

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído

Filipe Leonardo Oliveira Ribeiro

**EXPLORANDO MÉTRICAS URBANAS: DESENVOLVIMENTO DE UMA
FERRAMENTA ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA PARA SUPORTE EM
DRENAGEM URBANA**

Juiz de Fora
2018

Filipe Leonardo Oliveira Ribeiro

**EXPLORANDO MÉTRICAS URBANAS: DESENVOLVIMENTO DE UMA
FERRAMENTA ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA PARA SUPORTE EM
DRENAGEM URBANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ambiente Construído. Área de Concentração: Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima
Co-orientador: Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Juiz de Fora
2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ribeiro, Filipe Leonardo Oliveira.

Explorando Métricas Urbanas : desenvolvimento de uma ferramenta algorítmico-paramétrica para suporte em drenagem urbana / Filipe Leonardo Oliveira Ribeiro. -- 2018.

118 f.

Orientador: Fernando Tadeu de Araújo Lima

Coorientador: Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2018.

1. Parametrização. 2. Métricas Urbanas. 3. Drenagem Urbana. I. Lima, Fernando Tadeu de Araújo, orient. II. Ribeiro, Celso Bandeira de Melo, coorient. III. Título.

Filipe Leonardo Oliveira Ribeiro

**EXPLORANDO MÉTRICAS URBANAS: DESENVOLVIMENTO DE UMA
FERRAMENTA ALGORÍTIMO-PARAMÉTRICA PARA SUPORTE EM
DRENAGEM URBANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ambiente Construído. Área de Concentração: Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em

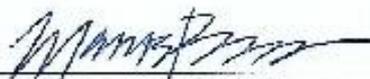
BANCA EXAMINADORA



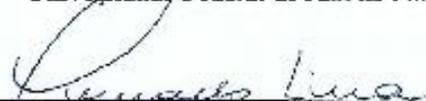
Prof. Dr. Fernando Tadeu de Araújo Lima (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro (Coorientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Marcos Martins Borges
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Geovany Jesse Alexandre da Silva
Universidade Federal da Paraíba

O Presidente da Banca atesta a
participação remota desta avaliadora.
Conforme art. 5, Inc. IV
Resolução 01/2016-CSPF-URFJ

AGRADECIMENTOS

Ao concluir essa etapa da minha vida acadêmica, realizo uma vitória pessoal. O percurso, que a um olhar desatento, pode parecer solitário, na verdade não seria possível se eu caminhasse só. Tenho muito a agradecer.

Agradeço ao meu orientador Fernando Lima, pelo direcionamento, por compartilhar seu conhecimento comigo e por me mostrar novas possibilidades. Aprendi muito!

Ao meu coorientador, Celso Bandeira de Melo Ribeiro, por toda atenção, dedicação e incentivo. Foi fundamental!

Aos professores Marcos Borges e Geovany Silva, por se juntarem a nós e comporem a banca examinadora, sempre dispostos a ajudar.

Aos professores Antonio Colchete e César Henrique Barra Rocha, pelo compromisso com a ciência e com seus alunos. Obrigado pelo suporte que me dão desde a minha especialização.

À todos os professores do PROAC (Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído) e à todos os outros com quem tive o privilégio de aprender. Todos contribuíram de alguma forma para eu estar onde estou hoje.

Aos meus pais, meus maiores exemplos, por todo apoio, incentivo e carinho. Não existem palavras para traduzir o amor e admiração que sinto por vocês! Obrigado por tudo!

À Dê, minha companheira de todas as caminhadas. Você foi fundamental para que eu pudesse chegar até aqui. O percurso ao seu lado é, sem dúvidas, mais leve e muito mais divertido! Amo você!

À minha família e meus amigos, que me dão força e coragem. Nossas vitórias são compartilhadas. Obrigado por vibrarem comigo!

Ao meu amigo e sócio, Leonardo Sanches, por ajudar a tornar essa jornada mais fácil e por compreender minhas ausências.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, pelas trocas diárias e pelo aprendizado constante. Orgulho fazer parte dessas equipes!

À FAPEMIG (Fundação de amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pelo apoio e suporte financeiro garantido através da bolsa de estudos.

Agradeço à Deus, pela saúde, força e pelos bons ventos que me direcionam.

RESUMO

O desenvolvimento urbano inadequado e a drenagem descontrolada das águas de chuva vêm causando impactos ao meio ambiente. Apesar do longo histórico da utilização de infraestruturas no controle das águas pluviais, a grande maioria das cidades ainda não está preparada com sistemas eficientes adequados aos parâmetros ambientais de condução e armazenamento da água pluvial. A adoção de ferramentas computacionais no estudo de comportamento hídrico e como fornecedoras de informações e diretrizes para projetos de drenagem urbana tem sido cada vez mais exploradas. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta algorítmico-paramétrica, com base nos fundamentos do Método Racional, que permita avaliar e identificar o coeficiente de escoamento superficial de águas pluviais de determinada bacia assim como sua vazão máxima, à partir de um evento de precipitação. Para desenvolvimento da mesma, optou-se por trabalhar com os *softwares* AutoCAD e Rhinoceros e com a *plugin* Grasshopper. Para avaliação da ferramenta e simulações de cenários de implantação de técnicas e práticas de drenagem urbana do Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto, conceito de drenagem urbana que vem ganhando cada vez mais espaço em países desenvolvidos, optou-se por trabalhar com sub bacias da cidade mineira de Juiz de Fora. Para o desenvolvimento do estudo foi necessário fazer uma seleção de sub bacias que sofrem frequentemente com os transtornos das inundações urbanas, identificar seu perímetro, relevo e materiais de cobertura do solo. Esta etapa foi desenvolvida por meio de visitas aos locais e com auxílio do *software* Google Earth, de forma que este estudo exploratório possa ser replicado futuramente em outros municípios. O objeto geral foi desenvolver uma ferramenta paramétrica capaz de fornecer índices e diretrizes para eventuais projetos de drenagem urbana. Além disso, procurou-se gerar indicadores para apontar os modelos e alternativas que podem ser utilizados nos diferentes tipos de ocupação do solo em Juiz de Fora, e assim fornecer subsídios para o aperfeiçoamento da lei de uso e ocupação do solo de Juiz de Fora. Determinou-se, também, as taxas de ocupação e permeabilidade do solo para estimar os efeitos do crescimento da malha urbana sobre a capacidade de drenagem das bacias estudadas através de previsões baseadas no índice de crescimento da cidade. Uma contribuição da pesquisa foi explorar a criação e aplicação de novas ferramentas digitais, buscando estabelecer a base para futuros trabalhos. Como resultado, foi possível analisar o potencial do algoritmo desenvolvido e sua validação, assim como suas limitações. A ferramenta apresentou resultados similares aos valores apresentados no Plano de Drenagem de Juiz de Fora – Zona Norte, o que demonstra certa confiabilidade. Como pontos positivos, destaca-se a facilidade de se fazer simulações/manipulações com a utilização da ferramenta e os resultados considerados satisfatórios encontrados pela mesma. Como ponto frágil pode-se destacar a dificuldade do trabalho de reconhecimento da cobertura dos solos assim como o processo demorado de transcrição dos parâmetros do modelo para o computador.

Palavras-chave: Ferramenta algorítmico-paramétrica, Parametrização, Drenagem Urbana.

ABSTRACT

Inadequate urban development and uncontrolled drainage of rainwater have been causing impacts to the environment. Despite the long history of the use of infrastructures to control rainwater, the vast majority of cities are still not equipped with efficient systems that are adequate for the environmental parameters of conduction and storage of rainwater. The adoption of computational tools in the study of water behavior and as providers of information and guidelines for urban drainage projects has been increasingly explored. In this context, the objective of this work is the development of an algorithmic-parametric tool, based on the fundamentals of the Rational Method, that allows to evaluate the coefficient of runoff of rainwater of a given basin as well as its peak flow. For the development of the tool, it was chosen to work with the software AutoCAD and Rhinoceros and with the Grasshopper plugin. In order to evaluate the tool and simulate scenarios for the implementation of urban drainage techniques and practices of Urban Development of Low Impact, a concept of urban drainage that has been gaining space in developed countries, it was decided to work with sub basins of the city of Juiz de Fora. For the development of the study it was necessary to make a selection of sub basins that frequently suffer from urban flood disorders, identify their perimeter, relief and soil cover materials. This stage was developed through site visits and with the help of Google Earth software, so that this exploratory study can be replicated in other municipalities in the future. The general objective was to develop a parametric tool capable of providing indexes and guidelines for possible urban drainage projects. In addition, it was tried to generate indicators for the models and alternatives that can be used in the different types of land occupation in Juiz de Fora, and thus to provide subsidies for the improvement of the land use and occupation law of Juiz de Fora. Soil occupancy and permeability rates were also estimated to estimate the effects of urban mesh growth on the drainage capacity of the basins studied through predictions based on the city's growth index. A contribution of the research was to explore the creation and application of new digital tools, seeking to establish the basis for future work. As a result, it was possible to analyze the potential of the developed algorithm and its validation, as well as its limitations. The tool presented similar results to the values presented in the Drainage Plan of Juiz de Fora - North Zone, which shows some reliability. As strengths, it is worth mentioning the ease of doing simulations / manipulations with the use of the tool and the satisfactory results found by it. As a fragile point it is possible to highlight the difficulty of the work of recognizing the soil cover as well as the time-consuming process of transcribing the parameters of the model to the computer.

Keywords: Algorithmic-parametric tool, Parametrization, Urban Drainage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Impacto do crescimento urbano na drenagem das águas pluviais.....	15
Figura 02 – Localização da cidade de Juiz de Fora no Brasil.....	42
Figura 03 – Localização da cidade de Juiz de Fora no Estado de Minas Gerais.....	43
Figura 04 – Delimitação da cidade de Juiz de Fora/MG.....	44
Figura 05 – Bacias hidrográficas da Zona Norte do Município de Juiz de Fora.....	50
Figura 06 – Mapa de grupos do algoritmo	51
Figura 07 – Delimitação da sub bacia BD-36 no <i>software</i> AutoCAD.....	52
Figura 08 – Células desenvolvidas no <i>software</i> AutoCAD apresentando a sub bacia BD-36.....	53
Figura 09 – Células desenvolvidas no <i>software</i> AutoCAD vistas mais de perto.....	53
Figura 10 – Componentes “ <i>Geometry</i> ” criados em número proporcional ao número de revestimentos de solo encontrados na sub bacia BD-36.....	54
Figura 11 – Componente “ <i>Weighted Average</i> ” permite identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.....	55
Figura 12 – Todas as células presentes no arquivo do <i>Rhinoceros</i> vinculadas à um componente “ <i>Geometry</i> ” para se obter a área total da bacia.....	56
Figura 13 – Algoritmo que reproduz a fórmula do tempo de concentração.....	58
Figura 14 – Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 100 anos.....	59
Figura 15 – Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 100 anos.....	60
Figura 16 – Intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 5 anos..	61
Figura 17 – Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 5 anos.....	61
Figura 18 – Células desenvolvidas no <i>software</i> AutoCAD representando a sub bacia BD-30.....	63
Figura 19 – Componentes “ <i>Geometry</i> ” criados em número proporcional ao número de revestimentos de solo encontrados na sub bacia BD-30.....	64
Figura 20 – Componente “ <i>Weighted Average</i> ” permite identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.....	65
Figura 21 – Todas as células presentes no arquivo do <i>Rhinoceros</i> vinculadas à um componente “ <i>Geometry</i> ” para se obter a área total da bacia.....	66
Figura 22 – Algoritmo que reproduz a fórmula do tempo de concentração.....	67
Figura 23 – Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 100 anos.....	67
Figura 24 – Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 5 anos.....	68
Figura 25 – Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 100 anos.....	69
Figura 26 – Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 5 anos.....	70
Figura 27 – Células desenvolvidas no <i>software</i> AutoCAD representando a sub bacia BD-34.....	72
Figura 28 – Componente “ <i>Weighted Average</i> ” permite identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.....	73
Figura 29 – Todas as células presentes no arquivo do <i>Rhinoceros</i> vinculadas à um componente “ <i>Geometry</i> ” para se obter a área total da bacia.....	74

Figura 30 – Algoritmo que reproduz a fórmula do tempo de concentração.....	75
Figura 31 – Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 100 anos.....	75
Figura 32 – Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 100 anos.....	76
Figura 33 – Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 5 anos.....	77
Figura 34 – Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 5 anos.....	77
Figura 35 – Alteração do valor do coeficiente “C” das células “vias e calçadas” da sub bacia BD-36.....	81
Figura 36 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-36 para o tempo de retorno de 100 anos.....	82
Figura 37 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-36 para o tempo de retorno de 5 anos.....	82
Figura 38 – Alteração do valor do coeficiente “C” das células “vias e calçadas” da sub bacia BD-30.....	84
Figura 39 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-30 para o tempo de retorno de 100 anos.....	85
Figura 40 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-30 para o tempo de retorno de 5 anos.....	85
Figura 41 – Alteração do valor do coeficiente “C” das células “vias e calçadas” da sub bacia BD-34.....	87
Figura 42 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-34 para o tempo de retorno de 100 anos.....	88
Figura 43 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-34 para o tempo de retorno de 5 anos.....	88
Figura 44 – Alteração do valor do coeficiente “C” das edificações comerciais da sub bacia BD-30.....	92
Figura 45 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-30 para o tempo de retorno de 100 anos.....	93
Figura 46 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-30 para o tempo de retorno de 5 anos.....	93
Figura 47 – Alteração do valor do coeficiente “C” das edificações comerciais da sub bacia BD-34.....	95
Figura 48 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-34 para o tempo de retorno de 5 anos.....	96
Figura 49 – Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-34 para o tempo de retorno de 5 anos.....	96
Figura 50 – Número de células vinculadas aos componentes “Geometry” referentes às edificações e às vias e calçadas da sub bacia BD-36.....	100
Figura 51 – Transferência de células vinculadas ao componente “Geometry” relacionado à áreas permeáveis para o componente “Geometry” relacionado às edificações.....	101
Figura 52 – Aumento do coeficiente de escoamento em razão da transferência de células.....	102
Figura 53 – Aumento da vazão máxima nos períodos de cheia.....	103
Figura 54 – Aumento da vazão máxima nos períodos de seca.....	103
Figura 55 – Números de células vinculados aos componentes “Geometry”.....	105
Figura 56 – Transferência de células vinculadas ao componente “Geometry” das áreas permeáveis para o componente “Geometry” das áreas impermeáveis.....	106

Figura 57 – Aumento do coeficiente de escoamento superficial.....	107
Figura 58 – Aumento da vazão máxima nos períodos de cheia.....	108
Figura 59 – Aumento da vazão máxima nos períodos de seca.....	108
Figura 60 – Número de células vinculadas aos componentes “Geometry” da sub bacia BD-34.....	110
Figura 61 –Transferência de células vinculadas ao componente “Geometry” das áreas permeáveis para o componente “Geometry” das áreas impermeáveis.....	111
Figura 62 – Aumento do coeficiente de escoamento superficial.....	112
Figura 63 – Aumento da vazão máxima nos períodos de cheia.....	113
Figura 64 – Aumento da vazão máxima nos períodos de seca.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados para a sub bacia BD-36.....	62
Tabela 02 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados para a sub bacia BD-30.....	71
Tabela 03 – Obras mais referenciadas	78
Tabela 04 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-36.....	83
Tabela 05 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-30.....	86
Tabela 06 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-34.....	89
Tabela 07 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-30.....	94
Tabela 08 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-34.....	97
Tabela 09 – Índices de crescimento dos bairros na Zona Norte do município de Juiz de Fora entre os anos de 1996 a 2000.....	99
Tabela 10 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-34.....	104
Tabela 11 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-30.....	109
Tabela 12 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-34.....	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Coeficientes de escoamento superficial.....	33
Quadro 02 – Relação de intervenções em córregos de Juiz de Fora.....	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	12
1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	15
1.3. OBJETIVOS	18
OBJETIVO GERAL.....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4. CONTEXTO	19
1.5. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	20
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
2. HISTÓRICO DA DRENAGEM URBANA	21
2.1. DESENVOLVIMENTO URBANO DE BAIXO IMPACTO.....	25
2.1.1. Asfalto poroso	26
2.1.2. Telhado verde	27
2.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES, VANTAGENS, LIMITAÇÕES E RELEVÂNCIA DE LID	28
2.3. VANTAGENS, LIMITAÇÕES E RELEVÂNCIA DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL NO CONTEXTO DA DRENAGEM URBANA.....	29
2.4. PRINCÍPIOS MENSURÁVEIS E REFERÊNCIAS DE CÁLCULO PARA O ESCOAMENTO SUPERFICIAL / AUMENTO DA VAZÃO.....	29
2.4.1. Método Racional	31
2.4.2. Bacias hidrográficas	35
2.4.3. Sub bacias e Microbacias	35
3. APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS PARAMÉTRICAS NO CONTEXTO URBANO	36
3.1. O CONCEITO DE MÉTRICAS URBANAS (CITYMETRICS)	37
3.2. LÓGICA ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA NO CONTEXTO DA DRENAGEM URBANA	37

