



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

Kaline Muriel de Figueiredo Gomes

**MODELAGEM DA POLUIÇÃO DIFUSA EM UMA BACIA DE
DRENAGEM URBANA**

**Natal
2014**

Kaline Muriel de Figueiredo Gomes

MODELAGEM DA POLUIÇÃO DIFUSA EM UMA BACIA DE DRENAGEM URBANA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Marozzi
Righetto

Natal
2014

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede.
Catalogação da Publicação na Fonte.

Gomes, Kaline Muriel de Figueiredo.

Modelagem da poluição difusa em uma bacia de drenagem urbana /
Kaline Muriel de Figueiredo Gomes. – Natal, RN, 2012.
75 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do
Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Sanitária.

1. Poluição difusa - Dissertação. 2. Drenagem urbana - Dissertação.
3. Modelagem - Dissertação. 4. SWMM - Dissertação. I. Righetto,
Antonio Marozzi. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III.
Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.39

KALINE MURIEL DE FIGUEIREDO GOMES

**MODELAGEM DA POLUIÇÃO DIFUSA EM UMA BACIA DE
DRENAGEM URBANA**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-graduação, em
Engenharia Sanitária da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte, como
requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Sanitária.

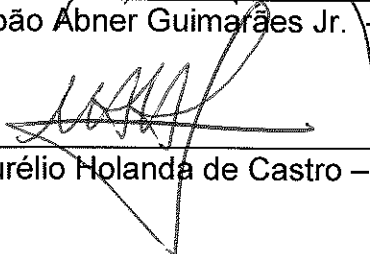
BANCA EXAMINADORA



Dr. Antonio Marozzi Righetto – Orientador



Dr. Dr. João Abner Guimarães Jr. – Examinador UFRN



PhD. Marco Aurélio Holanda de Castro – Examinador Externo UFC

Natal, 21 de Outubro de 2014

“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui...”

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força, foco e sabedoria durante essa etapa e por ter me ajudado a chegar até aqui.

A CAPES pela concessão de bolsa de mestrado.

A FINEP pelo financiamento da pesquisa através do projeto MAPLU (Manejo de Águas Pluviais Urbanas).

Ao professor e orientador Righetto, pela orientação, confiança, incentivo e pela paciência durante esses dois anos.

Aos professores do PPgES, pelos conhecimentos repassados e incentivo para na busca de novos conhecimentos.

Aos secretários, Leonor Barbosa (hoje ausente das suas atribuições), Pedro, Lucimara e Dacifran por todo suporte e esclarecimento de dúvidas.

Aos meus colegas de turma por proporcionar momentos de aprendizado juntos.

À Rafael Freitas pelo incentivo ao ingresso no mestrado e pelas valorosas contribuições na realização desta pesquisa.

À Raniere Rodrigue pela gentileza e atenção no início dessa jornada, pelos esclarecimentos e incentivo na busca de conhecimento.

Aos meus colegas do curso de engenharia Civil, Bolsistas e voluntários, Pedro, Igor, Levi, Lara, Rodrigo, Wanderson, Liv May, Larissa Naara e Ilana pela ajuda nas coletas e nas análises de laboratório. Sem vocês o exaustivo trabalho de campo não teria sido possível.

Ao meu colega de turma e técnico Paulo do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRN pelo auxílio prestado na realização dos ensaios.

Aos meus pais, Tarcísio Santiago Gomes e Antonia Vanilda de Figueiredo Gomes, aos meus irmãos Tarcísio Santiago Gomes Filho e Yasmim Karoline e a toda minha família pelo apoio nessa jornada difícil.

Ao meu companheiro Igor Leça pela paciência, amor e pelo apoio nos momentos difíceis e por me ajudar a superar meus obstáculos nesses dois anos de mestrado.

Aos colegas de trabalho do IDEMA pelo incentivo e partilha de conhecimento.

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	01
1.1	Bacia experimental – Projeto MAPLU 1.....	04
1.2	Poluição Difusa.....	05
1.3	Acumulação de poluentes na superfície da bacia (BUILDUP).....	05
1.4	Transporte de poluentes na superfície da bacia (WASHOFF).....	07
2.	OBJETIVO GERAL.....	08
2.1	Objetivos específicos.....	08
3.	ESTRUTURA GERAL DA DISSERTAÇÃO.....	09

CAPÍTULO 1 - POLUIÇÃO DIFUSA DAS ÁGUAS PLUVIAIS EM UMA		
BACIA URBANA.....		
		10
	RESUMO.....	10
	ABSTRACT.....	11
	INTRODUÇÃO.....	12
	MATERIAL E MÉTODOS.....	13
	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
	CONCLUSÕES.....	31
	REFERÊNCIAS.....	33

CAPÍTULO 2 - MODELAGEM DA POLUIÇÃO DIFUSA EM UMA BACIA		
PILOTO DE DRENAGEM URBANA.....		
		34
	RESUMO.....	34
	ABSTRACT.....	35
	INTRODUÇÃO.....	36
	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS.....	56

4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
	REFERÊNCIAS.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Representações hipotéticas de carga poluente superfície mais tempo.....	06
Figura 2	Delimitação da área da bacia de drenagem da Lagoa Mirassol, Natal, RN.....	13
Figura 3:	(a) Amostrador automático da água de escoamento superficial, (b) detalhe para a disposição das garrafas em seu interior.....	15
Figura 4:	Ponto de Monitoramento na Bacia Mirassol, Natal, RN, mostrando a localização das estações pluviométrica e fluviométrica.....	15
Figura 5:	Vista geral da estação pluviométrica do Floriano Cavalcante e de alguns de seus instrumentos, no bairro Mirassol, Natal, RN.....	16
Figura 6:	Zonas de monitoramento no período seco e os três pontos de coleta de sedimentos P1, P2 e P3, no bairro Mirassol, Natal, RN.....	18
Figura 7:	Coleta dos sedimentos secos no talvegue da bacia.....	19
Figura 8:	Análise de Regressão para as relações entre as variáveis: Demanda Química de Oxigênio (DQO): A) e C) Fósforo Total (FT): B) e D); Óleos e Graxas (TOG) E) e F) e o Material Suspenso total (SST) para eventos de precipitação pluviométrica ocorridos nos meses de julho e agosto de 2013.....	22
Figura 9:	Polutograma do evento 2/07/2013 obtido para os primeiros 25 minutos de escoamento acumulados a cada 5 minutos, na bacia Mirassol, Natal, RN.....	23
Figura 10:	Polutograma do evento 19/07/2013 obtido para os primeiros 25 minutos de escoamento acumulados a cada 5 minutos, na bacia Mirassol, Natal, RN.....	23
Figura 11:	Polutograma do evento 14/08/2013 obtido para os primeiros 25 minutos de escoamento acumulados a cada 5 minutos, na bacia Mirassol, Natal, RN.....	24

Figura 12:	Polutograma do evento 25/10/2013 obtido para os primeiros 25 minutos de escoamento acumulados a cada 5 minutos, na bacia Mirassol, Natal, RN.....	24
Figura 13:	Curvas Granulométricas.....	27
Figura 14:	(A) Teor de FT e (B) Teor de DQO para nas faixas granulométricas analisadas.....	28
Figura 15:	Representatividade média das variáveis FT e DQO por tamanho das partículas de sedimento.....	29
Figura 16:	Delimitação da área de drenagem da Bacia Mirassol, cidade de Natal, RN.....	39
Figura 17:	Mapa com a descrição do uso do solo.....	40
Figura 18:	Cobertura do solo na Bacia de Mirassol.....	40
Figura 19:	(a) Mapa das quadras e arruamentos da bacia piloto; (b) e (c) Discretização das áreas das quadras.....	41
Figura 20:	Discretização de uma bacia hipotética.....	45
Figura 21:	(a) Variação da concentração de pico com a variação da acumulação máxima e (b) Variação da concentração de pico com a variação do expoente de acumulação.....	46
Figura 22:	(a) Variação da concentração de pico com a variação do coeficiente de carreamento e (b) Variação da concentração de pico com a variação do expoente de lavagem.....	46
Figura 23:	Áreas de Influência dos pontos escolhidos para a coleta de sedimentos.....	48
Figura 24:	Classificação dos níveis de poluição e pontos de amostragem dos sedimentos.....	48
Figura 25:	Polutogramas ajustados do evento 02/07/2013.....	50
Figura 26:	Polutogramas ajustados do evento 02/07/2013.....	51
Figura 27:	Polutogramas ajustados do evento 02/07/2013.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores calibrados de C_1 e C_2 em locais estudados por Deletic et al. (1997 e 2000).Adaptado.....	07
Tabela 2 Metodologia utilizada na análise dos parâmetros da qualidade da água.....	16
Tabela 3: (a) Diâmetro médio (d_{50}) de sedimentos encontrados em áreas urbanas.....	18
Tabela 4: Concentração Média por Evento (CME).....	20
Tabela 5: Diâmetro médio (d_{50}) dos sedimentos no período seco.....	27
Tabela 6: Porcentagem média de FT e DQO por faixa granulométrica de sedimento.....	29
Tabela 7: Teor de FT e DQO para o diâmetro médio d_{50}	30
Tabela 8: Bacia totalmente limpa no início da estiagem, valores de C_1 considerado como incremento de carga no período seco antecedente.....	53
Tabela 9: Bacia considerando um remanescente de carga considerada como área com contribuição no início do evento.....	54

1. INTRODUÇÃO

A poluição difusa decorrente da drenagem urbana consiste em fonte significativa de poluição dos corpos d'água de bacias urbanas. Esses poluentes são gerados em toda a área da bacia, de forma que, quando associados às precipitações pluviométricas, são carregados para as águas de superfície.

Segundo Barco et. al. (2003) a poluição das águas pluviais ocorre principalmente no sistema de drenagem; nas precipitações intensas, carrega grande carga de poluentes para os corpos d'água. Esse transporte se torna complexo devido à deposição de sedimentos e resíduos sólidos na bacia e pela dinâmica hidráulica com que os poluentes são transportados pelo escoamento. De modo que estudos envolvendo a análise temporal e espacial, da qualidade dos deflúvios são necessários para que se possa realizar o manejo, e assim possibilitar a utilização das águas pluviais como recursos hídricos, bem como tornar possível o seu aproveitamento no abastecimento de água, na recarga de aquífero, em jardinagem, na limpeza pública etc.

Diante da complexidade da dinâmica de ocupação do espaço urbano, existe a necessidade de se buscar mecanismos que possibilitem dar respostas rápidas e de baixo custo no que se refere à qualidade dos deflúvios superficiais e que envolvam os estágios de desenvolvimento urbano de uma bacia urbana. Aliada à complexidade de ocupação da bacia, há em geral escassez de dados meteorológicos e hidráulicos nas bacias urbanas e a existência de problemas quando se consideram as dificuldades em se criar mecanismos para monitoramento da qualidade da água de drenagem com base científico-teórica, em que se busca melhor compreender os fenômenos da poluição difusa.

Os modelos são capazes de estimar eventos pluviométricos, de deflúvios, bem como, cargas poluidoras advindas do escoamento superficial. A modelagem pode ser usada ainda como ação de fundamental importância na avaliação de estratégias de controle, visando à melhoria das condições ambientais e a qualidade de corpos de água receptores.

A variabilidade das respostas das variáveis hidrológicas leva à avaliação dos sistemas de drenagem quando se dispõe de uma série de dados quali-

quantitativos, o que nem sempre acontece com o monitoramento usual da bacia.

Assim, na tentativa de suprir possíveis falhas dos dados ou mesmo, de estarem em quantidades insuficientes para a análise, adota-se a previsão de respostas do meio diante de possíveis ações que possam causar alterações sobre esse meio.

Os modelos descrevem as interações entre os processos físicos, químicos e biológicos, tornando-se possível avaliar novas respostas dos sistemas frente às situações diferentes das observadas em dados de series históricas. Com os modelos, podem ainda ser testadas medidas de controle e cenários alternativos para a bacia hidrográfica, no que se refere ao uso do solo ou a modificações no sistema de drenagem.

Um dos modelos mais utilizados para a simulação em sistemas de drenagem urbana é o *Storm Water Management Model* (SWMM), sendo considerado um dos mais detalhados e abrangentes modelos computacionais utilizados para simular quali-quantitativamente os deflúvios de áreas urbanas (GARCIA, 2005).

Com esse modelo é possível prever cargas de contaminantes ao longo do tempo de vários eventos pluviométricos, a partir de parâmetros de ajustes preliminares do modelo, como parâmetros hidráulicos, hidrológicos, de qualidade, uso e ocupação do solo, intervalos de varrição das ruas, etc. Tsihrintzis & Hamid (1997), porém, consideram que o modelo SWMM possui pouca precisão quando aplicado a eventos de precipitação individuais.

Por ser de domínio público e permitir modificações em seu código de programação, o SWMM se tornou o modelo mais utilizado em simulações dessa natureza. Todavia, Righetto *et al.* (2009) afirmam que a utilização desse modelo em bacias urbanas brasileiras ainda não apresenta uma grande difusão se comparado ao observado em alguns estudos internacionais.

Righetto *et al.* (2009) realizaram um estudo quali-quantitativo de manejo das águas pluviais urbanas em uma área de drenagem piloto da cidade de Natal. O trabalho estudou a hidrologia urbana em duas bacias pilotos da cidade, as Bacias Mirassol e Cidade Jardim, no intuito de caracterizar a

transformação chuva - vazão - qualidade. O projeto seguiu duas frentes principais de atividades: a caracterização hidrológica, hidrogeológica e ocupacional da área, levantamentos de parâmetros, monitoramento hidrológico e modelagem hidrológica; e o estudo da qualidade das águas pluviais por meio de monitoramento e de modelagem, ressalta-se que apenas para DQO foi analisada.

Ressalta-se que pesquisas envolvendo a qualidade dos deflúvios superficiais são relativamente recentes na hidrologia urbana, constituindo-se em mudança de paradigma, no sentido de focar a qualidade juntamente com a quantidade e a mitigação das inundações. O objetivo principal desse ramo científico é o de propiciar o conhecimento da dinâmica das interações entre as atividades de desenvolvimento, ocupação e uso do espaço urbano com, a qualidade ambiental, a qualidade de vida da população, com o enfoque da água pluvial como recurso hídrico (RIGHETTO *et al.*, 2009).

Esta pesquisa possui grande relevância, uma vez que os resultados obtidos poderão ser utilizados para a tomada de decisão no manejo das águas pluviais. Portanto, este trabalho é justificado pela necessidade de se obter informações com confiança dos resultados, no que se refere à qualidade da água dos deflúvios superficiais na área da bacia piloto de Mirassol, de modo prático e com baixo custo.

Com o uso do modelo SWMM, ajustado às condições da bacia piloto, será possível avaliar as respostas do sistema frente a eventos pluviométricos com diferentes magnitudes.

As informações obtidas na bacia piloto de Mirassol terão importância para o conhecimento científico, uma vez que os dados poderão eventualmente ser utilizados para outras bacias de características semelhantes (Clima, relevo, uso e ocupação, etc.) às da bacia estudada, onde seja identificada a escassez de dados qualitativos. Lerner *et. al.* (1990) afirma que muitas vezes é melhor transpor dados de uma região semelhante em outro lugar do que depender de estimativas.

1.1 Bacia experimental – Projeto MAPLU 1

O projeto Manejo de Águas Pluviais Urbanas – MAPLU 1 teve como objetivo principal estudar, em uma bacia piloto de drenagem situada no município de Natal-RN, ou seja, a Bacia de Mirassol; a geração dos deflúvios; o carreamento pelos deflúvios do material de superfície; a análise temporal da qualidade das águas de deflúvio; da capacidade de infiltração das lagoas de retenção e de infiltração; do manejo das águas acumuladas e da utilização de processos de injeção de água no subsolo.

O Projeto possuía três frentes de trabalho, a saber: i) Caracterização hidrológica, hidrogeológica e ocupacional da área, levantamentos de parâmetros, monitoramento hidrológico e modelagem hidrológica; ii) Estudo da qualidade das águas pluviais através de monitoramento e modelagem; iii) Estudo da retenção, infiltração e manejo das águas pluviais, em função da quantidade e qualidade. Teve vigência de 2 (dois) no período de 2006 a 2008 e contou com a parceria de órgãos municipais e estaduais responsáveis pelos recursos hídricos, drenagem urbana e meio ambiente; respectivamente, a Secretaria de Estado e Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH), a Secretaria Municipal de Obras e Viação (SEMOV) e a Agência Reguladora de Saneamento Básico e Ambiental (ARSBAM).

No MAPLU 1, ou seja, na primeira etapa do projeto no âmbito quantitativo, procurou-se obter informações por meio da aquisição e análise dos dados referentes ao monitoramento das componentes hidrológicas em uma bacia piloto, obtidos ao longo das estações chuvosas e durante a vigência do projeto, visando o levantamento de hietogramas, hidrogramas e observação dos volumes de infiltração e retenção para a lagoa de captação de águas pluviais existente na área de estudo, esses dados foram usados para a calibração e validação do modelo SWMM;

Já no âmbito qualitativo dos deflúvios, o objetivo foi apresentar a variação da qualidade da água de duas bacias de drenagem na cidade de Natal/RN de modo que se pudesse subsidiar a aplicação de práticas de drenagem que considerassem o aspecto qualitativo, bem como identificar potencial para o uso dessas águas. As coletas foram divididas em três fases,

as duas primeiras diretas no exutório de uma das bacias e a terceira, em coletores distribuídos ao longo sua superfície de drenagem. Foi constatado que todos os parâmetros estudados apresentaram uma elevada carga poluidora inicial, apresentando entre eles indicadores biológicos fecais. A água do escoamento superficial das duas bacias não apresentaram risco de salinidade e sodicidade para uso em irrigação, todavia devendo ser observado o teor de cloreto na escolha do método em caso de uso para a irrigação.

1.2 Poluição Difusa

A alta taxa de urbanização das bacias vem sendo a principal causa do aumento significativo no escoamento superficial, com consequências para o aumento das inundações e a diminuição da qualidade da água é devido principalmente ao acúmulo de poluentes na superfície do solo.

Porto (1995) afirma que as redes de drenagem urbana são responsáveis pela veiculação de cargas poluidoras, constituindo-se um importante fator de degradação de rios, lagos e estuários. A poluição difusa é gerada pelo escoamento superficial em áreas urbanas e é proveniente da acumulação de poluentes, que são depositados de maneira esparsa na superfície da bacia.

Normalmente, a maioria das pesquisas referentes à poluição difusa tem se concentrado na avaliação das variações temporais dos parâmetros de qualidade de águas pluviais, que podem incluir incertezas e aumentar o risco de falha nas estruturas de controle. Assim, a variação espacial da poluição difusa é o fator-chave nos estudos das fontes de poluição na bacia.

1.3 Acumulação de poluentes na superfície da bacia (BUILDUP)

Para se avaliar os impactos gerados pela poluição difusa, é necessária a identificação das fontes de acumulação de poluentes. As principais fontes geradoras das cargas poluentes são: deposição atmosférica, desgaste da pavimentação, veículos, restos de vegetação, resíduos sólidos e poeira, restos

de dejetos de animais, derramamentos e erosão (USEPA, 1977 apud Tucci 1995).

Duncan (2003, apud Dotto 2006) estudou a acumulação de sedimentos em superfícies impermeáveis concluindo que esse processo pode ser descrito por um equilíbrio dinâmico, sendo alternado entre a acumulação e o carreamento do material acumulado na superfície da bacia como ilustrado na figura 01.

