

## **BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**AMANDA CRISTINA GONÇALVES DA SILVA**

**SIMULAÇÃO DO USO DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS  
PARA DRENAGEM UTILIZANDO O SWMM: CASO NA  
BACIA DO RIO JUQUERIQUERÊ, CARAGUATATUBA, SP**

**CARAGUATATUBA**

**2021**

**AMANDA CRISTINA GONÇALVES DA SILVA**

**SIMULAÇÃO DO USO DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS  
PARA DRENAGEM UTILIZANDO O SWMM: CASO NA  
BACIA DO RIO JUQUERIQUERÊ, CARAGUATATUBA, SP**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Câmpus Caraguatatuba como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Vassiliki Boulomytis

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Taís Arriero Shinma Galbetti

**CARAGUATATUBA**

**2021**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Serviço de Biblioteca e Documentação do IFSP Câmpus Caraguatatuba

S586s	<p>Silva, Amanda Cristina Gonçalves da Simulação do uso de medidas compensatórias para drenagem utilizando o SWMM: caso na bacia do Rio Juqueriquerê, Caraguatatuba-SP. / Amanda Cristina Gonçalves da Silva. -- Caraguatatuba, 2022. 30 f. : il.</p> <p>Orientadoras: Profa. Dra. Vassiliki Terezinha Galvão Boulomytis e Tais Arriero Shinma Galbetti. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) -- Instituto Federal de São Paulo, Caraguatatuba, 2022.</p> <p>1. Engenharia Civil. 2. Modelo hidrológico (SWMM). 3. Medidas compensatórias. 4. escoamento superficial. I. Boulomytis, Vassiliki Terezinha Galvão, orient. II. Galbetti, Tais Arriero Shinma, coorient. III. Instituto Federal de São Paulo. IV. Título.</p> <p>CDD: 624</p>
-------	--

Ficha catalográfica elaborada por Elis Regina Alves dos Santos  
Bibliotecária - CRB 8/8099

ATA N.º 1/2022 - CENG-CAR/DAE-CAR/DRG/CAR/IFSP

Ata de Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **SIMULAÇÃO DO USO DE MEDIDAS COMPENSATÓRIAS PARA DRENAGEM UTILIZANDO O SWMM: CASO NA BACIA DO RIO JUQUERIQUERÊ, CARAGUATATUBA, SP** apresentado(a) pelo(a) aluno(a) **Amanda Cristina Gonçalves da Silva (CG1704486)** do Curso **BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL (Câmpus Caraguatatuba)**. O trabalho foram iniciados às 16h03min (dezesesseis horas e três minutos) pelo(a) Professor(a) presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

Membros	IES	Presença (Sim/Não)	Aprovação/Conceito (Quando Exigido)
Vassiliki Terezinha Galvao Boulomytis (Orientadora)	IFSP CAR	SIM	Aprovado
Taís Arriero Shinma Galbetti (Coorientadora/ Examinadora Externo)	UEMS	NÃO	--
Luciene Pimentel da Silva (Examinadora externa)	PUC PR	SIM	Aprovado
Jose Gilberto DalFRE Filho (Examinador externo)	UNICAMP	SIM	Aprovado
Ruan Larisson Toninato Vilela (Examinador interno)	IFSP CAR	SIM	Aprovado

**Observações:**

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo da monografia, passou à arguição da candidata. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo(a) aluno(a), tendo sido atribuído o seguinte resultado:

Aprovado(a)                       Reprovado(a)

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos às 16h58min (dezesesseis horas e cinquenta e oito minutos) e, para constar, eu lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Caraguatatuba, 17 de fevereiro de 2022

(Assinado Eletronicamente)

Documento assinado eletronicamente por:

- Vassiliki Terezinha Galvao Boulomytis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/02/2022 20:04:47.
- Ruan Larisson Toninato Vilela, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO, em 21/02/2022 20:11:05.
- Amanda Cristina Gonçalves da Silva, CG1704486 - Discente, em 21/02/2022 20:12:53.
- Jose Gilberto DalFRE Filho, 21402550898 - Pessoa Externa, em 22/02/2022 10:21:03.
- Luciene Pimentel da Silva, 72755393734 - Pessoa Externa, em 22/02/2022 17:46:58.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 21/02/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifsp.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 300563  
Código de Autenticação: c14ffe546



## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer a minha família pelo apoio, dedicação e amor, e por sempre me incentivarem. Agradeço também aos professores que contribuíram para um melhor aprendizado, em especial a minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vassiliki T. G. Boulomytis.

## RESUMO

O processo de urbanização implica na impermeabilização de áreas causando alteração no ciclo hidrológico e na vida da população, como alagamentos e inundações, caso não tenha o planejamento adequado. Estas alterações causam o aumento do escoamento superficial e levam os sistemas de drenagem, muitas vezes ineficientes, ao seu limite de funcionamento. O município de Caraguatatuba, localizado no Litoral Norte do estado de São Paulo, apresenta amplo crescimento urbano para os próximos anos. Utilizou-se o software de simulação hidrológica *Storm Water Management Model* (SWMM) para simular o uso de medidas compensatórias, a fim de mitigar os impactos causados pela urbanização, promovendo um comportamento do escoamento mais próximo ao natural. As medidas compensatórias simuladas foram: telhado verde, pavimento permeável e cisternas. As simulações foram aplicadas em cinco cenários: cenário atual, sem urbanização, cenário futuro, com a impermeabilização máxima prevista em legislação e com o uso das medidas compensatórias em 10%, 20% e 30% das áreas impermeáveis. Os resultados indicam desempenho satisfatório na implementação das medidas, com redução de 9,51% da vazão de escoamento, com o tratamento de 30% da área impermeável pelos dispositivos, quando comparados com o cenário de urbanização sem o uso das medidas sustentáveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelo hidrológico (SWMM); medidas compensatórias; escoamento superficial.

## **ABSTRACT**

The urbanization process implies the waterproofing of areas causing changes in the hydrological cycle and in the life of the population, such as floods and inundations, if there is not adequate planning. These changes cause an increase in surface runoff and take drainage systems, often inefficient, to their operating limit. The municipality of Caraguatatuba, located on the North Coast of the state of São Paulo, has ample urban growth in the coming years. The Storm Water Management Model (SWMM) hydrological simulation software was used to simulate the use of compensatory measures in order to mitigate the impacts caused by urbanization, promoting a flow behavior closer to natural. The simulated compensatory measures were: green roof, permeable pavement and cisterns. The simulations were applied in five scenarios: current scenario, without urbanization, future scenario, with the maximum waterproofing provided for in legislation and with the use of compensatory measures in 10%, 20% and 30% of the impervious areas. The results indicate satisfactory performance in the implementation of the measures, with a reduction of 9.51% of the flow of flow, with the treatment of 30% of the impermeable area by the devices, when compared with the scenario of urbanization without the use of sustainable measures.

