



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**MARCOS HENRIQUE BANDEIRA FERREIRA**

**ESTIMATIVA DE CARGAS DE FOSFATO NA ÁGUA E FÓSFORO NO SEDIMENTO**  
**NA VERTENTE MARITIMA DE FORTALEZA, CEARÁ**

**CRATEÚS-CE**  
**2022**

MARCOS HENRIQUE BANDEIRA FERREIRA

ESTIMATIVA DE CARGAS DE FOSFATO NA ÁGUA E FÓSFORO NO SEDIMENTO NA  
VERTENTE MARÍTIMA DE FORTALEZA, CEARÁ

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Janine Brandão de  
Farias Mesquita.

CRATEÚS-CE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

F442e Ferreira, Marcos Henrique Bandeira.  
Estimativa de carga de fosfato na água e fósforo no sedimento na vertente marítima de Fortaleza, Ceará / Marcos Henrique Bandeira Ferreira. – 2023.  
42 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Crateús, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Janine Brandão de Farias Mesquita.

1. Drenagem Urbana. 2. Carga difusa. 3. Fosfato na água. 4. Fósforo no sedimento. I. Título.  
CDD 628

---

MARCOS HENRIQUE BANDEIRA FERREIRA

ESTIMATIVA DE CARGAS DE FOSFATO NA ÁGUA E FÓSFORO NO SEDIMENTO NA  
VERTENTE MARÍTIMA DE FORTALEZA, CEARÁ

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovada em: 20/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Janine Brandão de Farias Mesquita (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Raimunda Moreira da Franca  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Assis e Carminha  
Aos meus avós, José, Francisca e  
Raimunda e Tia avó, Maria

## AGRADECIMENTOS

À Deus, em quem tudo posso por me dar sabedoria e fortaleza.

Aos meus pais, Francisco de Assis e Maria do Carmo por todo incentivo, apoio e confiança de que sempre posso ir mais longe.

Aos meus irmãos, Maria Carolina e Leonardo, meus primos, tios e padrinhos, minha ajuda e amparo, muitas vezes foi difícil estar longe e acabar perdendo muitos momentos juntos, mas o amor e alegria de vocês com minhas conquistas sempre me abraçaram bem de perto.

Aos meus avós, José, Francisca Maria e Raimunda e minha tia avó “mainha” Maria Francisca, meus amores, sua sabedoria, torcida e certeza de que tudo vai ficar bem me motivaram e deram coragem de enfrentar todos os desafios, nunca lhes esquecerei.

À minha amiga, Marianna Torres, as horas de conversa e risadas, se ajudando mesmo distantes sempre ouvindo as queixas e acompanhando os dramas da graduação, a vida é mais leve com sua amizade;

Aos meus muitos amigos que a UFC e Crateús me deram, minha família da graduação, a rede de apoio que me amparou durante essa trajetória. Primeiramente, minha panelinha dos primeiros semestres Maria Ellen, Evelyn, Celymara, Lucas e Leticia.

Meus amigos de muitas disciplinas e inúmeros momentos divididos Isadora, Maria Carolina, Michelle Emanuel, Nazaré, Hillary, Nadilly, Amanda, Wellington e Giovanna, pela gentileza e fraternidade que facilitaram a trajetória.

À Divisão de Apoio Educacional, pelo apoio e orientação nos momentos de dificuldade e na rotina universitária.

Aos professores e professoras, que guiaram a caminhada dessa formação, com seu conhecimento repassado, amizade, conselhos, disponibilidade, compreensão e paciência.

À minha orientadora, professora Janine Mesquita, pela orientação, confiança, paciência, compreensão, exemplo de profissional, acreditar e me apoiar.

À CAGECE pela cessão da base cartográfica da CAGECE e os recursos que viabilizaram a pesquisa.

“O que é que é

Aluvião que cai de pé, corre no chão

H<sub>2</sub>O é ouro em pó

No ponto futuro o doce e o sal vão se misturar”  
(BainaSystem)



## RESUMO

A carga de poluentes dispersas em uma bacia hidrográfica pode ser transportada e lançada pelos sistemas de drenagem urbana, representando uma fonte de poluição para os corpos receptores. Esse processo se intensifica nas grandes cidades com altas taxas de impermeabilização e diversas fontes difusas de contaminantes. A carga desses poluentes devido à variabilidade dos eventos de precipitação e imprecisão da localização dos geradores têm medição dificultada. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo aplicar uma ferramenta de modelagem para estimar e analisar as cargas de fosfato na água e fósforo no sedimento lançadas pelo sistema de drenagem urbana da Vertente Marítima de Fortaleza, Ceará, através da aplicação de um modelo hidrológico-hidráulico. Deste modo, utilizou-se o modelo computacional PCSWMM para estimar as vazões de lançamento do sistema de drenagem. A metodologia de estimativa das cargas obteve médias de carga difusa de fosfato na água entre 0,78g/dia.ha e 74,23g/dia.ha para as bacias analisadas e médias de cargas de fósforo no sedimento entre 5kg/ano e 92,84kg/ano. As análises de correlações das cargas com precipitação média (mm/dia) dos períodos analisados e a correlação da carga de fósforo no sedimento com a área impermeável (há) das sub-bacias analisadas apresentaram um modelo de estimação das cargas, com ajuste numa função potência de ordem dois ( $R^2 > 0,65$ ). A metodologia proposta é capaz de estimar cargas de fosfato e fósforo nos sistemas de drenagem e pode contribuir para o gerenciamento qualitativo do Sistema de Drenagem da Vertente Marítima de Fortaleza. Espera-se que essa metodologia possa ser aplicada em outras cidades com características hidroambientais semelhantes.

Palavras chave: Drenagem Urbana, Carga Difusa, Fosfato na Água, Fósforo no Sedimento

## ABSTRACT

The load of pollutants dispersed in a hydrographic basin can be transported and released by urban drainage systems, representing a source of pollution for the receiving bodies. This process intensifies in large cities with high levels of waterproofing and diverse diffuse sources of contaminants. The load of these pollutants, due to the variability of precipitation events and inaccurate location of generators, makes measurement difficult. In this context, the present work aimed to apply a modeling tool to estimate and analyze the phosphate loads in the water and phosphorus in the sediment released by the urban drainage system of the Maritime Strand of Fortaleza, Ceará, through the application of a hydrological-model. hydraulic. Thus, the computational model PCSWMM was used to estimate the release flows of the drainage system. The load estimation methodology obtained average diffuse phosphate load in the water between 0.78g/day.ha and 74.23g/day.ha for the analyzed basins and average phosphorus loads in the sediment between 5kg/year and 92, 84kg/year. The correlation analyzes of the loads with average precipitation (mm/day) of the analyzed periods and the correlation of the phosphorus load in the sediment with the impermeable area (ha) of the analyzed sub-basins presented a model of estimation of the loads, with adjustment in a function power of order two ( $R^2 > 0.65$ ). The proposed methodology is capable of estimating phosphate and phosphorus loads in the drainage systems and can contribute to the qualitative management of the Drainage System of the Fortaleza Maritime Side. It is expected that this methodology can be applied in other cities with similar hydroenvironmental characteristics.

Keywords: Urban Drainage, Diffuse Load, Phosphate in Water, Phosphorus in Sediment

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Impactos da urbanização sobre as águas.....	14
Figura 2	– Relação urbanização e gráficos de vazão pelo tempo.....	15
Figura 3	– Mapa de localização da bacia de drenagem da vertente marítima de Fortaleza	22
Figura 4	– Mapa de localização das sub-bacias analisadas .....	23
Figura 5	– Correlação das cargas difusas de fosfato na água (g/dia.ha) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Riacho Jacarecanga .....	29
Figura 6 -	– Correlação das cargas difusas de fosfato na água (g/dia.ha) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Náutico .....	29
Figura 7	– Correlação das cargas difusas de fosfato na água (g/dia.ha) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Riacho Maceió .....	30
Figura 8	– Correlação das cargas de fósforo no sedimento (kg/ano) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Riacho Jacarecanga .....	31
Figura 9	– Correlação das cargas de fósforo no sedimento (kg/ano) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Náutico .....	31
Figura 10	– Correlação das cargas de fósforo no sedimento (kg/ano) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Riacho Maceió .....	32
Figura 11	– Correlação da carga de fósforo no sedimento(kg/ano) com Carga fosfato na água (kg/ano) para o ano de 2004) .....	33
Figura 12	– Correlação da carga de fósforo no sedimento(kg/ano) com Carga fosfato na água (kg/ano) para o ano de 2005 .....	34
Figura 13	– Correlação da carga de fósforo no sedimento(kg/ano) com a área impermeável da bacia (ha) .....	35

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Classificação do escoamento de fluidos, segundo Von Sperling (2007) .....	19
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa de carga (g/dia.ha) de fosfato na água por sub-bacia nos anos de 2004 e 2005 .....	26
Tabela 2 – Estimativa de carga (kg/ano) de fósforo no sedimento por sub-bacia nos anos de 2004 e 2005 .....	28

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	9
2	JUSTIFICATIVA .....	11
3	OBJETIVOS GERAIS .....	12
3.1	Objetivos Específicos .....	12
4	REFERENCIAL TEORICO .....	13
4.1	Água e cidade .....	13
4.2	Poluição por Cargas Difusas.....	15
4.3	Sistema de Drenagem Urbana .....	18
4.4	Modelagem do Sistema de Drenagem Urbana .....	19
4.4.1	<i>Modelagem hidrológico e hidráulica</i> .....	19
4.4.2	<i>Modelagem de qualidade de água</i> .....	20
4.4.3	<i>Software de Modelagem</i> .....	20
5	METODOLOGIA .....	22
5.1	Caracterização da Área .....	22
5.2	Estimativa de Cargas Difusas .....	23
5.3	Estimativa de Carga de Sedimentos .....	24
5.4	Correlações.....	25
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	26
6.1	Carga de Fósforo e Fosfato por Sub-bacia .....	26
6.1.1	Carga de Fosfato na água .....	26
6.1.2	Carga de Fósforo no sedimento .....	28
6.2	Equação de Cargas .....	29
6.2.1	Equação de Carga Difusa de Fosfato .....	29
6.2.2	Equação de Carga de Fósforo no sedimento .....	31
6.3	Correlação com Carga de Fósforo no sedimento .....	33
6.4	Correlação Carga de Fósforo no sedimento e área impermeável .....	34
7	Conclusão.....	36
	REFERÊNCIAS .....	37
	ANEXO A – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE PUBLICAÇÃO CAGECE ....	42

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de drenagem urbana devem ser projetados a fim de evitar os impactos negativos do escoamento superficial da água da chuva nas cidades sobre as populações e o meio. Modernamente, a drenagem está integrada à gestão de recursos hídricos, ao abastecimento de água, à gestão de resíduos sólidos, ao esgoto e ao planejamento do uso e ocupação do solo (TUCCI, 2012). A urbanização nas grandes cidades brasileiras nem sempre é seguida de um devido ordenamento do solo e planejamento da drenagem urbana. Esse processo tem como consequência uma grande variedade de impactos ambientais negativos que afetam a qualidade de vida das populações urbanas (TUCCI, 2008).