3.2.1. Lógica algorítmica.....	37
3.2.2. Modelagem paramétrica	38
3.2.2. Lógica algorítmico-paramétrica	38
3.3. A SELEÇÃO DOS SOFTWARES UTILIZADOS.....	40
3.3.1. Rhinoceros e Grasshopper	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS: DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO E SIMULAÇÕES PARA VALIDAÇÃO	42
4.1. O MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA.....	42
4.1. PLANO DE DRENAGEM DE JUIZ DE FORA	45
4.2. Zona Norte de Juiz de Fora	49
4.2. CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO E HISTÓRICO DE VERSÕES	50
4.2.1. Simulações na sub bacia BD-36	52
4.2.2. Simulações na sub bacia BD-30	62
4.2.3. Simulações na sub bacia BD-34	72
5. SIMULAÇÕES COM A FERRAMENTA	79
5.1. SIMULAÇÕES COM A UTILIZAÇÃO DO ASFALTO POROSO.....	80
5.1.1. Asfalto poroso nas vias públicas da sub bacia BD-36.....	80
5.1.2. Asfalto poroso nas vias públicas da sub bacia BD-30.....	84
5.1.3. Asfalto poroso nas vias públicas da sub bacia BD-34.....	86
5.1.4. Considerações sobre a aplicação do asfalto poroso.....	89
5.2. SIMULAÇÕES COM TELHADO VERDE	91
5.2.1. Simulações com telhado verde nas edificações comerciais da sub bacia BD-30...	91
5.2.2. Simulações com telhado verde nas edificações comerciais da sub bacia BD-34...	94
5.2.3. Considerações sobre a aplicação do telhado verde nas edificações comerciais	97
6. SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA NAS SUB BACIAS	99
6.1. SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA NA SUB BACIA BD-36	100

6.2. SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA NA SUB BACIA BD-30	105
6.3. SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA NA SUB BACIA BD-34	110
6.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO DAS ÁREAS URBANAS NAS SUB BACIAS	115
7. CONCLUSÕES.....	116
8. REFERÊNCIAS	117

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

*“Someone told me long ago
There’s a calm before the storm”*
Creedence Clearwater Revival

O constante aumento da malha urbana torna a realidade das inundações urbanas cada vez mais constantes no Brasil. O País apresentou, ao longo das últimas décadas, um crescimento significativo da população urbana, criando-se as chamadas regiões metropolitanas. A taxa de população urbana brasileira é de 80%, próxima à saturação. O processo de urbanização acelerado ocorreu depois da década de 1960, gerando uma população urbana com infraestrutura precária, principalmente na década de 1980, quando os investimentos foram reduzidos (TUCCI, 2007). Segundo Amaral (2017), a inundação pode ser um evento natural do ciclo hidrológico ou antrópico, causada pela ação do homem, principalmente em virtude da expansão urbana. Corroborando com essa afirmação, Castro (2011) afirma que as inundações em áreas urbanas resultam de dois processos, que podem ocorrer isoladamente ou de forma integrada:

- ***ocupação de áreas ribeirinhas***: os rios geralmente possuem dois leitos: o leito menor, onde a água escoar na maior parte do tempo; e o leito maior, que é inundado em média a cada 2 anos. O impacto devido a inundação ocorre quando a população ocupa o leito maior do rio, ficando sujeita a enchentes;
- ***devido à urbanização***: a ocupação do solo, com consequente impermeabilização das superfícies e implementação de rede de drenagem, faz com que aumentem a magnitude das inundações, bem como a sua frequência.

O aumento da malha urbana promove, conseqüentemente, o aumento de áreas desmatadas e de superfícies impermeabilizadas, aumentando assim os picos de vazões, tornando recorrentes as inundações urbanas. O solo se torna impermeável quando ocorre a aplicação de materiais como asfalto e cimento na superfície de um terreno, diminuindo significativamente sua capacidade de absorção de fluidos, ocasionando a diminuição da infiltração das águas pluviais e o aumento do escoamento superficial, que levam à ocorrência de inundações urbanas (MOURA E SILVA, 2018). A ocupação urbana através de áreas

impermeáveis como telhados, passeios, ruas, estacionamentos e outros, altera as características de volume e qualidade do ciclo hidrológico, trazendo como resultado o aumento das enchentes urbanas e a degradação da qualidade das águas pluviais (ARAÚJO *et al*, 2000). Além da impermeabilização dos solos, outro fator que contribui para este quadro é o crescimento da urbanização em áreas inapropriadas. Seja por falta de planejamento adequado por parte das leis de uso e ocupação do solo, ou por construções irregulares em áreas de risco, como encostas íngremes, topos de morros, baixadas e áreas alagáveis e margens de corpos d'água (COELHO NETTO, 2005). Além disso, a retificação e canalização de rios e córregos, erosão de encostas e assoreamentos dos cursos d'água, falta de controle de resíduos e sedimentos, falta de tratamento de efluentes de esgoto sanitário e redes clandestinas de esgoto agravam os problemas das inundações urbanas.

A ocorrência de inundações tem aumentado constantemente nas áreas urbanas e ribeirinhas no Brasil e no mundo, causando prejuízos ambientais, econômicos, sociais e à saúde da população. A ocupação urbana nas imediações das planícies de inundação dos cursos d'água acarreta em danos para a população, gerando um desastre natural (SILVEIRA, ROBAINA e TRENTIN, 2014). Todavia, as planícies de inundações dos rios, na maioria das vezes, são locais planos e férteis favorecendo o assentamento humano (ENOMOTO, 2004).

Apesar do longo histórico da utilização de infraestruturas no controle das águas pluviais, a maior parte das cidades brasileiras ainda não está preparada com sistemas eficientes e adequados aos parâmetros ambientais de condução e armazenamento da água pluvial (CANHOLI, 2005). A drenagem urbana tem sido desenvolvida com o princípio de drenar a água das precipitações o mais rápido possível para jusante, produzindo o aumento da frequência e magnitude das enchentes (ARAÚJO *et al*, 2000). Além disso, contribui para a contaminação do solo e das águas subterrâneas através do transporte de poluentes presentes nas vias de circulação e nas coberturas das edificações.

A abordagem atualmente adotada para o manejo de águas no meio urbano tem acarretado em prejuízos financeiros, ambientais, estéticos, à saúde e, sobretudo, à qualidade de vida da população. Em contrapartida, experiências recentes em outros países têm apresentado soluções mais aproximadas à sustentabilidade, por meio de planejamento e de tecnologias que reconhecem ecossistemas como mecanismos de controle e tratamento de águas pluviais de forma difusa e integrada às demais atividades urbanas (Souza e Tucci, 2012).

No município de Juiz de Fora, que é objeto para elaboração de simulações e validação da ferramenta, a realidade não é diferente. As cheias urbanas são responsáveis por transtornos relacionados a prejuízos materiais e à saúde humana, e os modelos de drenagem majoritariamente aplicados na cidade baseiam-se nas práticas higienistas. Tendo em vista o modelo de drenagem falho, ainda adotado pela grande maioria das cidades brasileiras, a abordagem de novos conceitos de drenagem de águas pluviais vem sendo aprimorada, buscando-se novas práticas e novas tecnologias no combate às enchentes. O Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (*Low Impact Development - LID*), comum nos Estados Unidos, vem ganhando espaço em novos modelos de planejamento e tem trazido vantagens e benefícios para algumas cidades de grande e médio porte ao redor do mundo. Além de combater as enchentes urbanas, tais práticas auxiliam na recarga de aquíferos, podem incorporar novos espaços de lazer para a população, proporcionam a melhora do microclima, servem de abrigo para a fauna, diminuem o efeito das ilhas de calor e podem possibilitar a reutilização da água retida (CORMIER E PALLEGRINO, 2008).

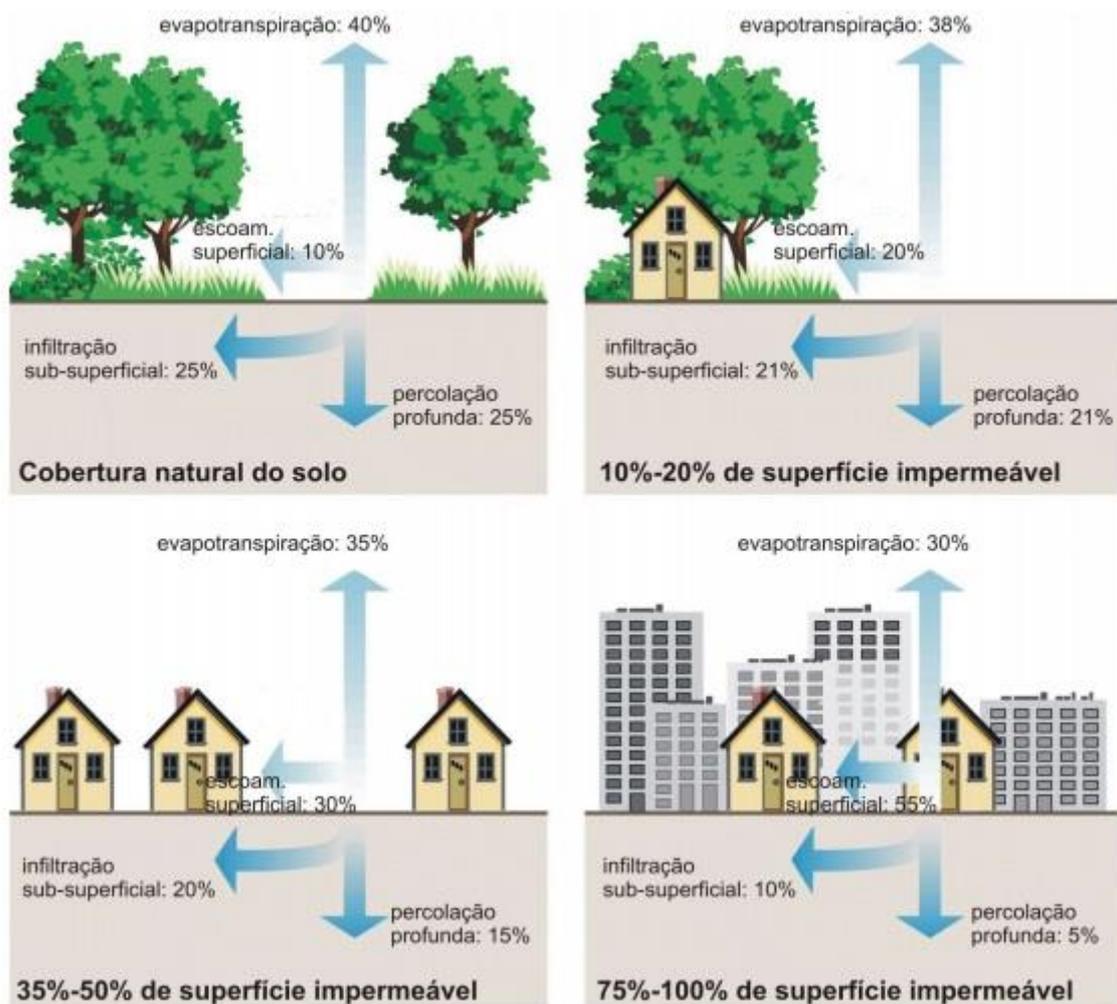
A utilização de recursos computacionais no estudo das técnicas de drenagem urbana assim como a sua eficiência pode ser um aliado importante para o desenvolvimento de projetos e simulações da drenagem de áreas urbanizadas. Na maior parte das vezes utilizam-se *softwares* com a tecnologia SIG (sistema de informações geográficas), um sistema projetado para capturar, armazenar, manipular e apresentar todos os tipos de dados geográficos, sendo que outras tecnologias, como as baseadas na lógica algorítmico-paramétricas, são pouco ou nada exploradas nesse campo.

Busca-se nesse trabalho desenvolver uma ferramenta algorítmica paramétrica, seguindo a lógica do trabalho desenvolvido por Lima (2017), que permita em primeiro lugar identificar o coeficiente de escoamento e a vazão de determinada área de interesse e, com isso, fornecer informações importantes para futuros projetos de drenagem urbana. É desejável que em um segundo momento a ferramenta permita analisar a eficácia da implementação de práticas do desenvolvimento urbano de baixo impacto no combate às inundações urbanas por meio da inserção de dados referentes aos coeficientes de escoamento de determinados materiais ou práticas que compõem o conjunto de ferramentas abordadas no conceito de LID.

1.2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A água proveniente das precipitações é essencial para o ecossistema, trata-se de um fenômeno natural bem-vindo e muito positivo para as atividades humanas (MARTINS *et al*, 2014). No entanto, ao se elaborar projetos de drenagem das águas pluviais é preciso ter cautela e estar munido de informações para que se possa evitar problemas relacionados à contaminação de aquíferos, alteração do microclima e inundações urbanas. Esses problemas são mais recorrentes em centros urbanos que tiveram o crescimento acelerado e desordenado, como é o caso de muitas cidades de países em desenvolvimento como o Brasil. Na figura 01 pode-se observar o impacto do crescimento urbano na drenagem das águas pluviais.

Figura 01 – Impacto do crescimento urbano na drenagem das águas pluviais.



Fonte: Paz (2004).

De acordo com Tucci (2008), os principais problemas relacionados com a infraestrutura e a urbanização nos países em desenvolvimento, com destaque para a América Latina, são:

- *Grande concentração populacional em pequena área*, com deficiência no sistema de transporte, falta de abastecimento e saneamento, ar, água poluída e inundações. Essas condições ambientais inadequadas reduzem condições de saúde, qualidade de vida da população, impactos ambientais, e são as principais limitações ao seu desenvolvimento.
- *Aumento da periferia* das cidades de forma descontrolada. Esses bairros geralmente estão desprovidos de segurança, de infraestrutura tradicional de água, esgoto, drenagem, transporte e coleta de resíduos sólidos.
- *A urbanização é espontânea* e o planejamento urbano é realizado para a cidade ocupada pela população de renda média e alta. Para áreas ilegais e públicas, existe invasão e a *ocupação ocorre sobre áreas de risco* como de inundações e de escorregamento, com frequentes mortes durante o período chuvoso. Parte importante da população vive em algum tipo de favela.

Ainda segundo Tucci (2008), os principais problemas relacionados com a infraestrutura de água no ambiente urbano são:

- Falta de tratamento de esgoto: grande parte das cidades da região não possui tratamento de esgoto e lança os efluentes na rede de esgotamento pluvial, que escoam pelos rios urbanos (maioria das cidades brasileiras);
- Outras cidades optaram por implantar as redes de esgotamento sanitário (muitas vezes sem tratamento), mas não implementam a rede de drenagem urbana, sofrendo frequentes inundações com o aumento da impermeabilização;
- Ocupação do leito de inundação ribeirinha, sofrendo frequentes inundações;
- Impermeabilização e canalização dos rios urbanos com aumento da vazão de cheia (sete vezes) e sua frequência; aumento da carga de resíduos sólidos e da qualidade da água pluvial sobre os rios próximos das áreas urbanas;
- Deterioração da qualidade da água por falta de tratamento dos efluentes tem criado potenciais riscos ao abastecimento da população em vários cenários, e o mais crítico tem sido a ocupação das áreas de contribuição de reservatórios de abastecimento urbano que, eutrofizados, podem produzir riscos à saúde da população.

Com a constatação de tais problemas e a aplicação de modelos de drenagem comprovadamente ultrapassados e limitados em grande parte das cidades brasileiras, é que se

busca a compreensão de novos modelos de drenagem urbana, que procuram alcançar o comportamento hidrológico existente antes do processo de urbanização. Tais modelos, como o conceito americano LID (*low impact development*) se baseiam, sobretudo, na infiltração e desaceleração das águas pluviais.

1.3.OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

A pesquisa aqui proposta tem por objetivo geral, contribuir para a área do planejamento e da drenagem urbana por meio do desenvolvimento de uma ferramenta algorítmico-paramétrica capaz de fornecer o coeficiente de escoamento superficial geral de determinada bacia assim como o coeficiente de escoamento de áreas específicas dentro da bacia. A ferramenta deve fornecer também a vazão máxima da bacia assim como a vazão máxima de pontos específicos da bacia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os índices de escoamento superficial de determinada bacia;
- Identificar os índices de vazão máxima de determinada bacia;
- Fornecer subsídios que auxiliem no aperfeiçoamento da lei de uso e ocupação do solo de determinado município, sobretudo quanto às taxas de ocupação e permeabilidade do solo;
- Simular e manipular, com base em práticas de Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (*Low Impact Development*), dados relacionados ao comportamento hidrológico e a capacidade de infiltração do solo. Com isso, deseja-se apresentar índices e diretrizes para eventuais projetos de drenagem urbana.
- Estimar os efeitos da expansão urbana da malha urbana sobre a capacidade de drenagem das bacias estudadas por meio de previsões baseadas no índice de crescimento da cidade.

1.4. CONTEXTO

Segundo Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa desenvolvida é uma pesquisa aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimento para aplicação prática na solução de problemas específicos. Pode-se compreendê-la como uma pesquisa exploratória e experimental, pois encontra-se em fase preliminar, tendo em vista o histórico inexistente da aplicação de ferramentas algorítmico-paramétricas no contexto da drenagem urbana.

Com relação à metodologia e à operacionalização, o estudo inicialmente contou com uma revisão bibliográfica para a identificação dos aspectos teóricos e conceituais relativos às técnicas de drenagem urbana. Esta revisão visou a consistência conceitual dos termos e a necessidade de se entender a evolução histórica das abordagens da drenagem urbana assim como as fórmulas matemáticas que possibilitam desenvolver estudos e estabelecer diretrizes para o desenvolvimento de estudos e projetos nesse campo. Para o aprofundamento nos aspectos dos problemas de drenagem urbana e soluções adotadas nesse sentido no município de Juiz de Fora/MG, realizou-se uma pesquisa documental sobre o Plano de Drenagem de Juiz de Fora – Zona Norte, elaborado pela Prefeitura Municipal de Juiz de Fora, índices pluviométricos do município além de suas características urbanas e morfológicas.

O Plano de Drenagem de Juiz de Fora se tornou um aliado para a identificação das regiões da cidade que sofrem constantemente com transtornos relacionados às enchentes urbanas e foi utilizado como critério para seleção das sub bacias utilizadas neste trabalho. Após a delimitação da sub bacias, foi realizada consulta à literatura para identificação de *softwares* e ferramentas computacionais utilizadas os pontos positivos e negativos das abordagens atualmente existentes. Após essa análise, foi desenvolvida pesquisa sobre o tema de CityMetrics¹, abordagem computacional utilizada como referência para desenvolvimento da ferramenta paramétrica proposta no presente trabalho para avaliação do coeficiente de escoamento superficial e vazão máxima de bacias hidrográficas.