**KEYWORDS:** Hydrological model (SWMM); sustainable drainage measures; surface runoff.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) a partir da década de 1970 a população brasileira urbana ultrapassou a população rural, de 52 milhões e 41 milhões, respectivamente. A ausência do planejamento urbano adequado traz consequências à drenagem urbana, por diminuir ou até extinguir as áreas naturais, cobertas por vegetação. A impermeabilização, além de ser diretamente responsável pelo aumento do escoamento superficial das bacias urbanas, reduz o tempo de concentração.

O escoamento superficial ocorre quando o volume de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo. Em regiões onde o nível do lençol freático é alto, o solo satura-se mais rapidamente, diminuindo a capacidade de infiltração e aumentando o volume de água que é escoado. As cheias urbanas são causadas por esse volume de água pluvial que não infiltrou devido à impermeabilização ou saturação do solo, que escoam superficialmente até as áreas próximas a rios, nos pontos mais baixos da cidade.

A Figura 1 elucida a relação da vazão com a urbanização. Em áreas urbanizadas, a vazão de pico é mais alta, em um tempo menor, enquanto em áreas não urbanizadas, a vazão de pico é mais baixa e é amenizada num intervalo maior de tempo devido a maior quantidade de áreas para infiltração.

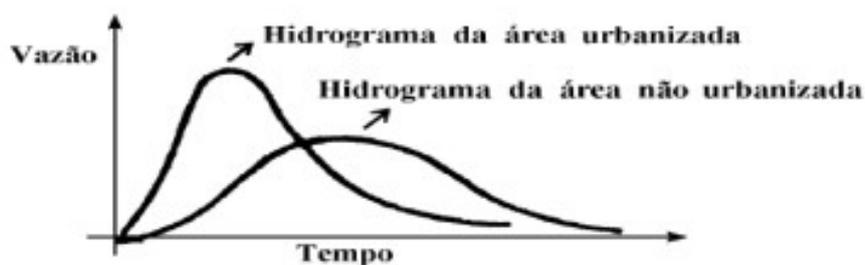


Figura 1. Comparação entre hidrogramas de áreas urbanizadas e não urbanizadas.

Fonte: Tucci (2000).

O sistema de drenagem urbano (SDU) é formado por estruturas instaladas destinadas a retenção, transporte e disposição final das águas pluviais. A função da microdrenagem é coletar e transportar a água pluvial até o sistema de macrodrenagem, retirando a água pluvial dos pavimentos das vias

públicas, evitando alagamentos. As sarjetas são responsáveis por escoar as águas pluviais por gravidade para as bocas coletoras e às galerias. Entre as tubulações são instalados poços de inspeção para facilitar a manutenção da rede. Após o transporte, a água tem como destino o curso d'água natural. (ROSA et al., 2018). É fundamental conceber adequadamente o sistema de drenagem, afim de garantir o escoamento seguro das águas pluviais, evitando enchentes (ALMEIDA, 2020). O sistema de drenagem convencional tem se mostrado ineficiente não apenas no controle de alagamentos, mas também em relação à qualidade da água e qualidade de vida da população.

Com o passar dos anos, os conceitos de drenagem foram aprimorados, buscando alternativas sustentáveis. O uso de medidas compensatórias busca minimizar os efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico, visando controlar o escoamento superficial junto à fonte geradora de escoamento, aumentando a parcela de água retida ou infiltrada, reduzindo ou retardando os picos de cheias e também permitindo a recarga do lençol freático.

A drenagem com o uso de medidas compensatórias não se limita à canalização das vazões, aumentando sua velocidade de escoamento e a transferindo para jusante. Esta técnica visa mitigar o impacto da urbanização, ao mesmo tempo que tenta retomar as condições hidrológicas naturais. Tendo como objetivo aumentar a qualidade de vida e preservar o meio ambiente.

As medidas compensatórias a serem usadas estão condicionadas ao objetivo a ser atingido no local de implantação, características do local, legislação em vigor, propriedades do solo, tipo de construção existente, entre outros fatores (NETO, 2019), podendo ser usadas de forma combinada, de forma a aumentar ainda mais o índice de infiltração de águas pluviais e reduzir o escoamento superficial. Algumas medidas que vem sendo implantadas como alternativas ao sistema de drenagem convencional são: pavimentos permeáveis, células de biorretenção, jardins de chuva, trincheiras de infiltração, telhados verdes, microreservatórios de retenção, entre outros. Nesse trabalho é dada mais ênfase a discussão de três medidas compensatórias sustentáveis: os pavimentos permeáveis, as coberturas verdes e cisternas.

O uso de pavimento permeável é capaz de reduzir o volume de escoamento superficial, promovendo infiltração no solo, atuando como um retardador do tempo de pico em cheias e efetuando a recarga no lençol freático. Caracterizam-se por apresentarem superfície porosa ou perfurada (ALVES, 2017). Lin et al. (2015) avaliou a sua performance da medida através do software *Storm Water Management Model* (SWMM) (em português, Modelo de Gerenciamento das Águas de Chuva) e obteve bons índices de reduções de escoamentos.

Os telhados verdes também têm sido utilizados como alternativas de drenagem na fonte, têm como principais objetivos, a gestão das águas pluviais no próprio lote e proporcionar melhorias no conforto térmico e acústico das edificações. Estudos realizados por Costa et al. (2011) e Alamy et al. (2016) apontam que a implantação de telhados verdes é capaz de reduzir expressivamente o volume de escoamento superficial, além de amenizar o calor nas edificações.

Assim como nas demais medidas compensatórias estudadas, as cisternas também apresentam um vasto campo de aplicações, podendo ser inseridas nos meios doméstico, comercial, industrial e institucional (SEMCOG, 2008). Além de ajudar a reduzir o escoamento superficial, podem ser posicionadas abaixo do nível do solo, tornando-se uma alternativa para locais com limitação de área. Como limitação principal, as cisternas apresentam baixa efetividade em eventos com precipitação extrema, devendo ser utilizados em conjunto com outras técnicas de LID, do conceito de *Low Impact Development* (em português, Desenvolvimento de Impacto Reduzido), caso contrário deve ter seu extravasor ligado diretamente à rede de drenagem pluvial (SEMCOG, 2008).

O SWMM foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 1971) para simular as respostas hidrológicas das áreas de estudo. Ele é um modelo dinâmico de chuva-vazão que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas, podendo ser utilizado para simulações por evento chuvoso ou de longo período (ROSSMAN, 2015).