Dentre os impactos, destacam-se eventos cada vez mais frequentes de inundações e cheias em grandes cidades relacionados diretamente à impermeabilização dos terrenos urbanos, resultando no aumento significativo da vazão de projeto dos sistemas de drenagem das águas pluviais urbanas (MARQUES *et al.*, 2013). Somado a intensa impermeabilização são esperados impactos na infraestrutura urbana de drenagem devido a previsão de intensificação de eventos severos e a possibilidade de aumento de eventos extremos de precipitação nas grandes cidades (PBMC, 2014).

Os recentes desastres após precipitação em Petrópolis-RJ, Paraty-RJ, Angra dos Reis-RJ, Recife-PE, Sul da Bahia e Norte de Minas Gerais têm levantado a discussão sobre o planejamento urbano e a drenagem urbana eficiente capazes de evitar deslizamentos, inundações e enxurradas.

O aumento da velocidade de escoamento nos ambientes urbanizados também significa um maior carregamento de sedimentos e poluentes, que estão muito mais presentes nas superfícies e no ar das cidades do que em ambientes naturais não urbanizados (BUTLER e DAVIES, 2004). Assim, o sistema de drenagem pode ser uma fonte de contaminação significativa para os recursos hídricos, uma vez que transportam diversos tipos de poluentes dispersos pela bacia de drenagem.

As superfícies das ruas, sarjetas e telhados são lavadas fornecendo a principal contribuição de poluentes para a drenagem e dando o caráter disperso a poluição das águas pluviais urbanas (RIGHETTO, GOMES e FREITAS, 2017). A contaminação por efluentes urbanos resultantes da falta de tratamento de esgotos domésticos e industriais e lançamento de esgotos pluviais é uma das principais causas da deterioração da qualidade da água de mananciais urbanos (TUCCI, 2012).

A carga de poluição difusa que é carregada pela drenagem é de difícil e complexa medição. Estas dependem principalmente dos fatores hidrológicos, de ocorrência aleatória, e do uso e ocupação do solo da bacia, característico de cada bacia de drenagem. Devido à diversidade de fontes de contaminação que ocorrem dispersas pela bacia de drenagem e a variabilidade dos eventos de escoamento, as cargas de contaminantes são extremamente variáveis (PRODANOFF, 2005).

Além disso, o controle da contaminação por fontes difusas é igualmente complexo, uma vez que o monitoramento não pode identificar com exatidão os pontos de origem que estão pulverizados pela área de influência. Conjuntamente, a regulamentação sobre o lançamento é de difícil padronização. Uma vez que há variabilidade intensa em momentos distintos de um mesmo evento de escoamento e também distinção de um evento para o outro, embora em mesmo sistema de drenagem (COSTA, 2013).

Desse modo, comumente, os lançamentos das águas pluviais são feitos sem nenhuma etapa de tratamento preliminar que minimizem os impactos, assim como, quando são adotadas tecnologias de infiltração do escoamento não são considerados os possíveis impactos dos contaminantes carregados sobre os mananciais subterrâneos (RIGHETTO; GOMES; FREITAS, 2017). Logo, o desenvolvimento de instrumentos de monitoramento do escoamento relacionado aos eventos hidrológico e a carga contaminante carregada são ponderadores para basear as decisões de gestão das águas urbanas.



## 2 JUSTIFICATIVA

O emprego da modelagem do sistema de drenagem e das cargas poluidoras tem papel fundamental para a realização de projeções de diversos cenários de eventos hidrológicos, vazões de escoamento, concentração de contaminantes e suas influências sobre a qualidade ambiental dos corpos receptores (MESQUITA, 2018). Essas projeções têm grande importância para a gestão ambiental e dos recursos hídricos em áreas urbanas, significando uma maior praticidade e redução de custos para o monitoramento da qualidade ambiental dos mananciais e a possibilidade de propor medidas mitigadoras dos impactos (GARCIA, 2005).

Dessa forma, a aplicação de um modelo computacional para a modelagem do sistema de drenagem da bacia possibilita a construção de cenários variados, bem como, relacionar a influência da carga poluidora carregada pelas águas pluviais sobre a qualidade do ambiente (MESQUITA, PEREIRA e LIMA, 2020) .

A deterioração da qualidade da água de faixas de mar urbanas devido à contaminação pode comprometer as funções ambientais desses ecossistemas, bem como, a perda da balneabilidade implica em prejuízos de ordem econômica para uma cidade turística como Fortaleza. Assim, avaliar a relação entre a descarga de esgotos pluviais e a carga de fosfato de sub-bacias de drenagem da vertente marítima, como valores de concentração de fosfato na água, fornecerá um modelo de projeção de cenários para embasar a gestão das áreas de interesse ecológico e avaliação das infraestruturas de saneamento básico das sub-bacias do Riacho Jacarecanga, Náutico e Riacho Maceió, áreas de estudo do presente trabalho.

### **3 OBJETIVO GERAL**

Aplicar uma ferramenta de modelagem do sistema de drenagem urbana da Vertente Marítima de Fortaleza, Ceará, para estimar e analisar as cargas de fosfato na água e fósforo no sedimento.

#### **3.1 Objetivos Específicos**

- Aplicar um modelo hidrológico-hidráulico para a predição de vazões nas áreas de estudo;
- Estimar as cargas poluidoras de fosfato na água e fósforo no sedimento;
- Analisar a correlação dos dados de carga estimados com indicadores de disposição inadequada de resíduos sólidos e coleta de esgoto das áreas analisadas.

## 4 REFERENCIAL TEORICO

### 4.1 Água e cidade

O processo de sedentarização da humanidade e o desenvolvimento das primeiras civilizações se dão no ambiente das margens férteis de corpos hídricos, para além do suprimento das necessidades de abastecimento, higiene, agricultura, construção e artesanato os rios moldaram o caráter logístico, comercial e de defesa das cidades desde os primeiros conglomerados urbanos até a atualidade. A relação das cidades e suas águas é marcada por proximidades e contradições. O lançamento de carga orgânica, disposição de resíduos, poluição difusa e ocupação das margens já impactavam os mananciais nas idades antiga e média, com a revolução industrial a insalubridade das grandes cidades é intensificada (BAPTISTA e CARDOSO, 2016).

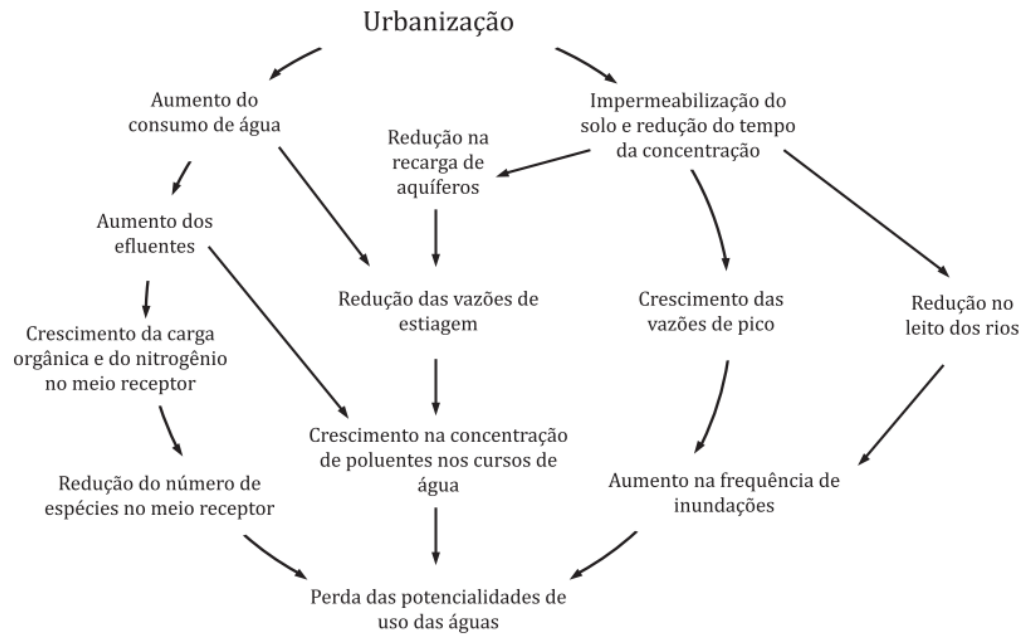
Em um contexto de epidemias e intensificação dos aglomerados urbanos na Europa, os avanços científicos do século XIX levaram à uma nova abordagem da relação da urbe com a água, pautando a elaboração de sistemas de coleta de esgotos e de drenagem urbana no combate às doenças e promoção de conforto urbano (BAPTISTA e NASCIMENTO, 2002).

O processo de ocupação do ambiente urbano acelerou consideravelmente no último século, esse processo é especialmente acentuado nos países em desenvolvimento. Até 2050, 70% da população mundial viverá em cidades (ONU NEWS, 2019), no Brasil a população já é predominantemente urbana, onde 84,72% dos habitantes vivem em cidades, que ocupam 1,2% do território nacional (IBGE, 2010).

Segundo Tucci (2012), os principais problemas no uso do solo urbano que têm impactos diretos sobre os recursos hídricos podem ser sintetizados na ocupação irregular sobre áreas de mananciais, áreas de risco de encostas e áreas de inundação, no aumento da densidade populacional e inerente aumento do consumo de água e da geração de esgotos e na impermeabilização excessiva do solo.

A combinação destas problemáticas desencadeiam impactos que culminam com a perda de corpos hídricos, redução da cobertura de água, aumento da frequência de eventos de inundação e deterioração da qualidade da água. Essa cadeia de impactos está ilustrada na Figura 1.

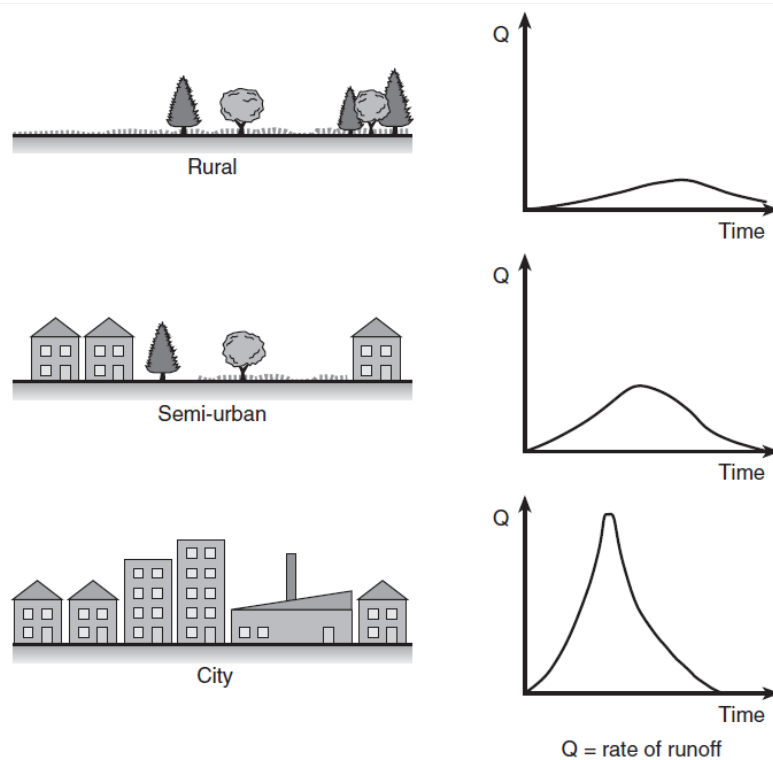
Figura 1 – Impactos da urbanização sobre as águas



Fonte: Adaptado de CHOCAT (1991) por BAPTISTA; CARDOSO (2016)

A impermeabilização do solo aumenta o volume do escoamento superficial uma vez que a infiltração e evapotranspiração são reduzidas. A chuva escoar numa velocidade maior pelas superfícies impermeáveis das cidades. Assim, um volume maior numa velocidade maior chega em um tempo menor nos rios e córregos urbanos, como apresentado na Figura 2, provocando inundações repentinas nos corpos hídricos e nas áreas da cidade de topografia desfavorável para o escoamento (BUTLER; DAVIES, 2018).