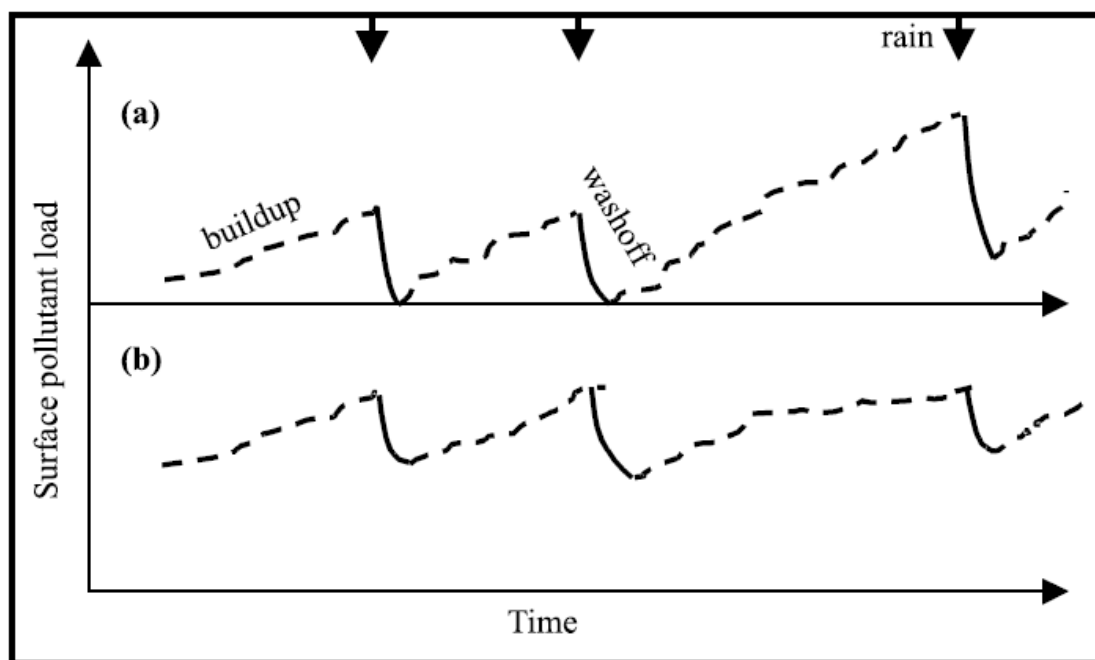


Figura 1: Representações hipotéticas de carga poluente superfície mais tempo.

As áreas urbanas nem sempre possuem uma acumulação real de poluentes de forma linear. Sartor & Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997) verificaram a acumulação de sedimentos do tipo exponencial, associando entre a quantidade de sólidos acumulados na superfície e o período de tempo seco antecedente. Tendo encontrados dois parâmetros de ajuste, que são determinados para cada local, C1 e C2 como mostrado na tabela abaixo.

Tabela 1: Valores calibrados de C_1 e C_2 em locais estudados por Deletic et al. (1997 e 2000). Adaptado

Local	Fonte	Uso do solo	C1	C2
Beechwood, Dundee, Escócia	Deletic et a. 2000	Residencial, estacionamento	27	0,015
Comercial Street, Dundee, Escócia	Deletic et a. 2000	Rua com tráfego intenso	100	0,100
Mijakovac-Belgrade, Suécia	Deletic et a. 1997	Rua com tráfego médio	10	0,145
Lund, Suécia	Deletic et a. 1997	Estacionamento	18	0,015

1.4 Transporte de poluentes na superfície da bacia (WASHOFF)

Intensidade e duração dos eventos tem papel importante na quantificação das cargas poluentes presentes nos deflúvios superficiais. As concentrações de poluentes geralmente possuem seus valores mais elevados no início do evento se comparadas ao meio e final. As cargas de poluentes acumuladas na superfície da bacia são rapidamente lavadas no início dos eventos pluviométricos, e no decorrer do evento os poluentes disponíveis para lavagem são esgotados e com isso diminuindo as concentrações.

Graf (1971) e Vanoni (1975) apud James (2003) enfatizam que o transporte de poluentes sobre uma superfície, é devido à erosão ocorrida durante o evento pluviométrico; esse processo pode ser descrito pela teoria dos transportes de sedimentos.

Vaze & Chiew (2003) concluíram em seu estudo que a energia das gotas de chuva era um fator importante no começo do evento, quando as concentrações desses poluentes eram maiores, podendo ocasionar um desprendimento das partículas colocando-as em movimento.

Vaze & Chiew (2003) em um estudo em superfícies impermeáveis, mostraram que uma quantidade significativa de poluentes encontrados no escoamento superficial é transportada como poluentes associados aos sedimentos. De modo que, conhecer a granulometria dos sedimentos é importante para que se possa compreender o processo da acumulação de poluente em função da geração de sedimentos pela bacia. Os autores

descobriram que praticamente toda a carga de Nitrogênio e Fósforo em amostras de águas pluviais estão ligados a sedimentos entre 11 e 150 μm .

Gastaldini e Silva (2011), em estudo realizado numa bacia hidrográfica do Canela, localizada em Santa Maria, quantificaram os poluentes em superfícies impermeáveis ligados a sedimentos de granulometrias diferentes. As amostras de sedimentos secos foram separadas em quatro faixas granulométricas (63 μm , 63-250 μm , 250-500 μm e 500 μm), sendo que poluentes orgânicos, nutrientes e metais pesados foram avaliados para cada faixa granulométrica. Concluíram que, para a DQO e fosfato a maior quantidade destes poluentes foram encontrados na faixa granulométrica acima de 500 μm .

Settle et. al. (2007) analisaram sólidos suspensos e fósforo como parâmetros indicadores de poluição. Verificaram que os Sólidos agem como um substrato móvel para o transporte de outros poluentes, como metais pesados e hidrocarbonetos.

O SWMM denomina copolvente o agente poluente que influencia a concentração de outros poluentes e cofração a razão da concentração do copolvente no escoamento dos deflúvios que contribui para a concentração do poluente considerado. Um exemplo disto é o caso em que a concentração de um determinado metal pesado no escoamento se torna uma fração fixa da concentração de sólidos em suspensão do escoamento, sendo os sólidos declarados como copolventes do metal pesado.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é calibrar um modelo às condições físicas e ambientais de uma bacia experimental urbana situada na cidade de Natal, a fim de que o modelo possa fornecer resultados confiáveis numa simulação da propagação de poluentes na bacia em estudo.

2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, cita-se: 1) Avaliar temporalmente a concentração de poluentes na área de estudos; 2) Avaliar o teor de poluentes gerados a partir de uma porção fixa de sedimentos oriundos da bacia piloto; 3)

Verificar a influencia do período de estiagem anterior aos eventos nos resultados do modelo; 4) Ajustar manualmente os parâmetros do modelo às condições ambientais da bacia.

3. ESTRUTURA GERAL DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido da seguinte forma: O primeiro capítulo, intitulado “Avaliação da poluição difusa em uma bacia urbana”, representa a primeira etapa da pesquisa, onde são mostrados os resultados do monitoramento de 10 eventos pluviométrico ocorridos entre maio e outubro de 2013, e a análise de sedimentos secos coletados ao longo da bacia no período de estiagem do mesmo ano. Sendo que, para os sedimentos analisados, foi obtido o teor de poluente em amostras de sedimentos para diferentes faixas granulométricas.

No segundo capítulo que trata da Modelagem da poluição difusa em uma bacia piloto de drenagem urbana foram escolhidos 4 dos 10 eventos monitorados, as amostras em cada evento chuvoso foram coletadas durante os primeiros 24 minutos do evento. Os polutogramas gerados pelo SWMM mostram que nos primeiros 5 minutos há um decréscimo acentuado nas concentrações dos poluentes, assim os eventos foram escolhidos por terem apresentado valores mais elevados de carga de poluentes nos primeiros minutos e a ocorrência de *first flush* como verificado por Freitas (2013), sendo que após o primeiro pico de concentração (todos ocorridos no primeiro minuto do evento) há uma queda acentuada da concentração, tendendo a valores constantes após os cinco primeiros minutos do polutograma.

Capítulo 1

POLUIÇÃO DIFUSA DAS ÁGUAS PLUVIAIS EM UMA BACIA URBANA

RESUMO

A urbanização das cidades produz um aumento na geração de deflúvios e na degradação da qualidade dos corpos hídricos receptores. Estudos integrados relativos ao processo chuva x vazão x qualidade são de suma importância para que se possa entender e se buscar tecnologias adequadas de destinação com a possibilidade de uso dessas águas como recurso hídrico, separando-se as primeiras águas. A proposta do presente trabalho é caracterizar os sedimentos gerados na bacia piloto de Mirassol, analisar o teor de poluentes nos grãos disponíveis na superfície da bacia, para serem carregados em um evento de chuva. Objetiva ainda fazer uma avaliação temporal das cargas poluentes contidas no escoamento superficial em decorrência de eventos de precipitação pluviométrica monitorados ao longo do ano de 2013. Os sedimentos foram coletados ao longo do talvegue da bacia e analisados os teores de DQO e Fósforo Total para diversas faixas granulométricas. Foi constatado que o diâmetro médio das partículas está na faixa de 0,35mm, e que aproximadamente 38% e 54% dos teores de DQO e Fósforo Total em sedimentos respectivamente, estão ligados ao material de granulometria inferior 0,15mm. Já no que se refere à qualidade do escoamento na referida bacia, foi verificado que os primeiros cinco minutos foram responsáveis pelas quedas acentuadas nos picos de concentração de sólidos Totais, DQO e Fósforo Total. Foi constatado também que houve correlação significativa entre a quantidade de FT e DQO com SST, variando de 0,75 a 0,97 e de 0,96 a 0,98 para DQO e FT com Sólidos Totais, respectivamente.

Palavras-Chave: Águas Pluviais Urbanas, Poluição Difusa, Qualidade dos deflúvios.

ABSTRACT

The urbanization of cities causes an increase in the generation of runoff and degradation of the water resource quality. Integrated studies of rain x runoff x quality are essential to understand and search appropriate technologies for fate of storm water can use as a water resource, separating the first flush. The purpose of this study is to characterize the sediment into experimental watershed Mirassol, study the amount of pollutant on the surface sediments of watershed, to be transport in runoff. The study made a temporal evaluation of pollutant loads contained in runoff, to rainfall measure throughout the year 2013. The sediments were collected on the thalweg of the watershed and analyzed the levels of COD and Total Phosphorus for various particle sizes. It was found that the average particle diameter is 0.35mm, and about 38% and 54% of the levels of COD and total phosphorus are in the total solids, respectively, are together particles smaller than 0.15mm. About the runoff quality in the basin watershed, it was found that in the five minutes at start of rainfall were responsible for the decrease in peak concentrations of Total solid, COD and Total Phosphorus solids. It was also found that there was a significant correlation between the amount of TP and COD with TSS, ranging from 0.75 to 0.97 and 0.96 to 0.98 for COD and TP with Total Solids, respectively.

Key-Word: Urban Storm water, Diffuse Pollution, Runoff Quality

INTRODUÇÃO

A poluição difusa é um processo que tem início com a lavagem e transporte de poluentes atmosféricos pela chuva, procedendo-se o escoamento superficial que carrega grande parte dos poluentes depositados na superfície da bacia, transportando-os ao seu destino final, em um corpo receptor. Este tipo de despejo, ao contrário dos lançamentos pontuais é um fenômeno aleatório de difícil mensuração e cujas magnitudes dependem principalmente de fatores meteorológicos e do tipo de uso e ocupação do solo

A carga poluente transportada junto com o escoamento é variável ao longo do tempo em um evento pluviométrico. Pesquisas que tratam da avaliação temporal da qualidade dos deflúvios superficiais se constituem em um paradigma atual, no que se refere ao conhecimento do potencial poluidor dos deflúvios, com a possibilidade da separação das cargas mais concentradas, para posterior tratamento.

Em bacias de pequeno porte como a bacia estudada ocorre um fenômeno conhecido como First Flush, ou primeira carga de lavagem, uma vez que em grandes bacias a diminuição das concentrações de poluentes pode não ocorrer tão rápido com o aumento do volume escoado. Devido ao tempo de concentração da bacia, as descargas iniciais poderiam gerar valores de concentrações mais elevados e que pode misturar com cargas menos concentradas em pontos próximos a medição.

Diversos estudos já foram realizados com o objetivo de avaliar o impacto da carga de drenagem urbana sobre um corpo receptor. A finalidade principal desses estudos é conhecer a carga total de poluentes lançadas ao final de um evento, identificando as concentrações médias dos eventos. Porém conhecer a variação temporal das cargas poluentes é fundamental para um gerenciamento adequado dos deflúvios, possibilitando seu uso como recurso hídrico.

Com essas considerações, este trabalho tem como objetivo caracterizar os sedimentos gerados na bacia de Mirassol, analisar o teor de poluentes nos grãos e fazer uma avaliação temporal das cargas poluentes contidas no escoamento superficial em decorrência de eventos de precipitação

pluviométricos monitorados ao longo do ano de 2013. As variáveis analisadas foram: Sólidos Totais, DQO, Fósforo Total e Teor de Óleos e Graxas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado em uma bacia experimental situada no Município de Natal. A bacia está inserida no conjunto habitacional Mirassol, abrangendo parte dos bairros de Cidade Jardim, Conjunto Mirassol e Campus Universitário. É margeada pelo polígono formado pelas coordenadas geográficas 9352900-9353700S e 255380-256700 W (UTM). A bacia experimental possui uma área igual a 0,14km², altitude de 61,10 m e a altura do seu exutório, localizado na entrada da lagoa de retenção e infiltração é 34,90 m.

A cidade de Natal possui características topográficas que propiciam a formação de bacias fechadas, como a bacia estudada. O relevo tem predominância de dunas associadas a formações lacustres. O fluxo dos deflúvios é direcionado para uma Lagoa de Detenção e Infiltração (Lagoa Mirassol - Cidade Jardim), localizada na zona com cota topográfica inferior aos demais locais da bacia (Figura 2).

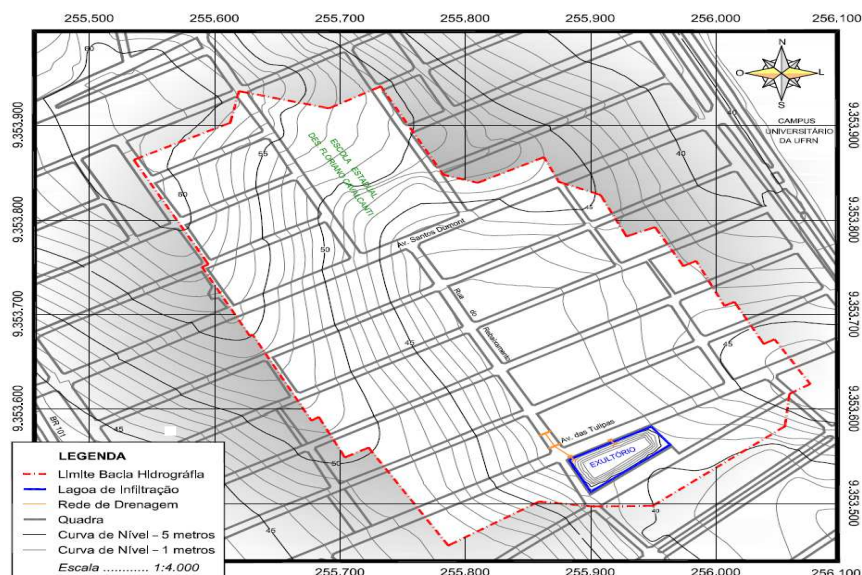


Figura 2: Delimitação da área da bacia de drenagem da Lagoa Mirassol, Natal, RN.

FONTE: RIGHETTO *et. al.*, 2009

O padrão de ocupação é do tipo residencial unifamiliar, classe B e C, com predomínio de lotes de 200m². A sua localização privilegiada enseja alterações de melhoria da paisagem e mudança gradual para residências de padrão tipo A.

As condições predominantes de cobertura do solo são as vias em paralelepípedo, exceto uma das vias que apresenta revestimento asfáltico, prevalecendo arruamentos de classificação secundária. Apenas um dos arruamentos é do tipo principal. O padrão de ocupação indica tendenciosamente alto grau de impermeabilização. Por estar inserida em regiões dunares, a bacia possui trechos com grandes declividades.

Monitoramento qualitativo dos deflúvios

O período de amostragem ocorreu ao longo do ano de 2013, sendo as coletas realizadas após cada evento de precipitação pluviométrica.

O presente estudo foi dividido em duas etapas, a saber: a primeira foi o monitoramento no período chuvoso, em que foram coletadas amostras após cada evento pluviométrico. A segunda, referente ao período seco seguindo a metodologia e as definições adotadas por Dotto (2006) em que foram coletados os sedimentos secos e analisados em laboratório para a caracterização granulométrica e do teor de poluentes agregados nos sedimentos acumulados durante o período seco.

As amostras nos eventos de escoamento superficial foram obtidas por meio de amostrador automático ISCO 6712, em que foi possível fazer uma análise progressiva da qualidade da água escoada, analisando-se os primeiros 24 minutos do escoamento superficial, sendo que cada minuto era correspondente a uma amostra. O início do evento chuvoso era sinalizado ao equipamento através de pulso elétrico enviado pelo pluviômetro de báscula conectado ao mesmo por um cabo (Figura 3). O ponto de amostragem localizava-se na entrada da lagoa de infiltração (Figura 4).

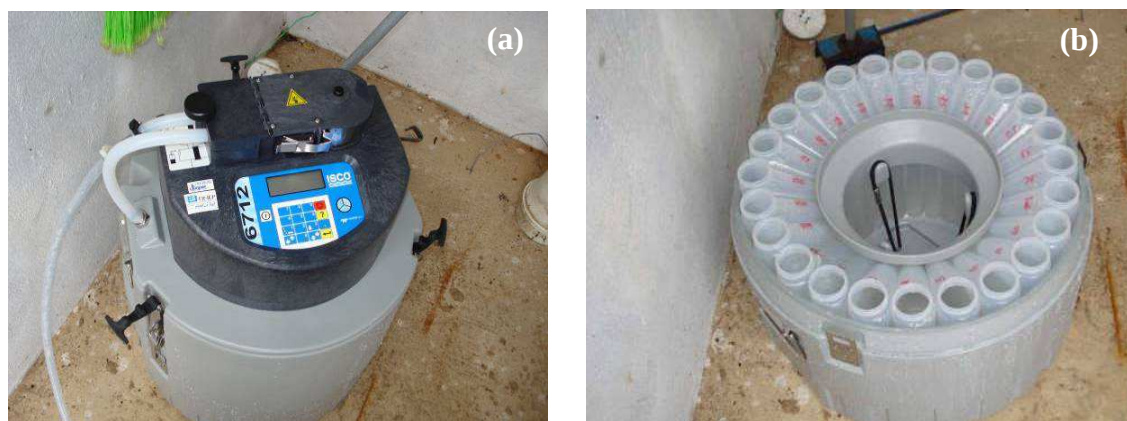


Figura 3: (a) Amostrador automático da água de escoamento superficial, (b) detalhe para a disposição das garrafas em seu interior.
Fonte: Arquivo do Projeto MAPLU.

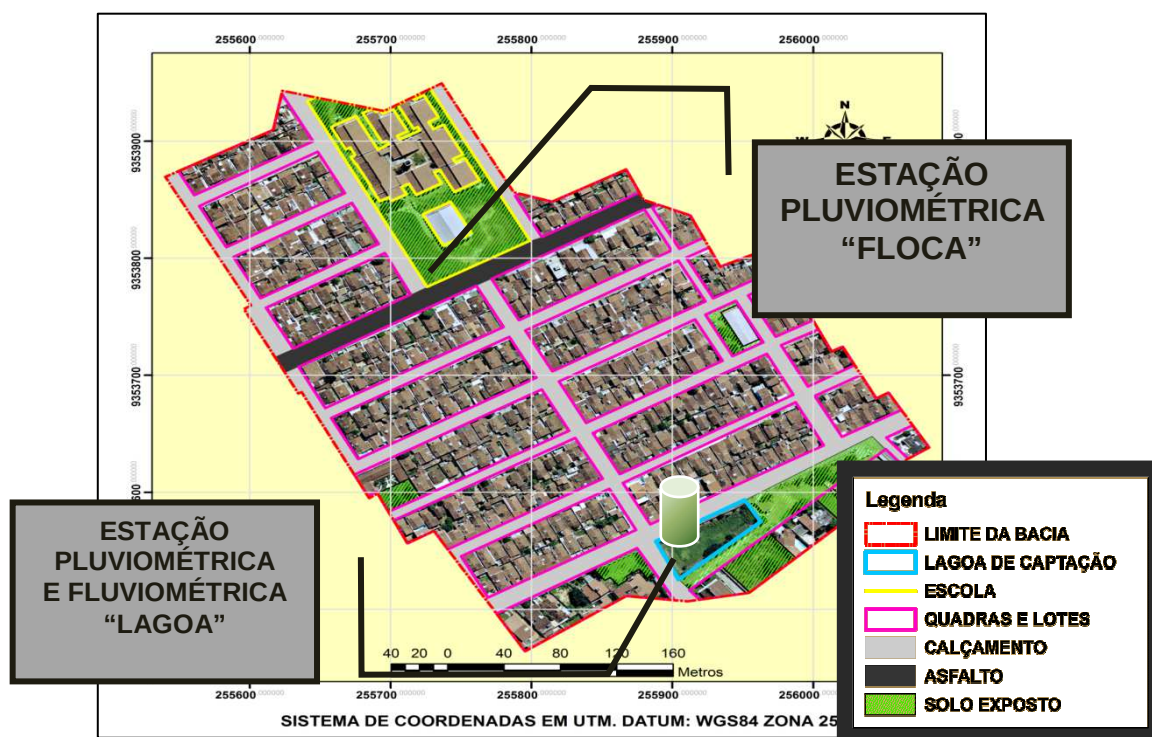


Figura 4: Ponto de Monitoramento na Bacia Mirassol, Natal, RN, mostrando a localização das estações pluviométrica e fluviométrica.