Segundo Lima (2011), o SWMM é um modelo abrangente e detalhado para simular eventos através de tubulações e estruturas de armazenamento, além de apresentar considerável resolução espacial e temporal. Para simulação, utilizou-se o modelo de onda cinemática, onde o software resolve a equação da continuidade junto com uma fórmula simplificada da equação da quantidade de movimento em cada um dos condutos (ROSSMAN, 2015).

Neste enfoque, buscou-se simular o comportamento do sistema de drenagem com o uso de medidas compensatórias sustentáveis em uma bacia não urbanizada, considerando os cenários futuros de ocupação. Elegeu-se uma área conhecida como Fazenda Serramar, não urbanizada, na cidade de Caraguatatuba, estado de São Paulo, como área de estudo. O município, assim como outras cidades do litoral norte de São Paulo, tem sofrido uma urbanização acelerada nos últimos anos acarretando em altas taxas de impermeabilização do solo e modificações no ciclo hidrológico de toda a região. Localizada entre o mar e o Parque Estadual da Serra do Mar, a maior parte da cidade de Caraguatatuba possui o nível do lençol freático alto, saturando-se rapidamente em precipitações com pequenos períodos de retorno. Em toda a área urbana, são documentados problemas de escoamento da água pluvial e frequentes alagamentos ou inundações.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudo

A Bacia do Rio Juqueriquerê divide-se em dois municípios: Caraguatatuba e São Sebastião, no litoral norte do Estado de São Paulo, Brasil. A bacia possui 419,80 km<sup>2</sup>, sendo a maior bacia do litoral norte. Compreende as principais planícies não urbanizadas da região, caracterizadas pela especulação imobiliária e turística.

A área delimitada ao estudo compreende a bacia do Rio Juqueriquerê reduzida, no município de Caraguatatuba, excluindo a área a jusante, já urbanizada, e que está sob influência das marés, apresentada na Figura 2.

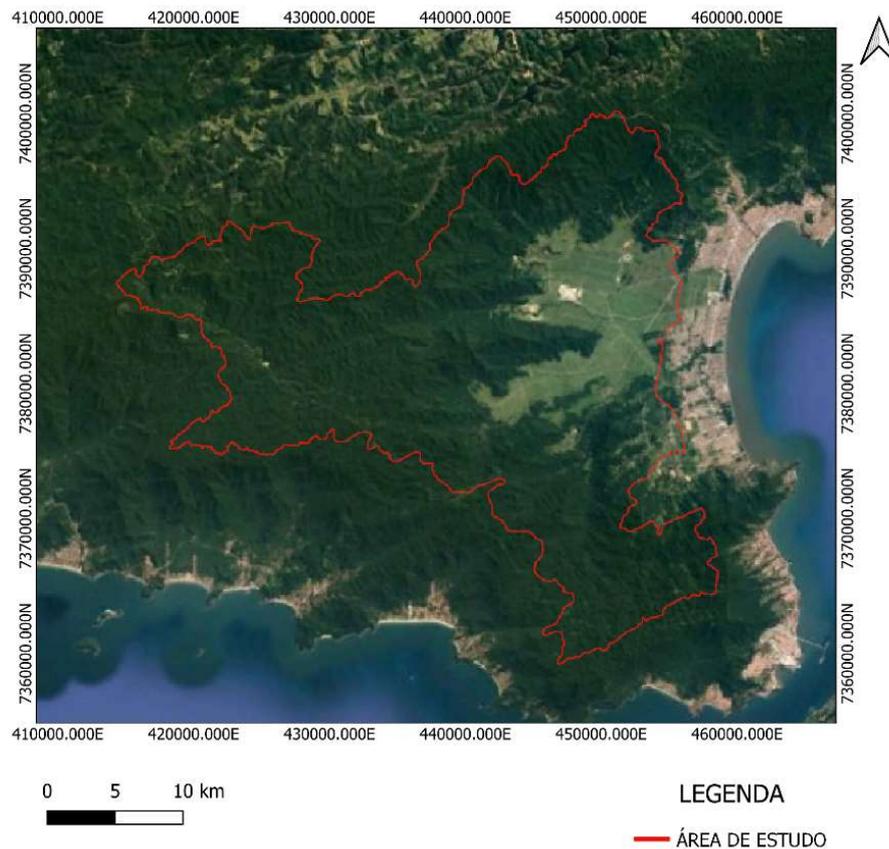


Figura 2. Bacia do Rio Juqueriquerê.

Fonte: Autor

Atualmente há o predomínio de vegetação arbórea, gramados, campos e pastagens na área da bacia. Todavia, se concretizadas as disposições do

Plano Diretor do município, ocorrerá a expansão da urbanização e loteamento da área da planície da bacia, com substituição das áreas verdes permeáveis por superfícies impermeáveis. Logo, no cenário atual, grande parcela de água precipitada é infiltrada no solo, no cenário futuro, devido à impermeabilização, uma maior porção de água é transformada em escoamento superficial.

As planícies extensas e semiurbanas são circundadas pela Serra do Mar, onde a Mata Atlântica ainda é preservada, abrigando rica biodiversidade e algumas espécies endêmicas do ecossistema costeiro (IVANAUSKAS, 1997). É a única bacia na 7ª ordem de Strahler, onde a susceptibilidade morfométrica da bacia indica sua probabilidade natural de ocorrência de enchentes (SOUZA, 2005). A dinâmica fluvial e de uso do solo na Bacia do Rio Juqueriquerê foi amplamente modificada, o resultado é a ocorrência de inundação por causa do nível do lençol freático raso, superfícies impermeáveis e rios assoreados (BOULOMYTIS et al., 2015). Diversos fatores influenciam na fragilidade da região: insuficiência de matas ciliares nos cursos dos rios, retificação dos rios gerando aumento do escoamento, e moradias irregulares ao longo dos cursos dos rios e várzeas.

Conforme a classificação climática de Köepen o clima é tropical chuvoso, com estação seca indefinida e chuvas intensas no verão, com temperatura média anual de 25°C (SANTOS; GALVANI, 2012).

Os solos pertencentes à bacia podem ser classificados como: Cambissolo, Latossolo Vermelho-Amarelo e Espodossolo. O Latossolo é resultado de intemperização intensa, presença de óxido de ferro de média a baixa – Grupo hidrológico: B; Cambissolo possui textura média ou argilosa com horizonte B incipiente – Grupo hidrológico: B; Espodossolo são constituídos por material mineral com horizonte B espódico – Grupo hidrológico: D. (EMBRAPA, 2018; BOULOMYTIS et al., 2016).