Figura 2- Relação urbanização e gráficos de vazão pelo tempo



Fonte: BUTLER; DAVIES, 2018

## 4.2 Poluição por Cargas Difusas

A relação da urbanização e a poluição da água, normalmente, é feita através dos efluentes domésticos e industriais lançados inadequadamente e disposição inadequada de resíduos sólidos. Entretanto, recentemente a poluição causada pelo escoamento superficial das áreas urbanas começou a ser notada. Desse modo, as redes de drenagem são veiculadoras de cargas poluidoras e importantes fontes de degradação de rios, lagos e estuários (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995).

A poluição gerada por esse lançamento pode ser caracterizada como de origem difusa, dado que a sua fonte está dispersa por toda área da bacia de drenagem, em telhados, pátios, calçadas, autovias, obras e praças. Uma poluição de fontes difusas pode ser caracterizada com base em cinco condições, segundo Novotny (1991):

- Seu lançamento é intermitente e está ligado aos eventos de precipitação.
- A carga poluidora é transportada a partir de uma extensa área.

- As cargas poluidoras não podem ser monitoradas desde a sua origem, mesmo porque o ponto de origem não pode ser precisamente identificado.
- As medidas de controle da poluição devem atuar sobre a área geradora, ao invés de ações exclusivamente sobre o controle do lançamento.
- O estabelecimento de padrões de qualidade para o lançamento é difícil, devido à grande variabilidade das cargas poluidoras que variam de acordo com a intensidade e duração do evento hidrológico, extensão e área da bacia de drenagem e outros fatores que dificultam a definição de uma relação vazão x carga poluidora.

Segundo Propanoff (2005), a identificação qualitativa das fontes geradoras da carga difusa carregada pelo escoamento superficial é fundamental para entender os poluentes presentes, o potencial poluidor e os impactos gerados. Embora os efeitos individuais de uma fonte sejam quase impossíveis de serem identificados, visto que a carga poluidora no escoamento é dada pela interação das diversas fontes, os conhecimentos das principais fontes de contaminantes possibilita a identificação de áreas problemáticas e a proposição de medidas de mitigação sobre essas áreas. Para Sartor e Boych (1972) as principais fontes de poluição são:

Pavimentação – a pavimentação em apresenta componentes contaminantes, com a degradação das vias esse material pode fazer parte da carga poluidora. O material agregado é tem a maior contribuição adicionado aos enchimentos e substâncias aplicadas sobre a superfície. Idade, estado e tipo de pavimento, tráfego, clima do local e eventos de derramamento de combustíveis e óleos são condicionantes da quantidade de poluentes.

Motores dos Veículos – Os veículos derramam combustíveis, fluidos lubrificantes, fluidos de freio, fluidos de ar-condicionado, partículas dos pneus, partículas das emissões, ferrugens e pedaços da lataria que se soltem. Mesmo não sendo a origem da maior porção dos contaminantes do escoamento superficial, os poluentes vindos dos veículos são os mais tóxicos e maior importância na poluição de ecossistemas aquáticos, destacada a presença de metais pesados e derivados do petróleo.

Deposição Atmosférica – Partículas que antes de serem depositadas são carregadas pelas correntes de ar vindas majoritariamente de áreas de construção, movimentações de terra, agricultura, tráfego de veículos, comércio e indústria intensos. Estabelecendo uma relação entre os poluentes atmosféricos e as cargas poluidoras das superfícies das ruas boa parte dessa deposição altera apenas a turbidez da água apresentando grande quantidade de sólidos suspensos. Entretanto, parte desses poluentes depositados são

reativos, aumentam a demanda de oxigênio ou são compostos de metais pesados e reagentes químicos. Assim como podem se depositar pela ação da gravidade na deposição seca podem ser carregados da atmosfera pela própria chuva na deposição úmida.

Vegetação – As folhas, grama, galhos, sementes, frutos e outros materiais de origem da vegetação urbana tem contribuição, sobretudo, na demanda de oxigênio, a nutrição de algas e pesticidas também estão associados à essa fonte. A distribuição desses contaminantes depende da localização, estações do ano e práticas de paisagismo e disposição da arborização urbana.

Erosão – Tanto materiais de origem orgânica como inorgânica podem ser carregados pelo escoamento em áreas de terra e ruas da bacia de drenagem. A quantidade de material erodido irá variar em função da topografia, do clima, do tipo de solo, uso do solo, áreas públicas, naturalmente áreas sem proteção da vegetação, pavimentação ou áreas de campos e lotes vagos, escavações e demolições desprotegidas apresentarão maior arraste de sedimentos. Junto com o material particulado do solo são carregados outros poluentes aderidos a eles, como óleos, metais e graxas de estacionamentos e operações industriais e comerciais.

Lixo – resíduos sólidos como embalagens, sacolas e copos plásticos, baganas de cigarro, dejetos de animais e resíduos de varrição deixados na rua intencionalmente ou não contribuem para a contaminação do escoamento superficial urbano.

Deposição – Uma contaminação muito provável, mas de difícil especificação quantitativa dos contaminantes das mais diversas origens e características dos materiais que são depositados na superfície da área urbana. Primariamente, sujeiras, areia, entulho e rejeitos, mas os de origem industrial e química apresentam maior risco.

A ineficiência dos serviços de coleta e tratamento de esgotos também representa uma importante fonte da contaminação difusa, as diversas unidades familiares sem a devida coleta das águas residuárias dispersas pela bacia impactam sobre o sistema de drenagem deteriorando a qualidade da água transportada por ele uma vez que são fontes emissoras de cargas bacteriológicas e de nutrientes consideráveis (CAMELO, 2019)

Modificação dos canais, perda da vegetação ciliar, erosão, e aumento de vazões de pico são impactos típicos da urbanização sobre mananciais. O lançamento do escoamento superficial contaminado transportado pela rede de drenagem urbana em corpos hídricos trazem impactos para além dos típicos impactos da urbanização sobre esses ambientes. A alteração da qualidade da água tem consequências sobre todo ecossistema aquático e fatores como resiliência do ambiente, estado de qualidade da água antes do lançamento, quantidade e

distribuição dos eventos meteorológicos, tipo e carga de poluentes carregados determinarão a magnitude dos impactos.

Dentre as problemáticas causadas pelos contaminantes presentes nos esgotos pluviais, podemos exemplificar: Alterações estéticas, Deposição de sedimentos, Depleção da Concentração de oxigênio dissolvido, Contaminação por organismos patogênicos, Eutrofização e danos devido a presença de tóxicos (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995).

Certamente, a grande variabilidade de fontes, de poluentes, concentrações dispersas por toda bacia, a difícil relação taxativa sobre a quantidade da produção de cargas em determinada área, e a variação da carga dessa contaminação em cada precipitação e durante uma mesma precipitação tornam os processos de monitoramento e mitigação dessa contaminação especialmente complicados (BUTLER e DAVIES, 2004).

### **4.3 Sistema de Drenagem Urbana**

Os sistemas de drenagem têm a função de coletar, transportar e lançar nos corpos receptores as águas do sistema e devem ter a capacidade de drenar grande picos de vazão de eventos hidrológicos intensos. Nas cidades essas funções são assumidas por infraestruturas artificiais, uma vez que os sistemas de drenagem natural de rios e córregos foi descaracterizado. Assim, entende-se que existem dois tipos de sistemas de drenagem os naturais e os artificiais ou urbanos (MARQUES *et al.*, 2013).

Dentro dos sistemas de drenagem urbana, existem essencialmente dois tipos de sistema, um combinado e um separado. O primeiro as águas pluviais são combinadas na mesma tubulação das águas residuais domésticas e industriais, já no segundo o esgoto pluvial flui em tubulações e canais distintos daqueles destinados às águas residuárias (BUTLER; DAVIES, 2018).

As estruturas de drenagem são classificadas com relação suas dimensões correspondentes às suas vazões de projeto. As estruturas destinadas a condução pluvial em escala local de ruas, lotes e quarteirões são definidas como de microdrenagem (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995).

Esse tipo de sistema é caracterizado por elementos físicos de projeto como sarjetas, redes de galerias, bocas-de-lobo e poços de visita. As estruturas e trechos da microdrenagem seguem a topografia e traçado das vias públicas e loteamentos (SILVA, 2014).

O projeto de estruturas de macrodrenagem destina à essas estruturas a fase final de condução das águas pluviais estando a jusante do fluxo de água advindo das estruturas de



microdrenagem. Logo, comumente os equipamentos ocupam espaços de leitos de riachos e córregos naturais mesmo que de caráter intermitente. Deste modo as vazões de projeto considerando eventos hidrológicos com maiores tempos de recorrência que os utilizados nos projetos de macrodrenagem (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995).

#### **4.4 Modelagem de Sistema de Drenagem Urbana**

A modelagem de sistemas de drenagem urbana é obtida através da aplicação de modelos hidrológicos, uma vez que o modelo hidrológico vai descrever todos os processos do ciclo hidrológico. Para transcrever esses processos da realidade para modelos matemáticos, é preciso um aprofundado entendimento dos processos de escoamento (BUTLER; DAVIES, 2018).

Segundo Von Sperling (2007), os escoamentos podem ser classificados como demonstrado no Quadro 1:

**Quadro 1 - Classificação do escoamento de fluidos, segundo Von Sperling (2007)**

Variável	Classificação	Descrição
Tempo	Permanente	Características não variam com o tempo
	Transitório	Características variam com o tempo
Trajetória das partículas	Laminar	A trajetória das partículas não varia com o deslocamento
	Turbulento	A trajetória das partículas varia com o deslocamento
Trajetória do escoamento	Uniforme	Vetor velocidade constante em módulo, direção e sentido em todos os pontos
	Variado	Vetor velocidade é variável
Número de coordenadas	Unidimensional	Apenas uma coordenada
	Bidimensional	Duas coordenadas
	Tridimensional	Três coordenadas

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2007)

#### **4.4.1 Modelagem hidrológico hidráulica**

Os fenômenos naturais apresentam grande complexidade, de forma que, para representá-los são utilizados modelos que simplificam a realidade através de equações matemáticas. Assim os modelos hidrológicos têm como base os processos do ciclo hidrológico e como objetivo descrever e quantificar os processos de escoamento numa bacia hidrográfica, possibilitando estender séries históricas de vazões de escoamento e projetar cenários que podem embasar as tomadas de decisão dos gestores (MAZIERO, 2010).

