente de *Manning* variando ao longo da bacia, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 4) Modelo permeável: Infiltração no solo através do método do *Curve Number*, conforme uso e cobertura do solo (INEA); 5) Implementação da variação astronômica da maré de maio/2018.

A Figura 25 demonstra o progresso da vazão em um período de 72 horas, nota-se uma alta extremamente considerável da vazão no Rio Macaé com a implementação desses novos parâmetros. Porém com uma pequena diminuição quando comparado com a chuva de TR de 20 anos.

Figura 25: *[channel flow] [MOHID Land Model]* – Node_RioMacaé_LinhaAzul. Simulações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.



Fonte: Elaborada pelos autores.

4. CONCLUSÕES

A simulação da dinâmica da água com o MOHID mostrou que o modelo pode reproduzir o movimento da água no solo em uma simulação 1D, 2D e 3D, mas é necessário que os dados de entrada como precipitação, temperatura e características do solo (parâmetros hidráulicos) sejam representativos para o estudo da área. Esta é uma necessidade para a implementação de cada modelo hidrológico. Segundo os resultados obtidos nas simulações, pode-se concluir que o MOHID é um modelo adequado para descrição curta e longo prazo (mensal) da dinâmica da água. Os resultados do modelo podem servir de base para a construção de um sistema de previsão de cheias e para um sistema de pré-aviso de cheias.

A variação e quantidade de precipitação, simulados neste trabalho, tem como efeito imediato o aumento proporcional das vazões na bacia hidrográfica estudada. Estudos mais profundos no sentido de compreender melhor os fenômenos atmosféricos, principalmente ligados à precipitação, são de extrema importância para a compreensão dos fenômenos naturais.

Os resultados encontrados apontam a viabilidade técnica de aplicação da simulação computacional com o modelo numérico MOHID, como ferramenta de análise e modelagem de chuvas intensas em bacias hidrográficas com formação complexa. Conclui-se também que a técnica pode ser aplicada em qualquer bacia hidrográfica, com características semelhantes ao caso estudado de Macaé, com uma rede de drenagem, relevo e uso e ocupação do solo heterogêneo.

Apesar de que, em apenas hipóteses remotas de ocorrer chuvas intensas, com tempo de retorno estimado de 10, 20 e 50 anos, a falta de preparo dos gestores das cidades ao longo do tempo, pode gerar impactos e perdas irreparáveis à população ribeirinha, quase sempre aumentando a probabilidade de inundações. Além disso, a falta de uma política habitacional baseada em princípios ambientais e a disparidade social “empurra” a população mais carente para as áreas sujeitas às inundações, ampliando o problema ambiental e sacrificando as comunidades desassistidas.

O uso de medidas não estruturais, como por exemplo legislações do uso e ocupação da terra mais rígidas, principalmente nas áreas ribeirinhas, é uma ferramenta extremamente importante para os gestores das cidades. O aumento dessas áreas não edificáveis pode ajudar significativamente na

diminuição de alagamentos e inundações, provenientes de chuvas intensas e aumentos repentinos das vazões dos corpos hídricos.

Estudos como este, assim como outros estudos hidrológicos, têm mostrado que, cada vez mais, os dados experimentais são imprescindíveis para a adequada representação e entendimento dos processos através da modelagem computacional e hidrológica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. W. L. DE et al. Modelagem hidrológica sob escassez de dados na Bacia do Alto Mundaú, Nordeste do Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, p. 227–238, 31 jul. 2017.

BARBOZA, A. P. ESTUDO HIDROLÓGICO DE VAZÕES MÁXIMAS NA BACIA DO RIO MACAÉ. p. 141, 2014.

CBH MACAÉ OSTRAS. **A Bacia • Comitê de Bacias dos Rios Macaé e Das Ostras Comitê de Bacias dos Rios Macaé e Das Ostras**, 2 set. 2020. Disponível em: <<https://cbhmacae.eco.br/a-bacia/>>. Acesso em: 14 set. 2020

CHOW, V.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. **Applied Hydrology**. 1ª edição ed. New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1988.

CHOW, V. T. Open-channel hydraulics. **McGraw-Hill Civil Engineering Series**, 1959.