A delimitação e subdivisão das bacias foi realizada conforme Boulomytis et al. (2017). A bacia hidrográfica foi subdividida em 11 sub-bacias, mostradas na Figura 3. Os identificadores das sub-bacias indicam o rio responsável pela maior contribuição hídrica da bacia.

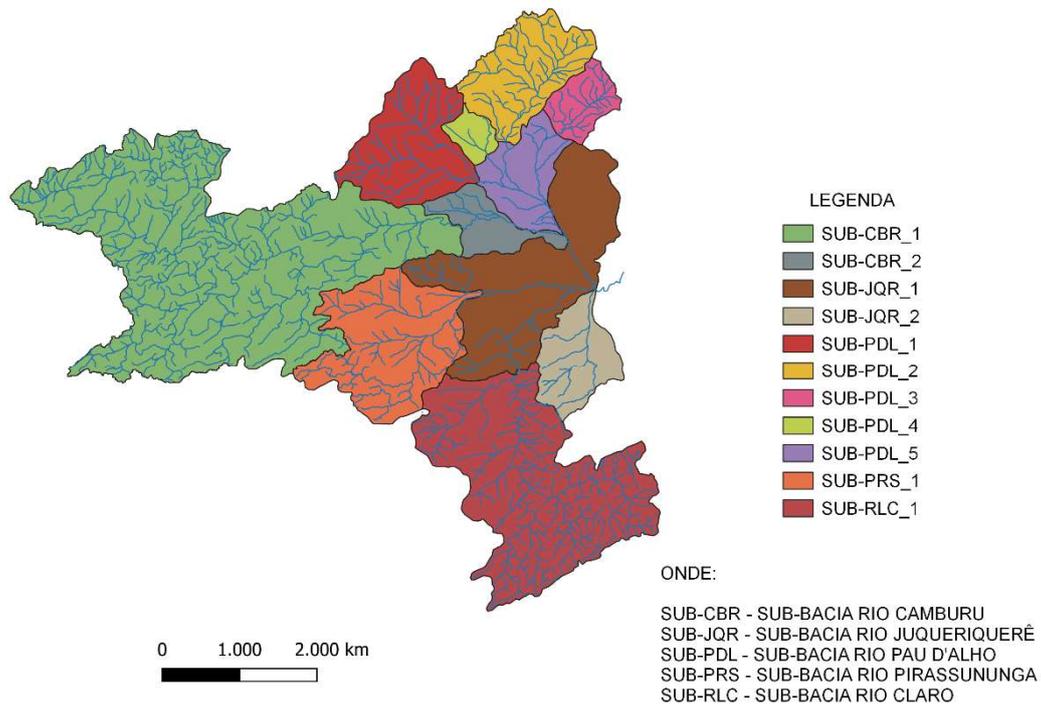


Figura 3. Delimitação das sub-bacias.

Fonte: Adaptado de Boulomytis et al. (2017).

## 2.2 Cenários de simulação

Os cenários simulados tiveram o objetivo de comparar as situações presente e futuro da área de estudo em diferentes condições. Os cenários simulados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Cenários de simulação.

<b>Cenários</b>	<b>Descrição</b>
<b>Presente</b>	Cenário atual, da área de estudo, sem urbanização.
<b>Futuro - Sem LIDs</b>	Cenário prevendo o máximo de área impermeável prevista no Plano Diretor para cada zona.
<b>10% LIDs</b>	Uso de medidas compensatórias em 10 % da área impermeável das sub-bacias.
<b>20% LIDs</b>	Uso de medidas compensatórias em 20 % da área impermeável das sub-bacias.
<b>30% LIDs</b>	Uso de medidas compensatórias em 30 % da área impermeável das sub-bacias.

Fonte: Autor

### **2.3 Simulação hidrológica do cenário presente**

Os parâmetros necessários para as simulações hidrológicas são físicos, através da caracterização das sub-bacias e variáveis, como a precipitação e infiltração. Nos diferentes cenários simulados, os dados físicos de área da sub-bacia, declividade e largura não são alterados, e foram obtidos de Boulomytis et al. (2017).

Tabela 2. Dados físicos inalterados nos diferentes cenários.

<b>Sub-bacias</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Largura (m)</b>	<b>Declividade (%)</b>
<b>CBR_1</b>	12.069,07	28.080,00	6,01
<b>CBR_2</b>	926,91	7.120,00	0,72
<b>JQR_1</b>	4.410,33	9.270,00	0,93
<b>JQR_2</b>	1.415,27	6.520,00	1,43
<b>PDL_1</b>	2.534,27	12.460,00	7,34
<b>PDL_2</b>	2.069,15	7.440,00	8,63
<b>PDL_3</b>	773,66	4.590,00	6,33
<b>PDL_4</b>	385,35	2.640,00	7,40
<b>PDL_5</b>	1.357,30	6.300,00	0,62
<b>PRS_1</b>	3.463,94	12.010,00	2,59
<b>RLC_1</b>	6.481,59	14.390,00	7,01

Fonte: Adaptado de Boulomytiset al. (2017).

Como o cenário presente não possui área impermeável, adotou-se o coeficiente de Manning de 0,400, considerando uma superfície composta de vegetação rasteira leve e 5,08 mm de armazenamento em depressão, conforme recomendação de Rossman (2015).

Para determinação da chuva de projeto foi utilizado o método dos Blocos alternados, a partir da equação de Intensidade, Duração e Frequência (IDF) desenvolvida pelo DAEE (2018), estação E2-046, localizada geograficamente a latitude 23° 38'S e longitude 45° 26'W, conforme Equação 1.

$$i_{t,T} = 39,04 (t + 40)^{-0,8515} + 26,66(t + 90)^{-0,9154} \cdot [-0,4839 - 0,9030 \ln \ln \left(\frac{T}{T} - 1\right)] \text{ (Eq. 1)}$$

Onde:  $i$  representa a intensidade da chuva(em mm/h);  $T$  é o tempo de retorno (em anos);  $t$  é a duração do evento (em min).

Nas simulações foram utilizadas chuvas de projeto com 250 min de duração, intervalos de 10 min, e com períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos. Dentre os tempos de concentração sub-bacias, o maior é 246,12 min, na sub-

bacia CBR\_1 (BOULOMYTIS et al., 2017), justificando a duração da chuva de projeto considerada.

O método utilizado para as sub-bacias foi o SCS (no inglês, *Soil Conservation Service*). Os valores de CN (Curva Número) foram obtidos a partir do levantamento feito por Boulomytis et al. (2017), sendo o maior valor correspondente a 100, indicando solo impermeável. Foi considerado para o cenário presente a ocupação não-urbanizada, conforme a Tabela 3.