Os modelos do tipo chuva-vazão se dedicam a fornecer uma compreensão e determinação da relação entre o fenômeno pluviométrico (chuva) e o escoamento superficial (vazão), tendo como objetivo a estimativa da vazão em um ponto de interesse com base na precipitação. Existem uma gama de modelos que vão de métodos matemáticos simplificados

até modelos computacionais mais elaborados que incorporam variáveis espaço-temporais da precipitação na bacia (ROCHA, 2019).

#### ***4.4.2 Modelagem de qualidade de água***

Os processos mais relevantes no estudo do transporte de poluentes são a advecção, relacionada ao transporte pelo escoamento longitudinal do fluido e a difusão, ligada ao movimento aleatório das partículas, que em escala molecular é chamada difusão molecular e em grande escala é chamada de difusão turbulenta. Em rios e canais prevalece o transporte por advecção, sendo expresso em modelos conceituais para compreensão dos processos de transporte de poluentes pelo escoamento (MESQUITA, 2018).

Os modelos de qualidade da água podem ser modelos conceituais práticos e não necessariamente apenas modelos computacionais. Dessa forma, a análise de qualidade de um corpo hídrico, por vezes é mais viável de ser feita por modelos conceituais, equações empíricas ou o estabelecendo valores anuais de carga poluidora por unidade de área da bacia do que por modelos computacionais (JACOBSEN *et al*, 2010 apud MESQUITA, 2018).

#### ***4.4.3 Software de Modelagem***

Uma diversidade de softwares foi desenvolvida para a modelagem de fenômenos hidrológico, hidráulicos e de transporte de poluentes. Cada modelo apresenta particularidades e se aplicam à uma variedade de ambientes com limitações distintas, onde o usuário deve discernir o mais adequado baseado na problemática em estudo e na disponibilidade de dados (ALMEIDA; SERRA, 2017).

O modelo da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, o SWMM (Stormwater Management Model), é o mais detalhado e abrangente software de simulação de escoamento superficial em áreas urbanas. O modelo possibilita a simulação dos eventos de chuva-vazão considerando tubulações, reservatórios, estações de tratamento, estações de bombeamento e processos erosivos, apresentando resolução robusta, espacialmente e temporalmente, e também é capaz de simular indicadores de qualidade da água. Para isso, é requisitada uma considerável base de dados de alimentação do modelo com dados detalhados da topografia e uso do solo da bacia (obtidos a partir de base cartográfica e de geoprocessamento), estruturas do sistema, características do corpo receptor e base de dados hidrológicos (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995).

O PCSWMM é um pacote computacional desenvolvido pela Computational Hydraulics International (CHI) que incorpora o modelo SWMM a uma ferramenta de geoprocessamento (SIG) e apresenta uma interface de trabalho que facilita sua utilização de forma mais fluída e simplificando a concepção e análise de projetos de drenagem.

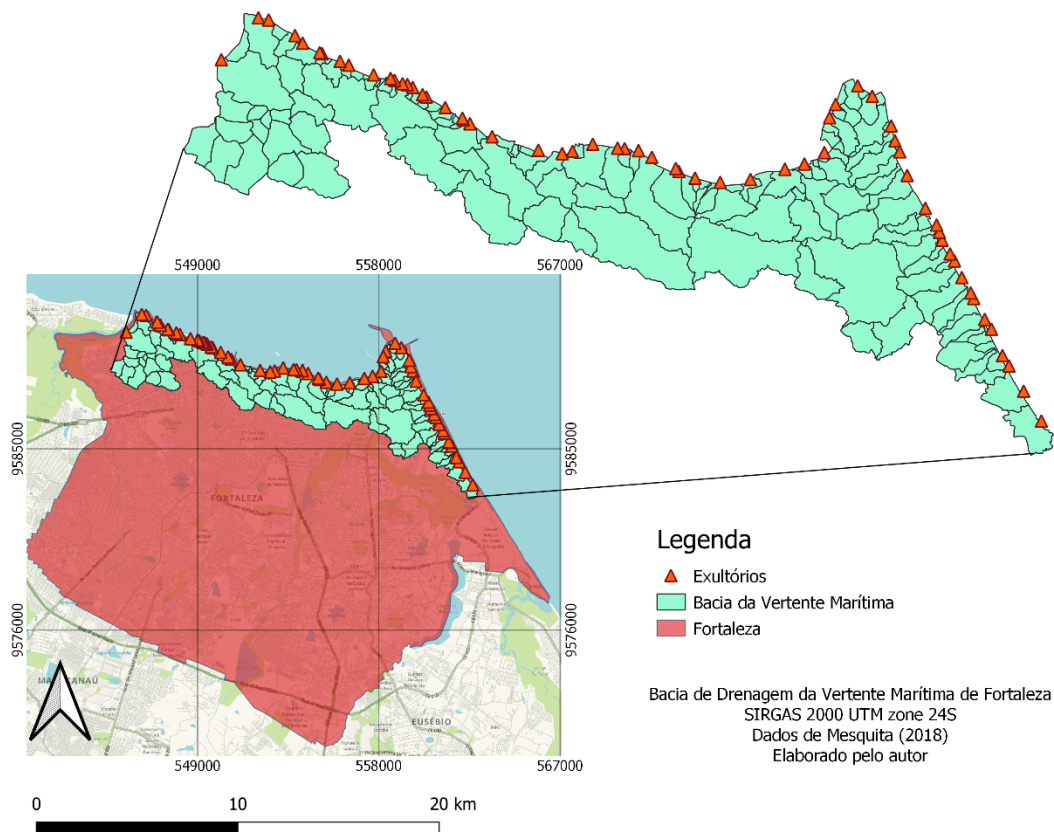
## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Caracterização da Área

A cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, no Nordeste do Brasil, possui 34km de praias banhadas pelo Oceano Atlântico, é a cidade mais populosa do estado, a quinta maior capital do país e considerada uma cidade turística. O município tem uma precipitação média anual de 1378,30 mm, concentrada no primeiro semestre, clima Tropical Quente Subúmido e com hidrografia dividida nas bacias da Vertente Marítima, do rio Cocó, do rio Maranguapinho e do rio Pacoti (FORTALEZA, 2015).

A bacia da Vertente Marítima compreende a faixa entre as bacias do Maranguapinho e do Cocó com topografia que favorece o escoamento para o mar, diretamente ou por meio de riachos ou tubulações. Por ser totalmente urbana e predominantemente residencial de grande densidade populacional, apresenta fatores de pressão sobre a drenagem como a ocupação e aterramento de caminhos preferenciais de escoamento, disposição inadequada de resíduos e lançamento de esgotos na rede de drenagem (FORTALEZA, 2015).

Figura 3- Mapa de localização da bacia de drenagem da vertente marítima de Fortaleza



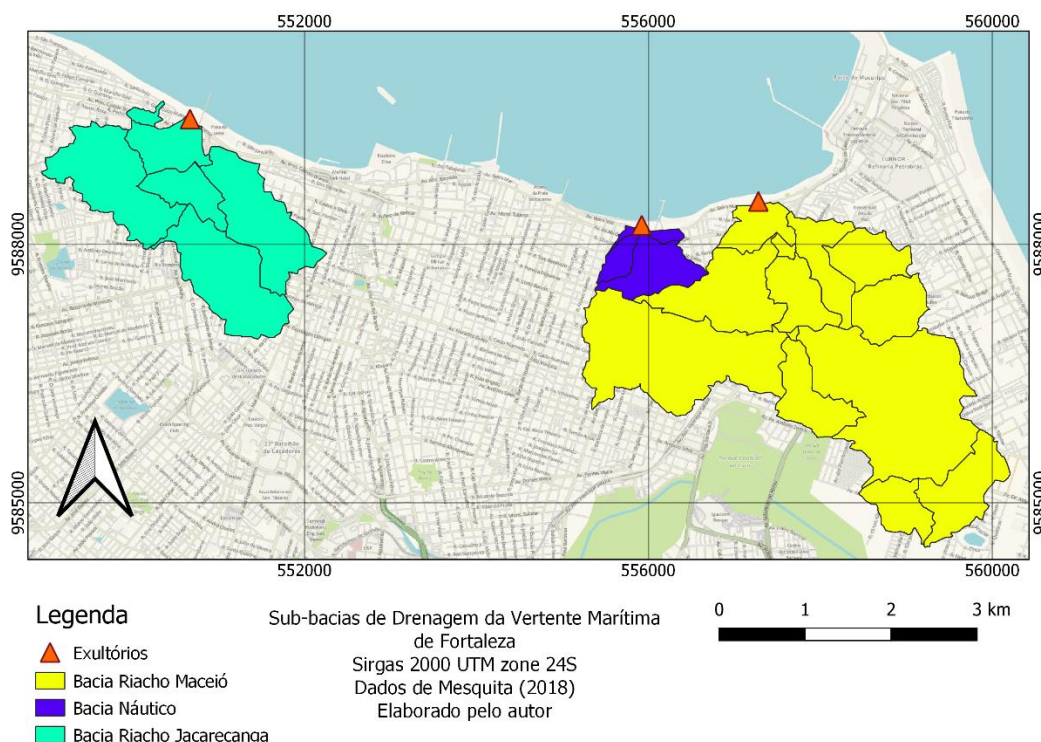
Fonte: Autoria própria

## 5.2 Estimativa de Cargas Difusas

Para a modelagem das bacias de drenagem foi utilizado o modelo validado por Mesquita (2018) com o modelo computacional SWMM. A modelagem apresenta a bacia Vertente subdividida em 139 sub-bacias, 212 junções, 60 exultórios e 208 condutos delimitados através da base cartográfica da CAGECE. As simulações de vazão foram realizadas no PCSWMM com o uso da base computacional de Mesquita (2018), sem a necessidade de adequações dos parâmetros.

Os dados de concentração de fosfato na água no exultório do sistema de drenagem disponíveis na literatura (PIMENTA, 2006) foram utilizados para estimar as cargas difusas de fosfato da Vertente Marítima aplicando a metodologia de Mesquita (2018) utilizada para estimar as cargas bacteriológicas difusas. Os pontos de coleta de Pimenta correspondem aos exultórios das sub-bacias do Riacho Maceió, Náutico e do Riacho Jacareacanga, apresentadas na Figura 4.

Figura 4- Mapa de localização das sub-bacias analisadas



Fonte: Autoria própria

As datas das coletas das amostras do trabalho de Pimenta (2006), realizadas nos anos de 2004 e 2005 em dois ciclos de coletas por ano com uma coleta por semana (um ciclo

de coletas de quatro semanas no período chuvoso e um ciclo de mesma duração no período seco) foram simuladas no PCSWMM utilizando os dados de precipitação da estação meteorológica localizada no Campus do Pici da UFC, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Foram extraídos do software os dados de vazão média no exultório das sub-bacias de drenagem do Riacho Maceió, Náutico e do Riacho Jacareacanga para os dias simulados.