Os dados de precipitação foram obtidos por meio de uma estação pluviométrica monitorada pelo Projeto Manejo de Águas Pluviais Urbanas - MAPLU, localizada na área de monitoramento do projeto. O pluviômetro

automático digital registrava o valor da precipitação a cada cinco minutos e também o total diário (Figura 5).



Figura 5: Vista geral da estação pluviométrica do Floriano Cavalcante e de alguns de seus instrumentos, no bairro Mirassol, Natal, RN.

As análises qualitativas do escoamento superficial foram realizadas segundo métodos analíticos padronizados, como os apresentados no “Standard methods for the examination of water and wastewater”. A Tabela 2 apresenta os métodos utilizados na análise das variáveis de qualidade da água.

Tabela 2: Metodologia utilizada na análise dos parâmetros da qualidade da água.

Parâmetro	Metodologia
Turbidez	Método Nefelométrico
Demanda Química de Oxigênio	Método da refluxação aberta
Fósforo total	Método da digestão em meio ácido
Óleos e graxas	Método Soxhlet
Sólidos (Sedimentáveis, Suspensos Totais, Suspensos, Fixos e Voláteis)	Método gravimétrico

Caracterização dos sedimentos secos

A definição da distribuição granulométrica dos sedimentos propagados no sistema de drenagem até o destino final é considerada um elemento importante no entendimento do processo. E, também, de desenvolvimento de projetos adequados dos componentes do sistema de drenagem, podendo-se definir o tamanho dos grãos que são propagados até o corpo receptor e as partículas que ficam retidas no sistema.

Vaze & Chiew (2003) demonstraram que, parte dos sedimentos presentes na superfície pode se desagregar ou se dissolver dependendo da intensidade e da duração de cada evento de precipitação. Pequenos eventos de precipitação desagregam principalmente a carga livre, enquanto que eventos maiores podem desintegrar, também, a carga fixa na superfície, podendo ainda dissolver parte dessa carga.

Muthukaruppan et al. (2002) apresentaram um estudo sobre a distribuição granulométrica de sedimento seco encontrado em sarjetas de ruas em Melbourne, Austrália. As coletas foram realizadas ao longo das sarjetas de uma área residencial, com o auxílio de um aspirador de pó. As análises granulométricas apresentaram 5 % das partículas menores que 0,45mm e diâmetro médio (d50) de 0,25mm. A distribuição granulométrica de sedimento carregado pela rede de microdrenagem é um fator importante para o entendimento do processo e desenvolvimento de projetos adequados. As análises no período seco foram realizadas por meio de coleta e análise granulométrica e do teor de Fósforo Total – FT e Demanda Bioquímica de Oxigênio - DQO nos sedimentos secos. Os sedimentos secos foram coletados ao longo das sarjetas do talvegue da bacia experimental, com o auxílio de um aspirador de pó, conforme procedimento descrito em estudos anteriormente realizados por Deletic et al.(2000); Muthukaruppan et al.(2002); Vaze e Chiew (2003); Dotto (2006). A tabela 3 apresenta valores de diâmetros médios (d50) encontrados em alguns estudos.

Tabela 3: Diâmetro médio (d50) de sedimentos encontrados em áreas urbanas.

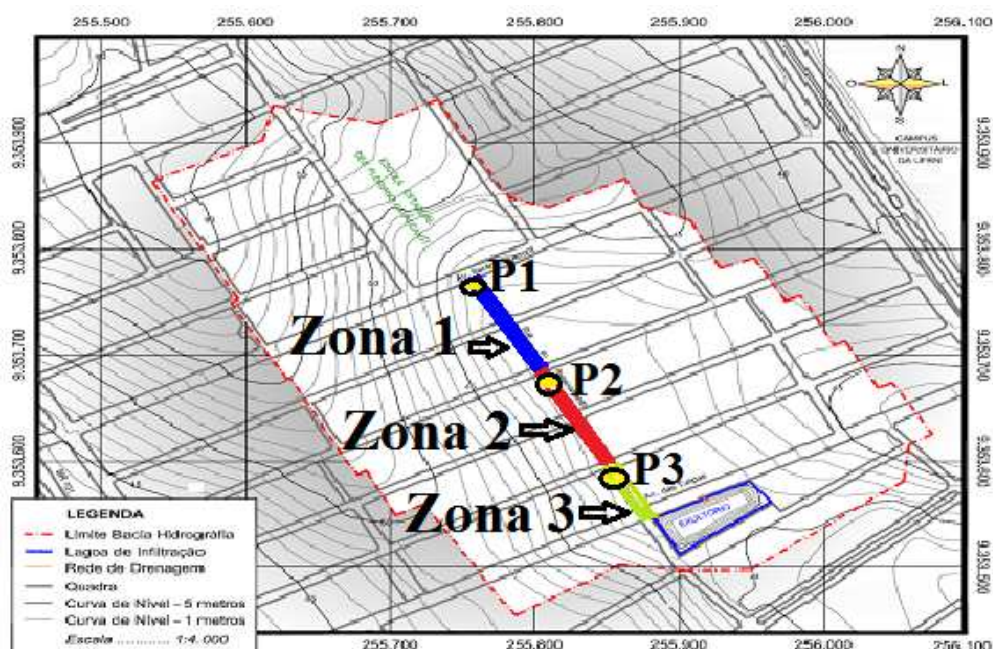
Local de Amostragem	d50 (µm)
London Borough of Lambeth, Londres, Inglaterra	400
Beechwood, Dundee, Escócia	8000*
Commercial Street, Dundee, Escócia	1600*
Melbourne, Austrália	250**
Bouverie Street, Melbourne, Austrália	500
Marques do Herval, Santa Maria, RS, Brasil	350
Rigoberto Duarte, Santa Maria, RS, Brasil	350

Fonte: Dotto (2006).

* Partículas menores que 63 µm não foram fracionadas.

** Foram fracionados apenas os sedimentos menores que 1000 µm.

A área de estudo foi dividida em três subáreas, como ilustrado na Figura 5, nas quais foi aspirada uma superfície de 0,5 m² (0,70m x 0,70m) do sedimento em 3 pontos distintos (P1, P2 e P3), como proposto em Vaze e Chiew (2002).

**Figura 6:** Zonas de monitoramento no período seco e os três pontos de coleta de sedimentos P1, P2 e P3, no bairro Mirassol, Natal, RN.

Para a amostragem, foi utilizada uma escova de cerdas macias para não desagregar material do asfalto, recolhendo apenas o material de interesse. Foi também usado um aspirador de pó portátil para retirada dos sedimentos mais finos, como ilustrado na Figura 7.



Figura 7: Coleta dos sedimentos secos no talvegue da bacia

A granulometria das amostras foi obtida por meio de ensaios realizados em conformidade com as especificações da NBR 7181 - Análise Granulométrica Conjunta. O procedimento se iniciou com o peneiramento, passando a amostra em um jogo de peneiras de diferentes malhagens (25mm; 19mm; 9,5mm; 4,8mm; 2,00mm; 1,20mm; 0,60mm; 0,42mm; 0,30mm; 0,15mm e 0,075mm) e pesando-se o material retido em cada uma. A análise granulométrica da amostra foi realizada e pequenas porções de cada faixa granulométrica foram separadas para posterior análise das concentrações de Fósforo total e DQO.

Um estudo realizado por Dotto (2006) em uma bacia urbana mostrou as distribuições de tamanho de partículas e como o acúmulo ocorre ao longo dos dias secos. O estudo indicou que as partículas poluentes tornam-se mais finos no decorrer do período seco em que ocorre a acumulação. Isto ocorre devido à desagregação pela ação do vento e ruptura dos grãos pelo tráfego de veículos.

Carga de nutrientes associadas com vários tamanhos de partícula poluente superfície

O FT foi determinado por colorimetria após uma etapa de digestão. Para determinar TP, a amostra foi digerida com ácido sulfúrico, que libera o fósforo como limite de ortofosfatos procedendo-se a leitura no espectrofotômetro. A DQO foi analisada utilizando o mesmo procedimento de análise de água, em que foi misturado 0,5g de sedimento em 50 ml de água deionizada, agitando-se a solução de modo a simular o comportamento da mistura do sólido com a água escoada e procedendo-se a leitura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

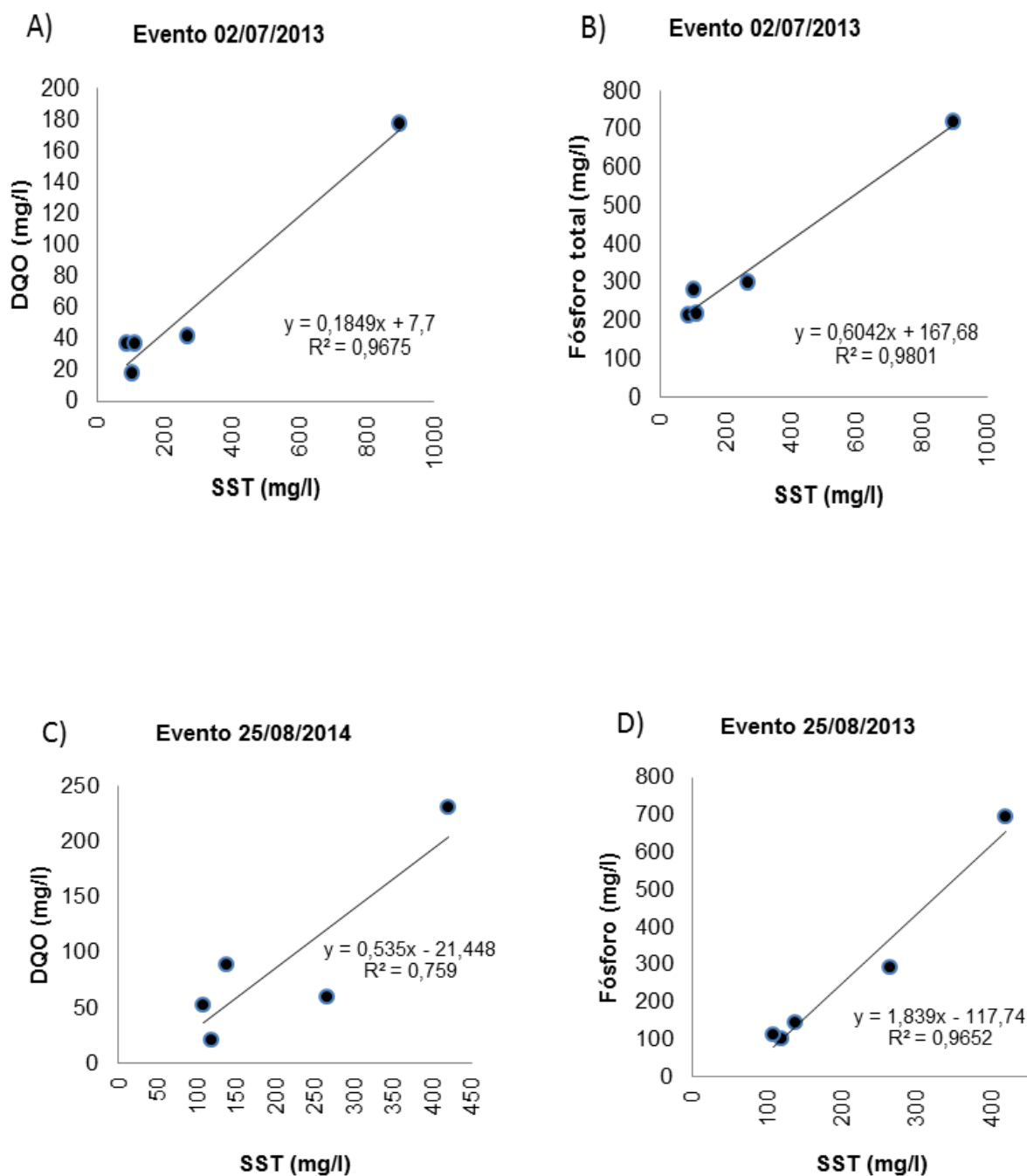
Avaliação progressiva poluição difusa na superfície da bacia

Os resultados encontrados foram obtidos do monitoramento de 10 eventos de precipitação pluviométrica observados ao longo do período chuvoso do ano de 2013. Foram calculadas as médias dos eventos monitorados (Tabela 4) para que se pudesse avaliar o potencial poluidor do escoamento na bacia piloto.

Tabela 4: Concentração Média por Evento (CME)

EVENTO	02/07/2013	17/07/2013	19/07/2013	26/07/2013	09/08/2013	14/08/2013	25/08/2013	20/09/2013	09/10/2013	24/10/2013
VARIÁVEL	Concentração Média dos Eventos									
P _{Amostra} (mm)	2,79	2,03	1,02	3,30	0,51	2,29	1,27	1,27	2,03	1,78
Dias de Estiagem Antecedente	2,73	1,99	0,97	3,88	3,15	4,05	2,15	5,15	0,95	14,69
ST (mg/L)	191,80	44,79	443,08	168,62	448,82	436,48	136,36	161,05	530,10	437,54
DQO (mg/L)	63,69	31,87	118,34	53,60	147,59	164,92	67,46	108,17	202,52	151,41
FT (µg P/L)	273,73	144,99	204,16	342,08	344,35	377,59	435,11	476,92	507,68	671,88
Turbidez	15,71	6,30	15,07	16,88	33,53	32,29	28,96	8,87	73,78	79,39
TOG (µg/L)	2,68	7,11	6,91	4,75	15,32	67,50	3,81	6,02	14,56	6,57

Para se estabelecer um critério homogêneo de análise, foram tomados os primeiros 5 minutos de escoamento de cada evento por apresentarem maior potencial poluente nos eventos monitorados e realizada a análise de regressão linear simples (Figura 8). Foram verificadas correlações significativas entre as variáveis: FT, DQO, TOG e concentração de SST.



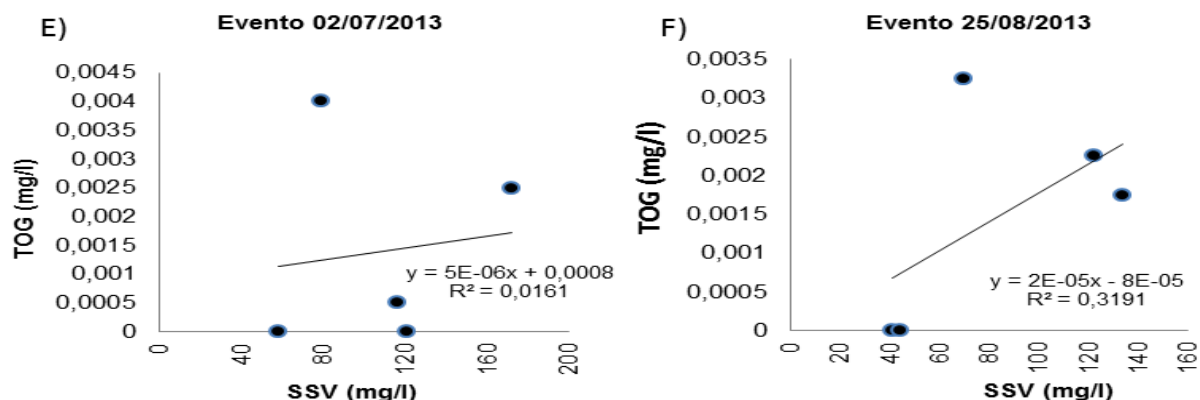


Figura 8: Análise de Regressão para as relações entre as variáveis: Demanda Química de Oxigênio (DQO): A) e C) Fósforo Total (FT): B) e D); Óleos e Graxas (TOG) E) e F) e o Material Suspenso total (SST) para eventos de precipitação pluviométrica ocorridos nos meses de julho e agosto de 2013.

Os eventos ocorridos nos dias 02/07/2013 e 25/08/2013 tiveram maior correlação do que nos demais eventos analisados, com valores de $r = 0,967$ e $0,980$ para DQO e FT, respectivamente, para o evento do dia 02/07/2013; e de $0,98$ para FT e $0,87$ para DQO, no evento do dia 25/08/2013.

Os resultados obtidos para as relações entre as variáveis indicaram que existem correlações significativas entre as concentrações de FT, DQO e SST.

O transporte de poluentes depende da intensidade da chuva, sendo que este processo ocorre pela remoção de poluentes acumulados nas superfícies impermeáveis, os quais são transportados junto com os deflúvios superficiais.

As maiores proporções de remoção de Sólidos Suspensos Totais observadas ocorreram nos eventos dos dias 2/7/2013 e 19/7/2013, cujas proporções de remoção da massa ST foram de 54,36% e 46,14%, nos primeiros 30% do volume, respectivamente, como verificado por Freitas (2013), em que para essa mesma bacia em estudo verificou-se a ocorrência de *first flush* em 5 de 9 eventos monitorados para SST.

Nas Figuras 9 à 12, (polutogramas) estão representados os volumes de chuva precipitada a cada cinco minutos, e também as concentrações acumuladas dos poluentes ao final deste intervalo de tempo nas águas dos deflúvios superficial. São apresentados os eventos em que foram obtidas as maiores correlações entre as variáveis FT, DQO e SST.

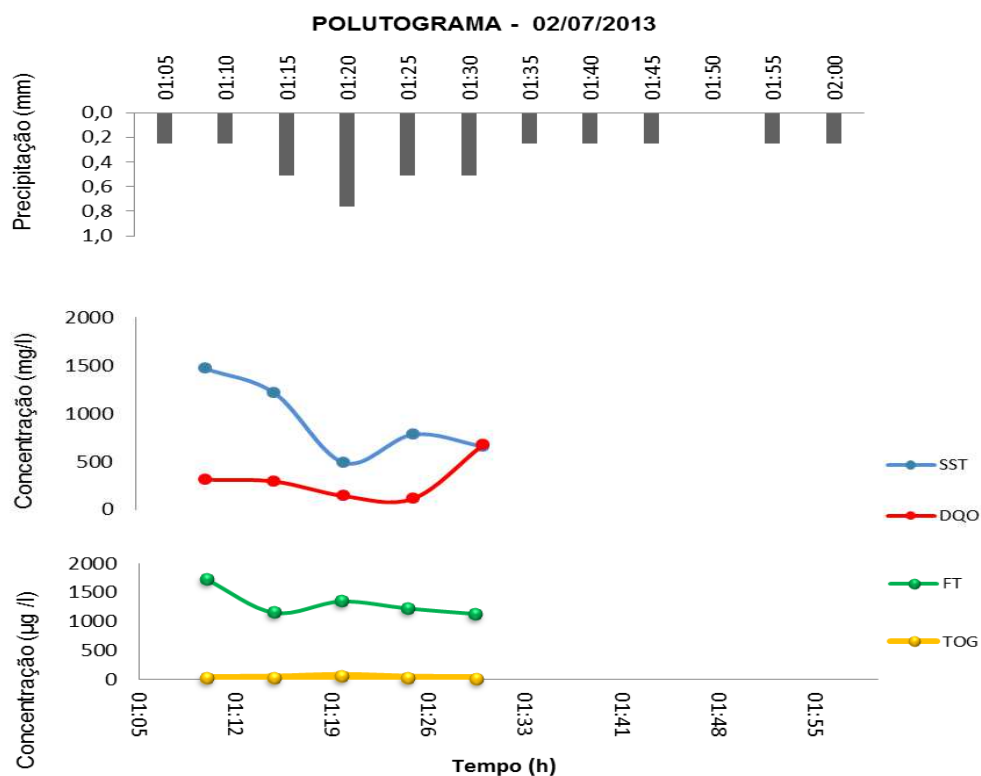


Figura 9: Polutograma do evento 2/7/2013 obtido para os primeiros 25 minutos de escoamento acumulados a cada 5 minutos, na bacia Mirassol, Natal, RN.