Após elaboradas as pesquisas bibliográficas, deu-se início o processo de construção do algoritmo. Fez-se uma seleção dos *softwares* a serem utilizados, além do estudo de seus comandos e possibilidades dentro dos resultados desejados com a ferramenta. Durante período dedicado ao desenvolvimento da ferramenta, foram selecionados valores fornecidos pelo Plano

¹ CityMetrics é um sistema desenvolvido por Lima (2017), que busca a implementação computacional de métricas urbanas enquanto parâmetros de análise e otimização de desempenho, conforme será melhor apresentado no capítulo 3.1.

de Drenagem de Juiz de Fora – Zona Norte para que pudesse ser feita a calibração da ferramenta, assim como os eventuais ajustes necessários. Somente após calibração e ajustes na ferramenta foram desenvolvidas as simulações e previsões de cenários relacionados à drenagem urbana de sub bacias da Zona Norte do município de Juiz de Fora/MG.

1.5. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Pelo campo de estudo já anunciado na introdução, foi estabelecido como recorte da pesquisa a cidade de Juiz de Fora e quatro parâmetros para desenvolvimento da ferramenta paramétrica: (1) reconhecimento dos limites das sub bacias, (2) reconhecimento dos materiais que cobrem a superfície das sub bacias, (3) identificação do coeficiente de escoamento de diferentes tipos de solo e (4) topografia dos locais, para cálculo do tempo de concentração. A ferramenta desenvolvida visa contribuir para identificar o coeficiente de escoamento superficial de toda sub bacia ou de parte dela, assim como identificar a vazão máxima, com a finalidade de fornecer dados para futuros projetos de drenagem urbana ou diretrizes para leis de uso e ocupação do solo. É possível replicar o estudo em outras localidades, de posse das informações listadas acima.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em capítulos que podem ser organizados em cinco partes. Na primeira parte, estão a introdução e justificativa para o trabalho, os objetivos da pesquisa e a contextualização dos limites e campos de aplicação em que o trabalho se insere, preparando, assim, o caminho para o desenvolvimento da revisão bibliográfica.

A segunda parte procura investigar o histórico do processo de drenagem urbana e verificar a situação atual das práticas adotadas no Brasil. Em seguida é feita uma revisão bibliográfica e a análise de princípios mensuráveis, ou métricas, (método racional) para desenvolvimento da ferramenta. Nesta parte, procura-se compreender as fórmulas matemáticas que compõem o método racional assim como as informações necessárias para alimentar as mesmas.

A terceira etapa apresenta a investigação sobre aplicações computacionais utilizadas no contexto urbano e discorre sobre o conceito de métricas urbanas e do sistema CityMetrics, referência para o desenvolvimento da ferramenta proposta. Além disso, esta parte ainda apresenta a seleção dos *softwares* utilizados, assim como a razão pelas suas escolhas.

A quarta parte relata o desenvolvimento do algoritmo, detalhando fluxos de entrada, fluxos de saída e processamentos com o objetivo de apresentar as necessidades específicas para

sua programação. A quinta parte procura verificar o algoritmo desenvolvido bem como estabelecer sua contribuição para o projeto, e suas possibilidades de aplicação para o espaço urbano. Tratam-se das simulações realizadas com o objetivo de apresentar os resultados obtidos com o algoritmo desenvolvido ao longo da pesquisa explorando sua aplicação em sub bacias específicas da cidade de Juiz de Fora/MG, procurando verificar sua utilidade como ferramenta útil no processo de análise da drenagem urbana assim como fornecedora de dados importante para projetos urbanos.

Complementando o trabalho, na sexta parte, procura-se traçar uma análise crítica do processo desenvolvido durante a pesquisa, e promover uma reflexão acerca da validade da ferramenta desenvolvida.

2. HISTÓRICO DA DRENAGEM URBANA

Desde os tempos mais remotos da humanidade os cursos d'água se configuram como eixo estruturante dos processos de desenvolvimento espacial dos aglomerados populacionais (GIAROLA et al., 2014). Os homens visando o seu abastecimento e transporte, optaram por se estabelecerem próximos aos cursos d'água (TUCCI, 2003). Os rios são sistemas ambientais de suma importância para o meio natural assim como para as atividades humanas, sendo utilizados para diversos fins. A historicidade das relações dos seres humanos com a água remonta ao estabelecimento das primeiras civilizações conhecidas (REBOUÇAS, 1999). Em contrapartida, o processo de inundação natural ocorre desde os tempos mais remotos, faz parte do ciclo hidrológico e se instala quando há excesso de chuva que venha a ocasionar o aumento do volume de água do corpo hídrico, elevando a sua vazão e conseqüentemente o extravasamento desse volume para fora da calha do canal fluvial, atingindo a planície de inundação ou várzea (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2007). A ação antrópica pode potencializar esse processo, principalmente em virtude da expansão urbana. As áreas ocupadas de forma irregular, acabam por aumentar o escoamento superficial, diminuindo assim, a taxa de infiltração, podendo levar ao transbordamento das águas dos rios (TUCCI, 2009). Fontes (2003) afirma que o processo de urbanização acarreta significativas transformações no uso do solo, as quais, por sua vez, causam grandes impactos nos ciclos hidrológicos das áreas urbanizadas. Com essa constatação no passado, além dos problemas relacionados aos sistemas de esgotamento cloacal e a insalubridade das cidades, evidencia-se a necessidade da criação de sistemas de drenagem. Os primeiros sistemas de drenagem de águas pluviais e cloacais surgiram ainda na Idade Antiga, na tentativa de amenizar inconvenientes no ambiente urbano (Baptista *et al.* 2005). Já na Idade

Média, sem a devida manutenção dos sistemas, todos os tipos de resíduos e dejetos passaram a ser lançados em áreas abertas e corpos hídricos, acarretando condições de vida bastante insalubres. Como consequência ocorreram grandes epidemias de cólera e tifo que assolaram a Europa. Segundo Silveira (2002), após constatar-se na Itália, durante o século XVIII, a relação entre zonas alagadiças e a mortalidade de pessoas e animais foi desencadeado, a partir da metade do século XIX, um processo de extinção de alagados, aterro de fossas receptoras de esgoto cloacal e a sua substituição por canalizações enterradas. Desta forma, deu-se origem ao conceito sanitaria-higienista.

Segunda Baptista *et al* (2005) a abordagem higienista é caracterizada pela evacuação rápida das águas pluviais e servidas, por meio de impermeabilização de áreas e sistemas de condutos artificiais. Esta abordagem tinha como finalidade minimizar a proliferação de doenças nos locais onde era instalada. Tal modelo de drenagem urbana ganhou força a partir da revolução industrial, quando o processo de crescimento das cidades se acelerou em função da necessidade de mão-de-obra nas indústrias. Porém, ao se observar o acelerado processo de urbanização, constatou-se que a impermeabilização exagerada do solo, a canalização de rios e córregos e a incorporação das várzeas dos rios ao sistema viário provocam aceleração dos escoamentos, aumentando os picos de vazão e com isso ocasionando enchentes a jusante (CANHOLI 2005).

Esse modelo de drenagem urbana ainda amplamente adotado no Brasil e grande parte do mundo é conhecido como “*sistema clássico de drenagem*”, baseado nos princípios da abordagem higienista (BAPTISTA, 2015).

Segundo Baptista *et al* (2005), com esta abordagem, o que acaba por ocorrer é:

- a) transferência do problema para áreas de jusante, implicando em novas obras de ampliação do sistema com custos incrementais crescentes;
- b) a falsa sensação de segurança na população com respeito às inundações, culminando em grandes prejuízos à sociedade, e;
- c) a limitação de outros usos presentes ou futuros da água em meio urbano.

Complementando as afirmações de Baptista, Castro (2011) afirma que a política de drenagem urbana que prioriza a simples transferência de escoamento, e a falta de controle da ocupação das áreas ribeirinhas produz impactos significativos no meio urbano:

- a) aumento das vazões máximas - em até 7 vezes, devido a ampliação da capacidade de escoamento de condutos e canais, para comportar os acréscimos de vazão gerados pela impermeabilização das superfícies;
- b) aumento da produção de sedimentos devido à falta de proteção dos solos e a produção de resíduos sólidos (lixo);
- c) deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea devido a lavagem das ruas, transporte de material sólido, contaminação de aquíferos e ligações clandestinas de redes de esgoto sanitário na rede de esgoto pluvial;
- d) danos materiais e humanos para a população que ocupa as áreas ribeirinhas sujeitas às inundações;
- e) impactos que ocorrem devido a forma desorganizada como a infraestrutura urbana e implantada, podendo ser citados: pontes e taludes de estradas que obstruem o escoamento; redução de seção do escoamento por aterros; deposição e obstrução de rios, canais e condutos por lixo e sedimentos; projetos e obras de drenagem inadequadas.

Ainda segundo Castro (2011), a canalização de córregos, rios urbanos ou uso de galerias para transportar rapidamente o escoamento para jusante, priorizando o aumento da capacidade de escoamento de algumas seções, não consideraram os impactos que são transferidos. Este processo produz a ampliação da vazão máxima com duplo prejuízo, fazendo com que haja necessidade de novas construções, que não resolvem o problema, apenas o transferem.

Como em drenagem urbana o impacto da urbanização é transferido para jusante, quem produz o impacto geralmente não é o mesmo que sofre o impacto. Portanto, para um disciplinamento do problema é necessária a interferência da ação pública por meio da regulamentação e do planejamento. De acordo com Araújo *et al* (2000), ainda hoje as soluções geralmente encontradas por parte do poder público são as redes de drenagem, que simplesmente transferem a inundação de um ponto para outro a jusante na bacia sem que se avaliem os reais benefícios da obra. Castro (2011) afirma que mesmo considerando que a solução escolhida deva ser a canalização (rios, condutos e galerias para a drenagem secundária), o custo desta solução chega a ser, em alguns casos, cerca dez vezes maior que o custo de soluções que controlam na fonte a ampliação da vazão devido a urbanização.

Na tentativa de sanar boa parte das deficiências apresentadas pelos sistemas higienistas, a partir da década de 1970, são desenvolvidos métodos compensatórios de manejo de águas pluviais (também denominados *Best Management Practices*, BMPs; Urbonas & Stahre 1993)

os quais são constituídos de planejamento em escala de bacia e da aplicação de dispositivos de armazenamento e infiltração (*e.g.* detenções, retenções, pavimentos permeáveis, microrreservatórios, valos e trincheiras de infiltração) (BAPTISTA et al, 2005). De maneira geral, percebe-se que a forma como estes reservatórios são executados no Brasil somados ao contexto de falta do controle de sistemas de esgoto e resíduos, resultam em sua maioria, em reservatórios a céu aberto comprometidos e muitas vezes, em locais proliferadores de doenças. Esses reservatórios, também conhecidos como “piscinões”, geram, na verdade, a degradação da paisagem onde são implantados (BROCANELLI, 2008; MOURA, 2014). Além disso, existe uma porcentagem grande de contaminação das águas de drenagem pluvial e dos mananciais, resultantes de conexões clandestinas de esgoto na rede de drenagem. De acordo com dados levantados no ano de 2000, mais de 80% do esgoto cloacal in natura distribuem-se por córregos, ruas e sistemas de drenagem (SOUSA FILHO, 2014). Mesmo países desenvolvidos não conseguem suprir as necessidades de investimento em infraestrutura, somente pela utilização de estruturas corretivas de armazenamento e infiltração (NIEMCZYNOWICZ, 1993).

Segundo Tucci (2008), no final dos anos de 1990, a ciência passou a reconhecer o papel do solo e da vegetação (sistemas naturais de drenagem) no controle qualitativo de águas pluviais, ao promover a infiltração, a evapotranspiração e o contato da água com bactérias e plantas. Para tanto, utiliza-se de dispositivos de acréscimo de infiltração e do aumento de retardo do escoamento (ARAÚJO *et al*, 2000). Um exemplo dessa abordagem que ganha mais força a cada dia é o conceito americano de *Low Impact Development* (LID), denominado no Brasil por Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto, como é conhecido na gestão da drenagem urbana sustentável.

2.1. DESENVOLVIMENTO URBANO DE BAIXO IMPACTO

O Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto (*Low Impact Development – LID*), uma estratégia de manejo da terra que utiliza recursos paisagísticos naturais ou artificiais, no lugar dos dispositivos tradicionais de gerenciamento de águas pluviais, tem se tornado cada vez mais popular nas cidades dos Estados Unidos como método para abordar a qualidade da água e a hidrologia urbana (JUAN *et al*, 2017). Segundo Pinto e Martins (2010), neste conceito o sistema de drenagem deve transportar as águas pluviais de maneira a não gerar impactos superiores aos naturais, nem a montante e nem a jusante da bacia. Ou seja, as vazões efluentes aos reservatórios devem ser equiparáveis àsquelas anteriores à urbanização da bacia, eliminando ou diminuindo os impactos gerados pela ocupação urbana sobre o sistema de drenagem existente.

Além de combater as enchentes urbanas, tais práticas auxiliam na recarga de aquíferos, podem incorporar novos espaços de lazer para a população, proporcionam a melhora do microclima, servem de abrigo para a fauna, diminuem o efeito das ilhas de calor e podem possibilitar a reutilização da água retida (CORMIER E PALLEGRINO, 2008).

Os princípios dessa abordagem baseiam-se basicamente na conservação e preservação de vegetação e solo nativos, mínimo impacto na vegetação e ciclo hidrológico, por meio do desenvolvimento de projetos locais únicos, conservação e mimetização de processos hidrológicos naturais. Além disso, defende a educação da população e envolvimento público (SOUZA, 2008). Essa abordagem pode ser definida como um conjunto de técnicas eficientes no tratamento do escoamento superficial próximo a fonte, integrado às atividades locais e com grande vantagem econômica se relacionado aos sistemas tradicionais. Apresentam soluções para os problemas relacionados ao escoamento pluvial que podem amenizar impactos de grande escala com intervenções pontuais bem articuladas.

Segundo Juan *et al* (2017) os conceitos de LID podem ser divididos em dois grupos: LID de conservação, que refere-se a recursos de grande escala (por exemplo, mata ciliar e valas de infiltração) e estão integrados no estágio inicial do desenvolvimento de bacias hidrográficas, enquanto LID de *retrofit* refere-se à implementação de recursos em escala local (por exemplo, telhados verdes e jardins de chuva), após a bacia hidrográfica ter sido totalmente desenvolvida.

2.1.1. Asfalto poroso

Segundo Acioli (2005), técnicas atuais de gerenciamento da drenagem urbana preconizam que a drenagem da água da precipitação seja realizada com o uso de dispositivos de controle que agem na fonte do escoamento superficial. Tais dispositivos tem o objetivo de recuperar a capacidade natural de armazenamento do solo, reduzida devido aos impactos da urbanização. Entre os dispositivos mais disseminados na literatura e mais amplamente aplicados nos ambientes urbanos é possível destacar o pavimento permeável. Pavimento Permeável é um dispositivo de infiltração onde o escoamento superficial é desviado por meio de uma superfície permeável para dentro de um reservatório de pedras localizado sob a superfície do terreno (URBONAS e STAHERE, 1993 *apud* Araújo *et al*, 2000).

Urbanas e Stahre (1993) *apud* Araújo *et al* (2000) classificam os pavimentos permeáveis basicamente em três tipos: pavimento de asfalto poroso, pavimento de concreto poroso e pavimento de blocos de concreto vazado preenchido com material granular, como areia ou vegetação rasteira, como grama.

Optou-se por trabalhar com o asfalto poroso ao simular o material de cobertura do solo das vias e calçadas do presente trabalho. Neste tipo de pavimento, a capacidade drenante da camada de rolamento é promovida por meio da dosagem da mistura betuminosa. Com granulometria aberta e, portanto, permeável, essa camada pode captar as águas superficiais e conduzi-las para fora da estrutura do pavimento até dispositivos de descarga. A camada superior dos pavimentos porosos (asfalto ou concreto) é construída de forma similar aos pavimentos convencionais, mas com a retirada da fração da areia fina da mistura dos agregados do pavimento (ALESSI *et al*, 2006; CASTRO *et al*, 2013).

De acordo com estudo experimental desenvolvido por Acioli (2005), no pavimento revestido com asfalto poroso, os coeficientes de escoamento superficial variaram de zero a 13,5%, com média de 5,08%.

2.1.2. Telhado verde

Outra técnica que minimiza o escoamento superficial é a dos telhados verdes. O telhado verde tem por objeto a aplicação de vegetação sobre a cobertura de edificações que recebam tratamento adequado em relação à impermeabilização, barreira anti-raízes e drenagem, favorecendo a eficácia do mesmo (BALDESSAR, 2012). O telhado verde consiste-se em uma série de camadas de materiais que permitem o plantio de vegetações, proteção e impermeabilização da cobertura, escoamento e muitas vezes armazenagem das águas pluviais. Assim de cima para baixo, estas camadas incluem: a vegetação, substrato, filtro de tecido de drenagem e camadas de retenção de água, camada de proteção da raiz, isolamentos, impermeabilização e um terraço ou pavimento.

Getter e Rowe (2006) *apud* Santos *et al* (2013) apresentaram uma revisão relacionada aos benefícios do emprego dos telhados verdes, em que destacaram redução no volume e retardo do escoamento superficial, aumento da vida útil do telhado, conservação de energia, aumento da biodiversidade, mitigação da poluição do ar, valor estético, entre outros.

