

## IV-040 - MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA INTEGRANDO DRENAGEM URBANA E HIDRODINÂMICA COSTEIRA

**Janine Brandão de Farias Mesquita<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental e Sanitarista (IFCE). Mestranda em Engenharia Civil (UFC).

**Silvano Porto Pereira<sup>(2)</sup>**

Biólogo (UFC). Mestre e Doutor em Saneamento Ambiental (UFC). Gerente de Pesquisa da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE).

**Iran Eduardo Lima Neto<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil (UFC). Mestre em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos (Universidade de Alberta, Canadá). Pós-doutor em Mecânica dos Fluidos Ambiental (Universidade de Cambridge, Inglaterra). Professor Adjunto IV da Universidade Federal do Ceará (UFC).

**Endereço:** Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental/UFC – Campus do Pici – Bloco 713, 1º andar – CEP: 60451-970 – Fortaleza (CE), Brasil – E-mail: [iran@deha.ufc.br](mailto:iran@deha.ufc.br)

### RESUMO

Fortaleza, capital do estado do Ceará, como a grande maioria das grandes metrópoles apresenta problemas relacionados ao saneamento, tanto pela baixa cobertura de serviços, como por representar possíveis fontes de poluição à orla. Desta forma, a utilização de ferramentas que possibilitem a mensuração das cargas de poluentes com vistas ao auxílio à tomada de decisão faz-se necessária. O presente trabalho objetivou analisar o impacto dos efluentes do sistema de drenagem de águas pluviais da bacia vertente de Fortaleza, Ceará sobre a balneabilidade da zona costeira, por meio da integração entre modelos matemáticos de transformação chuva-vazão, Stormwater Management Model – SWMM da Environmental Protection Agency - EPA (ROSSMAN, 2015), e hidrodinâmica costeira, Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHia (ROSMAN, 2011). Para este fim, realizou-se simulações nos períodos chuvoso e seco, do parâmetro Coliformes Termotolerantes, no sistema de drenagem utilizando o modelo SWMM e acoplou os resultados ao SisBaHia. Além disso, foi realizada a validação em termos quantitativos do modelo SWMM com dados medidos de vazão de seis sub-bacias inseridas na bacia vertente marítima, por meio de análise estatística do cálculo do desvio em relação ao ajuste perfeito do modelo, atentando que o mesmo apresenta respostas satisfatórias. O litoral de Fortaleza foi dividido em três zonas: leste, centro e oeste, o acoplamento dos modelos mostrou que o setor crítico é o oeste, ou seja, com maiores pontos ultrapassando os limites permitidos para a balneabilidade pela Resolução CONAMA 274/2000, sugerindo ser possivelmente em decorrência da baixa cobertura da rede de esgotamento sanitário, além da diminuição da mistura turbulenta devido às construções costeiras. Por fim, concluiu-se que modelo matemático integrado constitui uma ferramenta efetiva de análise do impacto dos efluentes oriundos da rede de drenagem urbana sobre balneabilidade da orla marítima e de auxílio à gestão ambiental de áreas urbanas localizadas em zonas costeiras.

**PALAVRAS-CHAVE:** Drenagem Urbana, Zona Costeira, Balneabilidade, Modelagem Matemática.

### INTRODUÇÃO

Fortaleza, capital do estado do Ceará, é uma importante e estratégica cidade turística da região Nordeste do Brasil. Possui 34 km de litoral banhados pelo oceano atlântico e a maior densidade demográfica do país (7.815,7 hab/km<sup>2</sup>), implicando em uma população de 2.500.174 habitantes (FORTALEZA, 2015).

Como a maioria das grandes metrópoles, Fortaleza apresenta problemas relacionados ao saneamento, não somente pela baixa cobertura, mas por apresentar fontes de aporte de poluentes à orla. Pereira (2012) constatou que as maiores fontes responsáveis pela alteração na qualidade da água na zona costeira são oriundas do sistema de drenagem, incluindo galerias, canais e rios. Estas são potencializadas nos períodos chuvosos, possivelmente devido ao aporte do escoamento superficial, ligações clandestinas de esgoto, bem como o extravasamento proveniente da rede de esgoto à rede drenagem pluvial, o que reduz o padrão de qualidade da água.

As supracitadas fontes proporcionam alterações nos padrões de balneabilidade da orla estabelecidos pela Resolução 274, de 29 de Novembro 2000, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que utiliza como parâmetros de referência as bactérias do grupo Coliformes (Coliformes Termotolerantes e *Escherichia coli*) e Enterococos (*Enterococcus* sp.).