Aplicando os dados de vazão simulados e a concentração de fosfato na água (PIMENTA, 2006) na Equação 1 para cada amostra analisada dos quatro ciclos de coleta.

$$Ki = Q \times C \times \frac{86400}{1000} \quad (1)$$

Em que: Ki = Carga de fosfato (g/dia); Q= vazão (L/s) e C= Concentração (mg/L)

Obtidos os valores das cargas K foi calculada a média aritmética da carga Ki para o período seco e para o período chuvoso, seguindo a Equação 2.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n Ki}{n} \quad (2)$$

Em que: K = Carga de fosfato na água média por período (g/dia) e n = número de medições realizadas por período.

Subtraiu-se a média do período seco da do chuvoso e dividiu-se pela área total da sub-bacia analisada, conforme a Equação 3, resultando a carga difusa média por área da bacia.

$$CD = \frac{Kc - Ks}{A} \quad (3)$$

Em que: CD= Carga Difusa de fosfato (kg/dia.ha); Kc = Carga de fosfato na água do período chuvoso (g/dia); Ks = Carga de fosfato na água do período seco(g/dia) e A = Área (ha).

### 5.3 Estimativa Carga de Sedimentos

Utilizando os dados de erosão numa bacia hidrográfica urbana do município de Fortaleza presentes na literatura (ARAÚJO, 2003), foram estimadas as cargas de fósforo no

sedimentos lançadas pelo sistema de drenagem urbana na orla. Com esse intuito, foi selecionado o valor de coeficiente de erosão na bacia com menor erro de previsão de HydroSed multiplicado pela área de cada sub-bacia obteve-se o valor de sedimentos lançados pelo sistema de drenagem de cada sub-bacia aplicando a Equação 4.

$$S = E \times A \quad (4)$$

Em que: S = Sedimentos erodidos (t/ano); E = coeficiente de erosão (t/ha.ano) e A = Área (ha)

Multiplicado, o sedimento lançado, à carga de fósforo no sedimento no período chuvoso disponíveis na literatura (PIMENTA, 2006) obteve-se valores de carga de fósforo para cada amostra de sedimento (assumindo que não há transporte de sedimentos pelo sistema de drenagem no período seco), conforme a Equação 5.

$$Wi = S \times Cs \quad (5)$$

Em que: Wi = Carga de fósforo (kg/ano) e Cs = Carga de fósforo no sedimento (ug/g)

Feita a média aritmética das cargas de fosfato Wi encontrou-se a carga de fósforo média lançado pela drenagem de cada bacia.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n Wi}{n} \quad (6)$$

Em que: W = Carga de fósforo média (kg/ano) e n = número de medições

### 5.3 Correlações

Tendo posse das cargas difusas de fosfato na água por área e das cargas de fósforo no sedimento para as três sub-bacias, foram correlacionados com alguns parâmetros com o intuito de generalizar o modelo de carga difusa e carga de fósforo para todas as sub-bacias da vertente marítima em função dos parâmetros analisados.

Os parâmetros foram selecionados conforme a facilidade de acesso aos dados e a relação com a geração de cargas de fósforo e fosfato, de forma a estabelecer correlações de



melhor qualidade. Assim, elegeram-se os parâmetros: percentual de rede de esgotamento sanitário e produção de resíduos sólidos coletados por serviço de limpeza pública, por sub-bacia analisada.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Carga de Fósforo e Fosfato por Sub-bacia

#### 6.1.1 Carga de Fosfato na água

Os resultados dos cálculos das cargas difusas de fosfato na água (unidade), obtidos com as vazões simuladas pelo PCSWMM e as concentrações da literatura (PIMENTA, 2006) estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1- Estimativa de carga (g/dia.ha) de fosfato na água por sub-bacia nos anos de 2004 e 2005

		2004			2005		
		Riacho Jacarecanga	Náutico	Riacho Maceió	Riacho Jacarecanga	Náutico	Riacho Maceió
	1	0,97	0,25	0,44	0,76	0,28	0,78
Fosfato na água (mg/l) chuvoso	2	-	-	-	0,30	0,01	0,30
	3	-	-	-	0,74	0,00	0,99
	4	-	-	-	0,77	0,12	1,14
Fosfato na água (mg/l) seco	1	-	-	-	0,95	0,87	0,52
	2	-	-	-	0,07	--	0,90
	3	-	-	-	1,06	--	1,23
	4	1,07	0,13	0,57	0,99	--	1,32
Vazões simuladas chuvoso (l/s)	1	76,68	22,03	50,14	3453,00	661,50	4692,00
	2	0,45	0,27	1,06	1992,00	352,70	2774,00
	3	0,45	0,27	1,06	140,50	36,00	95,50
	4	223,00	64,87	148,10	248,90	51,89	202,00
Vazões simuladas seco (l/s)	1	0,45	0,27	1,06	0,45	0,27	1,06
	2	0,45	0,27	1,06	0,45	0,27	1,06
	3	0,45	0,27	1,06	0,45	0,27	1,06
	4	0,45	0,27	1,06	0,45	0,27	1,06
carga	1	6426,40	475,85	1906,12	226737,79	16003,01	316203,26

chuvoso (g/dia)	2	-	-	-	51632,64	304,73	71902,08
	3	-	-	-	8983,01	0,00	8168,69
	4	-	-	-	16558,82	538,00	19896,19
Media		6426,40	475,85	1906,12	75978,06	4211,43	104042,56
carga seco (g/dia)	1	-	-	-	36,94	20,30	47,62
	2	-	-	-	2,72	--	82,43
	3	-	-	-	41,21	--	112,65
	4	41,60	3,03	52,20	38,49	--	120,89
	Media	41,60	3,03	52,20	29,84	20,30	90,90
CD (g/dia.ha)		6,24	2,75	0,78	74,23	24,37	43,98

Fonte: Autoria própria.

As vazões médias (l/s) simuladas pelo PCSWMM no período chuvoso para cada sub-bacia variam em ordem crescente entre 0,27 – 661,5, 0,45 – 3453,00, 1,06 – 4692,00, correspondentes as sub-bacias Náutico, Riacho Jacarecanga e Riacho Maceió respectivamente. Os dados da tabela no ano de 2004 apresentam lacunas devido a não realização de análises de concentração e no ano de 2005 apresentam lacunas na sub-bacia Náutico referentes a ausência de vazão na galeria na data de coleta.

Os valores das cargas de fosfato na água (g/dia) para os períodos chuvoso e seco através da aplicação da Equação 1 revelam que as cargas de fosfato lançadas no período chuvoso são muito superiores às do período seco. As sub-bacias com maiores valores de carga no período chuvoso são em ordem decrescente, Riacho Maceió, Riacho Jacarecanga e Náutico, as cargas de 2005 seguem essa mesma ordem, porém, nos valores referentes a 2004 na ordem decrescente de carga de fosfato na água temos Riacho Jacarecanga, Riacho Maceió e Náutico.

Com relação os valores de Cargas Difusas de Fosfato na água, os valores referentes ao ano de 2005 foram maiores que os do ano de 2004. Os maiores valores de Carga Difusa em 2004 são, em ordem decrescente, Riacho Jacarecanga, Náutico e Riacho Maceió; enquanto em 2005, em ordem decrescente, temos Riacho Jacarecanga permanecendo maior, seguido agora do Riacho Maceió e Náutico.

Os valores de carga (g/ha.dia) de fosfato encontrados para o ano de 2005 estão dentro do intervalo dos valores obtidos por Costa (2013) para duas bacias urbanas, já os resultados de 2004 estão abaixo do intervalo de valores encontrados na literatura (COSTA, 2013). Essa inconformidade dos valores de 2004 deve-se ao fato de amostras, mesmo do

período seco serem referentes dias sem eventos de precipitação que através da vazão interferem na estimativa de cargas.

### 6.1.2 Carga de fósforo nos sedimentos

Aplicada a metodologia de estimativa das cargas de fósforo nos sedimentos com dados da literatura de erosão da bacia e concentração de fósforo nos sedimentos os resultados estão detalhados na Tabela 2

**Tabela 2 – Estimativa de carga (kg/ano) de fósforo no sedimento por sub-bacia nos anos de 2004 e 2005**

	2004			2005			
	Riacho Jacarecanga	Náutico	Riacho Maceió	Riacho Jacarecanga	Náutico	Riacho Maceió	
Sedimento lançado (t/ano)	1125.52	189.2	2600.18	1125.52	189.20	2600.18	
1	47.35	32.46	30.22	24.49	34.21	42.33	
Fósforo no sedimento (ug/g)	2	-	-	12.93	23.96	37.14	
3	-	-	-	22.51	21.09	26.74	
4	-	-	-	21.99	26.48	36.61	
Carga (kg/ano)	1	53.29	6.14	78.58	27.56	6.47	110.07
2	-	-	-	14.55	4.53	96.57	
3	-	-	-	25.34	3.99	69.53	
4	-	-	-	24.75	5.01	95.19	
Média	53.29	6.14	78.58	23.05	5.00	92.84	

Fonte: Autoria própria

A quantidade de sedimentos lançados (t/ano) como esperado pela Equação 4 é proporcional a área da bacia, de forma que em ordem crescente de sedimentos lançados temos bacia Náutico, Riacho Jacarecanga e Riacho Maceió. Os valores de cargas de fósforo nos sedimentos (kg/ano) variaram entre 69,53-110.07 na bacia Riacho Maceió, 14,55-53,29 na bacia Riacho Jacarecanga e 3,99-6,47 na bacia Náutico. Quanto a média de carga de fósforo no sedimento, Riacho Maceió apresentou as maiores médias nos dois anos analisados seguido do Riacho Jacarecanga e com as menores médias o Náutico, nos dois anos.

A sub-bacia do Riacho Maceió apresenta valores maiores de cargas de fósforo no sedimento devido seu uso e ocupação do solo, característicos, diferentemente das duas outras sub-bacias que tem área urbana consolidada aquela apresenta ainda áreas de solo descoberto

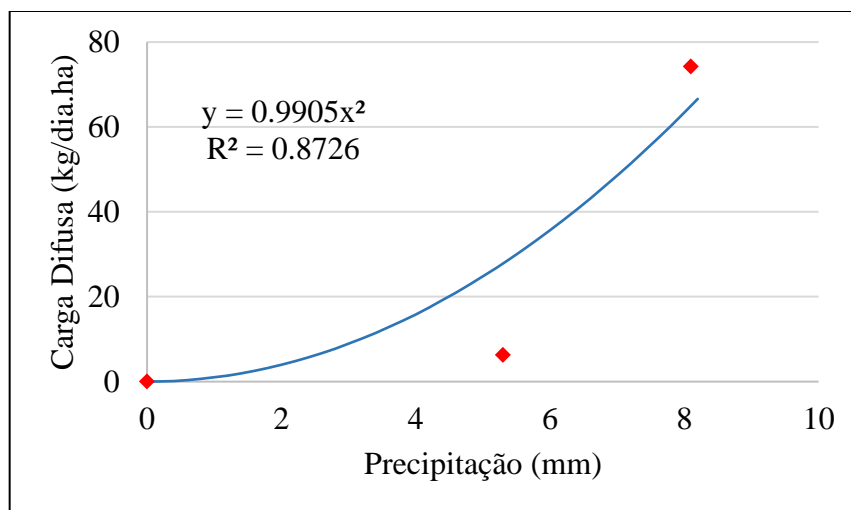
que tem maior contribuição para o aporte de fósforo no sedimento na drenagem urbana (SANTANNA, 2011).