Em simulações desenvolvidas no *software* GreenRoof por Baldessar no ano de 2012, comparando o coeficiente de escoamento superficial de telhados verdes com telhados de barro, os resultados de medição diária apontaram os benefícios do uso do telhado verde no processo de gestão de águas pluviais, que foi capaz de escoar 30,7% de toda a água precipitada enquanto o telhado de barro escoou 77,3%, demonstrando grande eficiência.

2.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES, VANTAGENS, LIMITAÇÕES E RELEVÂNCIA DE LID

A tendência moderna na área de drenagem urbana é a busca da manutenção das condições de pré-desenvolvimento atuando na fonte de geração do mesmo. Para tanto deve-se utilizar de dispositivos de acréscimo de infiltração e do aumento de retardo do escoamento (ARAÚJO *et al*, 2000). O conceito americano de LID (*low impact development*) se encaixa nessa tendência, pois consiste-se em uma série de práticas e ferramentas planejadas para atuar em conjunto, buscando reproduzir as condições hidrológicas existentes antes do processo de urbanização, possibilitando a evapotranspiração, infiltração e retardamento da vazão das águas pluviais, trazendo inúmeros benefícios para as águas urbanas e para a população em geral.

Entre as principais vantagens podemos destacar o auxílio no combate às enchentes e inundações urbanas, melhoria no microclima, recarga dos aquíferos, filtragem das águas pluviais e aumento das áreas verdes no ambiente urbano, possibilitando a criação de áreas de lazer e trazendo contribuições estéticas para as cidades.

As práticas de LID podem apresentar algumas limitações quando há a necessidade de implantação das mesmas em áreas urbanas consolidadas (*retrofit LID*), principalmente quando existe a dificuldade de se encontrar áreas disponíveis para instalação de dispositivos que promovem a infiltração da água da chuva. Além disso, existe a questão cultural, muitas pessoas encaram com desconfiança os conceitos de uma drenagem urbana sustentável, que promove o combate das enchentes na fonte, através de infiltração, retenção e retardamento do escoamento das águas pluviais.

Pelas razões citadas acima, as práticas de drenagem urbana sustentáveis, como o conceito americano de LID vem se mostrando muito relevantes no cenário mundial, sobretudo nos países desenvolvidos, e vem ganhando cada vez mais espaço nas discussões acadêmicas e nos planos diretores de várias cidades também de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil.

2.3. VANTAGENS, LIMITAÇÕES E RELEVÂNCIA DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL NO CONTEXTO DA DRENAGEM URBANA

A utilização de uma ferramenta paramétrica no campo da drenagem urbana tem por objetivo investigar a aplicabilidade e consistência da mesma em um ambiente pouco ou nada explorado. Tem-se por objetivo, ampliar a discussão sobre o tema e possibilitar que um número maior de pessoas seja capaz de compreender e trabalhar com questões relacionadas à drenagem urbana, tendo em vista que boa parte dos arquitetos e urbanistas estão familiarizados com o tema da parametrização e trabalham com alguma desenvoltura no ambiente paramétrico. A exploração da parametrização tem se mostrado como um caminho natural, e negar os avanços e possibilidades que a tecnologia nos proporciona é andar no caminho oposto ao da evolução.

Existem *softwares* baseados na tecnologia GIS, como o SWMM, Giswater e ArcGIS, que promovem resultados semelhantes ao que está sendo proposto nesta dissertação. No entanto, a possibilidade de se criar uma ferramenta paramétrica, que com a simples inserção de dados nos permita ter acesso a informações imprescindíveis para a elaboração de projetos de drenagem urbana é extremamente atraente. A necessidade de explorar novas possibilidades e novos caminhos, mesmo sob risco de se criar uma ferramenta similar às existentes, do ponto de vista dos resultados obtidos, foi o que motivou o desenvolvimento do presente trabalho.

2.4. PRINCÍPIOS MENSURÁVEIS E REFERÊNCIAS DE CÁLCULO PARA O ESCOAMENTO SUPERFICIAL / AUMENTO DA VAZÃO

Nos últimos anos, as grandes modificações de uso e ocupação do solo, provocadas pelas ações antrópicas, geraram impactos nas bacias hidrográficas, além de alterar a condição original da paisagem. O aumento das áreas urbanizadas, na grande maioria das vezes, impermeáveis, ocasiona a alteração do processo de evapotranspiração e infiltração da água da chuva no solo e, conseqüentemente, o aumento do escoamento superficial. O escoamento superficial é o volume de água que escoar sobre as superfícies terrestres na unidade de tempo, e é direcionado das cotas mais altas para as cotas mais baixas, devido à atuação da gravidade. Manifesta-se na forma de filetes de água que, em seus trajetos, carregam partículas de solo devido à erosão. Juntamente com a topografia local, os filetes vão formando a rede de drenagem, que converge para cursos d'água mais estáveis, como os rios (TUCCI, 2012). Após o início da precipitação, existe um tempo de retardo referente às perdas iniciais, como a interceptação vegetal e o tempo de resposta da bacia causado pelo deslocamento da água. A partir daí, ocorre a elevação da vazão até o ponto máximo, onde o escoamento superficial é predominante (PEREIRA, 2015). O aumento

do escoamento superficial em um tempo reduzido, devido à impermeabilização do solo, se traduz em um aumento do pico de vazão. O aumento do pico de vazão é, na maioria das vezes, o responsável por eventos indesejados, como enchentes e inundações, erosão e assoreamento de rios. De acordo com Reis *et al* (2012), a impermeabilização do solo acelera o escoamento, aumentando a quantidade de água que passa nos condutos e canais de drenagem urbana. Verifica-se que esta quantidade de água é tão menor quanto mais permeável for a cobertura. Já a presença de vegetação ajuda na retenção de água no solo, diminuindo a velocidade de escoamento e, conseqüentemente, a ocorrência de erosões e enchentes (REIS *et al*, 2012).

A utilização de ferramentas de monitoramento do uso e cobertura do solo permite que políticas públicas, direcionadas à preservação e conservação dos recursos naturais, possam atuar de forma coerente ao estabelecer medidas que minimizem os impactos causados pela urbanização estabelecida na bacia em que está inserida (RIBEIRO *et al.*, 2013). Dessa forma, fica evidente a importância de se conhecer os valores referentes ao escoamento superficial e de vazão máxima das águas pluviais, com a finalidade de fazer previsões das conseqüências da urbanização e dos eventos de precipitação, possibilitando a elaboração de projetos estruturais e não-estruturais que visem o combate às enchentes e inundações de áreas urbanizadas. A vazão máxima ou vazão de pico é definida como a maior vazão atingida em um evento no qual a precipitação gera escoamento, que excede os valores habituais de vazão em determinado curso d'água. O conceito de vazão máxima é associado a algum risco a ser igualado ou superado. A vazão máxima é um parâmetro muito utilizado nos cálculos de obras hidráulicas (MARTINS, 2017). Busca-se alcançar esses resultados por meio de inserção de modelos digitais e cálculos matemáticos amplamente aceitos e difundidos no meio acadêmico. Uma das metodologias mais antigas e difundidas para determinar a vazão máxima de uma bacia é a do Método Racional. O método estabelece uma relação entre a chuva e o escoamento superficial e é utilizado para calcular a vazão de pico de determinada bacia, considerando uma seção de estudo (TOMAZ, 2002). Existem outras metodologias, como a *Soil Conservation Service* (SCS), para estimar a vazão máxima por meio de um modelo matemático, porém optou-se por utilizar o Método Racional como base de cálculos da ferramenta paramétrica pela sua simplicidade e por seus resultados, que costumam ser satisfatórios, desde que respeitadas as condições de validade. Para Franco (2004), são esses os principais fatores que garantem a grande aceitação do método.

2.4.1. Método Racional

Como visto anteriormente, é fundamental identificar os valores da vazão das águas pluviais em uma bacia, para que se possam identificar meios de se combater as enchentes e inundações urbanas. A vazão máxima pode ser determinada por meio de levantamento de dados e estimativas matemáticas. Para efeito de cálculo e para viabilizar a criação da fórmula paramétrica proposta, o presente estudo irá utilizar a estimativa da vazão máxima com base na precipitação, conhecido como Método Racional. O método racional foi apresentado pela primeira vez em 1851 por Mulvaney e estabelece uma relação entre a chuva e o escoamento superficial (deflúvio). Sua equação de estimativa de vazão considera três variáveis: a intensidade máxima média da precipitação, o coeficiente de escoamento e a área de drenagem da bacia. O coeficiente de escoamento ou coeficiente C é o fator responsável por transformar a precipitação total em precipitação efetiva, descontando possíveis perdas. Essas perdas são influenciadas pela cobertura vegetal ou ocupação do solo na bacia, declividade e tempo de retorno da precipitação (tratando-se de vazão máxima). Os valores obtidos neste coeficiente variam entre 0 e 1, onde valores próximos de 1 representam maior escoamento e valores mais próximos de 0, menor escoamento (MELLO; SILVA, 2013).

O método racional deve ser aplicado somente em bacias de pequeno porte. Apesar de não haver consenso entre os estudiosos em relação às dimensões das bacias, boa parte dos autores defende que o método deve ser aplicado somente em bacias com área de drenagem inferiores a 3km² (300 ha), conforme indica Porto (1993).

A chamada fórmula racional é a seguinte:

$$Q = \frac{CIA}{360}$$

Sendo:

Q= vazão de pico (m³ /s);

C= coeficiente de escoamento superficial varia de 0 a 1. C= volume de runoff/ volume total de chuva

I= intensidade média da chuva (mm/h);

A= área da bacia (ha). 1ha= 10.000m²

O coeficiente de escoamento superficial (C), também conhecido como coeficiente de escoamento de enchentes, de uma bacia representa a quantidade de água de escoamento gerada

pela bacia em eventos chuvosos (TUCCI, 2000). Ainda segundo Tucci (2000), o coeficiente de escoamento de uma bacia de superfícies variáveis pode ser estimado pela ponderação do coeficiente de diferentes superfícies. Considerando uma bacia urbana onde podem existir dois tipos de superfícies: permeável e impermeável é possível estabelecer que:

$$C = \frac{C_p \cdot A_p + C_i \cdot A_i}{A_t}$$

Onde:

C_p é o coeficiente de escoamento de área permeável da bacia;

A_p é a área da bacia com superfície permeável;

C_i é o coeficiente de escoamento de uma área impermeável;

A_i é a parcela da bacia com área impermeável.

A_t é a área total da bacia.

Diferentes tipos de solo têm porosidades e coeficientes de infiltração diferentes e, conseqüentemente, coeficientes de escoamento diferentes. O escoamento superficial também está intimamente relacionado com as variações de declividade do terreno.

Segundo a ASCE (1969), os coeficientes de escoamento superficial podem ser avaliados como apresentado no quadro 01.

Quadro 01 – Coeficientes de escoamento superficial

Superfície	Coeficiente de Escoamento (C)	
	Limites	Normal
Pavimento:		
<ul style="list-style-type: none"> • asfalto • concreto • calçadas • telhado 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,70 a 0,95 • 0,80 a 0,95 • 0,75 a 0,85 • 0,75 a 0,95 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,83 • 0,88 • 0,80 • 0,85
Grama, em solo arenoso, declividade:		
<ul style="list-style-type: none"> • baixa (S < 2%) • média (2% < S < 7%) • alta (S > 7%) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,05 a 0,10 • 0,10 a 0,15 • 0,15 a 0,20 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,08 • 0,13 • 0,18
Grama, em solo argiloso, declividade:		
<ul style="list-style-type: none"> • baixa (S < 2%) • média (2% < S < 7%) • alta (S > 7%) 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,13 a 0,17 • 0,18 a 0,22 • 0,25 a 0,35 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,15 • 0,20 • 0,30

Fonte: Adaptado de ASCE (1969).

Para o cálculo da vazão máxima, é preciso definir a intensidade da precipitação. A intensidade da precipitação é obtida por meio de curvas de intensidade – duração – frequência do local de estudo. O cálculo da intensidade I é realizado de acordo com a equação:

$$I = \frac{a * Tr^b}{(t + c)^d}$$

Onde:

I = Intensidade em mm/h;

Tr = tempo de retorno em anos;

a, b, c e d = coeficientes que dependem do local;

t = duração em minutos.

Yoshizane (2008) afirma que a duração da chuva (t) equivale ao tempo de concentração (tc) da bacia e pode ser estimado por uma série de equações empíricas estabelecidas para cada

região. A seguir, destaca-se a equação de Kirpich, escolhida para ser utilizada no presente trabalho:

$$tc = 57 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$$

Onde:

tc = tempo de concentração em minutos;

L = comprimento do rio em km;

H = diferença de elevação entre o ponto mais remoto da bacia e a seção principal.

De acordo com Pereira (2015), a Curva Chave Intensidade - Duração - Frequência estabelecida para a cidade de Juiz de Fora e utilizada como referência para o presente trabalho é:

$$I = \frac{3000 * T^{0,173}}{(t + 23,965)^{0,96}}$$

Onde:

t = Duração da chuva em minutos, tendo sido calculada como o tempo de concentração da bacia de contribuição;

T = Período de retorno em anos, ou seja, o Tempo em que se espera que o evento calculado seja igualado ou superado pelo menos uma vez. Foram escolhidos três perfis a serem trabalhados: 2 anos, 10 anos e 100 anos;

I = Intensidade da chuva, em mm/h, com duração igual ao tempo de concentração (t) e período de retorno igual a 2, 10 e 100 anos.

De posse de todos os dados necessários para alimentar as fórmulas matemáticas descritas acima, é possível identificar com certa precisão o coeficiente de escoamento e a vazão máximas das bacias de interesse, desde que respeitados seus limitadores e condições de validade.

2.4.2. Bacias hidrográficas

Pode-se definir uma bacia hidrográfica como um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas das chuvas, ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático. As águas superficiais escoam para as partes mais baixas do terreno, formando riachos e rios, sendo que as cabeceiras são formadas por riachos que brotam em terrenos íngremes das serras e montanhas e à medida que as águas dos riachos descem, juntam-se a outros riachos, aumentando o volume e formando os primeiros rios, esses pequenos rios continuam seus trajetos recebendo água de outros tributários, formando rios maiores até desembocarem no oceano (BARRELA, 2001 apud TEODORO *et al*, 2007).

O que separa uma bacia hidrográfica de outra são os divisores de água. Eles são como uma espécie de fronteira em que, de um lado, escoam a água em direção a um rio e, de outro, escoam a água em direção a outro rio. Em razão da força da gravidade, as águas correm sempre do ponto mais alto da superfície (montante) em direção aos pontos com menores altitudes (jusante). Assim, podemos dizer que as localidades mais elevadas são os divisores de água e os pontos menos elevados costumam abrigar o leito dos rios.

As bacias hidrográficas podem ser classificadas conforme a sua grandeza. Isso porque todo o rio possui a sua bacia, mas alguns deles desaguam em outros rios, formando uma bacia hidrográfica maior, ou seja, as bacias de maior grandeza englobam as áreas de outras bacias menores.

2.4.3. Sub bacias e Microbacias

De acordo com Faustino (1996) as sub bacias são áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal. Possuem áreas maiores que 100 km² e menores que 700 km², enquanto as microbacias possuem toda sua área com drenagem direta ao curso principal de uma sub bacia, várias microbacias formam uma sub bacia. Possuem a área inferior a 100 km².

3. APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS PARAMÉTRICAS NO CONTEXTO URBANO

Em decorrência da pesquisa realizada, constatou-se que a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos no contexto da drenagem urbana, utilizam-se da tecnologia SIG (Sistema de Informação Geográfica) ou GIS, na sigla em inglês (*Geographic Information System*). Segundo Chrisman (2002), existem dezenas de definições para o termo sistema de informação geográfica (SIG), cada um desenvolvido a partir de uma perspectiva diferente ou origem disciplinar. Uma das definições mais gerais foi desenvolvida por consenso entre vários especialistas: Sistema de Informação Geográfica - Um sistema de hardware, software, dados, pessoas, organizações e arranjos institucionais para coletar, armazenar, analisar e disseminando informações sobre áreas da terra. (DUEKER e KIERNE, 1989, pp. 7-8 *apud* CHRISMAN, 2002).

De acordo com Flügel (1995) *softwares* delineados pelos sistemas de informações geográficas (GIS) são capazes de analisar as propriedades fisiográficas de uma bacia, como topografia, solos, geologia, precipitação e uso da terra, usando uma análise completa dos sistemas hidrológicos.

Trabalhos desenvolvidos sob a ótica dos sistemas de informação geográfica mostram-se, na maior parte das vezes, bem-sucedidos e relevantes, pela riqueza de informações e precisão dos resultados que proporcionam. Por outro lado, constatou-se que no campo da parametrização e da lógica algorítmica, a drenagem urbana é pouco ou nada explorada. Existem diversos trabalhos evidenciando as vantagens dessa tecnologia na produção arquitetônica, enquanto no urbanismo os trabalhos apresentam-se mais recentes e, conseqüentemente, menos explorados. No que diz respeito à drenagem urbana especificamente, não foram encontrados trabalhos desenvolvidos nesse sentido, motivo que estimulou o desenvolvimento da ferramenta apresentada neste trabalho, que tem por finalidade explorar as possibilidades da lógica paramétrica no contexto da drenagem urbana e levar a discussão sobre o tema à outras áreas do conhecimento.

3.1. O CONCEITO DE MÉTRICAS URBANAS (CITYMETRICS)

Com a elaboração deste trabalho, pretende-se desenvolver uma ferramenta algorítmico-paramétrica, referenciada no trabalho desenvolvido por Lima (2017), que trabalha na lógica de métricas urbanas e da elaboração de um sistema computacional, denominado como CityMetrics. O conceito de métricas urbanas tem por definição a aplicação de atributos mensuráveis para análises do ambiente urbano. Partindo desse pressuposto, CityMetrics é um sistema que visa a utilização de referências de cálculos (relativas a princípios objetivamente mensuráveis de teorias existentes) para a formulação de métricas geométricas e algébricas, visando a avaliar e a otimizar o desempenho de configurações de espaços urbanos a partir do modelo de desenvolvimento urbano denominado Desenvolvimento Orientado pelo Transporte - DOT (LIMA, 2017). Dessa forma, optou-se por desenvolver uma ferramenta computacional, sob essa ótica, que seja capaz de fornecer parâmetros de análise e otimização de desempenho da drenagem de águas pluviais no ambiente urbano, a partir da inserção de atributos mensuráveis.