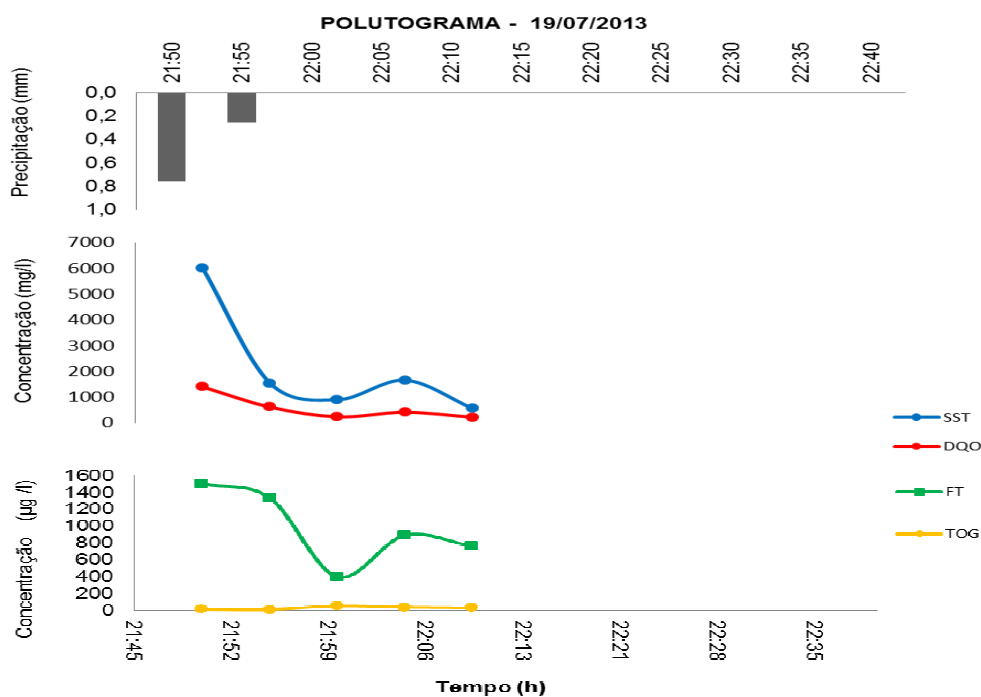


Figura 10: Polutograma do evento 19/7/2013 obtido para os primeiros 25 minutos de escoamento acumulados a cada 5 minutos, na bacia Mirassol, Natal, RN.

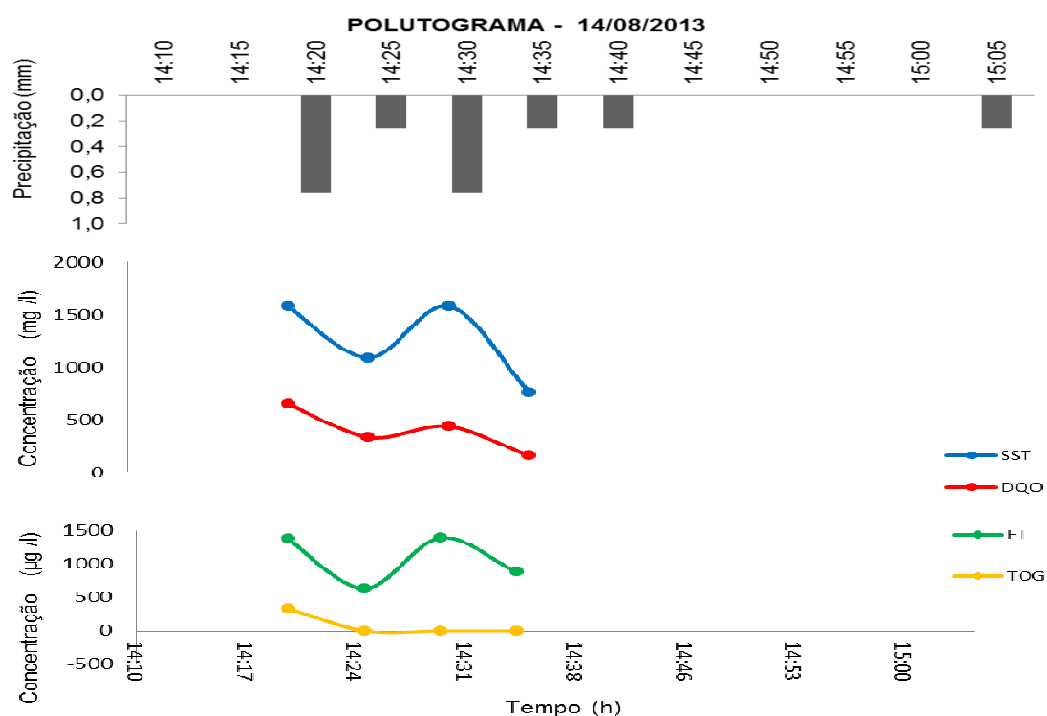


Figura 11: Polutograma do evento 14/08/2013 obtido para os primeiros 25 minutos de escoamento acumulados a cada 5 minutos, na bacia Mirassol, Natal, RN.

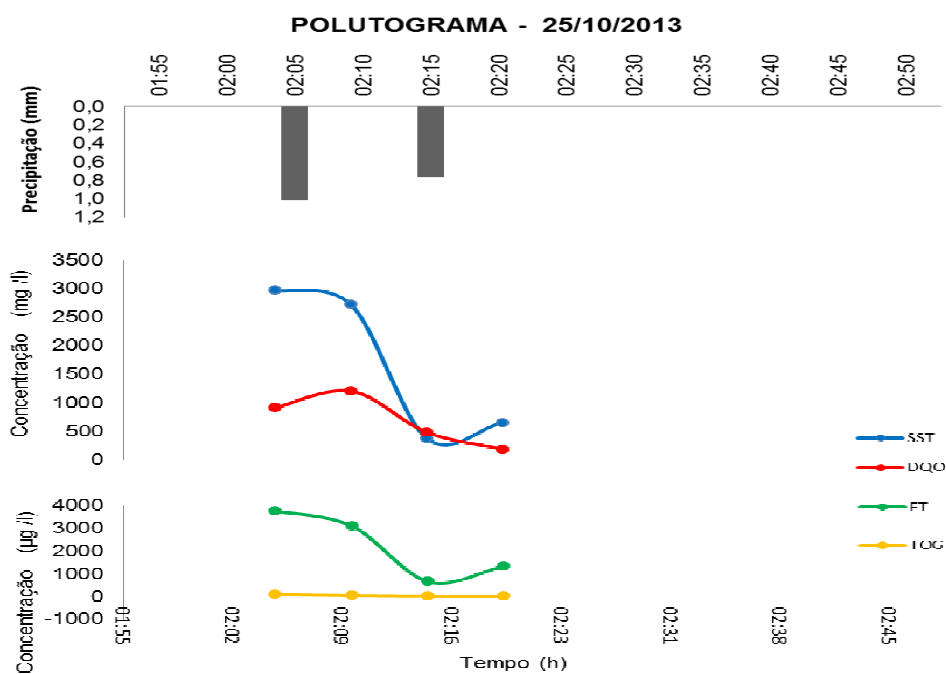


Figura 12: Polutograma do evento 25/10/2013 obtido para os primeiros 25 minutos de escoamento acumulados a cada 5 minutos, na bacia Mirassol, Natal, RN.

Os eventos que resultaram em maior remoção de massa de SST verificado por Freitas (2013), foram também os que apresentaram maior correlação entre a quantidade de FT e DQO com SST e, também, as maiores intensidades de precipitação pluviométrica nos primeiros minutos dos eventos medidos. Pode-se observar também com os polutogramas ilustrados abaixo uma queda acentuada das concentrações dos parâmetros estudados nos primeiros 15 minutos de ocorrência do evento.

Percebem-se nos gráficos dos dias 02/07/2013, 19/07/2013 e 25/10/2013, depressões nas curvas de concentração. Isso ocorreu devido ao início da precipitação ter lavado parte dos poluentes contidos na bacia e causado queda acentuada da curva no início do evento. Com a redução da precipitação, ocorreu a depleção na curva, com recuperação posterior em decorrência do aumento da lâmina de chuva.

Os polutogramas mostram ainda, um atraso relativo do início da coleta do amostrador em relação ao início dos eventos. Isso ocorre devido ao tempo que os deflúvios levam para chegar até o tubo do amostrador. Em alguns casos ao detectar a ocorrência de chuva, o amostrador era acionado, porém em caso de ocorrência da intensidade baixa no início do evento, não foi possível gerar escoamento superficial, havendo ausência de amostras para os primeiros minutos do evento.

O contrário também se verificou, ou seja, com maiores intensidades no início do evento, verificaram-se maiores concentrações nos instantes iniciais, uma vez que era possível se ter maior força de arrasto e, conseqüentemente, carrear maior carga de sólidos e outros contaminantes. Isso decorre do fato da energia das gotas de chuva ser um fator determinante no início do evento chuvoso, ocasionando o desprendimento das partículas sobre o solo, colocando-as em movimento (VAZE; CHIEW, 2003).

A ocorrência do fenômeno first flush, em muitos casos, além de permitir avaliar o tamanho da área de lavagem da bacia, mostra, também, a maior facilidade de desagregação e transporte das partículas sólidas pela chuva, ou seja, além das características da chuva, as características dos grãos também devem ser levadas em consideração no momento da desagregação e transporte de massa de poluente.

Em um estudo de sólidos e fósforo como indicadores de poluição, Settle et. al. (2007) verificaram que os sólidos agem como um substrato móvel para o transporte de outros poluentes, como metais pesados e hidrocarbonetos. A quantidade de sólidos disponíveis para o carreamento, bem como o conhecimento meteorológico dos primeiros minutos dos eventos, é de suma importância para a avaliação da carga de poluentes associadas aos sólidos em suspensão.

Diante disto, constatou-se que para a bacia em estudo, a quantidade de DQO e FT carreados em decorrência de um evento pluviométrico de maior intensidade pode se dar em função da descarga sólida gerada pela bacia.

Distribuição do tamanho das partículas de sedimentos secos

A figura 10 apresenta a distribuição granulométrica das partículas de sedimentos coletadas no talvegue da Bacia Experimental de Mirassol durante período seco. Através dessa figura verifica-se que cerca 80% da carga livre é mais fina que 1 mm, 75% é mais fina que 0,7 mm e 5% é mais fina que 0,3mm.

Os sedimentos tendem a ficarem mais finos à medida que a acumulação ocorre, podendo-se observar pelas curvas dos eventos dos dias 08/02/14 e 16/02/14, uma vez que os sedimentos são desagregados pela ação do vento e do tráfego de veículos.

A granulometria da carga de sedimento livre na superfície tende a ficar mais fina ao longo dos dias sem chuva ao contrário da carga de sedimento fixa, uma vez que as partículas fixas se encontram agregadas à superfície e são mais finas; já as partículas da carga livre são mais propícias a serem desintegradas em partículas menores. Comportamento semelhante em estudo realizado por Vaze e Chiew (2003). As demais amostras diferem desse comportamento, devido às interferências de precipitação entre coletas, fazendo com que houvesse transporte de massa de um ponto a outro.

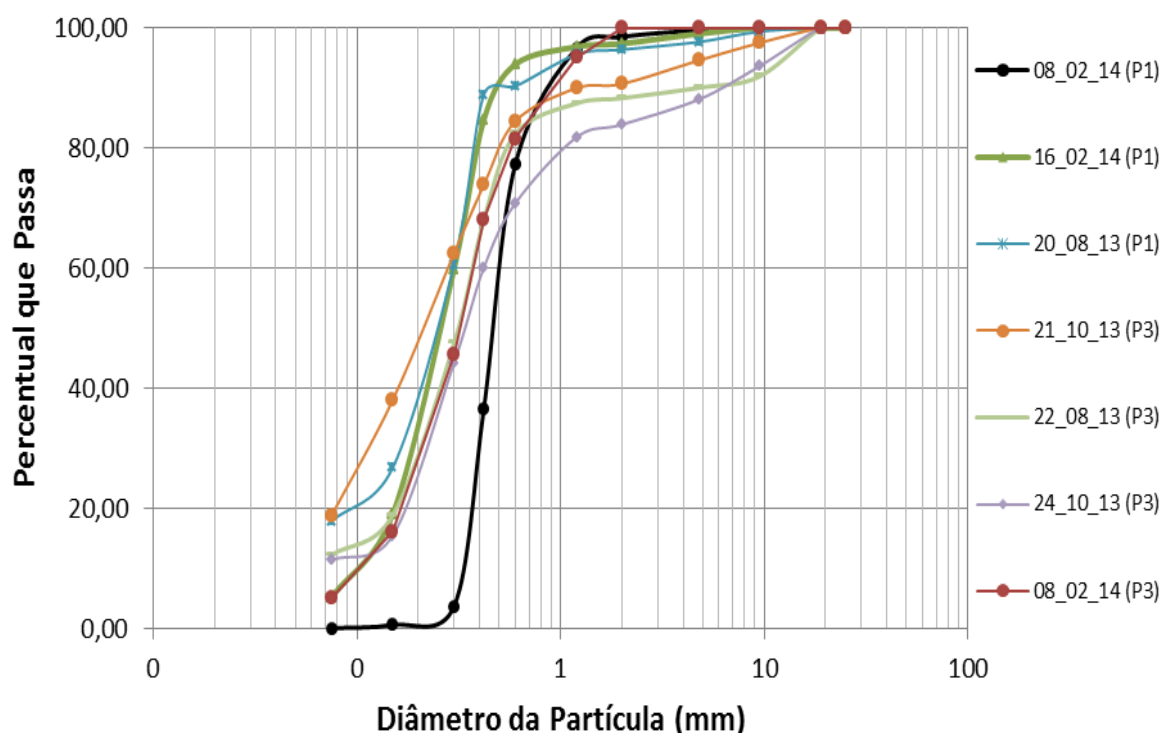


Figura 13: Curvas Granulométricas

Segundo Walling et al. (2000), os tamanhos das partículas em suspensão são geralmente referidos ao diâmetro médio, d_{50} , que corresponde ao diâmetro apresentado por 50 %, em massa, das partículas presentes. As amostras ensaiadas por peneiramento seco apresentaram um diâmetro médio de aproximadamente 0,35 mm.

A tabela 5 fornece a média ponderada do diâmetro médio (d_{50}) das amostras coletadas entre agosto de 2013 e fevereiro de 2014 submetidas ao ensaio de peneiramento dos sedimentos em relação às amostras totais deste estudo e de estudos realizados por Dotto (2006) e Vaze & Chiew (2003).

Tabela 5: Diâmetro médio (d_{50}) dos sedimentos no período seco

Local da Amostragem	d_{50} (μm)
Bacia de Mirassol	350
Rua Marque do Herval*	400
Bouverie Stree Melbourne, Austrália**.	600

* Fonte: Dotto (2006)

** Fonte: Vaze & Chiew (2002)

Concentrações de poluentes

As concentrações de poluentes nos vários intervalos de tamanhos de partícula são apresentadas na Figura 11.

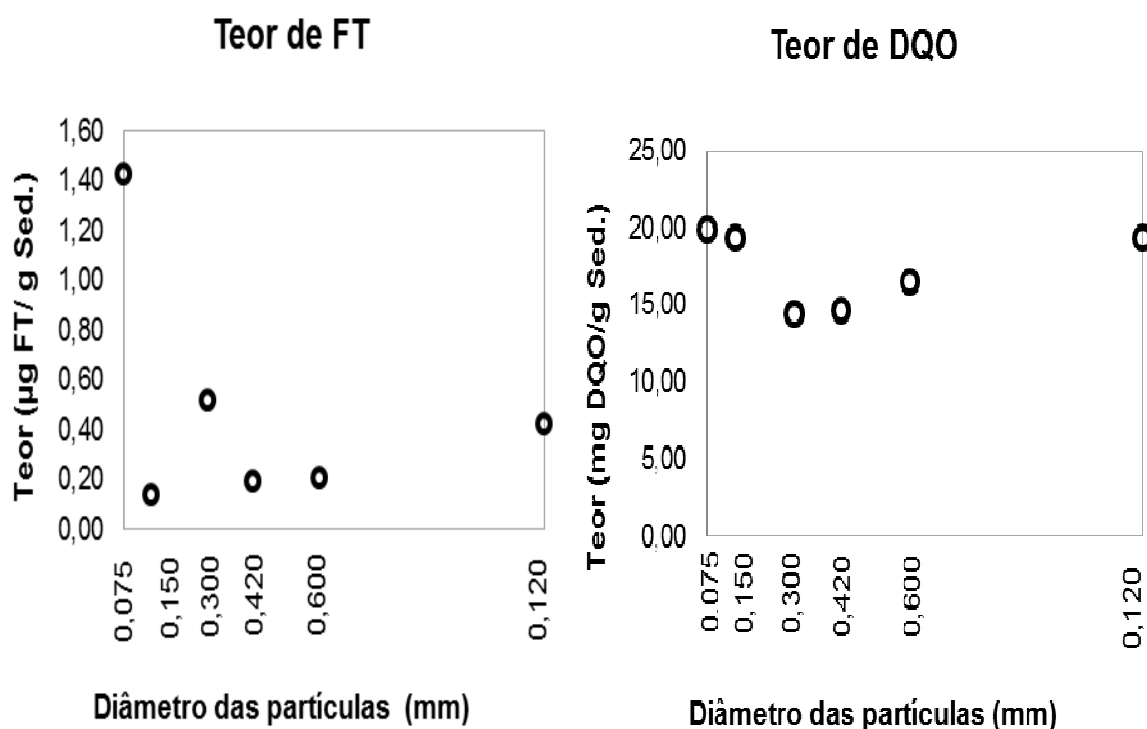


Figura 14: (A) Teor de FT e (B) Teor de DQO para as faixas granulométricas analisadas.

A tabela 5 mostra que há um teor menor de Fósforo Total nas faixas de 0,60mm, 0,42mm e 0,15mm; e a faixa de sedimentos mais fina, ou seja, 0,075mm é responsável por quase 50% do teor de Fósforo Total associado aos sedimentos. Já a carga de DQO, pode-se dizer que a contribuição é aproximadamente a mesma em todas as faixas de diâmetros, havendo pequena diminuição nas faixas centrais: 0,60mm; 0,42 mm e 0,30mm.

Peneiras		% FT _{médio} (1000 ⁻¹)	% DQO _{médio}
#	mm		
16	1,20	15	19
30	0,60	7	16
40	0,42	7	14
50	0,30	18	14
100	0,15	5	14
200	0,075	49	19

Tabela 6 : Porcentagem média de FT e DQO por faixa granulométrica de sedimento

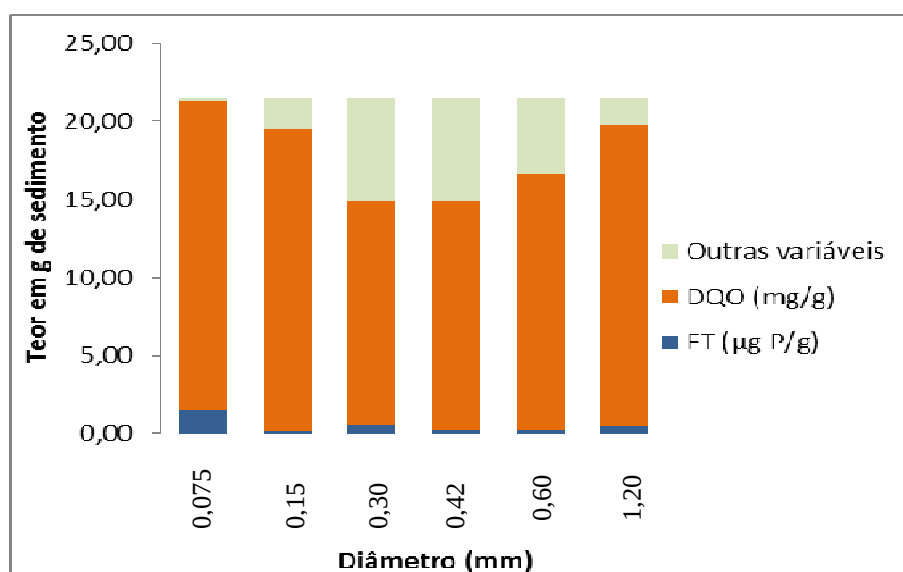


Figura 15: Representatividade média das variáveis FT e DQO por tamanho das partículas de sedimento.