Em vista disso, o uso da modelagem se torna indispensável, possibilitando a realização de análises de diagnósticos e prognósticos, interpolação e extrapolação de dados e estudo da dinâmica de determinados processos, permitindo a integração de informações espacialmente e temporalmente dispersas, sendo inquestionável a necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão de recursos hídricos, face à complexidade do ambiente em corpos de água naturais, especialmente em lagos, reservatórios, estuários e zona costeira adjacente das bacias hidrográficas (ROSMAN, 2011).

Desta forma, o presente trabalho objetiva analisar o impacto dos efluentes do sistema de drenagem de águas pluviais da bacia vertente de Fortaleza, Ceará sobre a balneabilidade da zona costeira, por meio da integração entre modelos matemáticos de transformação chuva-vazão, SWMM (ROSSMAN, 2015), e hidrodinâmica costeira, SisBaHia (ROSMAN, 2011).

## **METODOLOGIA**

### **DELIMITAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Devido à carência de dados consistentes sobre a rede de drenagem da região de interesse (bacia da vertente marítima do município de Fortaleza), como cota dos poços de visita, diâmetro das galerias por trechos e etc, foi gerada uma base cartográfica correspondente a uma nova proposta de divisão de sub-bacias hidrográficas da região e a vetorização da drenagem natural, com vistas à representação simplificada e simulações hidrológicas e hidráulicas do sistema de drenagem artificial.

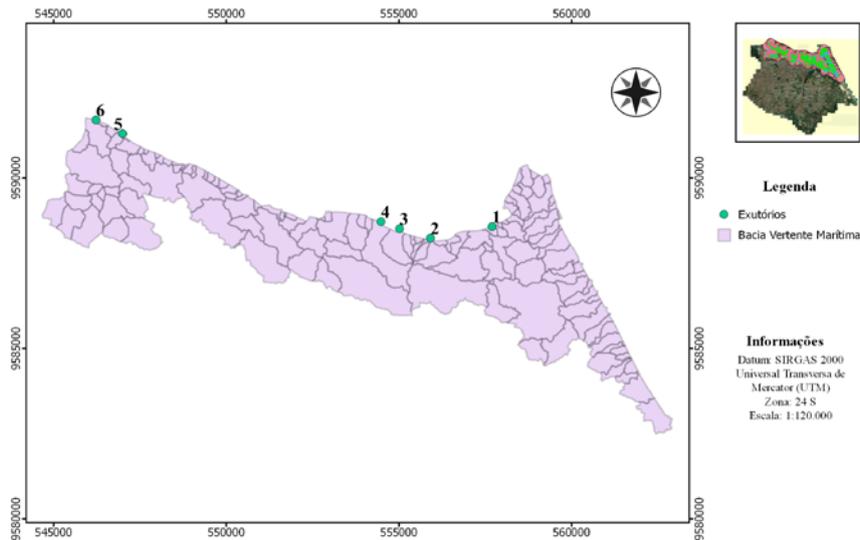
### **REDE DE DRENAGEM ARTIFICIAL**

A planta atualizada (2016) do sistema de drenagem urbana foi fornecida pela Secretaria de Infraestrutura de Fortaleza (SEINF), com a qual foi realizada uma superposição aos cursos d' água e as bacias propostas, utilizando-se o software QuantumGis versão 2.14.1, a fim de se verificar a compatibilidade física entre a vetorização dos cursos de água e a drenagem artificial atualmente implantada, necessárias a estimativa da área de drenagem contribuinte das bacias traçadas e a real estimativa das vazões afluentes ao sistema de drenagem.

### **SIMULAÇÃO, VALIDAÇÃO E ACOMPLAMENTO DOS MODELOS MATEMÁTICOS**

Com vistas à verificação da compatibilidade das bacias propostas e a eficiência dos cursos de água vetorizados na representação do sistema de drenagem artificial, foram executadas simulações hidrológica e hidráulica, utilizando o modelo chuva-vazão da Environmental Protection Agency -EPA, Storm Water Management Model – SWMM (ROSSMAN, 2015). Os dados hidrológicos foram fornecidos pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFC, da Estação meteorológica localizada no campus do Pici da UFC.