3.2. LÓGICA ALGORÍTMICO-PARAMÉTRICA NO CONTEXTO DA DRENAGEM URBANA

A aplicação de recursos algorítmico-paramétricos em contexto urbanístico constitui uma possibilidade relativamente nova para o planejamento e o projeto das cidades (LIMA, 2017). Após extensiva pesquisa, constatou-se que o contexto da drenagem urbana se mostra ainda mais recente e, naturalmente, pouco explorada. No entanto, recursos computacionais, sob a ótica algorítmico-paramétrica, possuem grande potencial para contribuir significativamente no suporte a solução de problemas relacionados à drenagem urbana, pois podem nos fornecer dados e diretrizes de forma precisa e dinâmica para, entre outras coisas, projetos urbanos com a finalidade de minimizar ou combater as enchentes e inundações urbanas.

3.2.1. Lógica algorítmica

De acordo com Lima (2017), trabalhar com algoritmos ou na lógica algorítmica significa decompor um determinado problema em um conjunto de etapas simples, que possam ser computadas e associadas de maneira a fornecer, por meio de um conjunto de instruções bem definidas, uma solução ao problema proposto. Isto implica em adotar um pensamento abstrato e associativo, além de clareza na hierarquização de informações. Terzidis (2006) *apud* Lima (2017) define algoritmo como um procedimento que utiliza uma sequência finita de instruções para resolver um determinado problema.

No contexto da arquitetura e do urbanismo, diversos autores consideram que associar o uso de algoritmos com a capacidade de processamento do computador, permite gerenciar de maneira mais eficiente uma grande quantidade de dados, cálculos e interações, potencializando as possibilidades analíticas e propositivas do homem e criando novos cenários criativos e de avaliação (LIMA, 2017). A partir desta informação, pode-se imaginar que ao abordar a lógica algorítmica dentro do contexto da drenagem urbana é possível obter resultados eficientes e dinâmicos para o gerenciamento e proposição de soluções para problemas relacionados às inundações urbanas.

A produção de um algoritmo parte de uma organização do problema em três etapas: (1) entrada – dados indispensáveis para a solução de um problema –, (2) processamento – procedimentos para se chegar ao resultado – e (3) saída – resultado para problema. A formalização destas etapas se dá através de métodos de representação específicos, como o fluxograma, representação por meio de símbolos geométricos convencionais, com os quais se expressa o raciocínio lógico com o qual se resolverá o problema (ALMEIDA, 2008 *apud* SANCHES, 2017).

3.2.2. Modelagem paramétrica

Velten (2009) *apud* Lima, (2017) descreve a modelagem matemática (ou simplesmente modelagem) como a área do conhecimento que utiliza modelos matemáticos para a simulação de sistemas reais, com o objetivo de prever seu comportamento. Neste cenário, e de uma maneira geral, a modelagem matemática pode ser definida como uma abordagem metodológica que pretende descrever um determinado fenômeno para que se obtenha previsões (ou informações) acerca de seu comportamento.

A partir desta informação, optou-se por executar a ferramenta embasada nas fórmulas matemáticas do método racional, de forma que se torne possível contribuir para processos de projeto do de drenagem urbana mais eficientes assim como possibilitar avaliar possíveis intervenções no espaço urbano.

3.2.2. Lógica algorítmico-paramétrica

Segundo Lima (2017), o termo “lógica algorítmico-paramétrica” pode ser utilizado para se referir a uma abordagem metodológica que pressupõe a associação entre a lógica algorítmica e a modelagem paramétrica. Pode-se afirmar então, que trata-se de uma forma de pensamento que lança mão de recursos de programação com a finalidade de atingir resultados mais precisos

em atividades de análise de contextos urbanos através do uso do computador. Ainda segundo Lima (2017), é possível atingir os resultados esperados, utilizando-se da lógica algorítmica-paramétrica, por meio de:

a) a decomposição de uma determinada questão em um conjunto de etapas simples, que possam ser computadas e associadas de maneira a fornecer, por meio de um conjunto de instruções ou ferramentas, uma resposta a uma questão colocada ou uma solução a um problema proposto, e;

b) a definição dos atributos (ou parâmetros) necessários para uma especificação completa ou relevante de um modelo que se pretende elaborar, possibilitando que diferentes partes deste modelo se relacionem e modifiquem juntamente, de maneira coordenada.

Portanto, no contexto deste trabalho, o termo “lógica algorítmico-paramétrica” se refere à utilização de recursos de programação para a elaboração de ferramentas e códigos específicos, desenvolvidas em plataformas de modelagem algorítmica, como é o caso do *plugin* Grasshopper, integrado ao *software* de modelagem Rhinoceros.

3.3. A SELEÇÃO DOS SOFTWARES UTILIZADOS

Conforme explicitado anteriormente, pretende-se desenvolver uma ferramenta algorítmico-paramétrica, referenciada no trabalho desenvolvido por Lima (2017), dentro da lógica de métricas urbanas. Para executar procedimentos algorítmicos no computador, é necessário um editor de algoritmos específico, por meio do qual serão construídas suas instruções de funcionamento. Editores algorítmicos operam em modo *standalone*⁴¹, ou ainda, incorporados a algum outro programa (LIMA, 2017). Entre os editores autônomos encontram-se C#, Python, entre outros, sendo que os *softwares* AutoCAD e Rhinoceros, por exemplo, possuem editores incorporados que permitem aos seus usuários escrever códigos para automatizar algumas tarefas (TEDESCHI, 2014 *apud* LIMA, 2017).

Nesse sentido, optou-se por trabalhar com os *softwares* Rhinoceros e o *plugin* Grasshopper, pois ambos desfrutam de grande popularidade em ambientes de design tradicionais e paramétricos, proporcionando uso generalizado de ambos entre estudantes e profissionais (XIE *et al*, 2011 e LIMA, 2017).

Além dos atributos de usabilidade e interatividade, da combinação entre o *software* Rhinoceros e o *plugin* Grasshopper, que se dá através de conexões entre parâmetros e hierarquias interligadas por pilhas de execução (componentes), com os resultados sendo visualizados simultaneamente em 3D, a modelagem algorítmica de estruturas complexas torna-se mais amigável e versátil aos projetistas não familiarizados à programação textual (VOLTOLINI, 2016; FLORIO, 2011). Segundo Sanches (2016), a escolha do *software* Rhinoceros favorece a integração direta com programas frequentemente utilizados no Brasil para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos (e também urbanísticos), como ArchiCAD, AutoCad e Sketchup.

3.3.1. Rhinoceros e Grasshopper

No *software* de modelagem digital Rhinoceros são fornecidos os dados do ambiente por meio de desenhos (que chamaremos de células) que servirão de suporte para as operações realizadas pelo algoritmo (desenvolvido com o *plugin* Grasshopper). O *plugin* Grasshopper é um editor gráfico de algoritmos integrado com as ferramentas de modelagem 3D do *software* Rhinoceros, com grande utilização no contexto internacional (GRASSHOPPER3D, 2016). Nesse ambiente, o algoritmo é formulado com grupos de operações (*clusters*), em função de suas ações no contexto da programação, e cada grupo de operações é composto por um determinado conjunto de componentes. Segundo Lima (2017), no contexto do *Grasshopper*, *cluster* é um recurso utilizado para agrupar todos os parâmetros e componentes de um

determinado código construído dentro do próprio *Grasshopper*, de maneira a poder organizá-lo, simplificá-lo visualmente e reutilizá-lo várias vezes em um mesmo arquivo ou em vários.

O *plugin* Grasshopper se enquadra no conceito de *Visual Programming Language*. Em computação, *Visual Programming Language* ou Linguagem de Programação Visual (LPV), pode ser definida como qualquer linguagem de programação que permita a seus usuários criar ferramentas por meio da manipulação de elementos graficamente, ao invés de especificá-los textualmente (LIMA, 2017).

4. MATERIAIS E MÉTODOS: DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO E SIMULAÇÕES PARA VALIDAÇÃO

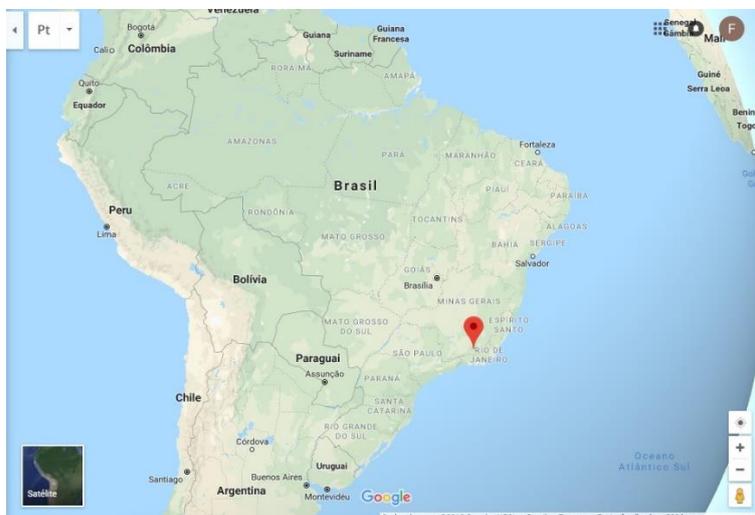
Para a pesquisa, foi proposta a criação de um algoritmo capaz de fornecer o coeficiente de escoamento e a vazão máxima de uma bacia a partir de inserção de parâmetros específicos, além de permitir a simulação de diferentes realidades no contexto da bacia. O roteiro para identificar os valores referentes ao coeficiente de escoamento e vazão máximo deveriam seguir fórmulas matemáticas previamente apresentadas neste trabalho, além de formas geométricas que se referem ao tamanho e formato da bacia, assim como aos materiais que cobrem o solo.

Quanto à validação dos valores encontrados na ferramenta desenvolvida, optou-se por trabalhar com o Plano de Drenagem de Juiz de Fora, elaborado no ano de 2011, como referência. Nele pode-se encontrar dados sobre as sub bacias da Região Norte do município, como seu tamanho, perímetro e densidade, além dos valores do coeficiente de escoamento superficial médio e vazão máxima de cada sub bacia nos períodos de seca de cheia.

4.1. O MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA

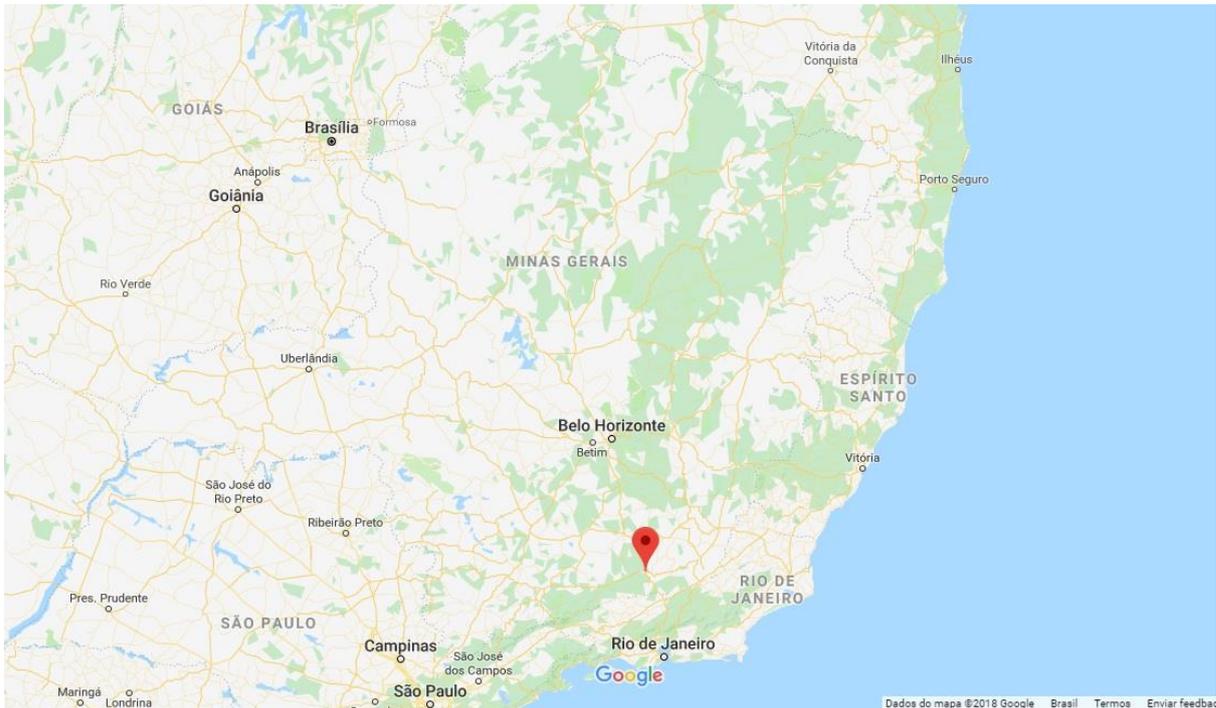
Juiz de Fora é uma cidade com população estimada pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística - IBGE (2017) de 563.769 habitantes, localizada na região sudeste do País (Figura 02) e sudeste do Estado de Minas Gerais, (Figura 03), e é polo de uma extensa região que abrange a Zona da Mata Mineira e parte significativa do vizinho Estado do Rio de Janeiro (MACHADO E CUNHA, 2011).

Figura 02 – Localização da cidade de Juiz de Fora no Brasil.



Fonte: Imagem retirada do Google Maps.

Figura 03 – Localização da cidade de Juiz de Fora no Estado de Minas Gerais.

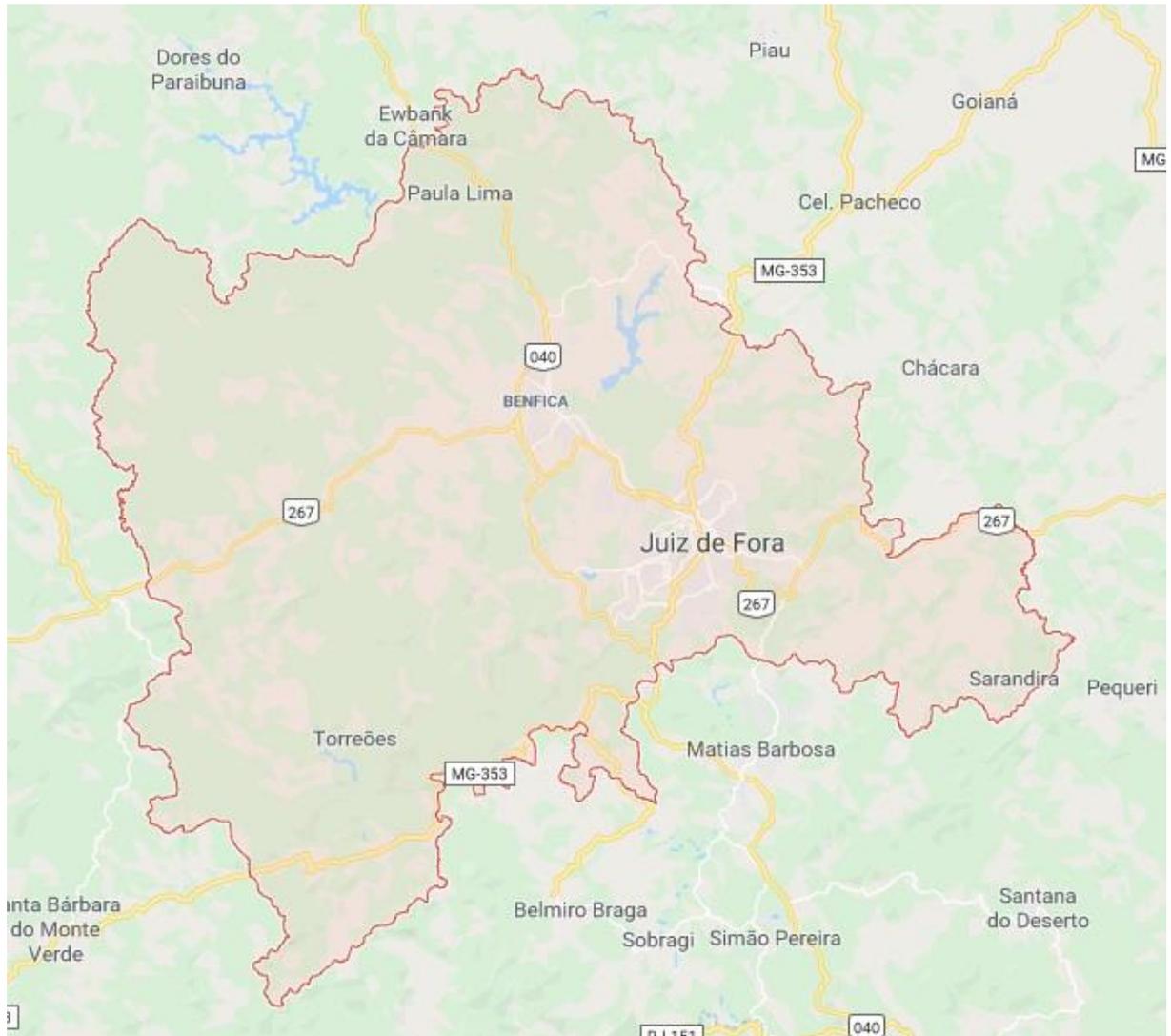


Fonte: Imagem retirada do Google Maps.