DAVIS, E. G.; NAGHETTINI, M. C. **Estudos de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro - CPRM**. 2º ed. Rio de Janeiro: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2001.

DER-RJ. **Estudo de Chuvas Intensas do Estado do Rio de Janeiro**: Departamento de Estradas e Rodagem - DER-RJ. Rio de Janeiro: Departamento de Estradas e Rodagem - DER-RJ, 1989. . Acesso em: 11 maio. 2021.

DNIT. **MANUAL DE HIDROLOGIA BASICA PARA ESTRUTURAS DE DRENAGEM**. 2ª edição ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: [s.n.].

FRANCHINI, M. et al. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 175, n. 1, p. 293–338, 1 fev. 1996.

FREITAS. **Diagnóstico Socioambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé - Projeto Macaé Rio Sustentável**. Macaé: Universidade Cândido Mendes, 2011. Disponível em: <http://www.macaeriosustentavel.com.br/wpcontent/uploads/2014/05/Diagnostico_Socio-Ambiental_Bacia_hidrografica_Rio_Macae.pdf>. Acesso em: 11 maio. 2021.

GRIBBIN, J. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas fluviais**. 2ª edição ed. [s.l.] Cengage Learning, 2014.

HEWLETT, J. D. **Principles of Forest Hydrology**. [s.l.] University of Georgia Press, 1982.

HORTON, R. E. EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS; HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. **GSA Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275–370, 1 mar. 1945.

- IOANA, P. **Modeling floods in Enxoe watershed**. Roménia: IST Technical University Of Iasi, 2013.
- KLEMEŠ, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 31, n. 1, p. 13–24, 1 mar. 1986.
- LUGON JUNIOR, J. et al. Reservoir implantation for flood dampening in the Macaé River basin using the Mohid Land model. **Ciência e Natura**, v. 41, p. e29, 4 out. 2019.
- MARETEC. **Maretec (2012) Descrição do Mohid. Campos dos Goytacazes Essentia..pdf**. [s.l.] Essentia Editora, 2012.
- MELESSE, A. M.; SHIH, S. F. Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, n. 1–3, p. 173–183, 2002.
- MIGUEZ, M.; REZENDE, O.; VERÓL, A. **Drenagem urbana: do Projeto Tradicional à Sustentabilidade**. 1ª edição ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: GEN LTC, 2015.
- MOHID STUDIO. **MOHID Studio - User Guide - v.2.0 - Action Modulers Wiki**. Disponível em: <http://wiki.actionmodulers.com/wiki/index.php?title=MOHID_Studio_-_User_Guide_-_v.2.0>. Acesso em: 11 maio. 2021.
- MOHID WIKI. **Mohid Land - MohidWiki**. Disponível em: <http://wiki.mohid.com/index.php?title=Mohid_Land>. Acesso em: 14 set. 2020.
- NASCIMENTO, F. et al. Caracterização espaço-temporal das chuvas associada às vazões na bacia do rio Macaé-RJ. **IX Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica (Anais)**. Fortaleza: UFC. CD-ROM, 2010.
- NETO, J. et al. Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 177–188, 2014.
- REIS, F. **Tempo de concentração HidroMundo**, 10 dez. 2016. Disponível em: <<http://www.hidromundo.com.br/tempo-de-concentracao/>>. Acesso em: 11 maio. 2021
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. USO DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO COMO ESTIMADOR DA PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO. p. 10, 2003.
- RIBEIRO, G. Acerca do calculo da vasão de obras d’arte: tempo de concentração. **Revista do Clube de Engenharia**, v. 294, n. 3, p. 16–19, 1961.
- SANTOS, F. M. DOS; LOLLO, J. A. DE. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 663–675, 27 out. 2016.
- SAYD, J. L. C.; BRITTO, A. L. OBRAS HIDRÁULICAS E ESPAÇO URBANO NO ESTUÁRIO DO RIO MACAÉ. **São Paulo**, p. 22, 2016.
- SCHWAB, G. O. et al. **Soil and Water Conservation Engineering**. 4th Edition ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.