## 6.2 Equação de Carga

### 6.2.1 Equação de Carga Difusa de Fosfato

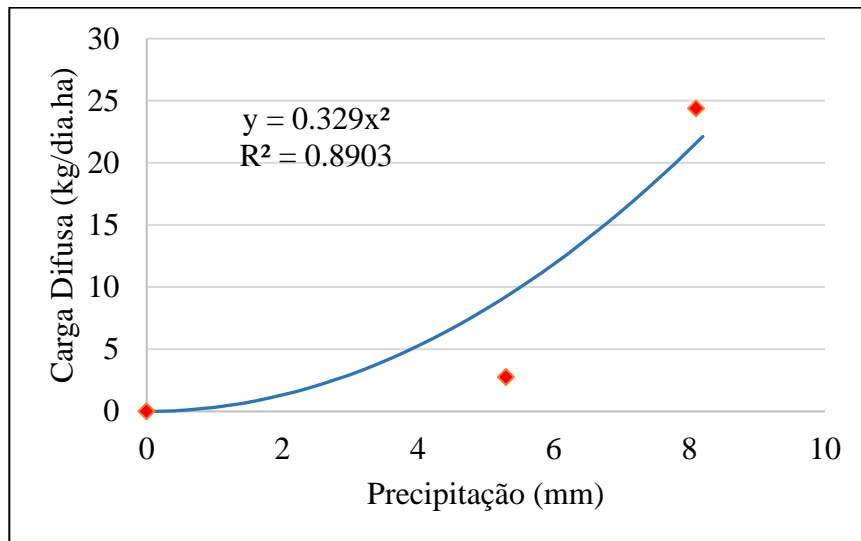
Foi realizada a correlação das Cargas Difusas de Fosfato na água (g/dia.ha) pela média de precipitação (mm/dia) dos períodos chuvosos analisados com os dados da estação pluviométrica do Pici para cada bacia, assumindo que a Carga Difusa é igual a zero quando a média de precipitação é zero. Assim com os ajustes e usando a mesma base de dados pluviométricos uma vez que as análises nas três bacias forma realizadas no mesmo período (PIMENTA, 2006), apresentadas nas Figuras 5, 6 e 7:

Figura 5 – Correlação das Cargas Difusas de Fosfato na água (g/dia.ha) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Riacho Jacarecanga



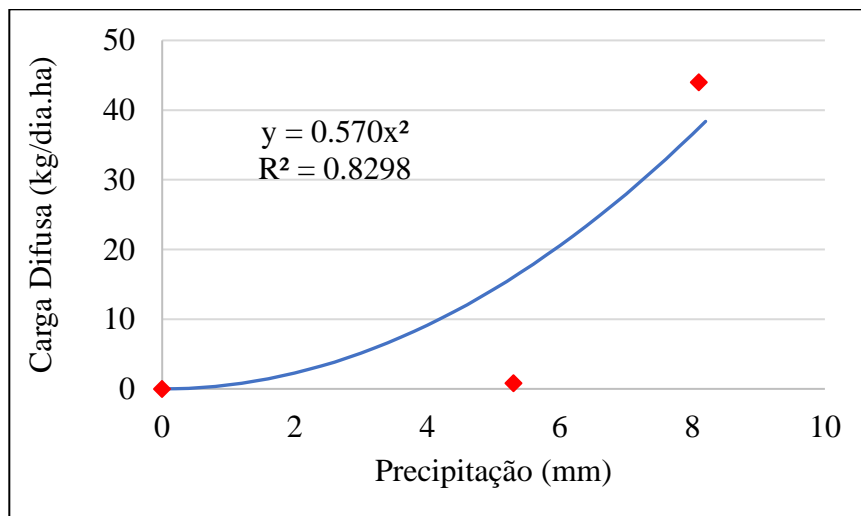
Fonte: Autoria própria

Figura 6 – Correlação das Cargas Difusas de Fosfato na água (g/dia.ha) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Náutico



Fonte: Autoria própria

Figura 7- Correlação das Cargas Difusas de Fosfato na água (g/dia.ha) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Riacho Maceió



Fonte: Autoria própria

Assim, obtiveram-se equações de determinação da Carga Difusa (kg/dia.ha) a partir da precipitação (mm) da Equação 7:

$$CD = a \times P^2 \quad (7)$$

Em que:  $a$  = coeficiente da equação ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{dia}^{-2}$ ) e  $p$  = Pluviosidade média do período ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

Os coeficientes de determinação  $R^2$  encontrados para as correlações foram de 0,8726, 0,8903 e 0,8290 para as bacias do Riacho Jacarecanga, Náutico e Riacho Maceió,

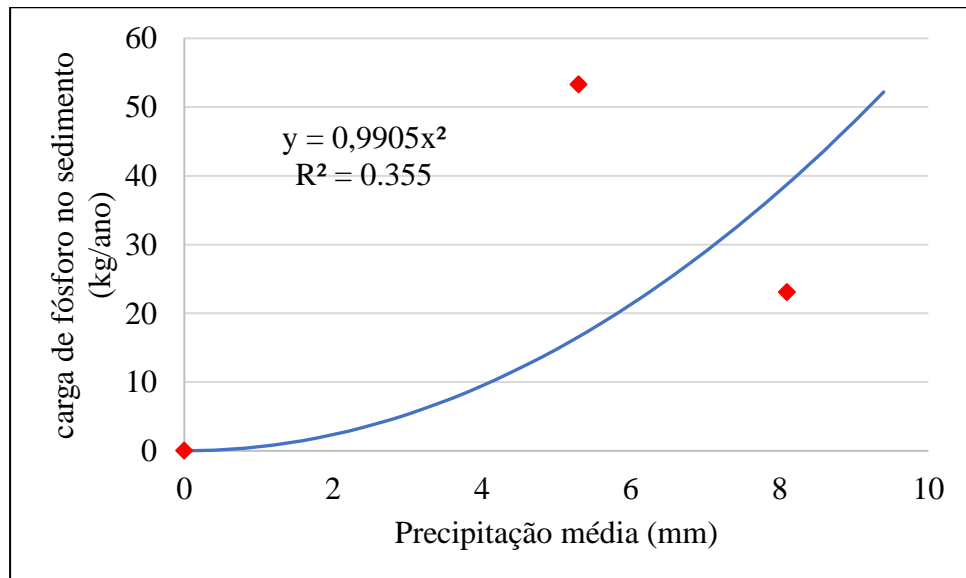
respectivamente. Os valores dos coeficientes das equações de correlação da CD com a precipitação ( $\text{kg}/\text{mm}^2 \cdot \text{ha}^2 \cdot \text{dia}^1$ ) foram de 0,9905, 0,329 e 0,570 para Jacarecanga, Náutico e Maceió, respectivamente.

Trabalhos anteriores de modelagem da qualidade da água de sistemas de drenagem urbana mostram a importância do volume precipitado no aumento da carga de poluentes lavada (CAMELO, 2019; TSUJI, 2018; BRITES & GASTALDINI, 2005). Assim, a obtenção de um modelo matemático para a carga difusa de parâmetros de qualidade de água através dos valores de precipitação pode ser uma ferramenta útil na gestão das águas urbanas (MARTINS, 2017; MESQUITA, 2020; NOGUEIRA, 2020; SOUZA, 2021)

### 6.2.2 Equação de carga de fósforo no sedimento

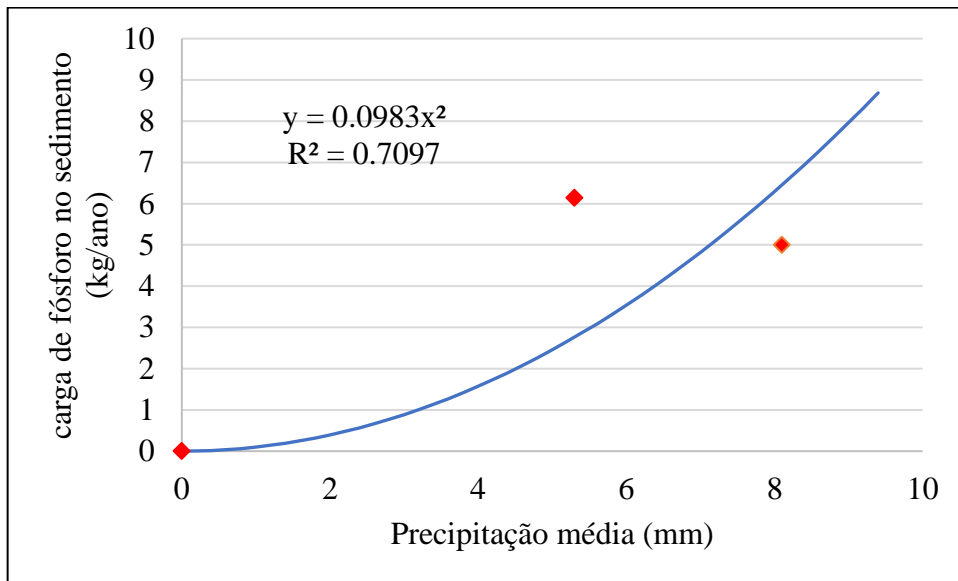
Assim como realizada com a carga difusa de fosfato na água a carga de fósforo no sedimento foi correlacionada com a média de precipitação do período das análises, com os mesmos dados de precipitação usados anteriormente temos os gráficos seguintes das correlações das bacias Riacho Jacarecanga, Náutico e Riacho Maceió, respectivamente nas Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 – Correlação das Cargas de Fósforo no sedimento ( $\text{kg}/\text{ano}$ ) pela média de precipitação ( $\text{mm}/\text{dia}$ ) na sub-bacia Riacho Jacarecanga



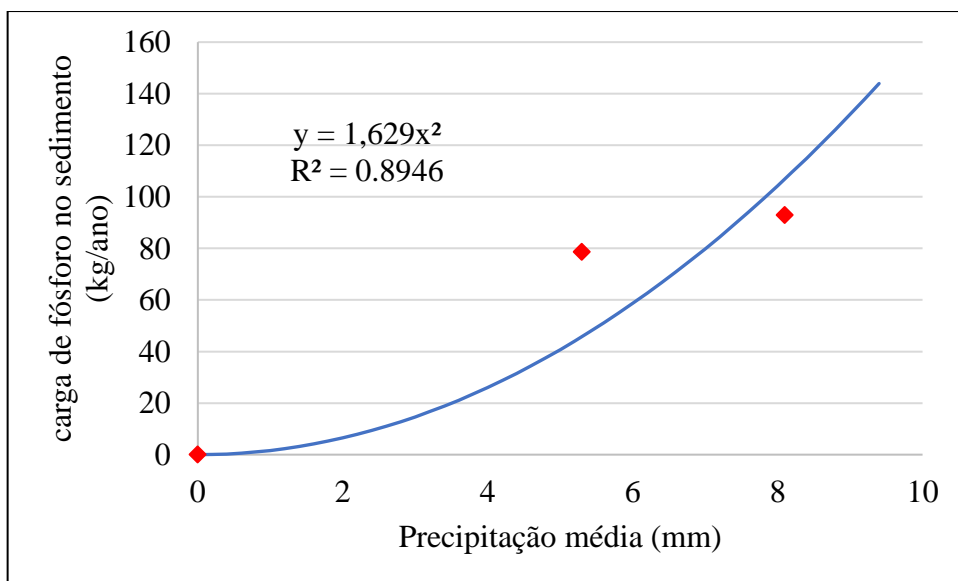
Fonte: Autoria própria

Figura 9 – Correlação das Cargas de Fósforo no sedimento (kg/ano) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Náutico



Fonte: Autoria própria

Figura 10 – Correlação das Cargas de Fósforo no sedimento (kg/ano) pela média de precipitação (mm/dia) na sub-bacia Riacho Maceió



Fonte: Autoria própria

Assim, chegam à equações de determinação da Carga de Sedimentos (kg/dia.ha) a partir da precipitação (mm) da Equação 8:

$$CS = b \times P^2 \quad (8)$$

Em que:  $c$  = coeficiente da equação ( $\text{kg.ano.mm}^{-2}.\text{dia}^{-2}$ ) e  $P$  = Pluviosidade média do período ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ).