Tabela3. Valores CN das sub-bacias da área de estudo.

<b>Sub-bacias</b>	<b>CN</b>
<b>CBR_1</b>	74,08
<b>CBR_2</b>	86,10
<b>JQR_1</b>	87,35
<b>JQR_2</b>	84,44
<b>PDL_1</b>	74,45
<b>PDL_2</b>	73,89
<b>PDL_3</b>	74,54
<b>PDL_4</b>	78,08
<b>PDL_5</b>	89,65
<b>PRS_1</b>	76,15
<b>RLC_1</b>	73,96

Fonte: Boulomytis et al. (2017).

#### **2.4 Simulação hidrológica do cenário futuro sem medidas compensatórias**

A determinação dos demais dados físicos das sub-bacias considerou o uso e ocupação máximo do solo, com as mínimas áreas permeáveis permitidas em cada zona, previsto pelo Plano Diretor de Caraguatatuba, visto que, atualmente, a área não está urbanizada. As zonas pertencentes à área de estudo e as porcentagens impermeáveis consideradas foram estabelecidas conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Permeabilidade das zonas de ocupação urbana.

<b>Zonas</b>		<b>Área Permeável (%)</b>
<b>ZA</b>	Zona de amortecimento	100
<b>ZEU</b>	Zona Expansão Urbana	20
<b>ZPP</b>	Zona de Preservação Permanente	100
<b>ZMV-9</b>	Zona Mista Vertical – 9	30
<b>ZMV-6</b>	Zona Mista Vertical – 6	30
<b>ZE</b>	Zona Especial	20
<b>ZPA</b>	Zona de Proteção Ambiental	100
<b>ZCV</b>	Zona Comercial	20
<b>ZLI</b>	Zona Logística Industrial	20
<b>ZEIS</b>	Zona Especial de Interesse Social	20

Fonte: Plano Diretor da Cidade de Caraguatatuba (2011).

Os parâmetros de porcentagem de área superficial impermeável e os coeficientes de Manning para o escoamento superficial na parcela permeável e impermeável foram obtidos através de médias ponderadas, considerando as áreas ocupadas por cada zona dentro das sub-bacias.

Nas zonas ZA, ZPP e ZPA adotou-se 0,400 no coeficiente de Manning, para a rugosidade de superfícies de vegetação rasteira leve. Na ZEU considerou-se as áreas impermeáveis ocupadas por coberturas cerâmicas, coeficiente de Manning 0,015, e nas zonas ZMV-6 e ZMV-9, áreas impermeáveis com superfície de concreto, com coeficiente igual a 0,013. Nas áreas permeáveis das zonas que permitem urbanização adotou-se o coeficiente de rugosidade de 0,130, conforme recomendações de Rossman (2015).

Considerando a pior situação de urbanização da área, adotou-se que 100 % da área impermeável não permite armazenamento em depressão. Os parâmetros físicos das sub-bacias estão presentes no Anexo A.

O método adotado nas sub-bacias também foi o SCS. para o cenário futuro de urbanização (BOULOMYTIS et al., 2017), conforme a Tabela 5.

Tabela 5. CN no cenário futuro de ocupação urbana.

<b>Sub-bacias</b>	<b>CN</b>
<b>CBR_1</b>	74,11
<b>CBR_2</b>	89,43
<b>JQR_1</b>	91,96
<b>JQR_2</b>	89,69
<b>PDL_1</b>	75,16
<b>PDL_2</b>	74,28
<b>PDL_3</b>	76,21
<b>PDL_4</b>	80,80
<b>PDL_5</b>	93,45
<b>PRS_1</b>	77,51
<b>RLC_1</b>	74,02

Fonte: Boulomytis et al. (2017).

### **2.5 Simulação hidrológica do cenário futuro com medidas compensatórias**

As medidas compensatórias implementadas nessa simulação foram: cisternas, telhados verdes, pavimentos permeáveis. Os parâmetros de entrada das medidas compensatórias foram calculados com base em pesquisas anteriores e na verificação dos intervalos permitidos no manual do SWMM. A Figura 4 apresenta o mapa simulado no SWMM.

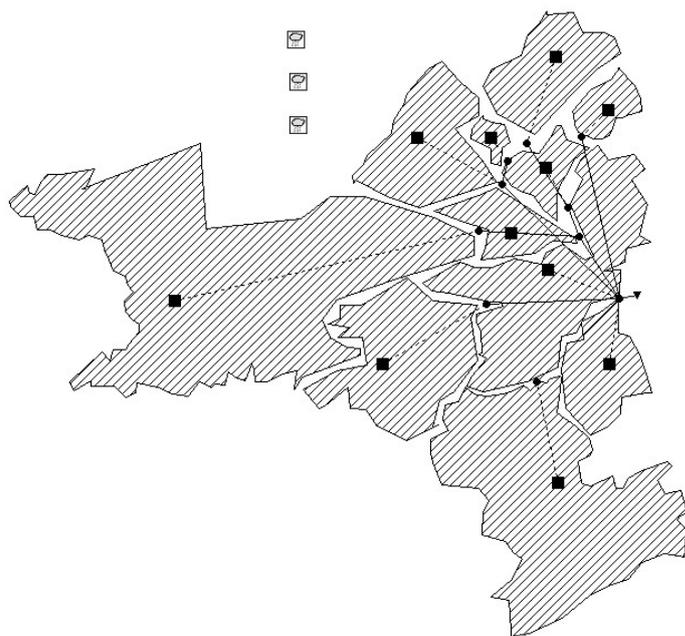


Figura 4. Representação das sub-bacias no SWMM.

Fonte: Autor.

A simulação com o uso das medidas compensatórias, ou seja, com o uso dos dispositivos LIDs no SWMM é projetada para subtrair parte do escoamento superficial por meio de processos artificiais combinados de retenção, infiltração e evapotranspiração (ROSSMAN, 2015).

As cisternas podem ser utilizadas para capturar o escoamento de telhados ou coberturas, que representam as áreas impermeáveis. Simulou-se o uso das cisternas tratando 10 %, 20 % e 30 % das parcelas impermeáveis das sub-bacias. São capazes de atuar no controle do volume de escoamento, não promovendo a infiltração da água ao solo natural, mas permitindo o armazenamento para subsequente utilização. A capacidade de armazenamento da cisterna não foi considerada uma variável, pois segundo Jennings et al. (2013) e Marotto et al. (2019), a variação do tamanho das cisternas não é proporcional a redução do escoamento superficial e pela simulação consideramos apenas 1 evento chuvoso. Para a simulação adotou-se cisternas com capacidade de 10.000 L, seguindo padrões comerciais, e considerando 1.000 unidades em cada sub-bacia, valor máximo permitido pelo software.