No que tange aos aspectos quantitativos, as vazões medidas no ano de 2009 foram comparadas às modeladas pelo SWMM por meio do cálculo do Desvio em relação a um gráfico de ajuste perfeito, visando a verificação da representatividade do modelo. Para tal, foram realizadas simulações no SWMM em seis bacias das quais se dispunha de dados medidos (Figura 1), no supracitado dia da medição de vazão no período chuvoso (05/03/2009). As bacias estão distribuídas ao longo da orla, nos setores Centro e Oeste. Gerou-se para cada simulação hidrogramas de 24 horas com passo de tempo de 1 hora. Nestes se identificou o ponto condizente com o dado medido.

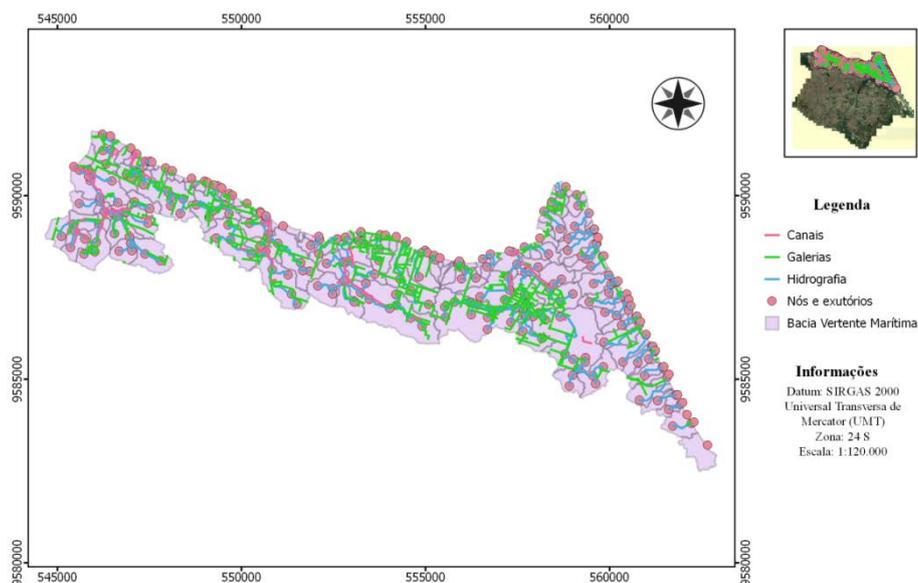


**Figura 1: Localização dos exutórios das sub-bacias utilizadas para a validação**

Após a realização das simulações com o SWMM para os referidos períodos, os resultados obtidos alimentaram um modelo de transporte lagrangeano do Sistema de Base Hidrodinâmica Ambiental –SiSBaHiA (ROSMAN, 2011), a fim de avaliar o impacto das águas da drenagem pluviais afluentes à orla marítima sobre a balneabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As bacias propostas com a hidrografia vetorizada sobreposta à planta da drenagem urbana artificial de Fortaleza, com vistas à representação desta última o mais próximo possível à realidade, estão ilustradas na Figura 2.



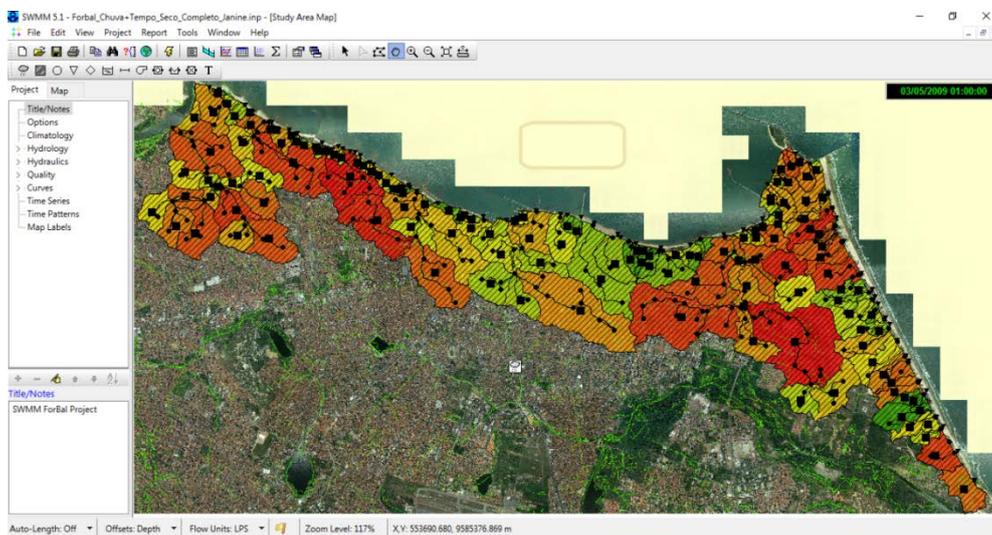
**Figura 2: Sobreposição do Sistema de Drenagem Urbana e a Hidrografia vetorizada, Fortaleza-Ceará.**