SILVA, D. D. DA et al. Estimativa e Espacialização dos Parâmetros da Equação de Intensidade Duração-Frequência da Precipitação para o Rio de Janeiro e o Espírito Santo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal - SP. v. 18, n. 3, p. 11–21, 1999.

SILVA, R. DA; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. Hidráulica fluvial. **Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ**, 304p, 2003.

SOUZA, P. A. DE; MARÇAL, M. D. S. HIDROSEDIMENTOLOGICA E CONECTIVIDADE DO RIO MACAÉ, NORTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, BRASIL. **Geo UERJ**, v. 0, n. 27, 20 dez. 2015.

STRAHLER. **Handbook of Applied Hydrology**. [s.l.] McGraw-Hill, New York, 1964.

STRAHLER, A. N. HYPSONOMETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OF EROSIONAL TOPOGRAPHY. **GSA Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117–1142, 1 nov. 1952.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913–920, 1957.

TAVARES, L. P. DA S. et al. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Macaé utilizando o MOHID Land. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 11, n. 1, p. 169, 30 out. 2017.

TAVARES, L. P. DA S. et al. WATER MANAGEMENT AND URBAN FLOOD MITIGATION: STUDIES AND PROPOSALS FOR THE MACAÉ RIVER BASIN IN BRAZIL. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 12, n. 2, p. 188–200, 31 dez. 2018.

TELLES, W. R.; NETO, A. J. S.; RODRIGUES, P. P. G. W. **Avaliação do sistema de modelagem MOHID na delimitação de bacias hidrográficas**. Anais do Congresso de Modelagem Aplicada e Computacional. **Anais...Nordeste: 2012**. . Acesso em: 11 maio. 2021

TRANCOSO, A. R. et al. An advanced modelling tool for simulating complex river systems. **Science of The Total Environment**, v. 407, n. 8, p. 3004–3016, abr. 2009.

USDA-SCS. National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Section 4, Chapter 10. Washington, DC: Natural Resources Conservation Service. In: **US Department of Agriculture**. [s.l: s.n.].

USDA-SCS. National engineering handbook, section 4: hydrology. In: **US Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC**. [s.l: s.n.].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

DE ABREU, S. R.; FARIA, T. DE J. P. O mapa da migração em Macaé: impactos da industrialização no processo de urbanização. **Anais do Seminário Nacional da Pós-Graduação em Ciências Sociais-UFES**, v. 1, n. 1, 2011.

DEAK, C.; SCHIFFER, S. T. R. O processo de urbanização no Brasil. São Paulo: EdUSP, 1999.

EM-DAT. **The Office of US Foreign Disaster Assistance / Centre for Research on the Epidemiology of Disaster - CRED**. Disponível em: <<https://www.emdat.be/database>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. Concepts and importance of mathematical modeling of water quality for water resources management. **Revista Ambientia**, v. 9, n. 3, 2013.

GUIMARÃES, É. A. OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E POBREZA HÍDRICA: ESTUDO COMPARATIVO DE COMUNIDADES ESTUARINAS DO MUNICÍPIO DE MACAÉ/RJ. 2019.

HORA, H. M. C. et al. Modelagem computacional como ferramenta de gerenciamento dos recursos hídricos: uma alternativa para abordagem de problemas de usos múltiplos. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 5, n. 1, p. 71–87, 2011.

LEFEBVRE, H. **O direito à cidade**. São Paulo: Centauro, 2001. v. 5.

MARCELINO, E. V. **DESASTRES NATURAIS E GEOTECNOLOGIAS: CONCEITOS BÁSICOS**. Santa Maria, RS, Brasil: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / CRS - Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, 2008. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

MARTINE, G. et al. A urbanização no Brasil: retrospectiva, componentes e perspectivas. **Anais**, n. VI, p. 19–65, 2016.

ONU. **Objetivos de desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 7 jul. 2020.

PACHECO, M. D. F. F. et al. DIVERSIDADE FITOSSOCIOLÓGICA DE UMA ZONA DE EXPANSÃO URBANA NO MUNICÍPIO DE PELOTAS-RS. 2014.

PINTO, T. DOS S. **Evolução das cidades. As cidades da Antiguidade à contemporaneidade**. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/historia/evolucao-das-cidades.htm>>. Acesso em: 7 abr. 2020.