O uso de cobertura verde e pavimento permeável foram adotados considerando cobertura em 10 %, 20 % e 30 % da área impermeabilizada, logo o parâmetro de área impermeável de cada bacia foi reduzido, considerando o uso das medidas compensatórias. Os parâmetros de entrada para o telhado verde dividem-se em três camadas: superfície, solo e drenagem, enquanto para o pavimento permeável, quatro camadas: superfície, pavimento, armazenamento e solo. Os dados foram obtidos com base em Gonçalves et al. (2018), Alves (2017) e Sangalli (2021).

Haja vista que a futura urbanização da bacia ocorra apenas nas zonas que a permitam, concentrando-se nas áreas de planície, as sub-bacias: CBR\_1, PDL\_2, PDL\_3 e RLC\_1 terão área impermeável inferior a 1 %, logo, medidas compensatórias de drenagem não foram implementadas nas simulações desse estudo. Nas demais bacias, considerou-se a implantação das medidas compensatórias em 10 %, 20 % e 30 % da área impermeabilizada, conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Medidas compensatórias simuladas nas sub-bacias.

<b>Sub-bacias</b>	<b>Medidas compensatórias simuladas</b>
<b>CBR_1</b>	Nenhuma medida simulada
<b>CBR_2</b>	Cisternas
<b>JQR_1</b>	Cisternas
<b>JQR_2</b>	Cisternas
<b>PDL_1</b>	Cisternas, pavimento permeável e telhado verde
<b>PDL_2</b>	Nenhuma medida simulada
<b>PDL_3</b>	Nenhuma medida simulada
<b>PDL_4</b>	Cisternas, pavimento permeável e telhado verde
<b>PDL_5</b>	Cisternas
<b>PRS_1</b>	Cisternas, pavimento permeável e telhado verde
<b>RLC_1</b>	Nenhuma medida simulada

Fonte: Autor.

Considerando a chuva de projeto como um evento único, adotou-se que as cisternas não estão preenchidas, ou seja, com a capacidade máxima de armazenamento e que o solo encontra-se totalmente seco, o que não ocorre com frequência na área de estudo, pois o solo das sub-bacias: JQR\_1, JQR\_2, PDL\_5 e CBR\_2 é classificado como Espodossolo, pertencente ao Grupo hidrológico D. Os solos pertencentes ao Grupo hidrológico D possuem alto potencial de gerar escoamento superficial quando completamente saturado. Segundo a pesquisa de Boulomytis et al. (2016), amostras mostraram que o nível do lençol freático, na área de estudo, é mais raso que 50cm nas áreas de várzea. Semcog (2008) não recomenda o uso de técnicas compensatórias que promovam a infiltração da água pluvial no solo natural, para os solos pertencentes a esse grupo. Portanto, para as bacias descritas simulou-se apenas cisternas, como medida compensatória, visando a redução do escoamento superficial.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir das simulações com a chuva de projeto de 250 min de duração e períodos de retorno de 2, 5 e 10 anos estão apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. Inferiu-se, como esperado, um aumento gradual nas vazões de escoamento com o crescimento dos períodos de retorno simulados.

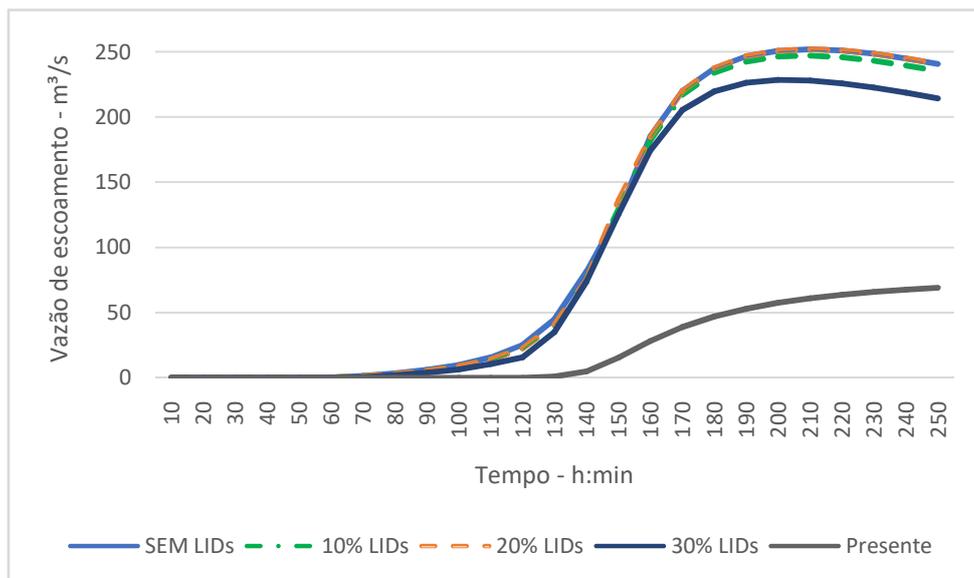


Figura 5. Vazão de escoamento para o período de retorno de 10 anos.

Fonte: Autor.

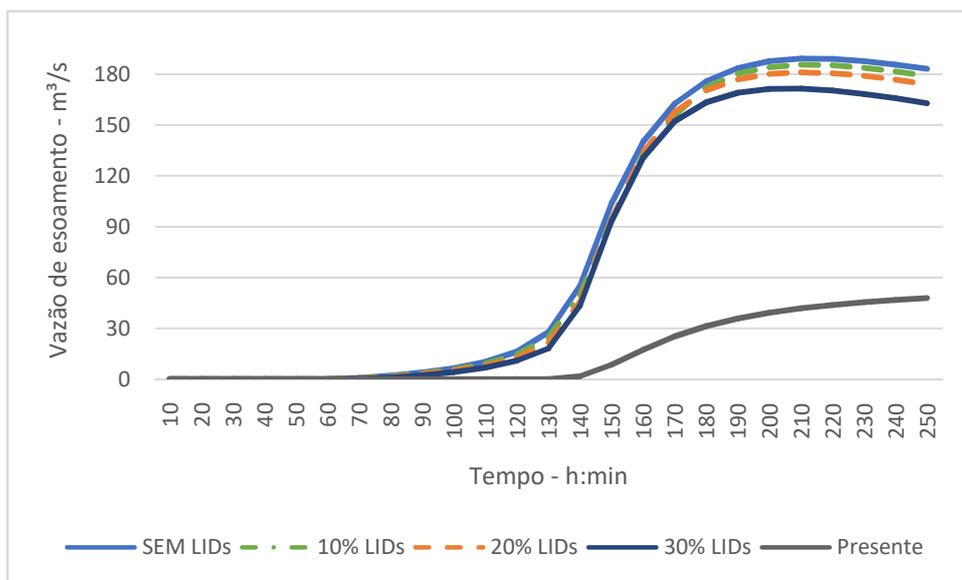


Figura 6. Vazão de escoamento para o período de retorno de 5 anos.