Na delimitação das bacias hidrográficas e cursos de água representativos, o exutório foi definido de modo a coincidir com a rede artificial, existindo atualmente em Fortaleza 57 saídas da drenagem que deságuam na orla (entre galerias, rios e riachos) sendo possíveis fontes de poluição fecal. Cada saída da drenagem está ligada a

uma rede, esta, por sua vez, recebe contribuição de uma área correspondente e está representada por um curso de água definido (denominado hidrografia na Figura1).

## SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO

Na verificação da efetividade da rede e das bacias propostas, foram realizadas simulações, considerando escoamento unidimensional (1D), para os períodos secos e chuvosos, tanto de quantidade como qualidade da água, utilizando o SWMM, conforme Figura 3.



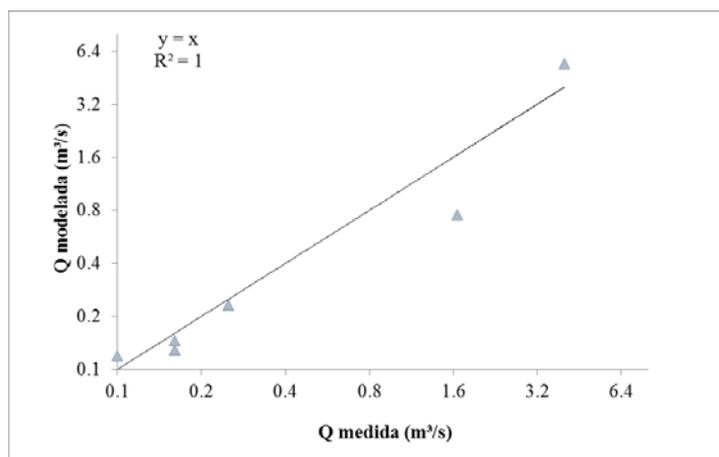
**Figura 3: Subdivisão de bacias e cursos d' água lançadas no SWMM.**

O método de infiltração de água utilizado foi o Curve Number (CN) definido para cada sub-bacia; já o modelo hidráulico foi o da onda dinâmica.

No que se refere a validação do modelo quanto à quantidade, a Tabela 01 apresenta os dados de vazão medidos comparados aos modelados pelo SWMM com datas compatíveis, com o percentual de desvio. A Figura 4 apresenta o gráfico ajuste perfeito.

**Tabela 1 – Comparação das vazões**

EXUTÓRIO	VAZÃO MEDIDA (m <sup>3</sup> /s)	VAZÃO MODELADA (m <sup>3</sup> /s)	DESVIO (%)
<b>1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.12</b>	<b>20,0</b>
<b>2</b>	<b>0.16</b>	<b>0.129</b>	<b>19,4</b>
<b>3</b>	<b>1.65</b>	<b>0.759</b>	<b>54,0</b>
<b>4</b>	<b>4.02</b>	<b>5.44</b>	<b>35,3</b>
<b>5</b>	<b>0.25</b>	<b>0.233</b>	<b>6,8</b>
<b>6</b>	<b>0.16</b>	<b>0.145</b>	<b>9,4</b>