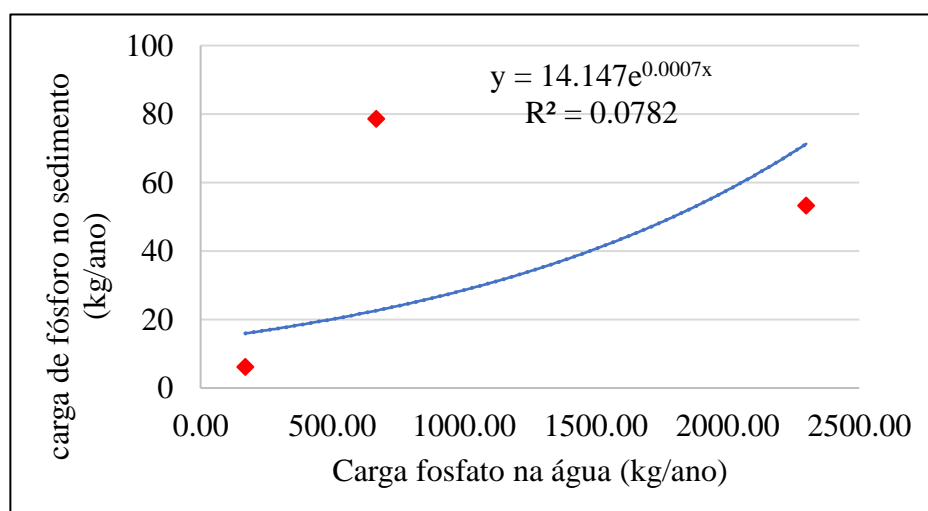
Os coeficientes de determinação  $R^2$  encontrados para as correlações foram de 0,355, 0,7097 e 0,8946 para as bacias do Riacho Jacarecanga, Náutico e Riacho Maceió, respectivamente. Os valores dos coeficientes das equações de correlação da CS com a precipitação ( $\text{kg.ano/mm}^2.\text{ha}^2.\text{dia}^1$ ) foram de 0,9905, 0,0983 e 1,629 para Jacarecanga, Náutico e Maceió, respectivamente.

Os trabalhos anteriores acerca do transporte de sedimentos pelo sistema de drenagem urbana revelam a relação direta dos fenômenos de precipitação e o aumento dos valores de descarga solida total no sistema (GOMES, 2014; COSTA, 2017; POLETO & MARTINEZ, 2011). Assim como das cargas de fósforo total (FRANZEN, 2009) de forma que a obtenção da equação da carga de fósforo no sedimento com base nas médias de precipitação tem importância para a análise não de eventos de precipitação pontuais, mas as médias de cargas transportadas por período.

### 6.3 Correlação com carga de fósforo no sedimento

Os valores médios de carga de fosfato na água ( $\text{kg/ano}$ ) do período chuvoso e de carga de fósforo no sedimento ( $\text{kg/ano}$ ) de cada bacia no mesmo ano foram correlacionados nas Figuras 11 e 12:

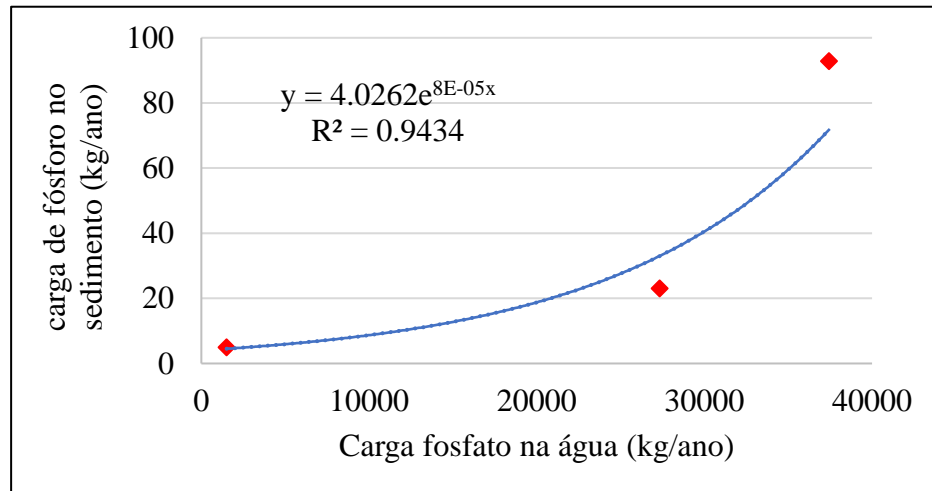
Figura 11 – Correlação da carga de fósforo no sedimento( $\text{kg/ano}$ ) com carga fosfato na água ( $\text{kg/ano}$ ) para o ano de 2004;



Fonte: Autoria própria



Figura 12 – Correlação da carga de fósforo no sedimento(kg/ano) com carga fosfato na água (kg/ano) para o ano de 2005



Fonte: Autoria própria

O valor do coeficiente de determinação  $R^2$  no ano de 2005 é de 0,9434, considerado excelente, já nos dados referentes ao ano de 2004 é especialmente baixo, 0,0782. Isso pode estar ligado ao baixo número de amostras analisadas nesse ano o que aumenta a possibilidade de desvios e erros nas médias.

Com os resultados referentes ao ano de 2005 pode ser observada uma relação direta de proporcionalidade, de forma que à medida que é observado um aumento na carga de fosfato na água um aumento também poderá ser identificado na carga de fósforo no sedimento.

#### 6.4 Correlação carga de fósforo no sedimento e área impermeável

A média da carga de fósforo no sedimento (kg/ano) foi correlacionada com a área impermeável (ha) de cada bacia, apresentada na Figura 13. Com o ajuste da equação da linha de tendência se obtém uma equação de determinação da carga de fósforo no sedimento com base na área impermeável da bacia na Equação 9:

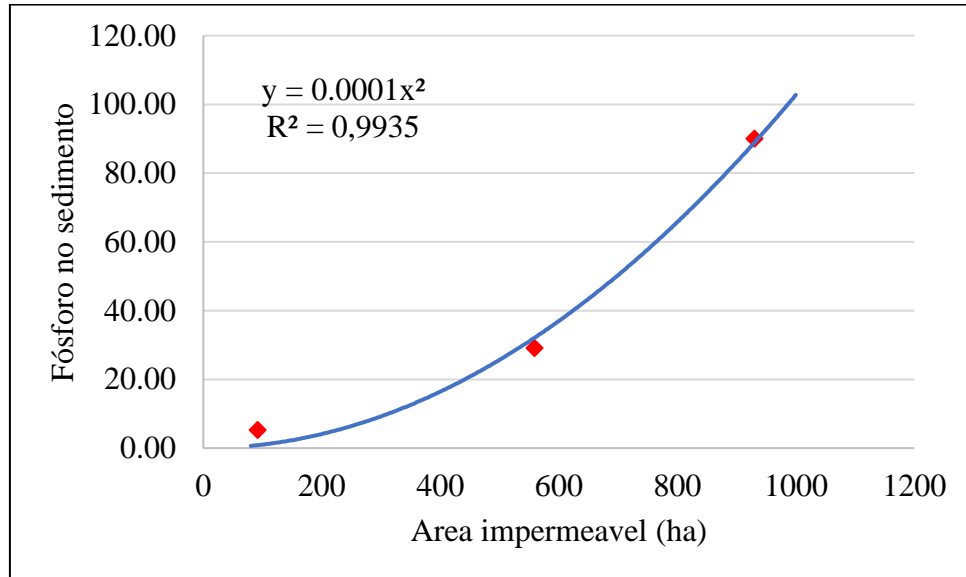
$$CS = c \times A^2 \quad (9)$$

Em que:  $b$  = coeficiente da equação ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{dia}^{-2}$ ) e  $A$  = Pluviosidade média do período ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

A equação apresentou um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,9935, indicando uma boa precisão da equação em determinar a carga de fósforo no sedimento com base na área impermeável para as amostras analisadas. O coeficiente da equação encontrado foi de 0.0001.

Nos estudos de poluentes em sedimentos o uso e ocupação do solo e área impermeável da bacia são fatores principais para determinação das cargas (LEMOS et al., 2014; NETO, 2018)

Figura 13 - Correlação da carga de fósforo no sedimento (kg/ano) com a área impermeável da bacia (ha)



Fonte: Autoria própria

## 7 CONCLUSÃO

O presente estudo teve foco na estimativa das cargas de fosfato na água e fósforo no sedimento em uma bacia hidrográfica urbanas a partir das vazões preditas por um modelo hidrológico-hidráulico e análise das correlações das cargas estimadas com indicadores de saneamento das áreas analisadas.

A aplicação do modelo hidrológico-hidráulico para predição das vazões nas áreas estudadas mostrou-se eficaz para obtenção dos dados para a estimativa das cargas lançadas nos exutórios. Foi verificada uma contribuição das carga de fosfato e fósforo muito superior no período chuvoso com relação ao período de estiagem, mesmo não identificado um padrão de concentração ligado a sazonalidade. Assim, a carga difusa tem contribuição principal no lançamento de fósforo nas sub-bacias analisadas.

Os valores médios de carga difusa de fosfato na água estimadas variaram entre 0,78g/dia.ha e 74,23 g/dia.ha, sendo a sub-bacia Riacho Jacarecanga as maiores contribuições de carga difusa lançada dentre as sub-bacias pesquisadas, seguida da Riacho Maceió e, por último, Náutico. As médias de cargas de fósforo no sedimento estimadas variaram entre 5kg/ano e 92,84kg/ano, sendo a sub-bacia Riacho Maceió as maiores contribuições de carga difusa lançada dentre as sub-bacias pesquisadas, seguida da Riacho Jacarecanga e, por último, Náutico. As correlações das cargas com médias de precipitação e a de fósforo no sedimento com área impermeável da bacia apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,65.