Diante dos valores apresentados na tabela 6, pode-se dizer que praticamente todas as cargas de FT nas amostras de sedimentos secos estão associadas aos tamanhos das partículas, sendo que a maior parte da carga está associada a diâmetros inferiores a 0,075mm.

A análise granulométrica é de suma importância, uma vez que a carga de sedimento está disponível na superfície da bacia para ser carregada ou dissolvida em função do diâmetro das partículas e da intensidade da chuva.

O Fósforo disponível na superfície pode ocasionar maior potencial de dissolução nos volumes escoados diante de um evento chuvoso, devido ao fato dessa variável estar associada com as partículas mais finas dos grãos.

No entanto, a DQO está suscetível ao carreamento junto com os grãos de sólidos, já que todas as faixas granulométricas contribuem de forma aproximada em proporção, não tendo tanta vulnerabilidade a dissolução uma vez que as partículas maiores também tem importância na contribuição dessa variável nos deflúvios superficiais.

Estas análises têm implicações importantes na tomada de decisão quanto ao manejo das águas pluviais no meio urbano. A redução dos sedimentos pode não acarretar em uma redução proporcional em termos de cargas de nutrientes como o Fósforo Total, aqui analisado. Porém, é necessário considerar a separação das primeiras águas do escoamento, uma vez que são assimilados ao escoamento nutrientes e contaminantes por dissolução no contato com a superfície da bacia.

Em relação ao diâmetro médio d50 foi obtido 2,27 μg de FT correspondendo a um percentual de 0,000076% da massa de sedimento; e 68,42 mg de DQO correspondendo a um percentual de 2,281% em massa de sedimento. Esses valores são bastante significativos, uma vez que se levado em conta toda a bacia contribuindo nessas proporções para um corpo d'água, o fator de assimilação poderia não comportar a carga contribuinte, levando à deterioração de suas águas. Somente com a separação dessas cargas poluentes seria possível o uso das águas pluviais como recurso hídrico.

Tabela 7: Teor de FT e DQO para o diâmetro médio d50.

Valores de massa e percentual do poluente para o diâmetro médio dos grãos (d50)		
	Massa média de uma amostra	% Massa em g sólidos
<i>FT ($\mu\text{g P}$)</i>	2,27	0,000076%
<i>DQO (g)</i>	0,07	2,28%

CONCLUSÕES

A análise da poluição difusa das ruas de uma área urbana é complexa e de difícil mensuração. O escoamento pluvial pode carrear resíduos sólidos, sedimentos e poluentes provenientes de áreas vizinhas às ruas, havendo interferência também de ligações clandestinas de esgoto doméstico direto nas vias ou elementos de microdrenagem, como verificado neste estudo. E também, o sedimento retido nas bocas de lobo e áreas de estagnação das águas.

Os resultados do monitoramento da qualidade dos deflúvios da bacia piloto de Mirassol mostraram que o escoamento superficial Runoff possui grande potencial poluidor de corpos d'água, uma vez que foram constatadas que para diferentes intensidades de precipitação, estas poderiam gerar altas taxas de concentração de poluentes carregados junto com o escoamento superficial.

Entre as variáveis analisadas destacam-se os altos teores de Fósforo Total. A análise dessa variável é de grande importância, uma vez que é um nutriente limitante, capaz de causar a deterioração da qualidade da água pela eutrofização dos corpos d'água.

Essas altas taxas acontecem em decorrência dos hábitos dos moradores circunvizinhos ao ponto de coleta, uma vez que foi constatada a existência de ligações clandestinas na rede de drenagem, flagrando-se ainda a lavagem de carros na rua próxima ao ponto de monitoramento da lagoa. Segundo informação verbal de moradores, muitos costumam levar os bichos de estimação para passear sem a preocupação de recolher seus dejetos, estes ficando livres para serem carregados pelo escoamento em um evento chuvoso. Tais fatores podem ser tomados como fontes potenciais de poluição difusa, tendendo a elevar consideravelmente os níveis de concentração de nutrientes como o fósforo total, entre outros poluentes, agravando, assim, o problema da poluição difusa.

Embora a CME seja um indicador variável conforme a intensidade da chuva e as características da bacia, a Concentração Média dos Eventos pode ser considerada um indicador conciso que permite comparações úteis entre a

os níveis de concentração de poluente gerados pela bacia com diferentes intensidades de precipitação e diferentes períodos de estiagem antecedentes.

Além da CME, é preciso levar em consideração a concentração de sedimentos no início do escoamento; mesmo com vazão reduzida, ela é mais elevada, apresentando um pico, que nos eventos mais significativos representa as primeiras cargas de lavagem das ruas, ou seja, a ocorrência de *first flush*; geralmente são as mais concentradas em bacias de pequeno porte, como a bacia estudada.

Freitas (2013) em dados não publicados, concluiu que há ocorrência do fenômeno *first flush* para todos os parâmetros analisados (Sólidos Totais, Sólidos Suspensos, Demanda Química de Oxigênio, Fósforo Total e Teor de Óleos e Graxas) na bacia em estudo.

A evidência de *first flush* para determinadas intensidades de precipitação pluviométricas e a forte correlação entre FT e DQO com SST associados a um mesmo evento, pode propiciar estratégias de manejo das águas pluviais, como a implantação de sistemas separadores e de tratamento das primeiras águas do escoamento superficial em relação ao restante do escoamento considerado de melhor qualidade. Com esse manejo, pode-se ter um melhor aproveitamento das águas pluviais da parcela de qualidade superior como recurso hídrico.

Vaze & Chiew (2002) constataram que a limpeza das ruas pode ter um impacto adverso sobre a lavagem dos poluentes na superfície de uma bacia, uma vez que ao varrer as ruas são desagregadas as partículas mais finas de sedimento que estavam impregnadas na superfície, uma vez que os mecanismos de remoção como pás não são suficientes para a coleta da fração fina dessa carga que fica disponível para a lavagem em um próximo evento pluviométrico.

Os trabalhos experimentais realizados neste estudo se mostraram significativos na caracterização dos sedimentos presentes na superfície da bacia, bem como na avaliação do potencial poluidor do escoamento gerado pela bacia. Tais informações são necessárias para a implantação de elementos de tratamento das águas pluviais urbanas.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION – WEF. (1992). **Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater** 18. ed. Washington D C.
- DELETIC, A.; ASHLEY, R.; REST, D. **Modelling input of fine granular sediment into drainage systems via gully-pots**. Water Research. v. 34, n. 15, p. 3836-3844, 2000.
- DOTTO, C.B.S.; PAIVA, E.M.C.D.; SILVA, L.F. **Acumulação e caracterização dos sedimentos em superfícies asfálticas de área urbana em Santa Maria - RS**. In: VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2006, Santa Maria. Sedimentos: o Desafio da Multidisciplinaridade. Porto Alegre: ABRH, 2006.
- FREITAS, F. R. S. **Avaliação progressiva da qualidade da água do escoamento superficial de uma bacia fechada de drenagem urbana**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. 2013. 53 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental).
- MUTHUKARUPPAN, M., CHIEW, F.H.S. AND WONG, T. (2002) **Size distribution and partitioning of urban pollutants**. **Global Solutions for Urban Drainage**, 2002
- RIGHETTO, A. M.; ANDRADE NETO, C. O.; BRITO, L. P.; SALES, T. E. A. de; MEDEIROS, V. M. A.; FERREIRA, L. C. A.; LIMA, R. R. M., (2009). **Estudo Qualiquantitativo de Manejo de Águas Pluviais em Área de Drenagem Piloto na Cidade de Natal-RN**. In: FINEP, PROSAB. (Org.). Manejo de Águas Pluviais Urbanas. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES 2009, v. 04, cap. 6, p. 218-255.
- SETTLE, S.; GOONETILLEKE, A.; AYOKO, G. **Determination of Surrogate Indicators for Phosphorus and Solids in Urban Storm water: Application of Multivariate Data Analysis Techniques**. Water Air and Soil Pollution, pp. 149-161, 2007.
- VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. **Study of pollutant wash off from small impervious experimental plots**. Water Resour. Res. 39(6): [np]. 2003.
- VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. **Nutrient Loads Associated with Different Sediment Sizes in Urban Storm water and Surface Pollutants**. Journal of Environmental Engineering. p. 391-396, 2004.
- WALLING, D.E., OWENS, P.N., WATERFALL, B.D., LEEKS, G.J.L.; WASS, P.D. **The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed Catchments**, UK. The Science of Total Environment, p. 205-222, 2000.

Capítulo 2

MODELAGEM DA POLUIÇÃO DIFUSA EM UMA BACIA PILOTO DE DRENAGEM URBANA

RESUMO

Este estudo foi realizado em uma bacia piloto do município de Natal e tem como objetivo principal, a calibração do modelo SWMM. O modelo buscou contribuir para o entendimento do processo de acumulação (BUILDUP) e transporte (WASHOFF) de poluentes pelo sistema de drenagem urbana. Como dados de entrada do modelo foram utilizados dados de precipitação obtidos de uma estação pluviométrica. Foi avaliado também o uso do solo, com análise espacial da acumulação de poluentes, diferenciando-se por classes de poluição nas subáreas de uma área total de 14ha. As concentrações de Sólidos Totais nas amostras líquidas dos deflúvios variaram entre 898 e 1463 mg/L. Foram realizadas simulações da qualidade dos deflúvios superficiais em 4 eventos dos 10 eventos monitorados ao longo do ano de 2013, escolhidos por terem apresentado “*First Flush*”. A calibração do modelo foi realizada ajustando manualmente os parâmetros das equações de acumulação e lixiviação do SWMM. Os resultados obtidos pelas sucessivas simulações e ajustes foram da ordem de 0,83 e menores que 1%, para coeficiente de correlação e erro médio sobre a conservação de massa, respectivamente. Já para os erros médios entre os valores simulados e observados foram reduzidos a valores menores que 1%. Pode-se dizer com isso que, os resultados ajustados foram satisfatórios, podendo representar com êxito os processos envolvidos no transporte de sólidos Totais e os poluentes associados.

Palavras-Chave: Poluição difusa, modelagem, SWMM.

ABSTRACT

This study was conducted in an experimental watershed of Natal City and aims to calibrate the SWMM model. The model contributed to the understanding of the accumulation (buildup) and transportation (WASHOFF) of pollutants from the urban drainage. As input data model, we used rainfall data obtained from a rain gauge. This paper also studied the land using, with spatial analysis of the accumulation of pollutants, differing by classes of pollution in subareas of total area of 14ha. The concentrations of Total Solids in the runoff samples ranged between 898 and 1463 mg/l. Simulations of the runoff water quality were held in four to 4 events monitored in the year 2013. The model calibration was made manually by adjusting the parameters of the equations of Buildup and wash off of SWMM. The results obtained by simulations and successive adjustments were of the about of 0.83 and less than 1%, for the correlation coefficient and average error on the mass conservation, respectively. For the average error between the simulate and observed values were reduced to less than 1% values. Can mean that the adjusted results were satisfactory, being able to successfully represent the transport of Total Solids and associated pollutants.

Key-Word: Diffuse Pollution, modeling, SWMM.

INTRODUÇÃO

Os estudos integrados quali-quantitativos das águas pluviais são atualmente reconhecidos como necessários para o avanço tecnológico voltado para a minimização de impactos ambientais. A modelagem deve ser considerada uma ferramenta de importância para o planejamento e operação da drenagem urbana.

Segundo Rennó (2002), os modelos que representam os processos hidrológicos e hidráulicos da drenagem permitem a incorporação da heterogeneidade espacial e da variabilidade temporal das bacias hidrográficas, de modo a considerar as diferentes características do solo, vegetação e topografia e de eventos chuvosos variáveis no espaço e no tempo.

Para isso, os modelos necessitam ser alimentados com parâmetros referentes às variáveis que descrevem a bacia. A determinação dessas variáveis é essencial para que se possa avaliar e comparar as informações geradas pelos modelos com as informações de campo, podendo-se também analisar diferentes cenários.

Todavia, há de se levar em conta que algumas variáveis são de difícil determinação em campo como os níveis de poluição, vazão média nos trechos de drenagem, rugosidade do terreno devido à falta de informações sobre as bacias hidrográficas.

Assim, estimar esses parâmetros por meio de métodos indiretos como a calibração, pode ser considerado uma abordagem válida para garantir a confiabilidade das informações geradas pelo modelo. Com a calibração, os parâmetros são ajustados comparando-se, por exemplo, os valores de vazões observadas com os respectivos valores simulados, para os eventos de chuva escolhidos.

Portanto, o aperfeiçoamento de técnicas de modelagem e esforços para a quantificação e a redução de incertezas nesse campo constitui um elemento relevante de desenvolvimento tecnológico (NASCIMENTO, 2003).

Neste sentido, Baffaut & Delleur (1989) desenvolveram uma rotina para o módulo RUNOFF do aplicativo SWMM, baseada em “regras de produção”, que consistem de uma sequência de regras computacionais do tipo “If – then”, que foi considerada uma tentativa de calibração levando-se em conta as condições de contorno do problema. Nesse trabalho, a interface do modelo de calibração com o SWMM foi realizada externamente, através de arquivos de entrada e saída, demandando grande tempo computacional para a leitura escrita de arquivos além de, também, depender das condições estipuladas pelo usuário.

Liong et. al. (1991) e Wan & James (2002) se basearam na análise de sensibilidade dos parâmetros para desenvolver um método de calibração do módulo RUNOFF do SWMM, calibrando apenas os parâmetros com maior influência sobre os resultados do modelo. A calibração foi realizada por meio da análise dos erros da vazão de pico, utilizando um evento de chuva.

Shinma (2011) elaborou um calibrador multiobjetivo do SWMM, por meio de um software desenvolvido através da alteração do código computacional do SWMM. A metodologia utilizada foi desenvolvida por meio da análise de sensibilidade dos parâmetros em uma bacia hipotética e em uma bacia real, visando dar maior confiabilidade aos resultados.

A utilização da análise de sensibilidade como metodologia prévia do estudo de modelagem é de grande importância, uma vez que ela permite verificar quais as variáveis possuem maior influência nos resultados do modelo, tornando essas variáveis como foco da calibração.

A utilização de uma bacia hipotética de parâmetros conhecidos para uma análise prévia de sensibilidade possui grande relevância uma vez que para esse tipo de sistema, as incertezas são menores, bem como, o erro gerado nas simulações devido ao fato das variáveis serem previamente conhecidas, o que muitas vezes não seria possível em um sistema real.

Diante dessas considerações, este trabalho tem por objetivo calibrar os parâmetros de qualidade de um modelo hidrológico para uma bacia experimental urbana situada na cidade de Natal, RN.

Para tanto, será utilizado o modelo SWMM, que permitirá a simulação de cargas difusas em uma bacia, utilizando dados de caracterização da mesma, a fim de verificar previamente quais parâmetros possuem maior sensibilidade no modelo SWMM no que diz respeito à deposição e transporte de poluentes.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área

A bacia experimental em estudo está situada no Município de Natal, inserida no conjunto habitacional Mirassol, abrangendo parte dos bairros de Cidade Jardim, Conjunto Mirassol e Campus Universitário. É margeada pelo polígono formado pelas coordenadas geográficas 9352900-9353700S e 255380-256700 W (UTM). A bacia piloto possui uma área igual a 0,14km², altitude de 61,10 m e a altura do exutório, localizado na entrada da lagoa de retenção e infiltração, é de 34,90 m.

A cidade de Natal possui características topográficas que propiciam a formação de bacias fechadas, como a bacia estudada. O relevo é predominantemente formado por dunas e estas estão associadas a formações lacustres. O fluxo dos deflúvios é direcionado para uma Lagoa de Detenção e Infiltração, a Lagoa Mirassol em área com cota topográfica inferior aos demais locais da bacia. O padrão de ocupação é do tipo residencial uni familiar classe B e C, com predomínio de lotes de 200m². Por estar inserida em região de dunas a bacia possui trechos com grande declividade.

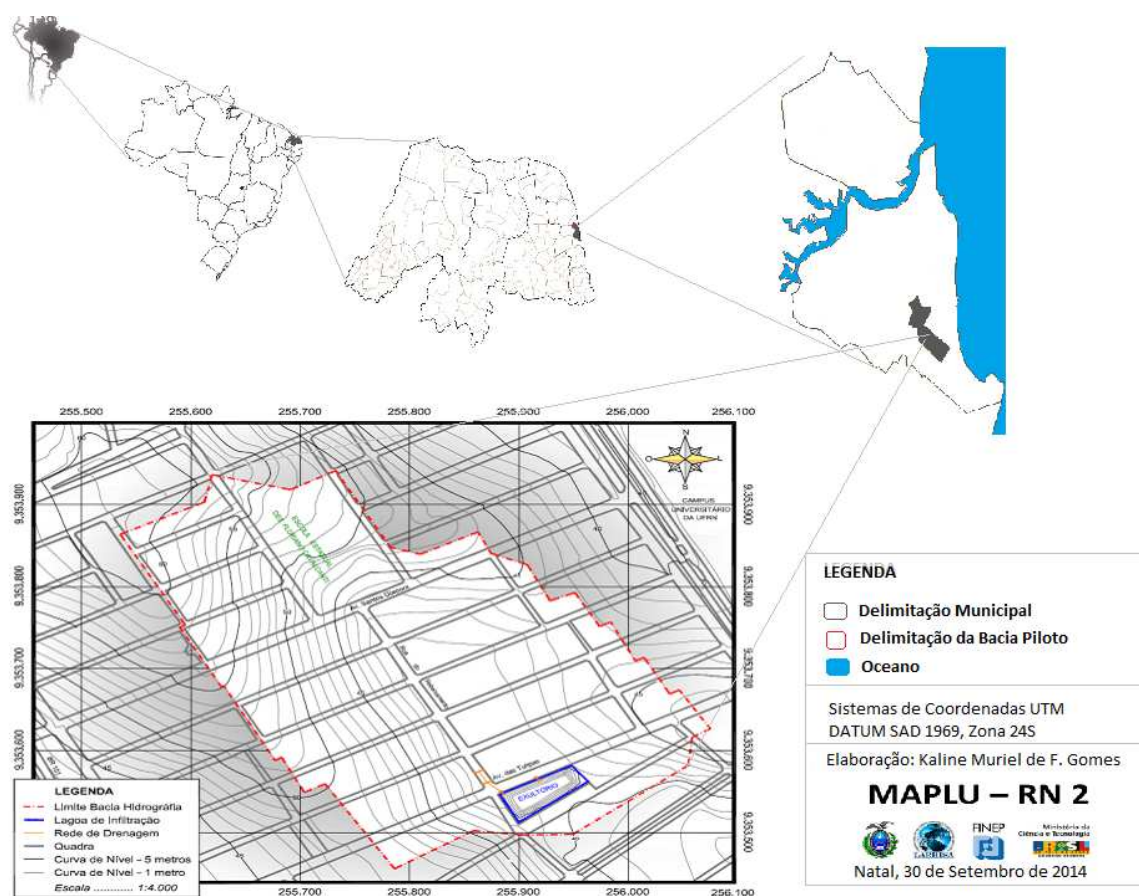


Figura 16: Delimitação da área de drenagem da Bacia Mirassol, cidade de Natal, RN, FONTE: adaptado de RIGHETTO *et. al.*, 2009.

Uso do solo

As condições atuais do uso e ocupação do solo foram determinadas, a partir de uma imagem do satélite IKONOS. Foram determinadas áreas permeáveis e impermeáveis através do software Auto CAD 2010, sendo elas: 1 - Áreas permeáveis: terrenos e jardins; 2 - Áreas impermeáveis: telhados, calçadas e ruas.

A bacia piloto de Mirassol, foi classificada no modelo como sendo do tipo residencial, com aproximadamente 94,4% (Tabela 7) de área com cobertura impermeável, como ilustrado na Figura 14.