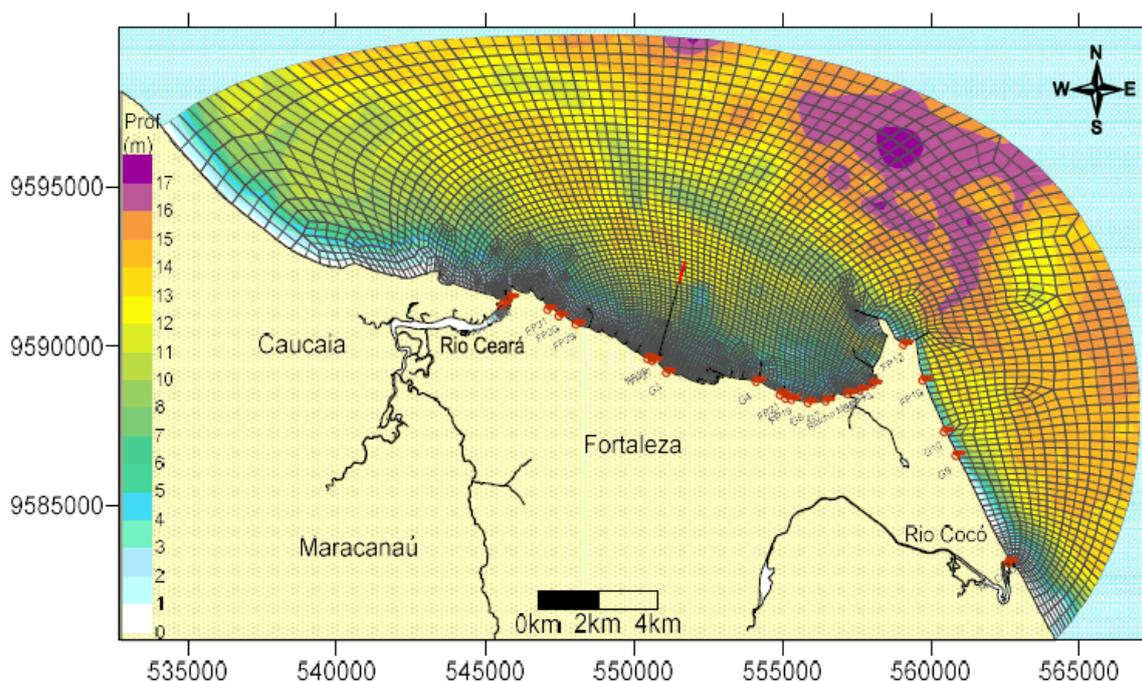


**Figura 4: Desvio das vazões medidas em relação ao ajuste perfeito.**

As sub-bacias das quais se dispõe de dados de vazão estão distribuídas ao longo dos setores Centro e Oeste da bacia vertente marítima. Como se observa, o modelo apresentou aproximações satisfatórias com os dados medidos, sendo o maior desvio de 54% e os demais inferiores a 40%. Destaca-se que as medições de campo estão sujeitas às variabilidades horárias dos lançamentos de esgoto na rede de drenagem em vista do consumo, o que pode interferir no aumento do desvio, já que as vazões foram medidas em horário pontual, e não continuamente ao longo do dia. Apesar disso, o modelo apresentou resultados compatíveis com a realidade, atentando, desta forma, sua confiabilidade na representação do Sistema de Drenagem Urbana de Fortaleza. Ressalta-se que todos os dados medidos são de galerias pluviais durante o período chuvoso.

## ACOPLAMENTO DOS MODELOS

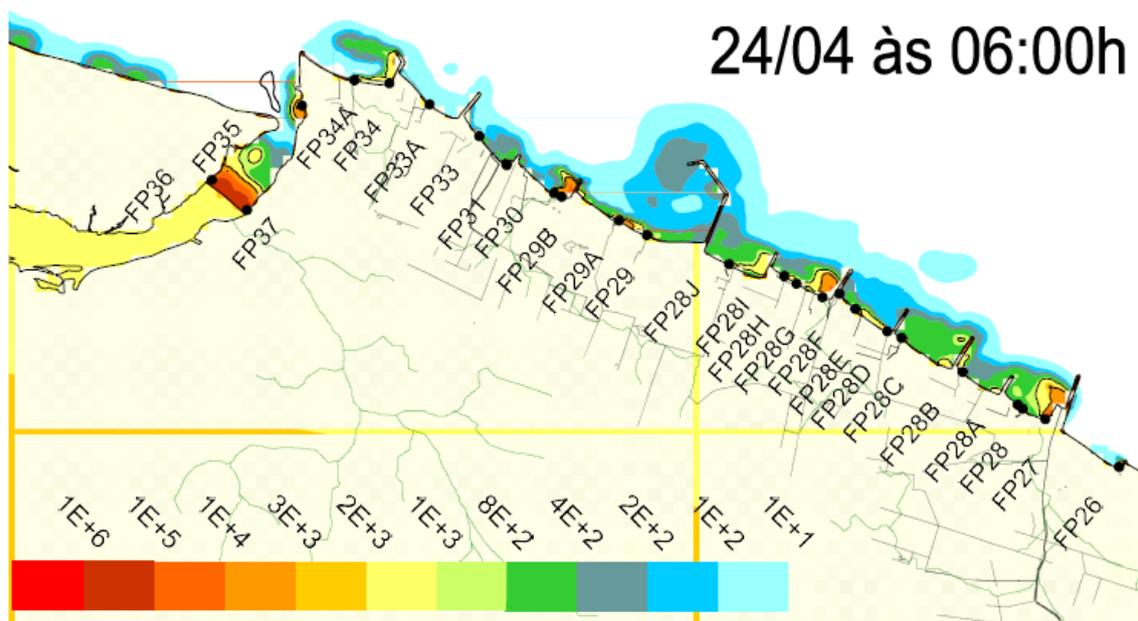
Na sequência, foi executada a simulação hidrodinâmica da zona costeira (2D) utilizando o SisBaHia, acoplado ao SWMM para os períodos propostos, conforme Figuras 5 e 6.