Diante dos resultados, a metodologia utilizada pode contribuir como ferramenta de gestão qualitativa das águas urbanas no monitoramento e quantificação do lançamento de nutrientes pela bacia da Vertente Marítima. Deste modo, podem ser propostos para trabalhos futuros:

- Aplicar a metodologia utilizando dados de vazão e qualidade de água mais recentes e com maior frequência de medição;
- Validar o modelo com dados de medições durante os eventos de precipitação;
- Estabelecer correlações empíricas entre as cargas difusas e as variáveis sanitárias da bacia hidrográfica;
- Aplicar as equações de correlação da carga difusa para serem inseridas no PCSWMM, possibilitando a modelagem de cenários para diferentes condições de precipitação e saneamento.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>
- ARAÚJO, J. C. D. Assoreamento em reservatórios do semi-árido: modelagem e validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 39-56, abr/jun 2003.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N. Aspectos Institucionais e de Financiamento dos Sistemas de Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 29-49, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v7n1.p29-49>>.
- BAPTISTA, M.; CARDOSO, A. Rios e cidades. **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, v. 20, n. 2, p. 124-153, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.35699/2316-770X.2013.2693>>
- BRITES, A.P.Z. & GASTALDINI, M.C.C. (2007) Avaliação da carga poluente no sistema de drenagem de duas bacias hidrográficas urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 211-221.
- BUTLER, D.; DAVIES, J. W. **Urban Drainage**. 2nd. ed. London and New York: Spon Press Taylor & Francis Group, 2004.
- CAGECE. Companhia de Água e Esgoto do Ceará. **Modelagem da Qualidade das Águas Costeiras de Fortaleza para a Seleção de Alternativas de Despoluição**. Fortaleza: CAGECE, jun, 2016, 55p.
- CAMELO, S. M. **Modelagem da poluição difusa em sistemas de macrodrenagem de bacias urbanas**. 2019. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019.
- COSTA, M. E. L. **Monitoramento e Modelagem de águas de drenagem urbana na bacia do lago Paranoá**. Dissertação Mestrado (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília. Brasília, p. 179. 2013.
- COSTA, Maria Elisa Leite; KOIDE, Sérgio. **O impacto da poluição difusa oriunda do sistema de drenagem urbano no lago paranoá**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1-8, 2013.
- COSTA, Pedro Oderich da. **Sedimentos em condutos de drenagem urbana: efeito das singularidades**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- CHAMUN, Camille Couto. **Avaliação da poluição difusa de esgoto doméstico veiculado à bacia hidrográfica urbana**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- FORTALEZA. **Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas do município de**

**fortaleza.** Fortaleza: Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente , 2015.

FRANZEN, Melissa. **Dinâmica do fósforo na interface água-sedimento em reservatórios.** 2009. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) -Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FREITAS, F. R. S. **Avaliação progressiva da qualidade da água do escoamento superficial de uma bacia fechada de drenagem urbana.** Natal. 2013.

Righetto, Antonio Marozzi, Gomes, Kaline Muriel e Freitas, Francisco Rafael Sousa. Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental [online].** 2017, v. 22, n. 06, pp. 1109-1120.

GARCIA, J. I. B. **Monitoramento hidrologico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrografica do arroio cancela.**2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria. [S.l.], p. 169.

GOMES, Kaline Muriel de Figueiredo. **Modelagem da poluição difusa em uma bacia de drenagem urbana.** 2014. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

LEMOS, Rodrigo Silva et al. **A evolução do uso e ocupação em uma bacia hidrográfica urbana e suas consequências para a qualidade ambiental: reflexões a partir do caso da lagoa da Pampulha, região metropolitana de Belo Horizonte.** III Seminário Nacional sobre o Tratamento de Áreas de Preservação Permanente em Meio Urbano e Restrições Ambientais ao Parcelamento do Solo, 2014

LIMA, J. P. D. **Hidrologia urbana - Sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas.** Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, 2013.

MARQUES, C. M. T. et al. **Hidrologia urbana - Sistemas de drenagem de águas pluviais urbanas.** Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de águas e Resíduos Universidade de Coimbra, 2013.

MARTINS, R.G. **Modelagem da carga de poluição difusa em escala de bacia com valores de concentração média por evento a partir de dados de uma rede de monitoramento local.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017

MESQUITA, B. D. F. **Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na Vertente.** Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental. Fortaleza. 2018.

Mesquita, Janine Brandão Farias, Pereira, Silvano Porto e Lima, Iran Eduardo. Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na Vertente Marítima de Fortaleza, Ceará. **Engenharia Sanitária e Ambiental [online].** 2020, v. 25, n. 1, pp. 205-216.

MORAIS NETO, João Vieira de. **Áreas de solo exposto intensificam o processo de eutrofização no semiárido brasileiro.** 2018. Dissertação de Mestrado. Brasil.

NEVES, M.G.F.P. **Quantificação de Resíduos Sólidos na Drenagem Urbana**. 2006. 249 f. Tese (doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

NOGUEIRA, Fabio Ferreira. **Métodos para monitoramento e estimativa de cargas poluidoras difusas em bacias hidrográficas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. doi:10.11606/D.3.2020.tde-05112020-112944.

ONU NEWS. ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050. **ONU NEWS**, 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>>. Acesso em: 9 fevereiro 2022.

PBMC. **Impactos, vulnerabilidades e adaptações às mudanças climáticas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 414. 2014.

PIMENTA, M. G. R. Determinação de contaminação de contaminação por coliformes termotolerantes, fósforo, metais traço (Cu, Pb e Hg) em água e sedimentos de galerias pluviais, 2006. Disponível em: <[http://repositorio.ufc.br/ri/bitstream/riufc/11453/1/2006\\_dis\\_mgrpimenta.pdf](http://repositorio.ufc.br/ri/bitstream/riufc/11453/1/2006_dis_mgrpimenta.pdf)>. Acesso em: 01 jul. 2022.

POLETO, C.; MARTINEZ, L. L. G. **Sedimentos urbanos: ambiente e água**. *Holos Environment*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 01–15, 2011. DOI:10.14295/holos.v11i1.3053. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/3053>. Acesso em: 10 dez. 2022.

PRODANOFF, J. H. A. **Avaliação da Poluição Difusa Gerada por Enxurradas em Meio Urbano**. Rio de Janeiro: Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005.

RIGHETTO, A. M.; GOMES, K. M.; FREITAS, F. R. S. Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, 22, n. 6, dezembro 2017. p. 1109-1120.

SANTANNA, Diego Magalhães Borges. Estimativas de cargas poluidoras em bacia hidrográfica, com ênfase nas cargas geradas para o parâmetro fósforo. 2009. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

SARTOR, J. D.; BOYD, G. B. **Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants**. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 1972.

SILVA, H. B. Qualidade da água de um parque urbano em Teresina, PI. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 05, p. 2371-2387, 2020.

SOUZA, Vladimir Caramori Borges de. Gestão da drenagem urbana no brasil: desafios para a sustentabilidade. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 58–72, 2013. DOI: 10.9771/gesta.v1i1.7105. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7105>.

TSUJI, T. M. (2018). Monitoramento e Modelagem das Águas de Drenagem Pluvial no

Núcleo Urbano da Bacia do Ribeirão Riacho Fundo, Brasília – DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM 211/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150p.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97 -112, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da Drenagem Urbana**. Brasília, DF: CEPAL Escritório no Brasil/IPEA, v. 48, p.50, 2012.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem Urbana**. 5. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1995.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WOLFF, D. B. et al. Resíduos Sólidos no Sistema de Drenagem Urbana no município de Santa Maria (RS). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 1, p. 151-158, jan/mar, 2016.

## ANEXO A – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE PUBLICAÇÃO CAGECE

Av. Dr. Lauro Vieira Chaves, 1030 - Vila União  
CEP: 60422-901 • Fortaleza / CE  
CNPJ: 07.040.108/0001-57



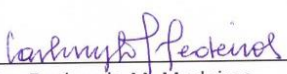
### TERMO DE AUTORIZAÇÃO

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará – Cagece, sociedade de economia mista inscrita no CNPJ sob o número 73.759.185/0001-96, com sede na av. Doutor Lauro Vieira Chaves, nº 1030 – Vila União, Fortaleza/CE, CEP 60.422-901, por meio da sua Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, representada pela gerente Cailiny Darley de Menezes Medeiros, vem, neste ato, considerando:

1. o Convênio de Receita para pesquisa voltada ao desenvolvimento de tecnologia entre a FUNCAP e a Cagece, publicado em DOE em 01/12/2020 (Extrato de Convênio 01/2020), que estabelece condições para que a Funcap selecione e apoie pesquisa científica e tecnológica cooperativa, a ser desenvolvida no Estado do Ceará, por pesquisadores vinculados a Instituições de Ensino Superior (IES) e/ou Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICT) ou por empresas, públicas ou privadas, selecionados mediante Chamada de Proposta de Pesquisa, com aporte de recursos da Cagece e Funcap, no valor total de R\$ 4.000.000,00 (quatro milhões de reais), sendo R\$ 3.000.000,00 com recursos próprios da Cagece e o restante pela FUNCAP;
2. que a pesquisa MODELAGEM INTEGRADA DA REDE COLETORA DE ESGOTO E DA DRENAGEM URBANA DE FORTALEZA-CE, coordenada pelo Prof. Iran Eduardo Lima Neto foi selecionada mediante a Chamada de Proposta de Pesquisa;
3. as disposições acerca das confidencialidades previstas na cláusula 5ª (quinta) do referido Convênio;
4. a previsão de sigilo expressa no Termo de Concessão assinado pelo coordenador da referida pesquisa, a ser estendido a toda equipe envolvida no projeto de pesquisa;
5. que a realização do trabalho envolve equipe composta por professores e alunos de cursos de graduação e pós-graduação;
6. que o Trabalho de Conclusão do Curso – TCC com o tema ESTIMATIVA DE CARGAS DE FOSFATO NA ÁGUA E FÓSFORO NO SEDIMENTO NA VERTENTE MARÍTIMA DE FORTALEZA, CEARÁ do(a) aluno Marcos Henrique Bandeira Ferreira, orientado pela Profa. Janine Brandão de Farias Mesquita, adotou informações cedidas pela Cagece;
7. que o coordenador informou não haver previsão de propriedade intelectual na referida pesquisa;
8. que o TCC foi analisado(a) pela equipe da Cagece e sua redação acatada;

Autorizamos a publicação do Trabalho de Conclusão de Curso referenciado no item 6 (seis) do presente Termo de Autorização, conforme preceitua a cláusula 5 (quinta) do Convênio de Receita firmado entre a Funcap e a Cagece.

Fortaleza, 06 de fevereiro de 2023

  
Cailiny Darley de M. Medeiros

**Gerente de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação - GEPED**