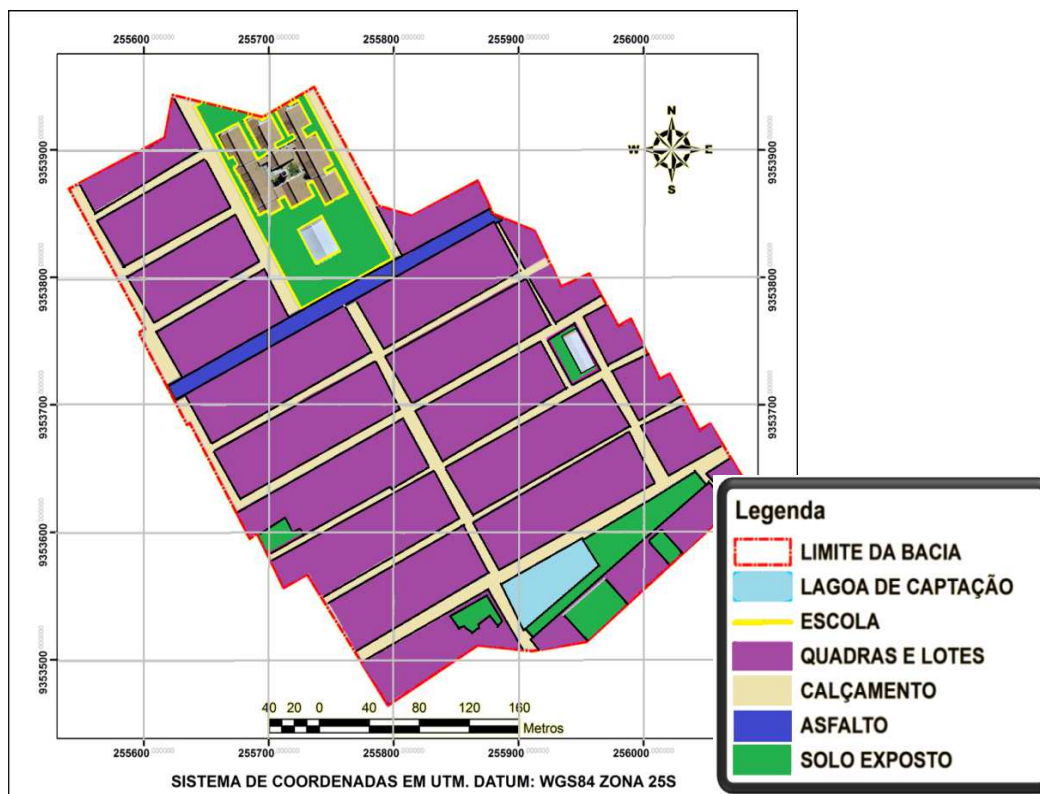


Figura 17: Mapa com a descrição do uso do solo.

Com base na classificação do tipo de cobertura do solo ilustrada na figura acima foi possível quantificar o percentual de áreas permeáveis e impermeáveis, conforme discriminados na Figura 15.

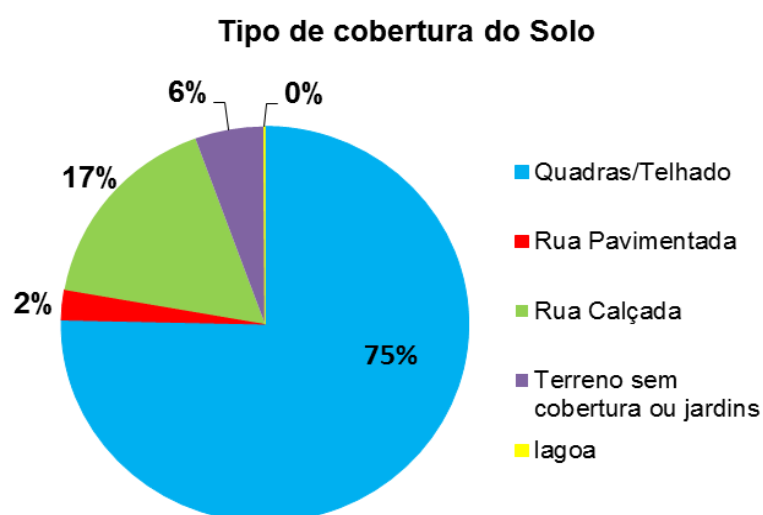


Figura 18: Cobertura do solo na Bacia de Mirassol.

Discretização da bacia de Mirassol

Como o escoamento dos deflúvios na bacia piloto de Mirassol ocorre de forma predominantemente superficial, foi inserido no modelo um total de 106 (cento e seis) nós e 112 (cento e doze) condutos, sendo 111 designados para operar como sarjetas e 1 conduto circular representando a galeria na entrada da lagoa de captação de águas pluviais, caracterizando com isto a rede de drenagem da bacia.

A Discretização da bacia resultou em um total de 148 sub-bacias, possibilitando a utilização de um sistema de acumulação de poluentes sobre a superfície da bacia. O direcionamento da vazão gerada pelas quadras e ruas foi considera no bloco de escoamento do modelo como sendo semelhante equivalente a um telhado de 4 águas, onde uma quadra possui em média 4 sentidos de escoamento distintos, direcionados para os nós conforme a declividade das subáreas. Dessa maneira, foram geradas 148 (cento e quarenta e oito) subáreas. A Figura 16 ilustra as características da discretização da bacia.

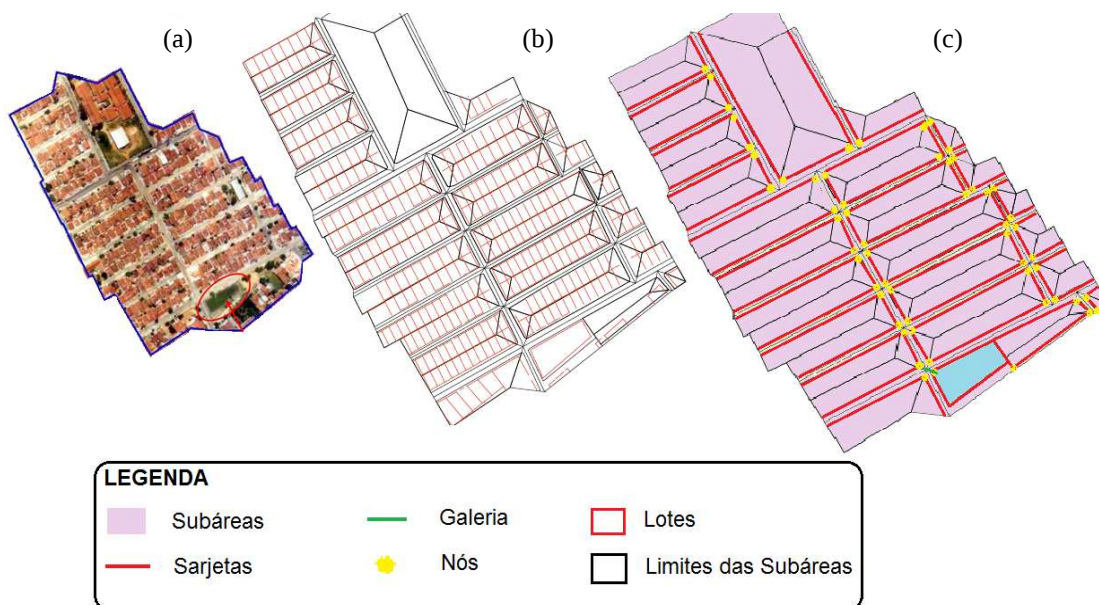


Figura 19: (a) Mapa das quadras e arruamentos da bacia piloto; (b) e (c) Discretização das áreas das quadras.

Descrição do modelo da qualidade da água no SWMM

A estrutura do SWMM compreende um conjunto de blocos funcionais, coordenados por um bloco executivo. Os blocos podem ser ativados sequencialmente ou separadamente. Os módulos de serviços são responsáveis pela entrada e tratamento dos dados (entrada de dados de precipitação, temperatura, formulação de gráficos, aplicação de estatística, etc.). Nos blocos computacionais (simulação hidrológico-hidráulica) se encontram os próprios modelos hidrológicos para a transformação da chuva em vazão, e os modelos de propagação hidrodinâmica do escoamento na rede. (Righetto, 2009)

A modelagem da qualidade da água nos trechos de canalização e nos nós indica que esses elementos se comportam como reatores de mistura completa, porém, um reator de fluxo pistão retrataria melhor a realidade, uma vez que as cargas poluentes tendem a não se misturar, se comportando como um pistão. A concentração de um constituinte no fim de uma etapa é encontrada realizando-se o balanço de massa, integrando-se a equação da conservação de massa, com valores médios para as quantidades que variam com o tempo, tal como a vazão e o volume da canalização.

Polutogramas são criados conforme o volume de escoamento e as condições da área de captação, assim como o número de dias de deposição seca, limpeza das quadras e o uso e ocupação do solo. A variável hidrológica utilizada pelo modelo é a precipitação, onde por meio das características físicas da superfície do solo o modelo realiza a transformação de chuva em vazão.

O uso do solo, para o aplicativo, é dividido conforme as características locais de superfície, taxas de impermeabilização, rugosidade da superfície, declividade das subáreas.

As parcelas de solo, de acordo com as atividades urbanas podem ser definidas em: residenciais, comerciais, industriais e ainda sem urbanização.

As superfícies das áreas contêm telhados, ruas pavimentadas, jardins, solos sem uso, entre outros.

Os usos de solo devem ser especificados para que se possa ter uma variação espacial do acúmulo e da “lavagem” dos poluentes dentro da área estudada.

A partir da definição do uso do solo e dos poluentes típicos da urbanização os cálculos de carreamento são efetuados pelo modelo em função do número de dias secos precedentes.

Para representar a acumulação de poluentes em superfícies urbanas, a metodologia interna do SWMM testa 4 modelos de acumulação, a saber: linear, potencial, exponencial e séries temporais. As equações internas ao modelo são apresentadas a seguir:

- Modelo de acumulação Potencial: $B = \text{Min} (C_1, C_2 t^{C_3})$. Equação 1
- Modelo de acumulação Exponencial: $B = C_1(1 - e^{-C_2 t})$ Equação 2
- Modelo de acumulação Linear: $B = C_1 t / (C_4 + t)$ Equação 3

Sendo: B = Poluentes acumulados em um dado tempo (Kg/ha); C1 = limite de acumulação (Kg/ha); C2 = expoente de acumulação (Kg/ha.dia); C3 = expoente do tempo (1/dia); C4 = constante de meia saturação, ou dias para que se atinja a metade da máxima acumulação possível (Kg/ha.dia); t = período de deposição seca (Dias).

O transporte de poluentes depende da intensidade da chuva; este processo se dá pela remoção de poluentes acumulados nas superfícies impermeáveis, sendo estes transportados junto com os deflúvios superficiais.

O cálculo da quantidade de poluentes lavados da superfície da bacia é realizado pelo modelo SWMM, conforme uma equação de autoria desconhecida, encontrada em 1974 em relatórios do corpo de engenheiros do exército do distrito da Boston como se segue:

- Lixiviação: $W = C_{w1} \cdot Q^{C_{w2}} B$ Equação 4

Sendo: W = quantidade de poluente lixiviado (mg/l); $Cw1$ = coeficiente de carreamento (mg/l); $Cw2$ = expoente de lavagem; Q = Vazão no ponto de análise; B = Quantidade de poluente disponível na superfície no tempo t .

Análise de sensibilidade das variáveis do modelo

A análise de sensibilidade em uma bacia hipotética do módulo RUNOFF foi realizada em uma etapa que precedeu a calibração do modelo, a fim de determinar quais os parâmetros que exercem maior influência sobre os resultados do modelo. A variável utilizada na análise de sensibilidade foi a concentração de pico e o tempo em que ocorre a concentração de pico da variável de qualidade analisada. Para esta análise foi selecionado um evento hipotético, com uma precipitação acumulada de 120 mm.

A sensibilidade dos parâmetros foi obtida variando-se um parâmetro por vez, e mantendo-se os demais fixos e, em seguida, submetendo-os à variação numa escala de -90% a +90% em relação aos valores originais, para que se pudesse verificar a influência de cada variável no resultado final.

Os parâmetros analisados referentes ao módulo RUNOFF foram: a máxima quantidade de poluentes disponível na superfície da bacia ($C1$), a constante de acumulação ($C2$) e os parâmetros da função de carreamento ($Cw1$ e $Cw2$).

O sistema hipotético inicialmente adotado considerou que o escoamento dos deflúvios ocorresse de forma superficial, assim como ocorre na bacia real estudada. A bacia foi construída com um total de 16 sub-bacias e é composta por um total de 28 (vinte e oito) nós e 28 (vinte e oito) condutos, formando o sistema de drenagem hipotético. A Figura 17 ilustra as características da discretização da bacia.

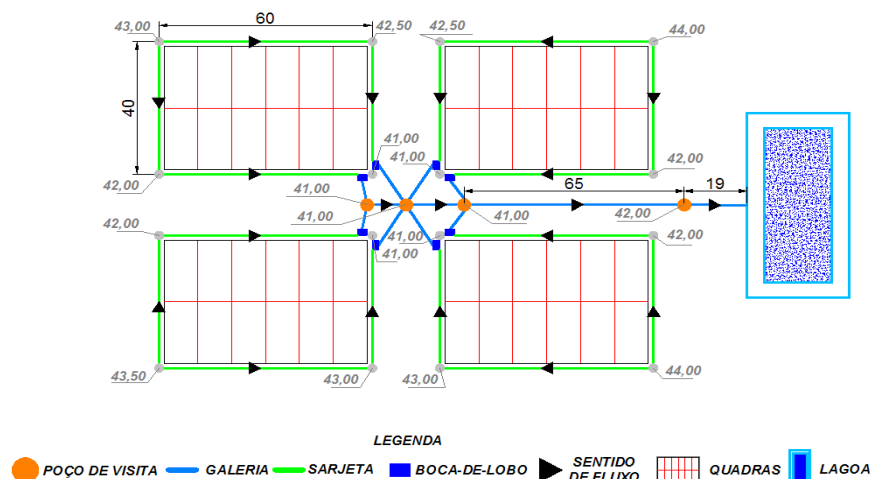


Figura 20: Discretização de uma bacia hipotética.

Os hidrogramas gerados foram adotados como séries de vazões observadas. Os dados de qualidade da água foram obtidos por meio da medição de um evento real, em 2008.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade realizada na bacia hipotética para as variáveis (C1, C2, Cw1 e Cw2), relativos ao parâmetro de qualidade, do modulo RUNOFF, buscou avaliar a influência dessas variáveis na concentração de pico do polutogramas.

Para o modulo RUNOFF os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade em relação à variação da concentração de pico foram: a acumulação máxima de poluentes na superfície da bacia (C1), o expoente de acumulação (C2) e o coeficiente de carreamento (Cw1). Já o expoente de lavagem teve pequena influência na alteração dos picos do polutograma. Na Figura 18 são apresentados os resultados gráficos da análise de sensibilidade para cada variável analisada.

As variáveis de acumulação máxima na superfície da bacia apresentaram um comportamento aproximadamente linear, quando foram alteradas as concentrações para os dois picos analisados com o acréscimo ou

decréscimo dos valores de C1. A alteração da concentração de pico apresentou pouca sensibilidade frente à variação do expoente de acumulação C2.

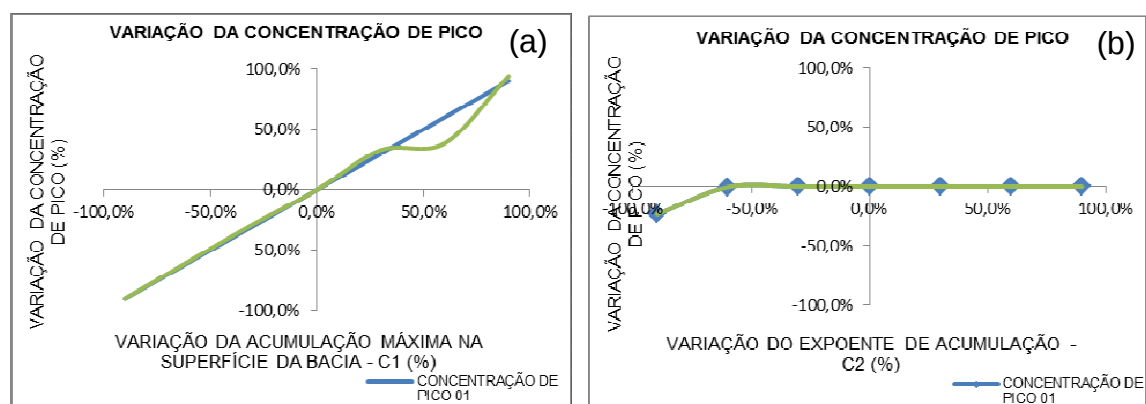


Figura 21: (a) Variação da concentração de pico com a variação da acumulação máxima; (b) Variação da concentração de pico com a variação do expoente de acumulação.

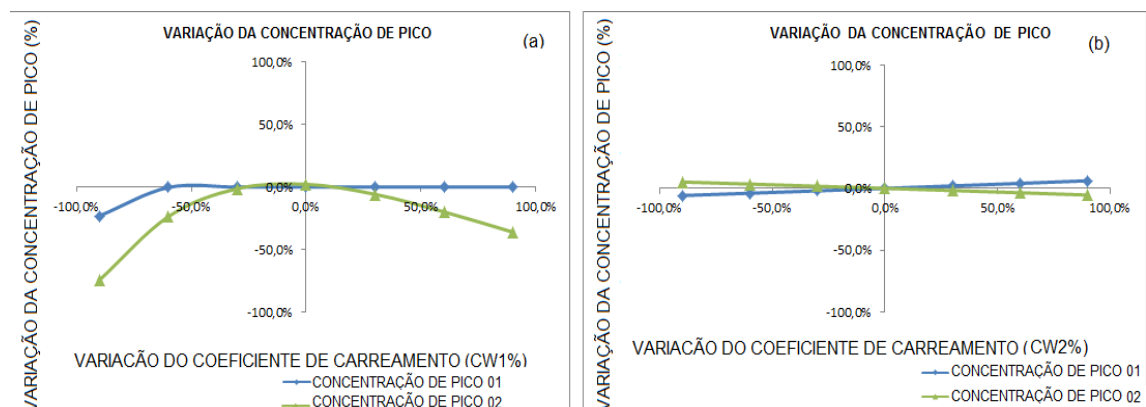


Figura 22: (a) Variação da concentração de pico com a variação do coeficiente de carreamento e (b) Variação da concentração de pico com a variação do expoente de lavagem.

O coeficiente de carreamento da equação de transporte causa alteração dos dois picos quando seus valores são diminuídos e verifica-se sensibilidade considerável do segundo pico quando esse coeficiente é aumentado.

Modelagem da qualidade dos deflúvios

As variáveis escolhidas para a modelagem da poluição difusa foram objeto de um monitoramento em uma etapa que precedeu a esta. As variáveis de qualidade simuladas para o escoamento foram: Sólidos Suspensos Totais

(SST) Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Fósforo Total (FT); a função escolhida para o BUILDUP foi do tipo exponencial conforme estudos realizados por Sartor & Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997) onde verificaram a acumulação de sedimentos do tipo exponencial em bacias urbanas de predominância residencial.

O modulo TRANSPORT permitiu a simulação da qualidade utilizando 5 variáveis nas funções referentes à qualidade do escoamento, sendo que o período de estiagem antecedente foi determinado através de observações entre os eventos, as demais variáveis foram: Acumulação máxima na superfície (C1) e expoente de acumulação (C2) da função de acumulação BUILDUP e Coeficiente de Carreamento (Cw1) e Expoente de Lavagem (Cw2) da função de carreamento dos poluentes sobre a superfície WASH OFF, sendo essas variáveis ajustadas para cada evento.

O modelo aqui estudado permite simulações considerando duas situações, a primeira com base no período de estiagem antecedente, onde o SWMM é capaz de calcular a acumulação ocorrida durante o período de estiagem. Em uma segunda situação é considerando um valor preestabelecido de carga de poluente no início do evento. Diante disto, foi realizado em uma primeira análise, o ajuste do modelo baseado no período de estiagem antecedente, cujas simulações foram feitas a partir da bacia totalmente limpa, ou seja, sem carga inicial em sua superfície, de modo que fosse possível a observação da quantidade de carga poluente que se deposita na superfície durante o período de estiagem, para tanto foram considerados 4 eventos com períodos de estiagem antecedentes distintos um do outro, variando de 1 a 15 dias, onde foi percebido que houve um incremento máximo de 1,02kg/ha de sólidos suspensos.