**Figura 5: Domínio da modelagem hidrodinâmica.**

Conforme a Figura 5, foi definido o domínio da modelagem, com malha e batimetria, além das descargas oriundas da drenagem urbana. Ressalta-se que a discretização da malha (2D), considera uma média da vertical (z) e as simulações são realizadas na horizontal (eixos x e y), tanto quantitativas quanto qualitativas.

Já a Figura 6 destaca o resultado da simulação do parâmetro Coliformes Termotolerantes nas praias do setor oeste. Conforme ilustrado na escala de valores, em considerável extensão, próximo à costa, é ultrapassado o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 274/2000 (1000NMP/100mL de amostra), fato que corrobora com diversos estudos realizados no litoral de Fortaleza sobre a contribuição da poluição fecal oriunda do sistema de drenagem urbana (VIEIRA et. al., 2002; PIMENTA, 2006; SILVA et. al., 2009; VIEIRA et. al. 2011; PEREIRA, 2012). Infere-se que tal resultado é devido à menor cobertura e quantidade de imóveis efetivamente ligados à rede de esgotamento sanitário (PEREIRA, 2012), além do efeito do quebra-mar e espigões, que potencialmente reduzem a mistura turbulenta no setor supracitado (SILVA et. al., 2009).



**Figura 6: Simulação hidrodinâmica bacteriológica na zona costeira.**

## CONCLUSÕES

Por intermédio dos resultados, conclui-se que o modelo matemático integrado constitui uma ferramenta efetiva de análise do impacto dos efluentes oriundos da rede de drenagem urbana sobre balneabilidade da orla marítima, bem como de auxílio à gestão ambiental de áreas urbanas localizadas em zonas costeiras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. Resolução N°274, de 29 de Novembro de 2000. Brasília: Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, 2000.
2. FORTALEZA. Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas do município de Fortaleza. Fortaleza: Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente. 2015
3. PEREIRA, S.P. Modelagem da qualidade bacteriológica das águas costeiras de Fortaleza (Nordeste do Brasil). 2012. 174 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, 2012.
4. PIMENTA, M. G. R. Determinação de contaminação por coliformes termotolerantes, fósforo e metais traço (Cu, Pb e Hg) em água e sedimentos de galerias pluviais., 2006. Universidade Federal do Ceará. 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: 19/09/2016.
5. ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA. 2011. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>>. Acesso em: 08/12/2016.

6. ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model – User Manual Version 5.1. Environmental Protection Agency (EPA): Office of Research and Development. EPA- 600/R-14/413b. Revisado em Setembro de 2015. Disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>>. Acesso em: 08/12/2016.
7. SILVA, A. C.; PINHEIRO, L. S.; MAIA, L. P.; MORAIS, J. O; PINHEIRO, L. Estudo Hidrodinâmico, Climático e Bacteriológico Associado às Fontes Pontuais de Poluição ao Longo do Litoral de Fortaleza. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 14, n. 2, p. 73-82, Abr/Jun. 2009.
8. SILVA, A. C.; PINHEIRO, L. S.; MAIA, L. P.; MORAIS, J. O; PINHEIRO, L. Estudo Hidrodinâmico, Climático e Bacteriológico Associado às Fontes Pontuais de Poluição ao Longo do Litoral de Fortaleza. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 14, n. 2, p. 73-82, Abr/Jun. 2009.
9. VIEIRA, R. H. S. F. et. al. Galerias pluviais como fonte de poluição de origem fecal para as praias de Fortaleza-Ceará. Arq. Ciên. Mar. 44(2) p.5 – 12, 2011.
10. VIEIRA, R. H. S. F. et. al. The stormwater drain system as a pollution vector of the seashore in Fortaleza (Ceará state, Brazil). Brazilian Journal of Microbiology. 33: p. 294-298, 2002.