Da população total do município, 98,9% é considerada urbana, de acordo com dados do IBGE no ano de 2010. Ainda segundo o IBGE, em 2017 sua área territorial era de 1.435,749 km². Segundo dados da Fundação João Pinheiro, o déficit habitacional local, ou seja, a necessidade de construção de moradias, é o quarto maior do estado e seria de dezesseis mil moradias em 2010 (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2015). O suprimento desse déficit implica em uma necessidade de aumento na malha urbana já consolidada.

De acordo com informações coletadas no site da Prefeitura Municipal de Juiz de Fora – PJJF em 2018, o relevo do município é bastante dissecado, com colinas côncavo-convexas e vales, com altitudes compreendidas entre 700 e 900 metros, característico do Vale do Paraíba do Sul e dos contrafortes da Serra da Mantiqueira. Os principais rios são o rio Paraibuna e seus afluentes, Peixe e Cágado, todos integrantes da Bacia do Paraíba do Sul. Apresenta clima tropical de Altitude (típico das áreas elevadas da região Sudeste. As temperaturas são mais baixas que as registradas nas áreas típicas de clima tropical. Apesar de ocorrerem durante todo o ano, as chuvas estão mais concentradas no verão), com dois períodos distintos, um mais quente e chuvoso e um menos quente e mais seco.

Figura 04: Delimitação da cidade de Juiz de Fora/MG.



Fonte: Imagem retirada do Google Maps

Na Área Urbana do Município de Juiz de Fora/MG, existem 156 sub bacias de diversas dimensões (CESAMA, 2011). Com o processo histórico de ocupação e com as modificações que ocorreram em boa parte das sub bacias, várias mudanças ocorreram, como as impermeabilizações, canalizações de córregos, retirada de meandros (retificação do canal) e construções em geral que ocasionam o aumento de probabilidades na ocorrência de inundações. Segundo Souza et al (2009), a mancha urbana do município ocupa apenas 93,5 km² (cerca de 28% da Área Urbana), o que deixa desocupados quase 72% do espaço legalmente considerado urbano e que se apresenta repleto de contrastes, tanto nos aspectos físicos, sociais e econômicos, que privilegia uma parcela da população e desfavorece outra, pois o processo de densificação e ocupação dos bairros periféricos da cidade tem sido um dos efeitos negativos de um setor habitacional desorganizado, mercado imobiliário especulativo e diferentes níveis de

infraestrutura entre os bairros, consolidando assim um processo de exclusão social e de segregação espacial. Essa disparidade de ocupação acarreta consequências também na drenagem urbana do município. Seguindo o exemplo de outras cidades brasileiras, ao promover seu crescimento e adensamento urbanos, Juiz de Fora desconsiderou a importância de seus recursos hídricos (MACHADO et al, 2017).

De acordo com o Plano de drenagem de Juiz de Fora (CASTRO *et al*, 2011), o Município de Juiz de Fora tem uma densa rede de drenagem de formato dendrítico, com artérias de pequena extensão. Ou seja, o Rio Paraibuna corre em direção a uma linha de fratura, enquanto seus tributários direcionam-se conforme a morfologia do terreno em direção variada, não se submetendo a controle geológico aparente, fugindo ao padrão de espinha de peixe. O Rio Paraibuna tem uma extensão de 150 km dentro do município, recebendo pelas margens direita e esquerda um grande número de pequenos córregos. Ao longo da história da ocupação urbana, esses córregos possuíram e continuarão possuindo papel significativo como fonte de suprimento de água para a população do Município.

Ainda segundo Castro *et al* (2011), após a enchente de janeiro de 1906 as questões da drenagem e do saneamento passam a ocupar papel de destaque dentro do contexto das preocupações públicas. Desde então vários projetos e obras foram implementados com a finalidade de otimizar o escoamento das águas, em especial as conduzidas pelo rio Paraibuna na área urbana de Juiz de Fora.

4.1. PLANO DE DRENAGEM DE JUIZ DE FORA

As características físicas de uma bacia hidrográfica são informações de grande relevância, principalmente, para o entendimento da dinâmica do escoamento superficial que nela atua. A partir de revisão de literatura, buscou-se compreender e tomar como base de estudos o Plano de Drenagem elaborado para a zona norte do município de Juiz de Fora. Segundo Castro *et al* (2011) os estudos elaborados no Plano de Drenagem de Juiz de Fora, foram desenvolvidos a partir de dados gerados em ambiente SIG (sistema de informação geográfica), utilizando o *software* ArcGis da ESRI®, com base em dados fornecidos pela Prefeitura de Juiz de Fora, o que possibilitou estabelecer as características fisiográficas das 40 sub bacias da zona norte de Juiz de Fora.

A determinação das vazões máximas para diferentes períodos de retorno foi realizada utilizando o *software* SISHIDRO-JF, um sistema computacional georreferenciado para auxiliar o gerenciamento dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas da região norte do município de

Juiz de Fora (RIBEIRO et al, 2011), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – ESA, da Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, onde foram avaliados sete cenários diferentes para analisar o comportamento das manchas de inundação em decorrência das mudanças nas vazões dos cursos d’água da região norte do município de Juiz de Fora.

A partir dos valores de vazões máximas para diferentes períodos de retorno gerados pelo sistema SISHIDRO-JF e das vazões máximas estimadas para o rio Paraibuna a partir da estação fluviométrica Chapéu D’uvas e com a base de dados geográficas gerados no *software* Hec-Geo_HAS e ArcGis, foi possível alimentar o sistema de simulação HecHAS, e assim gerar as manchas de risco de inundação (CASTRO *et al*, 2011).

No documento elaborado para o diagnóstico do plano de drenagem de Juiz de Fora não fica explícito qual a fórmula matemática utilizada para se obter os resultados através dos *softwares*, porém, durante a pesquisa foi possível fazer contato com autores que participaram dos estudos do Plano de Drenagem e foi esclarecido que as fórmulas utilizadas foram as do Método Racional, havendo a necessidade de aplicar o Método Racional Modificado quando utilizados em sub bacias maiores que 3km².

4.1.1. Soluções em drenagem urbana recentemente implantadas em Juiz de Fora

O processo de impermeabilização da cidade de Juiz de Fora, antes da década de 1980, se concentrava nos bairros centrais do município e adjacentes. Esta realidade se transformou com a implantação do Programa Especial Cidades de Porte Médio – CPM/BIRD – Componente PRTC (Plano de Reestruturação do Transporte Coletivo), no início dos anos 1980, com um constante processo de impermeabilização asfáltica, que começou restrita aos itinerários dos ônibus na periferia, seguiu para uma universalização desse procedimento, atingindo, gradativamente, a quase totalidade das vias urbanas (CASTRO, 2011).

Como dito anteriormente, o processo de impermeabilização do solo altera a capacidade de absorção das águas pluviais pelo solo, influenciando o ciclo hidrológico e podendo acarretar em inundações urbanas. De acordo com Castro (2011), o problema das inundações em Juiz de Fora se originou na falta de capacidade de transporte do rio Paraibuna para conduzir as descargas máximas de cheias. Esse problema antigo se agravou com o tempo, em função da ocupação das margens dos cursos d’água, da contínua remoção da cobertura vegetal e da crescente impermeabilização do solo urbano devido ao desenvolvimento da cidade, atração de mais população e ocupação de áreas por muito tempo esquecidas, como são as áreas de várzea que margeiam o Rio Paraibuna na região mais ao norte da cidade.

A ocupação das margens, ou proximidade com os canais que constituem a rede de macrodrenagem do município, que ocorre em sua grande maioria de forma irregular, são alvo de intervenções no leito desses canais que se configuram como obstruções ao escoamento natural das águas, fato observado e sentido pela população ribeirinha quando da ocorrência de precipitações mais intensas. Essa impermeabilização e a ocupação das áreas de várzea, caracterizada pela proximidade da população com os canais principais de macrodrenagem, o rio Paraibuna e seus tributários, têm representado uma sobrecarga importante para o sistema de drenagem natural e construído, já que, associada à conformação do relevo da maioria da cidade, faz com que as águas caídas adquiram velocidades torrenciais, carreando para as vias fluviais grandes volumes de terra e detritos poluentes, pelo que a cidade ainda apresenta problemas de inundações.

Segundo Castro (2011), na década de 1980, a cidade de Juiz de Fora recebeu recursos do Banco Mundial (Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD) para serem investidos em 12 projetos de desenvolvimento institucional e processos internos, bem como em melhoria e ampliação de serviços urbanos - Programa de Cidades de Porte Médio – CPM/BIRD. Nessa última categoria, as áreas de saneamento e drenagem foram contempladas com três componentes distintos: Ampliação do Sistema de Abastecimento de Água, Ampliação do Sistema de Limpeza Urbana e Drenagem de Córregos, atendendo a vários bairros e regiões da cidade até então descobertos por esses benefícios.

O Quadro 02 a seguir, apresenta algumas das intervenções realizadas, mais recentemente, em córregos na malha urbana de Juiz de Fora, incluindo canalização aberta ou fechada em rip-rap, gabião ou concreto, reforço de parede, correção de curso, retificação, taludamento das margens e aumento do canal de escoamento.

Quadro 02 - Relação de intervenções em córregos de Juiz de Fora

Córrego	Intervenções	Data
Humaitá	Gabião do Rio Paraibuna à linha férrea	1986 a 1988
Três Pontes	Acima da Rua Evaristo da Veiga / Região da Vila do Sapé acima. Prolongamento aberto do canal em concreto ciclópico	1986
Ipiranga	Da Av. Ibitiguaia até a cachoeira. Canalização fechada até a Rua Francisco Altomar e canalização aberta em gabião.	1988
	Canalização em rip-rap até a Rua Tereza Nogueira dos Santos	1996
Santa Luzia	Duas intervenções em datas diversas de reforço de parede	1991 e 1996
Tapera	Canalização em gabião do Bom Clima à Rua Treno Fabri no Bandeirantes;	1989
	Canalização entre Paraibuna a Rua Humberto Campos;	1982
	Rua Otávio Dias Moreira – aproximadamente 80 metros;	1995
	Correção de curso do córrego que passava entre casas em Santa Terezinha e passou a correr sob a Av. Rui Barbosa	1998
Yung	Houve uma intervenção de correção de curso	1983 a 1988
Matirumbide	Canalização do Paraibuna a Rua Afonso Pena	1981
	Outra intervenção de correção de curso foi realizada na altura da Rua Júlio Modesto onde o córrego passou a correr na Rua Vitorino Braga	1998
Teixeiras	Canalização aberta até a Rua Darcy Vargas	1999 a 2000
São Pedro	Do German Village até o bairro Itatiaia retificação (correção de curso) em canal aberto em gabião, taludamento de margens. Da entrada do Jardim Casablanca até a ponte de transposição sob via no Serro Azul foi feito quebramento de rochas para aumento do canal de escoamento e galeria fechada sob estrada (transposição/ponte)	1994
	Do German para cima (via São Pedro) até a rotatória do loteamento Viña del Mar correção de curso, taludamento e canalização em gabião entre pistas. Na rotatória onde há uma transposição foi executado canal fechado em concreto de 115 m.	2001

Fonte: Plano de Drenagem de Juiz de Fora – Zona Norte.

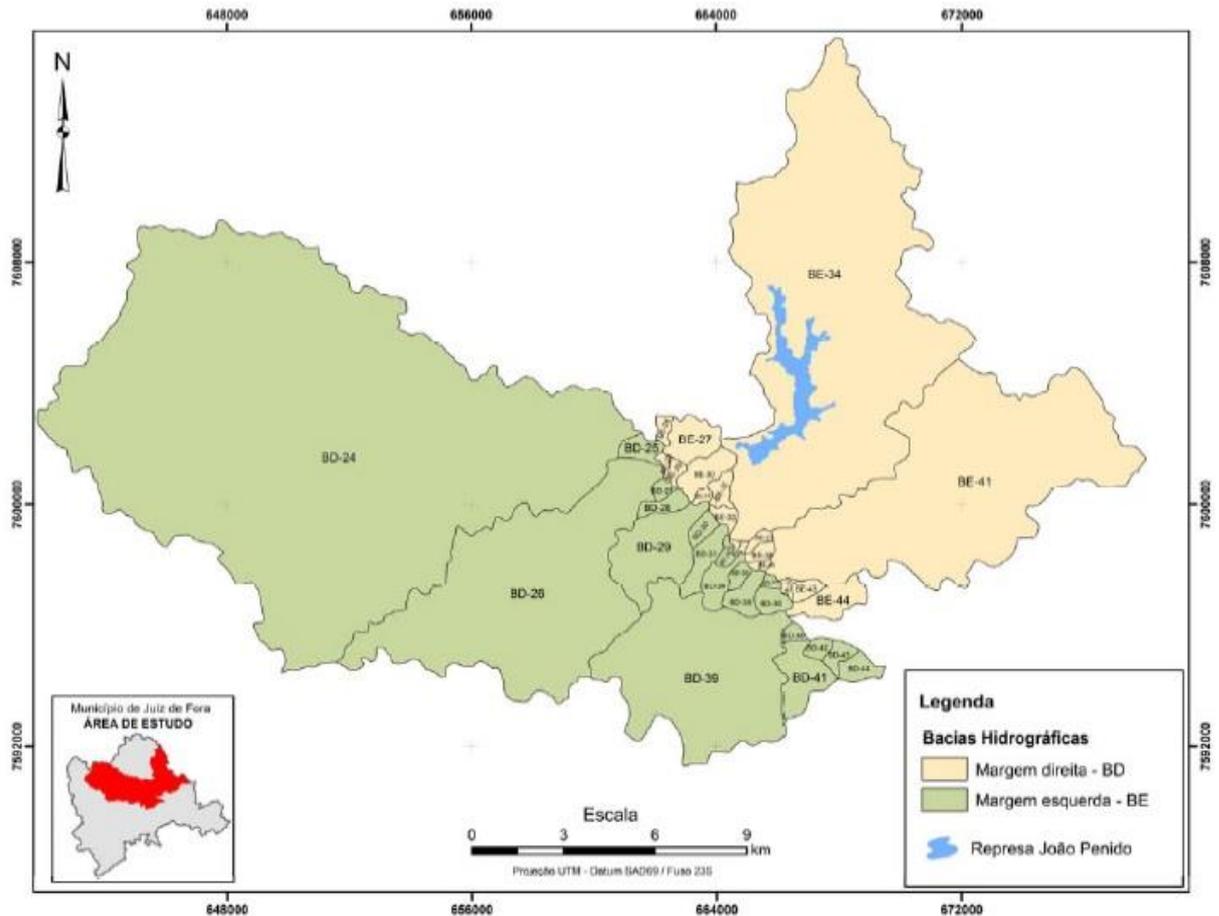
4.2. Zona Norte de Juiz de Fora

De acordo com o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Juiz de Fora – PDDU, a zona norte de Juiz de Fora, área de abrangência do Plano de Drenagem de Juiz de Fora (2011), é apontada como de grande potencial de expansão e adensamento. A região norte apresenta-se como receptora de investimentos em habitação popular, inclusive por parte do poder público municipal através da implantação de loteamentos sob responsabilidade da Empresa Regional de Habitação de Juiz de Fora - Emcasa.

De acordo com levantamentos do IBGE no ano de 2013, a Zona Norte de Juiz de Fora é composta por 63 bairros (Barreira do Triunfo, Novo Triunfo, Aldeia, Volta Grande, Represa, Náutico, Taboporanga, Jardim Paraíso, Enseada Parque Ecológico, Benfica, Distrito Industrial, São Damião, Araújo, Ponte Preta, Vila do Sapê, Nova Benfica, Vila Esperança I e II, Santa Cruz, Vila Melo Reis, São Judas Tadeu, São Francisco de Paula, Verbo Divino, Jardim dos Alfeneiros, Oswaldo Cruz, Santa Clara, Morada Nova, Nova Era, Nova Era I e II, Santa Lúcia, Jardim Santa Isabel, Barbosa Lage, Cidade do Sol, Parque das Torres, Santa Amélia, Jôquei clube II, Santa Maria, Recanto da Mata, Remonta, Jôquei II e III, Miguel Marinho, Jardim L'Ermitage, Parque das Torres, Jôquei Clube, Vila Vidal, Jardim Natal, Industrial, Francisco Bernardino, Milho Branco, Amazônia, Encosta do sol, Realeza, Parque Bernadino, Carlos Chagas, Cerâmica, Parque Bernardino, São Dimas, Esplanada, Monte Castelo, Jardim da Cachoeira e Monteville) e de acordo com Castro (2011), abrange 40 sub bacias (Figura 05).

Boa parte dos bairros da Zona Norte de Juiz de Fora sofre frequentemente com problemas relacionados às enchentes urbanas, conforme apontado no Plano de Drenagem de Juiz de Fora (2011) e noticiado regularmente nos noticiários locais. Quando considerado o potencial de expansão e adensamento da região, fica evidente a potencialidade de aumento de ocorrências desses fenômenos assim como da gravidade dos mesmos.