Para se estimar a carga inicial de poluentes na superfície da bacia no início da simulação, foram considerados níveis diferentes de poluição nas sarjetas e quadras, levando-se em conta três aspectos, a saber: grau de poluição em cada subárea, diferenciando-se em subárea do tipo quadra e

subárea do tipo arruamento; grau de declividade das subáreas e o grau das superfícies, ou seja, o tamanho das áreas de acumulação.

A classificação do grau de poluição da bacia foi realizada por meio de Diagnóstico com visitas in loco, visando o reconhecimento da área, a identificação dos distintos níveis de acumulação de poluição em diversos pontos. A classificação se deu em níveis de 1 a 4, em que: 1 - Área visivelmente limpa, 2 - Área com pouco sedimento acumulado, 3 - Área com sujeira, 4 - Área com muito sedimento acumulado, cujos valores estabelecidos para cada nível foram considerados como uma configuração inicial de cada sub-bacia, ou seja, o acúmulo de poluentes no início da simulação. As ilustrações abaixo mostram as Áreas de Influência dos pontos de coleta de sedimentos (Figura 20) e a classificação da bacia com base nos aspectos de poluição considerados (Figura 21).

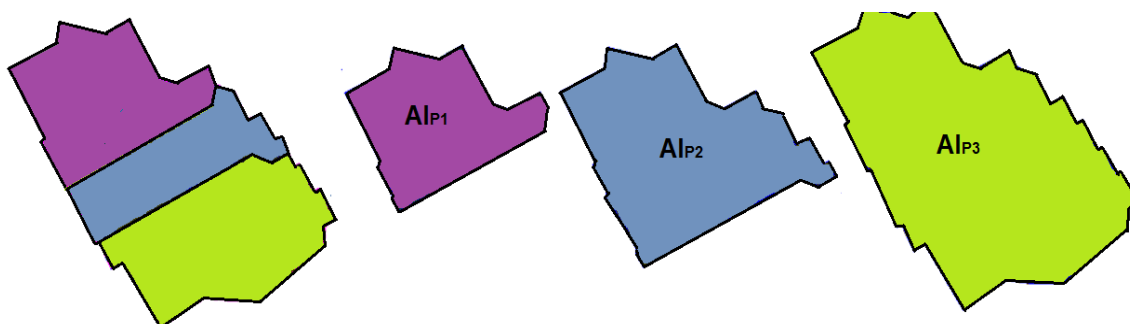


Figura 23: Áreas de Influência dos pontos escolhidos para a coleta de sedimentos.



Figura 24: Classificação dos níveis de poluição e pontos de amostragem dos sedimentos.

Os valores utilizados para declividade e extensão das áreas discretizadas da bacia, foi utilizados valores encontrados por Lima (2011) cuja base de dados foi resultados de geoprocessamento e atividades de desenho em ambiente georreferenciado para que fosse possível se extrair essas informações para cada subárea da bacia estudada.

A estimativa da carga inicial nas subáreas foi realizada com base na média ponderada das variáveis citadas abaixo, em que o peso de cada área discretizada foi calculado da seguinte forma.

$$C = \frac{G_c \cdot G_i \cdot G_a}{\sum G_c + \sum G_i + \sum G_a} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo que: C = Peso da variável para cada área de contribuição; G_c = Grau de poluição; G_i = Grau da declividade, G_a = grau em proporções de sub-área.

Calibração do modelo

A calibração do modelo foi realizada para a bacia piloto de Mirassol com base análise prévia da sensibilidade do modelo em uma bacia hipotética, onde se verificaram quais foram as variáveis que apresentaram maior influencia na variação do pico de concentração e no erro médio sobre a conservação de massa. O ajuste se baseou também no estabelecimento de critérios que pudessem auxiliar a tomada de decisão, critérios esses definidos por ordem de prioridade como: menor erro médio sobre a conservação de massa, não sendo aceitáveis valores que ultrapassassem 10%; maior coeficiente de correlação de Pearson e menor diferença das concentrações de pico entre os valores medidos e os simulados. Foi verificada em primeiro lugar qual a variável possui maior influencia no erro médio sobre a conservação de massa, uma vez verificado que as variáveis CW1 e CW2 possuem maior do que as demais variáveis essas variáveis foram tomadas como ponto de partida o ajuste da variável CW1 por tentativas até que fossem atingidos valores menores que 5% de erro, uma vez alcançado isso, essa variável era considerado como ótimo.

Após definido um valor para CW1 como ponto de partida na calibração do SWMM, passou-se a ajustar os demais parâmetros, com amplitude máxima

de variação de -90% a 90%, com variação a cada 10% dos valores adotados inicialmente para mais ou para menos. A calibração da variável Sólidos Totais (ST) apresentou um ajuste médio em relação ao coeficiente de correlação de Pearson de 0,83 para o evento ocorrido no dia 25/10/2013 com 15 dias de estiagem antecedente; os erros médios entre os valores medidos e os simulados resultaram em uma variação de cerca de -1,53% a 0,67%, considerados como ótimos do ponto de vista da conservação de massa para o mesmo evento. A Figura 22 apresenta os polutogramas dos eventos ajustados.

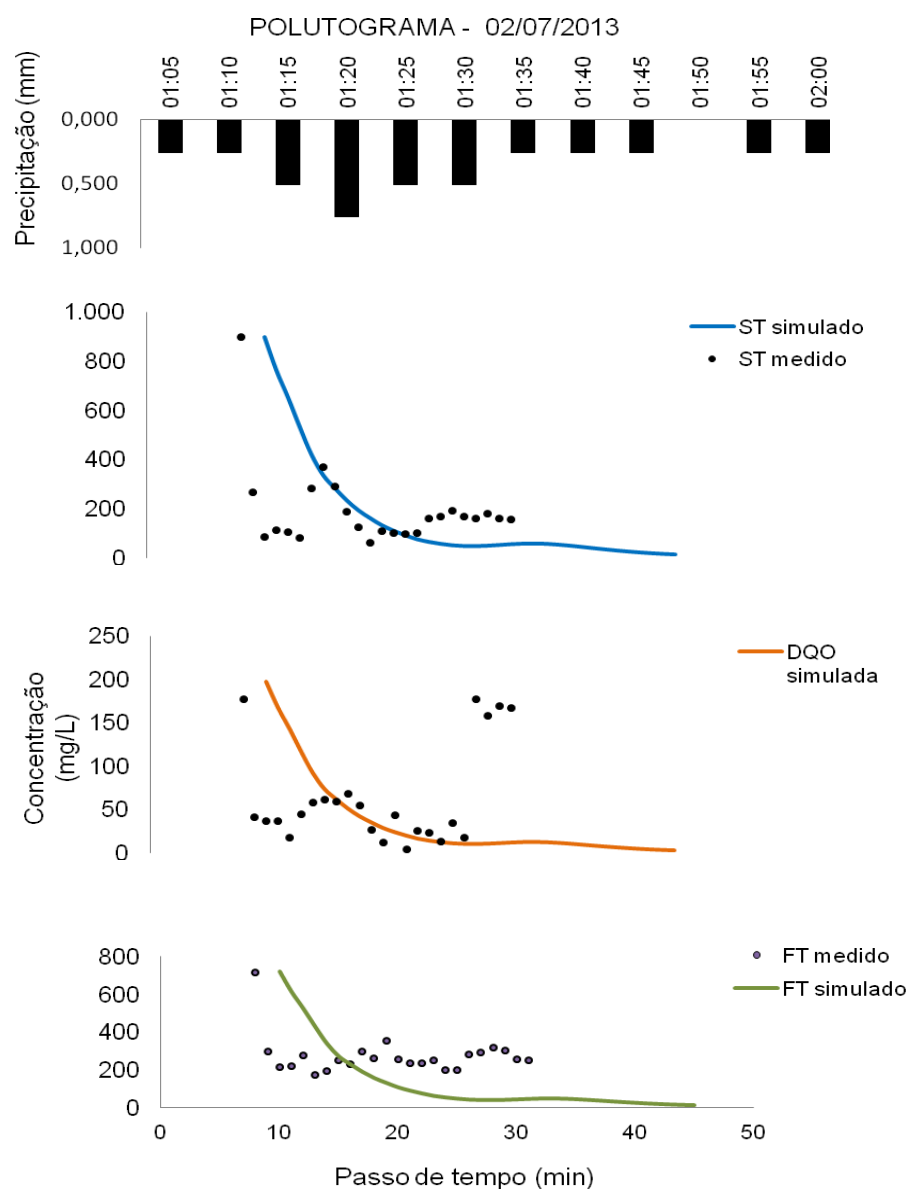


Figura 25: Polutogramas ajustados do evento 02/07/2013.

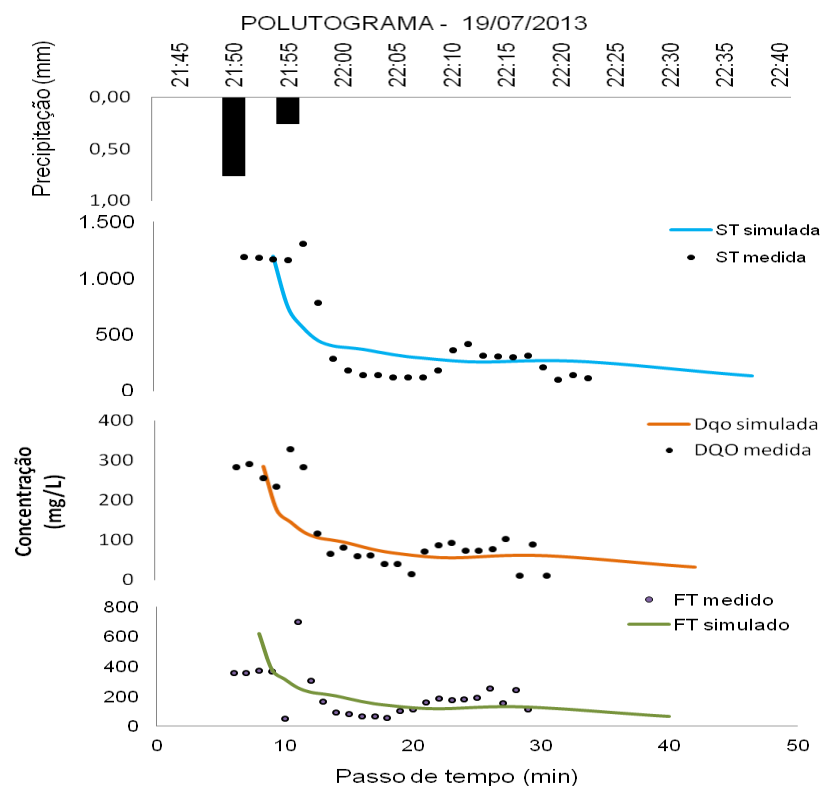


Figura 26: Polutogramas ajustados do evento 19/07/2013.

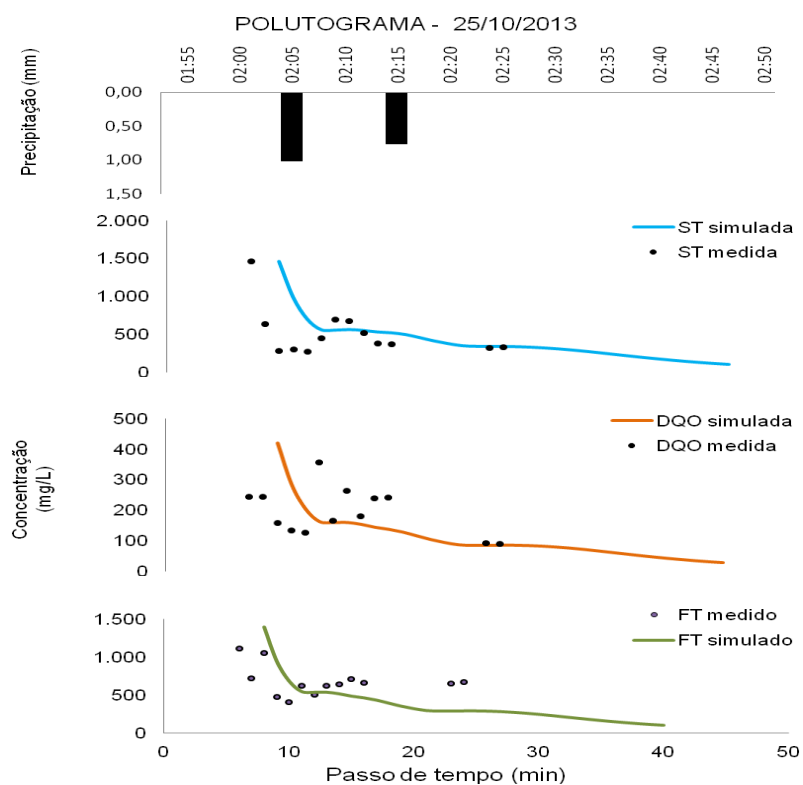


Figura 27: Polutogramas ajustados do evento 25/10/2013.

As funções para DQO e FT não foram definidas, partindo-se do pressuposto de que, as concentrações dessas variáveis são compostas por uma fração fixa da concentração de Sólidos Suspensos, sendo aqui tratada como co-fração.

A calibração foi realizada por ajuste manual das variáveis do modelo. Foram adotadas como variáveis de calibração para a função de acumulação de poluentes na superfície da bacia: a máxima quantidade de poluentes disponível, C1 e o coeficiente de acumulação, C2. Os resultados apontam para uma variação no valor de C1 de 100 a 280 Kg/ha para ST nos 4 eventos selecionados. Essa variação deve-se normalmente a intensidade de chuva no início do evento, variando de um evento para outro, assim como a duração do período de estiagem que antecede o evento. Já o coeficiente de acumulação é a variável relacionada com o uso do solo cujas variações no valor de C2 foram: 0,0891 a 0,095 Kg/ha.dia para a mesma variável, estando dentro da faixa (0,01 a 0,45 Kg/há.dia) encontrada por Deletic et al. (1997) e Deletic et al. (2000) em um estudo semelhante.

O carregamento das cargas poluentes foi calibrado com base no ajuste do coeficiente de carregamento, C_{w1} , e do expoente de lixiviação, C_{w2} . Os valores encontrados para a variável C_{w1} variou de 245 a 640 mg/l e o expoente de carregamento, C_{w2} teve uma variação de 0,91 a 1,2. Chen & Adams (2007), simularam a concentração de sedimentos em suspensão com a utilização do SWMM, encontrando um valor de 0,96 para o expoente de carregamento C_{w2} .

As co-frações de DQO e Fósforo após o ajuste dos parâmetros da função de acumulação de ST, apontam para um percentual de aproximadamente 24% e 55% respectivamente, em função da quantidade de sólidos nos eventos ajustados. Em confronto com os dados medidos em uma etapa preliminar a esta em que foram determinados os teores de DQO e Fósforo Total sendo gerados por uma carga fixa de sedimentos secos, em que foram encontrados aproximadamente 38% e 54% para DQO e FT respectivamente em sólidos de granulometria menor que 0,15mm, indicando que para os eventos analisados apenas as cargas mais finas de sedimentos

foram carregadas no início de cada evento. Isso é justificado por se tratar de uma relação inversamente proporcional, uma vez que quanto menor for o diâmetro da partícula mais fácil será seu transporte, elevando assim o valor do coeficiente de carregamento, isso é comprovado pelos valores apresentados acima.

Os valores obtidos pelo ajuste das variáveis estão resumidos na tabela 8. Além das variáveis intrínsecas do modelo, será apresentado o Coeficiente de correlação de Pearson para os eventos calibrados, erro médio relativo ao balanço de massa no SWMM, diferença da concentração de pico entre os valores observados e os simulados para cada evento e o atraso entre os picos de concentração.

Tabela 8: Bacia totalmente limpa no início da estiagem, valores de C1 considerado como incremento de carga no período seco antecedente.

Sólidos Suspensos	EVENTOS			
	02/07/2013	19/07/2014	14/08/2015	25/10/2013
C1 (Kg/ha)	0,310	1,020	0,330	0,215
C2 (Kg/ha.dia)	0,310	0,101	0,095	0,10
CW1 (mg/l)	210,98	425,00	309,2	481,3
CW2	0,946	0,945	1,200	0,79
PEARSON	0,630	0,750	0,710	0,87
Erro SWMM (%)	-2,830	-0,100	0,350	-9,8
Variação da concentração entre os Picos medidos e simulados (%)	0	-0,3	-2,9	-9,3
Variação do tempo entre os Picos medidos e simulados (minutos)	2	2	1	2

Tabela 9: Bacia considerando um remanescente de carga considerada como área com contribuição no início do evento.

Sólidos Suspensos	EVENTOS		
	02/07/2013	19/07/2014	25/10/2013
C1 (Kg/ha)	100	130	280
C2 (Kg/ha.dia)	0,0896	0,11	0,0891
CW1 (mg/l)	245	435	640
CW2	0,91	0,94	0,95
PEARSON	0,55	0,79	0,83
Erro SWMM (%)	-1,53	0,67	-0,097
Variação da concentração entre os Picos medidos e simulados (%)	-0,2	-0,4	-0,035
Variação do tempo entre os Picos medidos e simulados (minutos)	2	2	2

Para o evento do dia 14/08/2014 não foi possível chegar a um resultado satisfatório para as simulações considerando cargas remanescentes no início da simulação, uma vez que apresentaram ou valores de correlação muito baixos ou o erro médio foi demasiadamente alto.

Diante do exposto, pôde-se verificar que o comportamento da poluição difusa onde há ciclos de acúmulo e carreamento de poluentes na bacia, pode ser estimado pelas seguintes equações:

$$B = 280(1 - e^{-0,0861t}); \text{ para o período de estiagem,}$$

Onde:

O acúmulo máximo encontrado foi de 280 Kg/ha, o expoente de acumulação no período seco ou taxa de acumulação foi 0,0861 Kg/ha.dia para

o evento do dia 25/10/2013, que apresentou maior correlação entre os eventos medidos e os simulados.

$$W = C_{w1} \cdot Q^{C_{w2}} \cdot B; \text{ para a lixiviação dos poluentes na bacia}$$

Onde:

O coeficiente de carreamento máximo ajustado foi de 640 mg/l e o expoente de lixiviação, 0,95.

Um fator importante a se considerar é em relação à carga de poluente remanescente de eventos anteriores no sistema, contribuindo para os próximos eventos como material disponível na superfície da bacia no início do escoamento. Todavia, não foi possível neste estudo uma análise mais aprofundada para esse aspecto.

CONCLUSÕES

O estudo realizado na Bacia Piloto de Mirassol foi possível graças ao apoio do Projeto Manejo de Águas Pluviais Urbanas – MAPLU, em que nesta última etapa do projeto foi estudado o comportamento dos processos de acumulação e carreamento de poluentes na bacia. Foi possível perceber que as cargas poluentes que são transportados para exutório da bacia, ou seja, na lagoa final dependem de fatores distintos como: intensidade da chuva, duração do evento, tamanho da área de contribuição e declividade das ruas, período de estiagem antecedente, tamanho dos grãos de sedimentos, dentre outros fatores, tornando a relação Chuva x Vazão x Poluente, de difícil mensuração.

O modelo aqui estudado para a avaliação da propagação de poluentes no escoamento representou satisfatoriamente as variáveis ST e DQO, (esta última sendo uma fração fixa da primeira) nas simulações no SWMM, já para a variável FT, não foi possível a obtenção de valores satisfatórios nem pelo ajuste dos parâmetros dessa variável no modelo tampouco pelo ajuste da co-fração nos Sólidos. Obtendo-se os valores de correlação de Pearson aproximadamente 0,83 para o evento do dia 25/10/2013 com estiagem

anterior de 15 dias. Com isso, é possível perceber que, a modelagem computacional pode ser uma ferramenta indispensável para o planejamento de projetos na área de drenagem urbana e avaliação de impactos decorrentes da poluição difusa urbana, visando à minimização desses impactos nas águas superficiais ou subterrâneas.

A calibração do modelo apontou para um bom ajuste entre as curvas e os picos de concentração dos polutogramas medidos e os simulados, apresentando um atraso entre picos de 2 minutos, considerado aceitável visto o grau de precisão da observação onde foram medidos os 25 primeiros minutos de cada evento. Foi constatado também que nesses primeiros minutos é onde ocorre a lavagem da maior parte dos poluentes na bacia.