Fonte: Autor

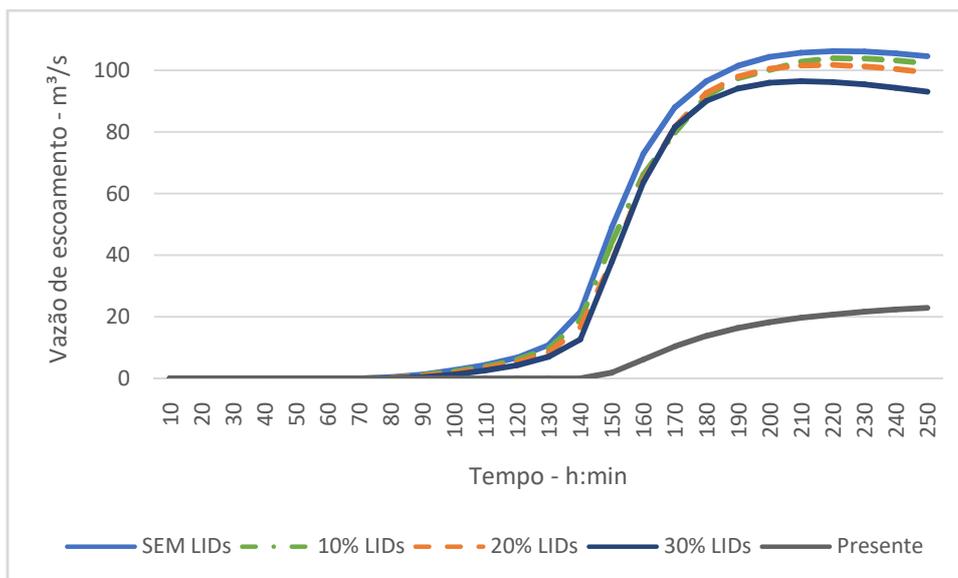


Figura 7. Vazão de escoamento para o período de retorno de 2 anos.

Fonte: Autor

Houve uma redução nas vazões máximas de escoamento, quanto maior foi considerado o uso de medidas compensatórias, menor foram as vazões de pico. Isso se dá pelo aumento da área permeável, reduzindo o volume de escoamento.

Verifica-se que para o tempo de retorno de 10 anos, o uso de LIDs em 30 % da área impermeável apresenta uma redução da vazão de pico em relação à bacia urbanizada sem o uso de medidas compensatórias de 23,98 m<sup>3</sup>/s, equivalente a 9,51 %, enquanto para os períodos de retorno de 5 anos e 2 anos, as reduções foram de 9,35 % e 9,44 %, respectivamente.

O impacto da urbanização pode ser analisado comparando o cenário presente com o cenário futuro, urbanizado sem o uso de medidas compensatórias, tem-se um aumento de 191,09 m<sup>3</sup>/s na vazão de pico, o que representa 75,93 % de aumento da vazão de escoamento superficial, para o período de retorno de 10 anos. O tempo de pico também será alterado, enquanto no cenário presente o tempo de pico é de 250 min, no cenário futuro é de 210 min.

A intensidade da precipitação influencia diretamente na resposta da bacia, sendo mais rápida quando o evento tem maior magnitude, mesmo com

as técnicas compensatórias. Isso está relacionado à capacidade de saturação do solo, atingida rapidamente, ao volume de chuva, responsável por aumentar a velocidade do escoamento e a duração, pois para chuvas com intensidade constante, há mais oportunidade de infiltração no solo. O coeficiente de escoamento superficial demonstra a razão entre o volume total escoado e o volume total precipitado em cada sub-bacia. A Tabela 7 apresenta os coeficientes de escoamento com e sem o uso de medidas compensatórias.

Tabela 7 – Coeficientes de escoamento

Sub-bacias	T (anos)					
	2		5		10	
	Sem LIDs	30% LIDs	Sem LIDs	30% LIDs	Sem LIDs	30% LIDs
<b>CBR_1</b>	0,031	0,031	0,058	0,058	0,076	0,076
<b>CBR_2</b>	0,331	0,273	0,404	0,345	0,443	0,382
<b>JQR_1</b>	0,169	0,154	0,215	0,197	0,241	0,221
<b>JQR_2</b>	0,265	0,222	0,331	0,285	0,366	0,318
<b>PDL_1</b>	0,101	0,084	0,157	0,143	0,192	0,179
<b>PDL_2</b>	0,056	0,056	0,101	0,101	0,131	0,131
<b>PDL_3</b>	0,074	0,074	0,134	0,134	0,172	0,172
<b>PDL_4</b>	0,25	0,185	0,33	0,267	0,374	0,316
<b>PDL_5</b>	0,379	0,327	0,45	0,395	0,486	0,431
<b>PRS_1</b>	0,089	0,069	0,122	0,102	0,143	0,124
<b>RLC_1</b>	0,028	0,028	0,056	0,056	0,074	0,074

Fonte: Autor

As sub-bacias com previsão de serem urbanizadas, segundo o Plano Diretor, são as da planície, próximas as áreas já urbanizadas da cidade, que compreendem as sub-bacias: CBR\_2, JQR\_1, JQR\_2 e PDL\_5. Considerando o uso das medidas compensatórias em 30 % da área impermeável das sub-bacias a redução no coeficiente de escoamento superficial é notável, com um período de retorno de 2, 5 e 10 anos, o coeficiente reduz em 13,72 %, 12,22% e 11,32 %, respectivamente, na sub-bacia PDL\_5, a sub-bacia com maior área impermeabilizada.

## 4 CONCLUSÃO

Esse estudo mostra que as simulações de cenários hidrológicos, usando de modelos computacionais, são importantes ferramentas, pois permitem avaliar previamente as alternativas para controle do escoamento. Quando comparada a vazão de escoamento de pico do cenário presente ( $60,69 \text{ m}^3/\text{s}$ ), com o cenário futuro, sem o uso de medidas compensatórias ( $252,06 \text{ m}^3/\text{s}$ ), apresentou um aumento de 75,93 %, o que evidencia a necessidade do uso de medidas compensatórias com o objetivo de diminuir o escoamento superficial ao nível de lotes, retardando o tempo de pico e o diminuindo.