Figura 05 - Bacias hidrográficas da Zona Norte do Município de Juiz de Fora



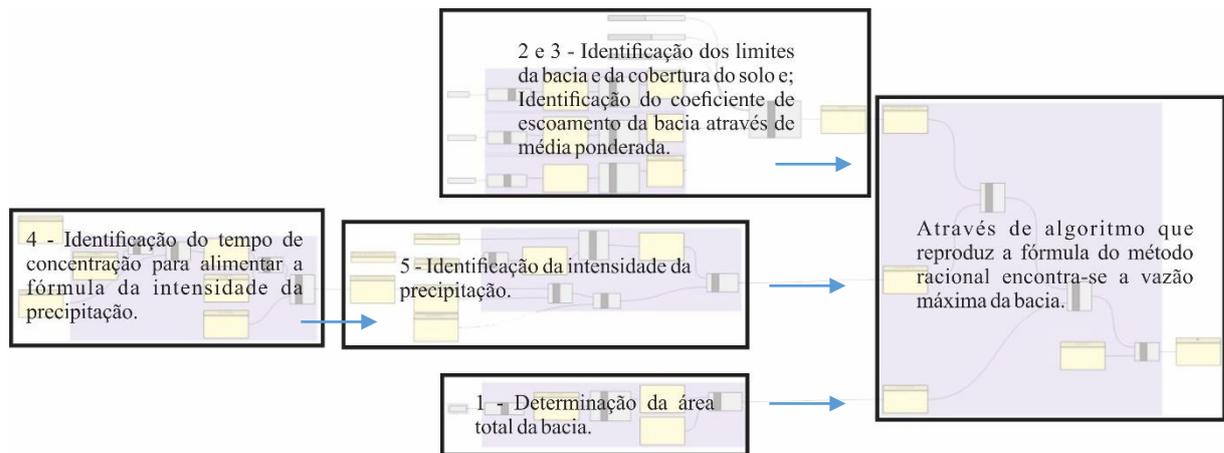
FONTE: Plano de Drenagem de Juiz de Fora – Zona Norte.

4.2. CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO E HISTÓRICO DE VERSÕES

Para a construção do algoritmo, calibração e testes posteriores, foram selecionadas três sub bacias localizadas na Região Norte do município de Juiz de Fora, nomeadas de BD-30, BD-34 e BD-36. De acordo com o Plano de Drenagem de Juiz de Fora, as sub bacias BD-30, BD-34 e BD-36 contam com uma área de 0,67 km², 1,27 km² e 1,16 km², respectivamente. A BD-36 e BD-34 encontram-se no bairro Barbosa Lage, enquanto a BD-30 abrange o bairro Nova Era. De acordo com levantamento do IBGE no ano de 2003, o crescimento do bairro Barbosa Lage entre os anos de 1996 a 2000 foi de 5,88%, enquanto o crescimento do bairro Nova Era foi de 21,65% no mesmo período. Segundo informações levantadas pelo Plano de Drenagem de Juiz de Fora, seis bacias contam com altas taxas de ocupações urbanas, e possuem área de ocupação urbana maiores do que 50 % de sua totalidade, entre elas está a BD-36, com taxa de ocupação urbana de 50,39%. Vale ressaltar que o diagnóstico feito para o Plano de Drenagem foi elaborado no ano de 2011, e de lá para cá a malha urbana da região aumentou.

Para a análise das sub bacias e construção da ferramenta, é fundamental o (1) levantamento de sua área, (2) reconhecimento da cobertura do solo, (3) identificação do coeficiente de escoamento dos materiais que conformam as coberturas do solo, (4) reconhecimento da tempo de concentração, e por fim, (5) a identificação da Curva Chave Intensidade - Duração - Frequência determinada para a localidade onde a ferramenta está sendo aplicada. Esses parâmetros são traduzidos em algoritmos conforme ilustrado na figura 06.

Figura 06 - Mapa de grupos do algoritmo

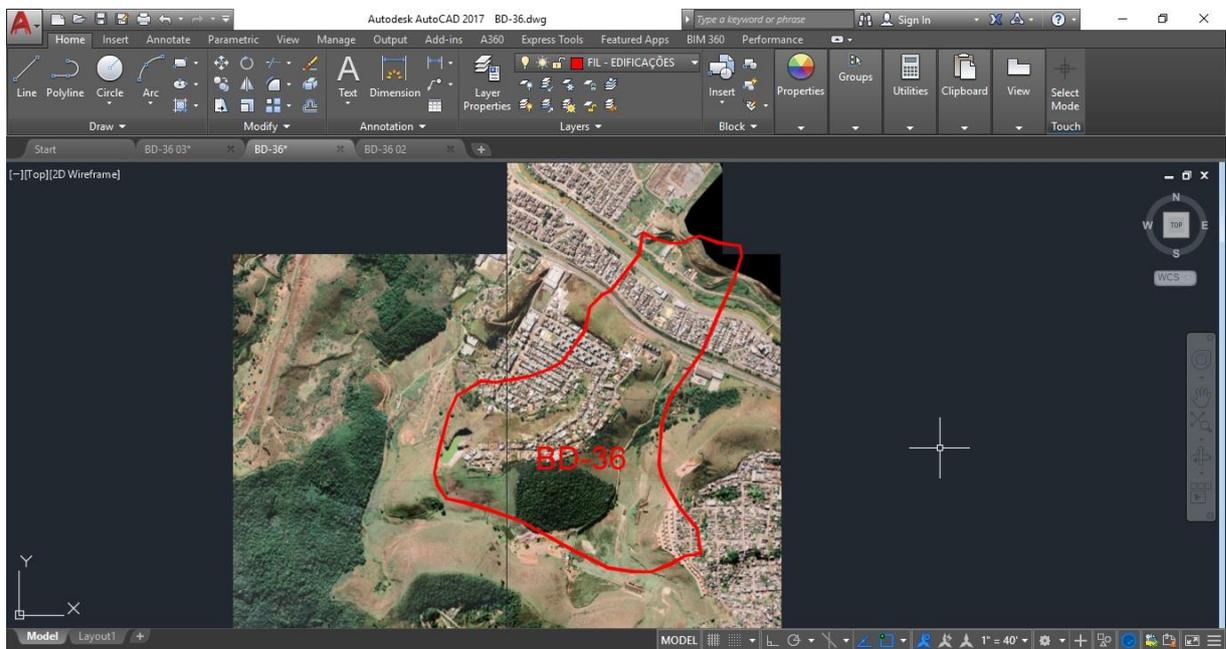


Fonte: Autor, 2018.

4.2.1. Simulações na sub bacia BD-36

Para experimento inicial com a ferramenta desenvolvida, foi selecionada a sub bacia BD-36, de 1,16km², por suas características físicas, morfológicas, e pelo seu histórico de inundações urbanas. Para o procedimento de levantamento do perímetro das sub bacia e o reconhecimento da cobertura dos solos, foram feitas diversas visitas ao local, assim como análises criteriosas de imagens de satélite referentes ao ano de 2011, ano em que foi elaborado o Plano de Drenagem de Juiz de Fora, retiradas do Google Earth, um *software* gratuito desenvolvido e distribuído pela empresa norte-americana Google. Essas imagens foram então importadas para o *software* AutoCAD, da Autodesk, conforme apresenta a figura 07.

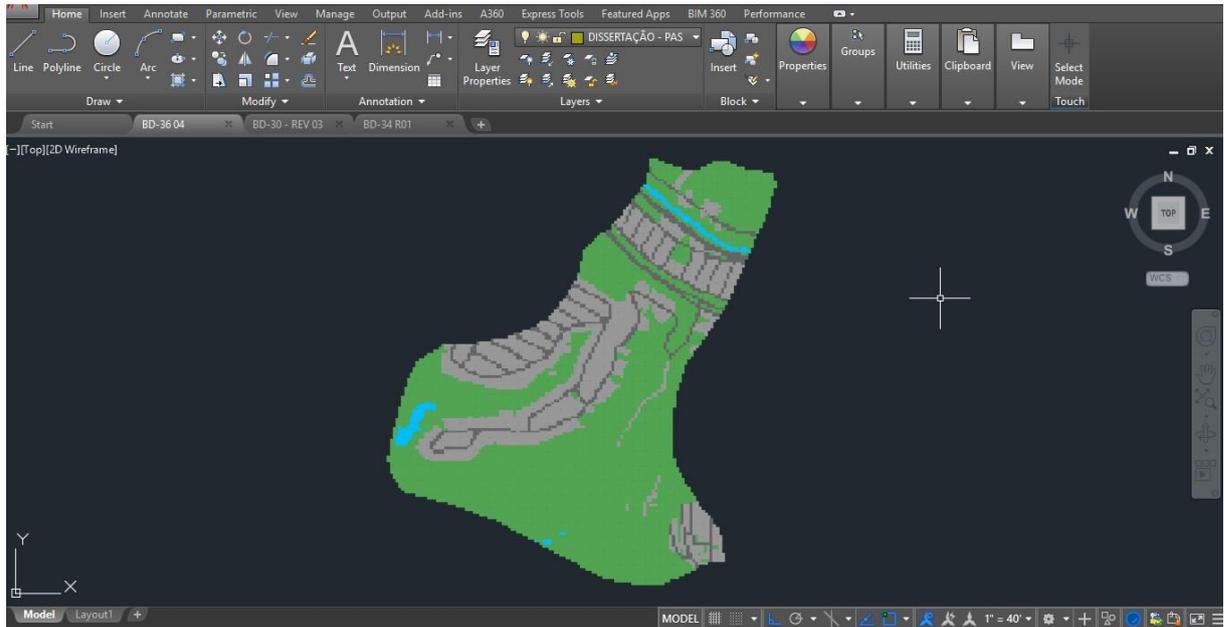
Figura 07 – Delimitação da sub bacia BD-36 no *software* AutoCAD.



Fonte: Autor, 2018.

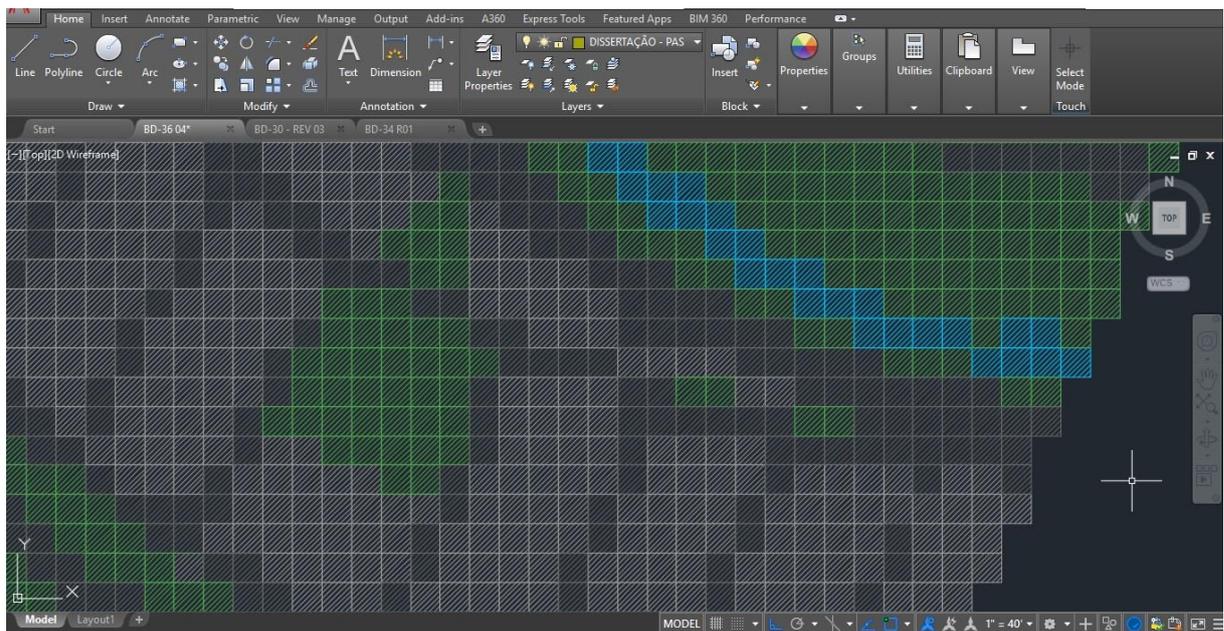
Utilizando-se da ferramenta “*Polyline*”, foram criados sobre as imagens, quadrados de 10 x 10m, chamados de células, conformando um *grid* sobre a sub bacia, conforme estudo similar desenvolvido no ano de 2017 por Juan *et al.* Optou-se por dividir a sub bacia em células pela simplificação no processo de reconhecimento da cobertura do solo e, sobretudo, por permitir a possibilidade de verificação do coeficiente de escoamento e vazão máxima em qualquer parte da sub bacia, e não somente à jusante (Figuras 08 e 09).

Figura 08 – Células desenvolvidas no *software* AutoCAD representando a sub bacia BD-36.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 09 - Células desenvolvidas no *software* AutoCAD vistas mais de perto.



Fonte: Autor, 2018.

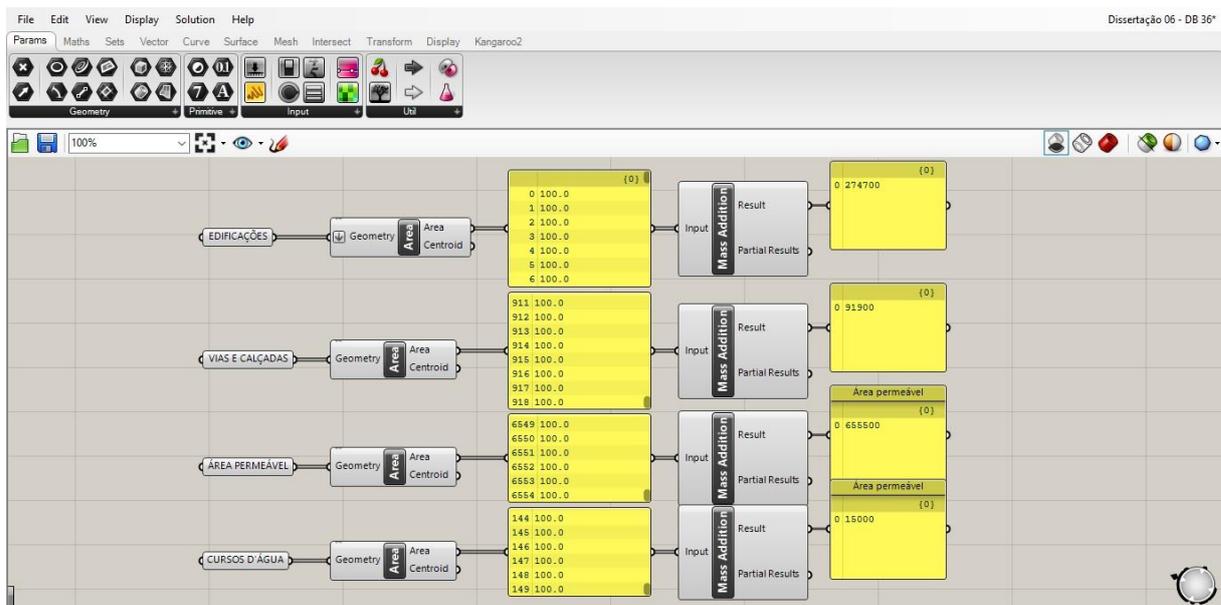
Dessa forma, cada célula da sub bacia BD-36 foi caracterizada por meio de “*layers*” de acordo com a cobertura predominantemente encontrada em sua superfície (asfalto, edificações, área permeável e cursos d’água). Portanto, a cobertura que ocupa a maior parte da superfície de cada célula determina o material que aquela célula representa. Vale ressaltar a importância de uma análise cuidadosa, pois cada material detém um coeficiente de escoamento diferente, e a

junção de todas as células determina o coeficiente de escoamento total da bacia, influenciando diretamente em sua vazão máxima.

Após feito o *grid* no *software* AutoCAD, o arquivo foi importado para o *software* de modelagem tridimensional Rhinoceros, baseado na tecnologia NURBS - *Non Uniform Rational Basis Spline*, modelo matemático usado regularmente em programas gráficos para gerar e representar curvas e superfícies. Dentro plataforma foi utilizado o *plugin* Grasshopper. No primeiro, são fornecidos os dados do ambiente por meio de desenhos que servirão de suporte para as operações realizadas pelo algoritmo (desenhos das células que conformam as bacias). No segundo, o usuário complementa os *inputs* com os valores dos coeficientes de escoamentos superficiais de cada cobertura de solo e valores que alimentam as fórmulas matemáticas para se identificar o coeficiente de escoamento total e vazão máxima das bacias.

Inicialmente, por meio de componentes “*Geometry*” o usuário informa ao *Grasshopper* as figuras a serem importadas, possibilitando o reconhecimento dos desenhos (células) inseridos no *Rhinoceros*, bem como sua classificação em (1) vias e calçadas, (2) edificações, (3) áreas permeáveis e (4) cursos d’água. Os componentes “*Geometry*” foram criados em número proporcional ao número de revestimentos de solo encontrados na sub bacia (1, 2, 3 e 4), e à cada componente foi vinculado determinado números de células de 10 por 10 metros que representavam determinada cobertura do solo, conforme figura 10.

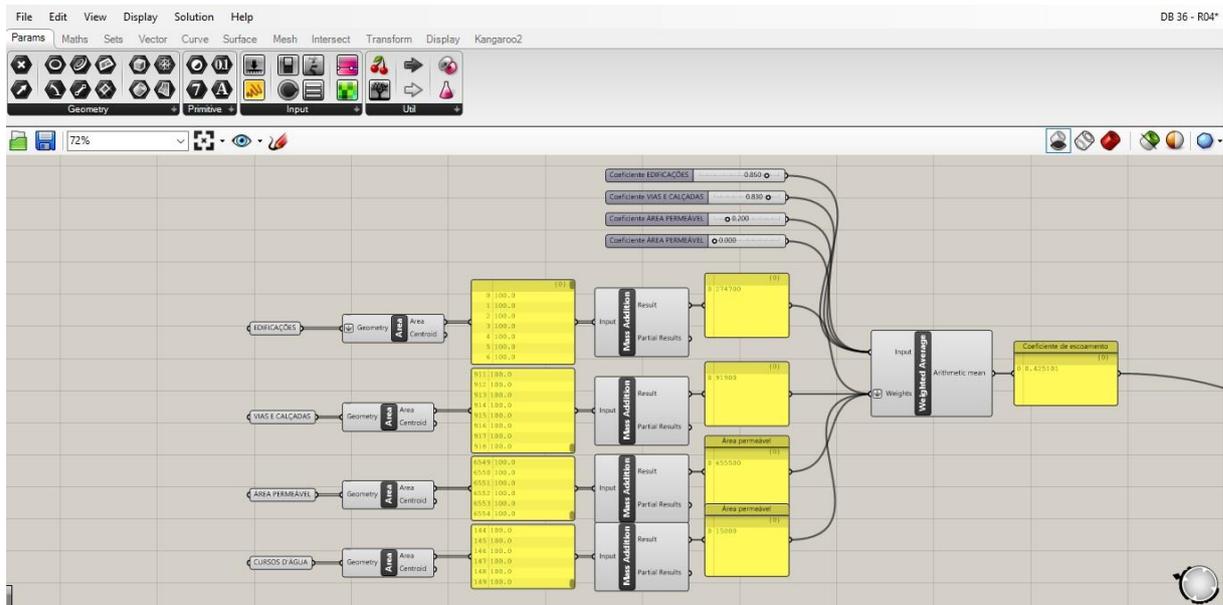
Figura 10 – Componentes “*Geometry*” criados em número proporcional ao número de revestimentos de solo encontrados na sub bacia BD-36.