Nas simulações foram considerados períodos maiores para a construção dos polutogramas, visando à identificação de outros possíveis picos de menor magnitude. Entretanto, nesse estudo foi constatada a ocorrência de apenas um pico de concentração no início do evento, onde a maior parte da carga é lavada. Foi verificado ainda que os picos de concentração medidos levaram aproximadamente 6 minutos para chegar à entrada da lagoa contra 8 minutos dos valores simulados, cronometrados a partir do momento em que o pluviômetro detectava o início de um evento.

Por fim, É possível concluir também que, tanto nos eventos medidos quanto nos simulados, o pico de concentração decresce rapidamente em uma função exponencial como proposta no início deste estudo em que o coeficiente de carregamento, $Cw1$ e expoente de lavagem, $Cw2$ valem 640 mg/l e $0,95$ respectivamente, sendo que nos primeiros 5 minutos de medição as concentrações são as maiores, decrescendo rapidamente para valores aproximadamente constantes como comprovado pelos resultados deste estudo.

REFERÊNCIAS

Baffaut, C.; Delleur, J. W. (1989) **Expert System for Calibrating SWMM**.
Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 115, No. 3. ASCE.

Liong, S. Y.; Chan, W. T., Lum, L. H. (1991). **Knowledge-based system dos SWMM runoff component calibration**. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 117, No.53.

NASCIMENTO, N.O. **Prospecção Tecnológica**. Recurso Hídricos. Anexo II – c. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. UFMG. p. 42. 2003.

Rennó, C. D.; Soares, J. V. (2010). **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. Disponível em:
[http://www.dpi.impe.br/cursos/modelagem/cap2_momdelos_hidrol\[ogicos.pdf](http://www.dpi.impe.br/cursos/modelagem/cap2_momdelos_hidrol[ogicos.pdf)
 acesso em: 19/01/2014.

RIGHETTO, A. M.; ANDRADE NETO, C. O.; BRITO, L. P.; SALES, T. E. A. de; MEDEIROS, V. M. A.; FERREIRA, L. C. A.; LIMA, R. R. M., (2009). **Estudo Qualiquantitativo de Manejo de Águas Pluviais em Área de Drenagem Piloto na Cidade de Natal-RN**. In: FINEP, PROSAB. (Org.). Manejo de Águas Pluviais Urbanas. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES 2009, v. 04, cap. 6, p. 218-255.

Shinma, T. A. (2011). **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. Dissertação (mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 136p.

Wan, B.; James, W. (2002). **SWMM Calibration using Genetic Algorithms**. Urban Drenage 2002.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A acumulação de poluente na superfície da bacia ocorre rapidamente após eventos chuvosos, desacelerando ao longo dos dias. As características dos grãos dos sedimentos também sofrem influência com o passar do tempo, onde os grãos tornam-se mais finos, pela desintegração influenciada pelo Tráfego nas vias, entre outros fatores.

Os resultados encontrados neste estudo indicam que mais da metade dos sedimentos depositados na superfície da bacia possuem granulômeros maior que 0,40 mm e também que cerca de 30% e 54% para valores medidos e 24% e 55% para valores calibrados de DQO e FT respectivamente estão ligados a partículas menores que 0,15 mm. Sugerindo-se que, para a redução da carga dessas variáveis é necessária a instalação de dispositivos de retenção e tratamento dessa porção mais fina de sólidos.

Não foi possível a mensuração da produção de sedimentos na bacia, porém pode-se perceber por meio de observações in loco que houve redução na quantidade de sedimentos, considerando uma situação global após um evento de chuva, ou seja, a bacia. Entretanto, levando-se em conta, ambientes pontuais como os nós, essas cargas aumentam ou diminuem após os eventos, variando com a intensidade e capacidade de transporte do escoamento. Com isso, foi observado que no dia seguinte a um evento pluviométrico, havia uma acumulação maior de sedimento no talvegue da bacia, divergindo das demais ruas, que se encontravam como ambientes limpos, ou seja, sem sedimentos acumulados. Isso pode ser explicado também pela influência das maiores declividades das ruas do entorno em comparação a declividade do talvegue, fazendo com que durante os eventos, o sedimento acumulado nas ruas do entorno fossem carregados até o talvegue, ali se depositando.

Em uma análise espacial da distribuição granulométrica na bacia, foram escolhidos pontos distintos no talvegue por se tratar de um ambiente onde é acumulado toda a carga de sedimentos oriundo das ruas do entorno, foi possível constatar que, na área de coleta do ponto 3 (Figura 18), ou seja, mais próxima ao exutório, a granulometria dos sedimentos encontrada nas amostras foi menor do que nos demais pontos, podendo-se concluir que as chuvas monitoradas não ocorreram em intensidade suficiente para carrear as

partículas de diâmetro maior. Como os grãos menores são transportados com mais facilidade, essa porção mais fina era transportada junto com o escoamento na forma dissolvida ou na forma suspensa e se acumulava próximo ao exutório, formando uma carga residual disponível na superfície para serem carregadas em um próximo evento.

Isso pode ser comprovado pelas medições realizadas, em que as concentrações das amostras decrescem rapidamente, podendo ser justificadas ou pela proximidade da carga residual mais fina de sedimentos ao talvegue ou pela facilidade de transporte dessa porção, se esgotando rapidamente, se comparado à porção de granulometria maior de sólidos.

Com relação à modelagem, pode-se concluir que assim como nas nos polutogramas medidos, os polutogramas simulados também apresentaram uma redução acentuada da concentração dos agentes simulados nos primeiros 5(cinco) minutos do evento. Pode-se perceber também que, houve um atraso de aproximadamente 2(dois) minutos entre os picos medidos e simulados, podendo essa variação, sendo esse atraso este previsto por se tratar de um modelo que requer um alto grau de detalhamento físico e ambiental, estando com isso dentro da margem esperada de 10minutos. Nas curvas simuladas de DQO no cenário da bacia totalmente limpa após um evento chuvoso, pode-se perceber que as variações das concentrações dessa variável foram de aproximadamente um terço das variações de ST simuladas quando ajustados os parâmetros das equações do modelo, comprovando com isso os resultados obtidos para o ST como co-polvente da DQO.

Com o ajuste das variáveis do modelo, foi possível obter um coeficiente de correlação de 0,83, relativos aos valores medidos e os simulados para o evento ocorrido no dia 25/10/2014 com 15 dias de estiagem antecedente e 0,55 para o evento do dia 02/07/2014 com 3 dias sem chuva, concluindo com isso que o número de dias sem chuva pode possuir influencia e sobre a qualidade dos resultados e quanto maior o período de estiagem antecedente melhor será a representação de uma situação real.

REFERENCIAS

BARCO, O. J., CIAPONI, C. Papiri, S. **Quantitative and qualitative analysis of storm water runoff in an urban experimental catchment**. Second World Wide Workshop for Young Environmental Scientist. Paris, France, 2003.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. **Comparação das Respostas do Modelo SWMM para Diferentes Amplitudes de Cheia**. In: Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul, Santa Maria, Nov. 2005, 1, p. 1-17.

TSIHRINTZIS, V. A.; HAMID, R. **Modeling and Management of Urban Stormwater Runoff Quality: A Review**. Water Resources Management. n.11, p. 137-164, 1997, Holanda.

RIGHETTO, A. M.; ANDRADE NETO, C. O.; BRITO, L. P.; SALES, T. E. A. de; MEDEIROS, V. M. A.; FERREIRA, L. C. A.; LIMA, R. R. M., (2009). **Estudo Qualiquantitativo de Manejo de Águas Pluviais em Área de Drenagem Piloto na Cidade de Natal-RN**. In: FINEP, PROSAB. (Org.). Manejo de Águas Pluviais Urbanas. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES 2009, v. 04, cap. 6, p. 218-255.

LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. **Groundwater Recharge: a guide to Understanding and Estimating Natural recharge**. International Association of Hydrogeologist, v.8. Alemanha, 1990.

PORTO, M.F.A. **Aspectos Qualitativos do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas**. In: Tucci, C.E.M.; Porto, R.L.L.; Barros, M.T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995, V.5, p.387-414.

TUCCI, C.E.M. **Inundações Urbanas**. In: Tucci, C.E.M.; Porto, R.L.L.; Barros, M.T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995, V.5, p.15-36.

DOTTO, C.B.S.; PAIVA, E.M.C.D.; SILVA, L.F. **Acumulacao e caracterizacao dos sedimentos em superfícies asfálticas de área urbana em Santa Maria-RS**. In: VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2006, Santa Maria. Sedimentos: o Desafio da Multidisciplinaridade. Porto Alegre: ABRH, 2006.

DELETIC, A.; MAKSIMOVIC, C.; IVETIC, M. **Modelling of storm wash-off of suspended solids from impervious surfaces**. Journal of Hydraulic Research. v. 35, n. 1, p. 99- 118, 1997.

JAMES, W.; HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E.; PITT, R. E.; JAMES, W. R. C.; ROSENER, L. A.; ALDRICH, J. A., **User's Guide to SWMM**, publicado por CHI, Guelph, Ontario, Canada, 2003.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. **Study of pollutant wash off from small impervious experimental plots**. Water Resour. Res. 39(6): [np]. 2003.

GASTALDINI, M.C.C.; SILVA, A.R.V. **Pollutant distribution in urban surface.** 2nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 2012.

Settle, S., Goonetilleke, A. and Ayoko, G. **Determination of Surrogate Indicators for Phosphorus and Solids in Urban Stormwater: Application of Multivariate Data Analysis Techniques.** Water Air and Soil Pollution, pp. 149-161, 2007.

APENDICES

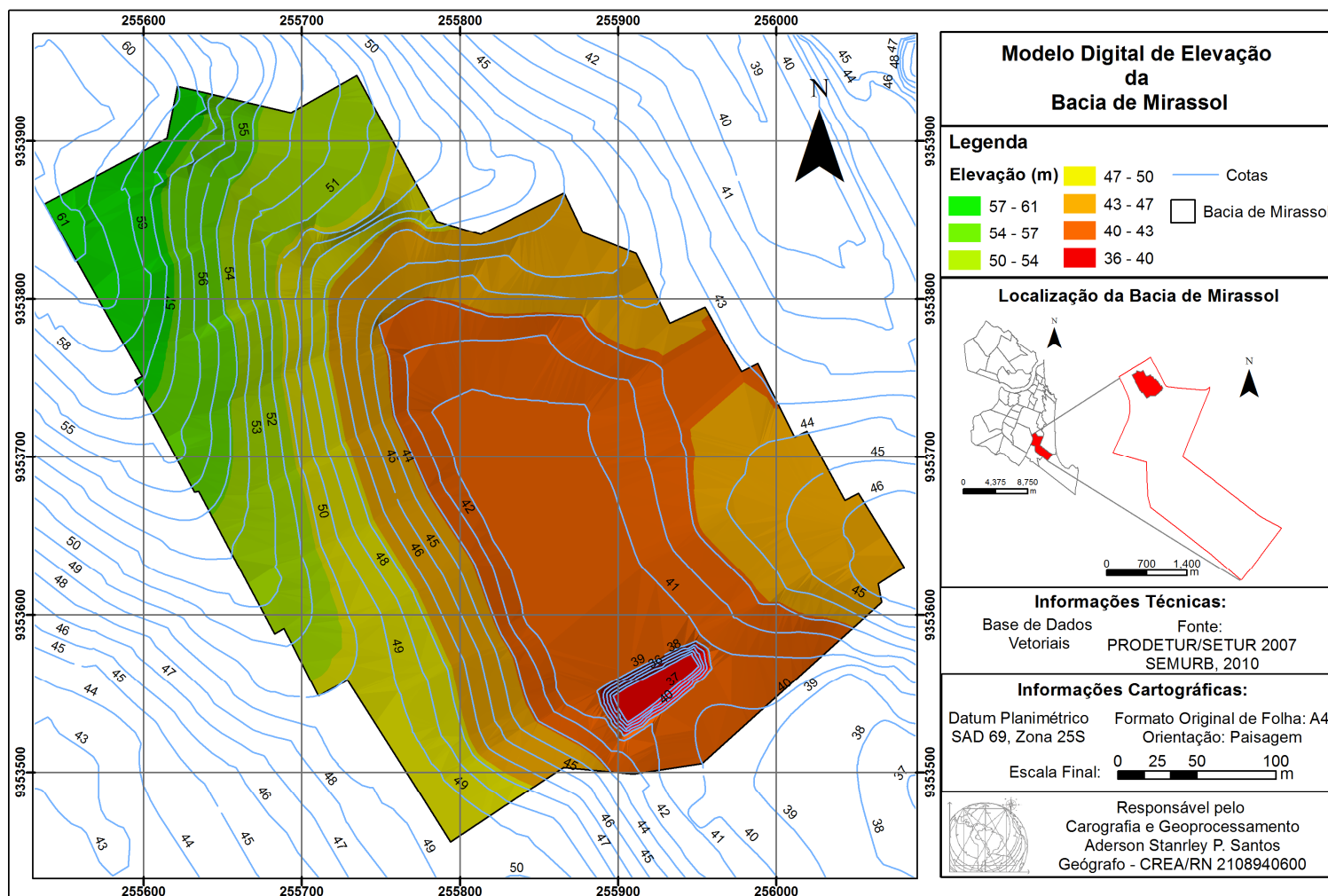


Figura A1: Modelo Digital de Elevação da Bacia de Mirassol.

Tabela A1: Porcentagem das áreas Permeáveis e Impermeáveis na Bacia Piloto.

TIPO DE COBERTURA	Área (ha)	% de área	PERMEÁVEL (%)	IMPERMEÁVEL (%)
Quadras/Telhado	10,55	75,3		x
Rua Pavimentada	0,34	2,4		x
Rua Calçada	2,34	16,7		x
Terreno sem cobertura ou jardins	0,77	5,5	x	
lagoa	0,01	0,1	x	
TOTAL	14,00	100,0	5,6	94,4

Tabela A 2: Contribuição de cada nível de poluição nas subáreas.

Grau de contribuição do poluente em cada subárea - Ruas (80% de poluição da área total)			
nível_poluição	n° (Qtd. de subáreas do tipo rua).	contribuição da subárea	Equação
1	14	5%	$(0.8 * Ct * 5\%) / n$
2	12	15%	$(0.8 * Ct * 15\%) / n$
3	28	30%	$(0.8 * Ct * 30\%) / n$
4	21	50%	$(0.8 * Ct * 50\%) / n$

Ct: Contribuição total da bacia

Quadras (20% de poluição da área total)

Tabela A3: Subáreas com os respectivos valores de áreas e declividades

Sub área	Tipo	Área (ha)	Decliv. (%)	Sub área	Tipo	Área (ha)	Decliv.(%)
1	Quadra	0,1914	4,00	41	Rua	0,0193	9,27
2	Rua	0,0395	5,00	42	Quadra	0,0482	4,48
3	Rua	0,0373	4,90	43	Rua	0,0220	6,72
4	Quadra	0,1918	5,88	44	Quadra	0,0463	4,57
5	Quadra	0,1935	7,13	45	Rua	0,0255	4,57
6	Rua	0,0381	8,14	46	Quadra	0,0491	2,25
7	Rua	0,0394	7,99	47	Rua	0,0223	2,25
8	Quadra	0,1927	7,99	48	Rua	0,0229	1,94
9	Quadra	0,1922	9,02	49	Quadra	0,0469	1,42
10	Rua	0,0371	8,02	50	Rua	0,0220	0,00
11	Rua	0,0431	7,50	51	Rua	0,0248	0,00
12	Quadra	0,2105	7,50	52	Quadra	0,0453	2,39
13	Quadra	0,2085	8,52	53	Rua	0,0195	0,00
14	Rua	0,0681	8,52	54	Rua	0,0217	0,00
15	Rua	0,0952	8,49	55	Quadra	0,0472	1,43
16	Quadra	0,3193	8,49	56	Rua	0,0218	0,00
17	Quadra	0,3147	8,48	57	Rua	0,0245	0,00
18	Rua	0,0518	7,82	58	Quadra	0,0489	2,23
19	Rua	0,0514	8,00	59	Rua	0,0238	0,00
20	Quadra	0,2920	7,33	60	Rua	0,0239	0,00
21	Quadra	0,3071	8,14	61	Quadra	0,0858	6,17
22	Rua	0,0568	7,46	62	Rua	0,0207	2,06
23	Rua	0,0520	7,15	63	Rua	0,0206	2,40
24	Quadra	0,3214	7,15	64	Quadra	0,6895	6,21
25	Quadra	0,2866	6,74	65	Quadra	0,2338	1,88
26	Rua	0,0537	6,74	66	Rua	0,0598	5,65
27	Rua	0,0515	6,76	67	Rua	0,0615	1,56
28	Quadra	0,2909	6,76	68	Quadra	0,0476	1,94
29	Quadra	0,2580	7,15	69	Rua	0,0469	2,36
30	Rua	0,0458	6,35	70	Rua	0,0403	2,36
31	Rua	0,0384	6,38	71	Quadra	0,0478	0,00
32	Quadra	0,2481	6,38	72	Rua	0,0432	1,56
33	Quadra	0,2553	6,55	73	Rua	0,0520	1,31
34	Rua	0,0724	6,55	74	Quadra	0,0485	0,00
35	Rua	0,0695	6,59	75	Rua	0,0544	1,31
36	Quadra	0,3282	6,59	76	Rua	0,0581	1,35
37	Quadra	0,0428	4,81	77	Quadra	0,0468	2,36
38	Rua	0,0203	7,22	78	Rua	0,0659	2,06
39	Rua	0,0851	1,04	79	Rua	0,0547	2,03

40	Quadra	0,0465	4,64	80	Quadra	0,0423	0,00
81	Rua	0,0856	2,73	121	Rua	0,0101	2,43
82	Rua	0,1070	2,77	122	Rua	0,0108	2,20
83	Rua	0,1006	0,00	123	Quadra	0,0482	2,29
84	Rua	0,0645	0,00	124	Quadra	0,0214	2,60
85	Quadra	0,5180	6,03	125	Rua	0,0075	2,60
86	Quadra	0,2424	2,35	126	Rua	0,0075	2,60
87	Quadra	0,2379	2,36	127	Quadra	0,0191	2,60
88	Quadra	0,2356	2,36	128	Quadra	0,0408	2,32
89	Quadra	0,2331	1,56	129	Quadra	0,0740	1,18
90	Quadra	0,2829	1,31	130	Rua	0,0179	1,18
91	Quadra	0,2810	1,31	131	Rua	0,0090	2,43
92	Quadra	0,2698	1,35	132	Quadra	0,0197	2,43
93	Quadra	0,2650	2,06	133	Quadra	0,0427	1,21
94	Quadra	0,2809	2,03	134	Quadra	0,0482	1,66
95	Quadra	0,2751	2,05	135	Rua	0,0144	1,66
96	Quadra	0,1591	4,49	136	Rua	0,0138	1,61
97	Quadra	0,1235	4,76	137	Quadra	0,0422	1,61
98	Rua	0,0332	4,76	138	Quadra	0,0486	1,18
99	Quadra	0,3858	2,64	139	Quadra	0,0601	1,27
100	Rua	0,0654	5,36	140	Rua	0,0160	1,65
101	Rua	0,0404	6,70	141	Rua	0,0146	1,27
102	Quadra	0,0513	8,89	142	Quadra	0,0626	1,27
103	Quadra	0,1525	2,52	143	Quadra	0,0493	1,13
104	Rua	0,0553	2,52	144	Quadra	0,0870	1,99
105	Quadra	0,0461	2,23	145	Rua	0,0285	1,99
106	Rua	0,0164	2,23	146	Rua	0,0142	1,00
107	Rua	0,0126	2,29	147	Quadra	0,0187	1,00
108	Quadra	0,0458	2,29	148	Quadra	0,0218	0,88
109	Rua	0,0138	2,29				
110	Lagoa	0,0121	2,32				
111	Quadra	0,0417	1,21				
112	Rua	0,0082	1,21				
113	Rua	0,0096	1,20				
114	Quadra	0,0463	1,16				
115	Rua	0,0218	1,16				
116	Rua	0,0192	1,18				
117	Quadra	0,0471	2,25				
118	Rua	0,0201	1,13				
119	Rua	0,0195	1,13				
120	Quadra	0,0214	4,85				