As simulações foram realizadas considerando um solo não saturado, para os pavimentos permeáveis, porém a área de estudo apresenta nível de lençol freático alto, inviabilizando a utilização de dispositivos que aumentam a infiltração no solo, principalmente nos períodos de chuvas. Por essa razão, simulou-se principalmente o uso de cisternas, que possui a propriedade de retardar o tempo de pico. Os resultados deste estudo sugerem que o uso de medidas compensatórias deve ser discutido como uma alternativa de controle de inundação urbana, em conjunto com o manejo e controle do uso e ocupação do solo.

## 5 REFERÊNCIAS

ALAMY, J. E. et al. Eficiência hidrológica de telhados verdes para a escala de loteamentos residenciais. *Sociedade & Natureza*, v. 28, p. 257-272, 2016.

ALMEIDA, J. C. B. Drenagem urbana. Curitiba: Contentus, 2020.

ALVES, P. B. R. Simulações de medidas compensatórias sustentáveis de drenagem: propostas em duas microbacias urbanas. 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande.

BOULOMYTIS, V. T. G. et al. Analysis of the urbanisation effects on the increase of flood susceptibility in coastal areas. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, v. 11, n. 4, p. 30-45, 2016.

BOULOMYTIS, V. T. G. et al. How effective are the environmental-planning tools towards the urbanization process of Juqueriquerê river basin in Caraguatatuba, SP? *Revista Brasileira de Desenvolvimento Regional*, v. 11, n. 3, p. 31-55, 2015.

BOULOMYTIS, V. T. G. et al. The effectiveness of the CN method in areas with saturated soil conditions. In: *International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2017)*, 22, Hobart, Tasmania, Australia. 2017.

BOULOMYTIS, V.T.G.; ZUFFO, A. C.; GIRELI, T. Z. Watershed spatial discretization for the analysis of land use change in coastal regions. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 23, p. 101-114, 2017.

Câmara Municipal de Caraguatatuba. Plano Diretor da Cidade de Caraguatatuba. Lei n. 42, 24 de novembro de 2011.

CARVALHO, T. M. N. et al. Avaliação do uso de cisternas como medida compensatória para atenuação de picos de cheia na Bacia do Pajeú utilizando o SWMM. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)*, 22, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. 2017.

COSTA J., et al. Experimental Studies of Green Roof Systems as part of Sustainable Urban Watershed in order to minimize the problems of flooding. In: *International Conference on Urban Drainage*, 12, Porto Alegre, Brasil, 2011.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA, DAEE. Precipitações intensas no Estado de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2018.

GONÇALVES, M. S. et al. Modelagem do telhado verde como técnica de desenvolvimento urbano de baixo impacto no Distrito Federal. In: Encontro Nacional de Águas Urbanas, 12, Maceió, Brasil. 2018.

IBGE, Censo. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. 2010.

IVANAUSKAS, N. M. Caracterização florística e fisionômica da floresta atlântica sobre a formação Pariquera-Açu, na zona da morraria costeira do estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado)- UNICAMP, Campinas, 1997.

JENNINGS, A. A. et al. Rain barrel–urban garden stormwater management performance. *Journal of Environmental Engineering*, v. 139, n. 5, p. 757-765, 2013.

LIMA, R. R. M. L. Estudo de manejo de águas pluviais urbanas na cidade Natal – Rio Grande do Norte, 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

LIN, W. et al. Performance evaluation of the runoff reduction with permeable pavements using the SWMM model. *International Journal of Highway Engineering*, v. 17, n. 4, p. 11-18, 2015.

MAROTTO, C. S.; GONÇALVES, F. V.; GOMES, A. O. Redução do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica urbana através do uso de cisternas. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22, Foz do Iguaçu, Brasil. 2019.

ROSA, G. G.; CAUDURO, F. Estudo de caso de drenagem sustentável para uma cidade de pequeno porte do estado de Santa Catarina. 2018. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2018.

ROSSMAN, L. Storm Water Management Model User's Manual v.5.1. US EPA Office of Research and Development, EPA: Washington, DC, USA, 2015.

SANGALLI, N. C. et al. Modelagem hidrológica de um módulo experimental de pavimento permeável poroso utilizando o EPA SWMM. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.

SANTOS H. G. S. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, D. D.; Galvani, E. Caracterização sazonal das precipitações no município de Caraguatatuba-SP, entre os anos de 1943 a 2004. Geonorte, v. 1 n. 5, p. 1196-1203, 2012.

SEMCOG, Southeast Michigan Council of Governments. Low Impact Development Manual for Michigan: A Design Guide for Implementors and Reviewers. Detroit, MI: SEMCOG information center. 2008.

SOUZA, C. R. G. Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 6, n. 1, p. 45-61, 2005.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. Estudos Avançados. São Paulo, v. 22, n. 63, 2008.

TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas. p. 15–29, 2000.

**ANEXO A – Parâmetros físicos do cenário futuro sem medidas compensatórias**

<b>Sub-bacias</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Largura (m)</b>	<b>Declividade (%)</b>	<b>Impermeabilidade (%)</b>	<b>Coefficiente de rugosidade para o escoamento superficial na parcela impermeável</b>	<b>Coefficiente de rugosidade para o escoamento superficial na parcela permeável</b>	<b>Profundidade do armazenamento em depressão na parcela permeável da sub-bacia (mm)</b>	<b>Porcentagem da área impermeável sem armazenamento em depressão</b>
<b>CBR_1</b>	12.069,07	28.080,00	6,01	0,27	0,39	0,39	5,02	100,00
<b>CBR_2</b>	926,91	7.120,00	0,72	43,09	0,19	0,25	3,71	100,00
<b>JQR_1</b>	4.410,33	9.270,00	0,93	49,85	0,17	0,24	3,64	100,00
<b>JQR_2</b>	1.415,27	6.520,00	1,43	35,90	0,22	0,28	3,90	100,00
<b>PDL_1</b>	2.534,27	12.460,00	7,34	3,45	0,37	0,37	4,78	100,00
<b>PDL_2</b>	2.069,15	7.440,00	8,63	0,46	0,39	0,39	4,94	100,00
<b>PDL_3</b>	773,66	4.590,00	6,33	0,00	0,40	0,40	5,08	100,00
<b>PDL_4</b>	385,35	2.640,00	7,40	14,75	0,33	0,35	4,61	100,00
<b>PDL_5</b>	1.357,30	6.300,00	0,62	62,78	0,10	0,19	3,09	100,00
<b>PRS_1</b>	3.463,94	12.010,00	2,59	6,94	0,36	0,37	4,83	100,00
<b>RLC_1</b>	6.481,59	14.390,00	7,01	0,00	0,40	0,40	5,08	100,00