Fonte: Autor, 2018.

Utilizando o componente “*Weighted Average*” foi atribuído à cada material de revestimento do solo um coeficiente de escoamento superficial, determinado a partir de informações extraídas de tabelas existentes, encontradas em literatura especializada. Os valores específicos referentes aos coeficientes de escoamento de cada material são editáveis, de forma que se torna possível fazer simulações com a aplicação de outros materiais como revestimento de solo, que detém outros coeficientes de escoamento. Na figura 11 pode-se observar que a partir da inserção dos diferentes materiais que compõem a superfície da bacia e seus respectivos coeficientes de escoamento no componente “*Weighted Average*” foi possível identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.

Figura 11 - Componente “*Weighted Average*” permite identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.

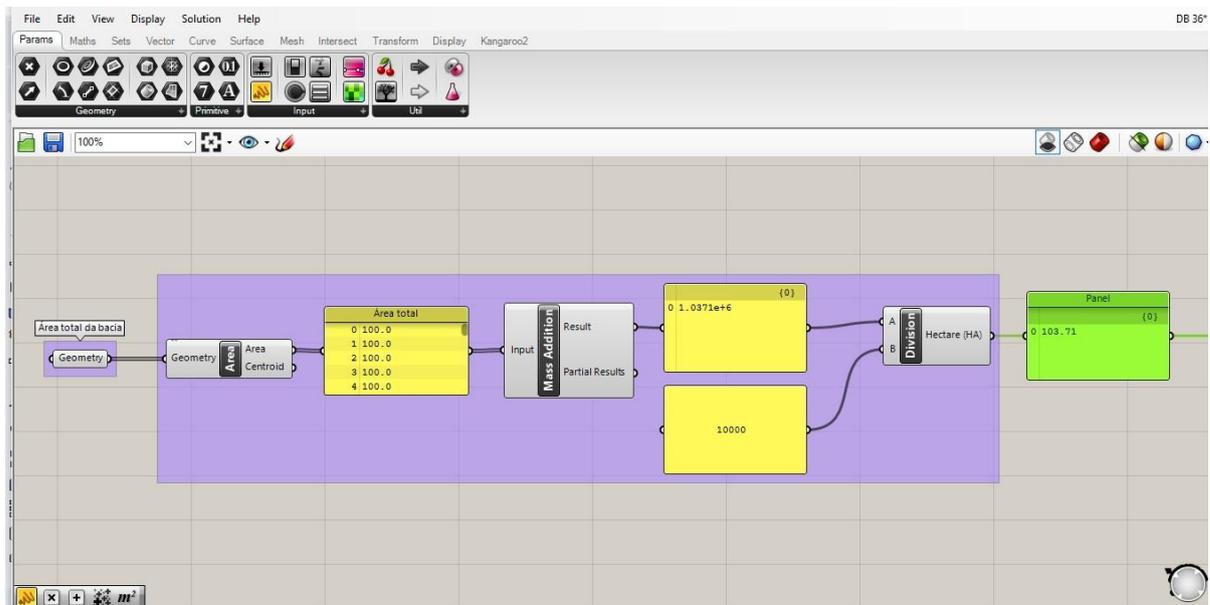


Fonte: Autor, 2018.

De acordo com o diagnóstico do Plano de Drenagem de Juiz de Fora (2011) o coeficiente de escoamento da sub bacia BD-36 é de 0,40. O valor obtido com a ferramenta desenvolvida é de 0,42, apresentando diferença de 5% no resultado final. Essa diferença provavelmente ocorre em razão da resolução do grid de 10 por 10 metros ou em razão da dificuldade de identificação da cobertura do solo em algumas partes da imagem de satélite utilizada como referência, principalmente nas áreas que conformam terrenos privados. Ainda assim, a diferença de 5% é baixa e considerada aceitável para os fins do presente estudo.

A partir do valor do coeficiente de escoamento superficial, encontra-se o valor de “C” da fórmula do método racional, utilizado neste trabalho para identificação da vazão máxima da sub bacia, conforme indicado nos capítulos anteriores. No método racional, multiplica-se o coeficiente de escoamento pela intensidade da precipitação e a área da bacia, e então divide-se o valor por 360. Para se obter a área da bacia vincula-se à um componente “Geometry” todas as células presentes no arquivo do *Rhinoceros*, que compõe a sub bacia, conforme ilustrado na figura 12. Divide-se o valor encontrado por 10000, utilizando o componente “Division”, pois a fórmula pede a área da bacia em hectares (HA). O valor encontrado para esta bacia foi de 103,71 ha.

Figura 12 - Todas as células presentes no arquivo do *Rhinoceros* vinculadas à um componente “Geometry” para se obter a área total da bacia.



Fonte: Autor, 2018.

Em relação à intensidade da precipitação, é possível obtê-la por meio de curvas de intensidade – duração – frequência do local de estudo. O cálculo da intensidade I é realizado através da equação:

$$I = \frac{a * Tr^b}{(t + c)^d}$$

Onde “ I ” corresponde à Intensidade em mm/h, “ Tr ” corresponde ao tempo de retorno em anos, “ a ”, “ b ”, “ c ” e “ d ” são coeficientes preestabelecidos que dependem do local e “ t ” é a duração em minutos. De acordo com Pereira (2015), para a cidade de Juiz de Fora os valores

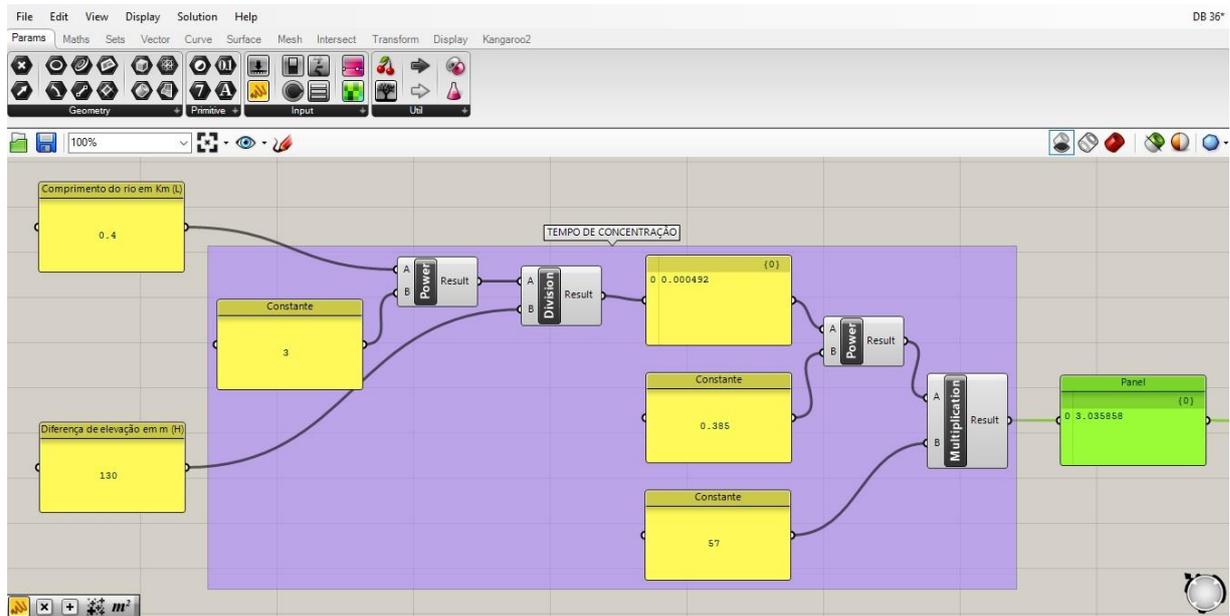
de “a”, “b”, “c” e “d” são 3000, 0,173, 23,965 e 0,96, respectivamente. Yoshizane (2008) afirma que a duração da chuva (t) equivale ao tempo de concentração (tc) da bacia e pode ser estimado por uma série de equações empíricas estabelecidas para cada região. A seguir, destaca-se a equação de Kirpich, escolhida para ser utilizada no presente trabalho:

$$tc = 57 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Onde “tc” refere-se ao tempo de concentração em minutos, “L” refere-se ao comprimento do rio em quilômetros e “H” é a diferença de elevação entre o ponto mais remoto da bacia e a seção principal.

Primeiramente, foi criado um algoritmo para identificar o tempo de concentração, onde foram criados “*Panels*” para cada um dos valores da equação. O primeiro deles é onde se insere a informação referente ao comprimento do rio em quilômetros. De acordo com medição feita no *software* Rhinoceros encontrou-se o valor de 0,4 km. Conectando o “*Panel*” referente ao comprimento do rio na entrada superior ao componente “*Power*”, e outro “*Panel*” com o valor 3, dado pela fórmula, conseguiu-se elevar o valor de 0,4 por 3. Na saída (*output*) do componente “*Power*” foi feita a conexão com a entrada (*input*) superior de outro componente chamado “*Division*”. Na entrada inferior foi conectado um “*Panel*” com o valor da diferença de elevação da bacia em metros. De acordo com análise feita através de curvas de nível no AutoCAD, foi encontrado o valor de 130 metros. Mais uma vez foi utilizada o componente “*Power*”, para conseguir elevar o resultado obtido pelo valor de 0,385, dado pela fórmula. Na saída do componente “*Power*” foi feita a conexão com a parte superior de outro componente, de nome “*Multiplication*”. Na entrada inferior foi feita a conexão com um “*Panel*” de valor 57, também dado pela fórmula, promovendo a multiplicação entre os dois valores e indicando o tempo de concentração: 3,035858. A fórmula do tempo de concentração se traduz no algoritmo descrito acima, ilustrado na figura 13.

Figura 13 – Algoritmo que reproduz a fórmula do tempo de concentração.



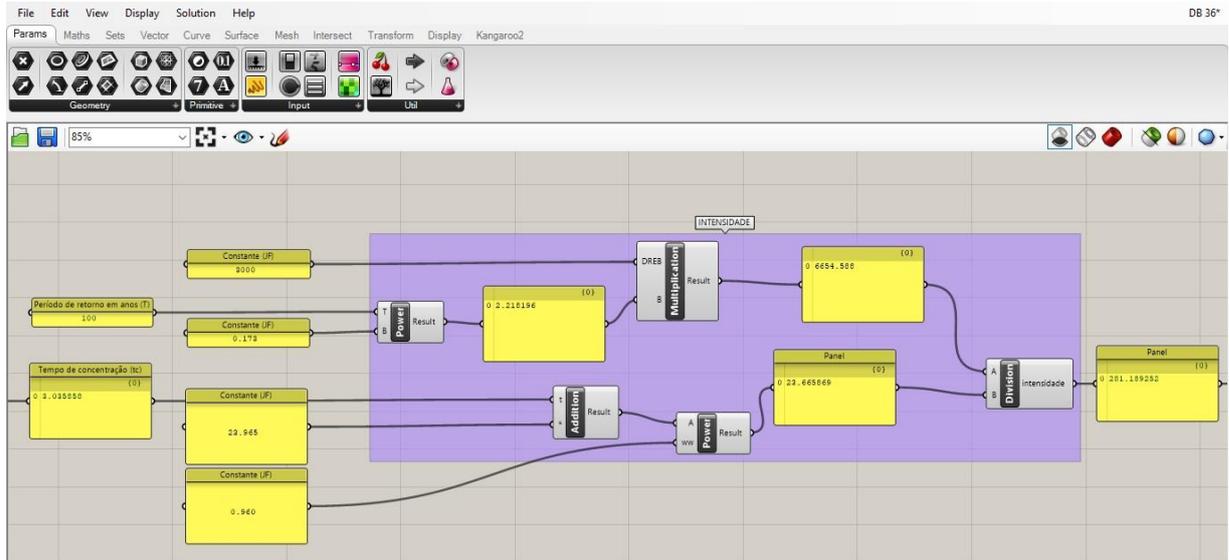
Fonte: Autor, 2018.

Tendo acesso ao valor do tempo de concentração, é possível determinar o valor da intensidade da precipitação. Foram criados dois “*Panels*”, onde foi inserido o valor de 0,173 em um (constante da fórmula para a cidade de Juiz de Fora) e no outro deve-se inserir o tempo de retorno, ou seja, é um “*Panel*” de valor editáveis, que pode variar de 2, 5, 10 e 100, valores em anos, que traduzem o tempo em que chuva de mesma magnitude pode voltar a ocorrer. O valor escolhido inicialmente foi de 100. Esses dois valores foram conectados à entrada do componente “*Power*”, permitindo que o valor do tempo de retorno seja elevado à 0.173. O resultado dessa equação foi multiplicado por 3000 (constante da fórmula para a cidade de Juiz de Fora) por meio do componente “*Multiplication*”, encontrando o valor de 6654,588. Paralelamente a esse processo, foi criado outro “*Panel*”, de valor 23.965. Esse “*Panel*” foi conectado à um componente “*Addition*” junto com o resultado obtido no algoritmo referente ao tempo de concentração, fazendo com o que os valores sejam somados. Na saída (*output*) do componente “*Addition*” foi feita a conexão com a entrada superior do componente “*Power*”, enquanto a entrada inferior recebeu a conexão de outro “*Panel*” de valor 0.960 (constante da fórmula para a cidade de Juiz de Fora), possibilitando a elevação do resultado da soma descrita acima pelo valor de 0,960. O valor encontrado foi de 23,665869.

De posse dos valores 6654,588 e 23,665869, divide-se o primeiro pelo segundo, conectando o primeiro valor a entrada superior de um componente “*Division*”, e o segundo

valor na entrada superior do mesmo componente. Ao desenvolver o procedimento descrito, encontra-se o valor da intensidade da precipitação: 281,189252 (Figura 14).

Figura 14 – Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 100 anos.

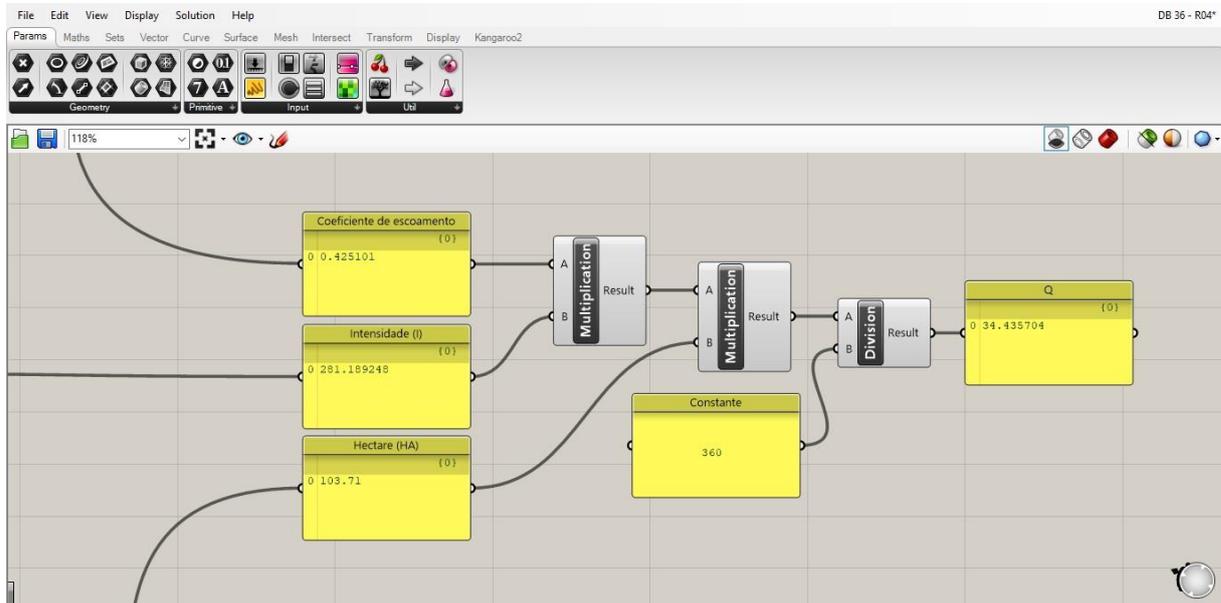


Fonte: Autor, 2018.

Encontrado os valores do coeficiente de escoamento “C” (0,42), intensidade da precipitação “I” (281,189252) e área total da bacia “A” (103,71), multiplicam-se os três valores e ao final divide-se o resultado por 360, valor constante da fórmula do método racional. Para a multiplicação, foram conectados os valores de “C” e “I” à um componente “*Multiplication*” e o resultado da equação foi conectando em outro componente “*Multiplication*”, onde também foi conectado o valor de “A”. O valor obtido foi então dividido por 360 utilizando um componente “*Division*” (Figura 15).

O valor final encontrado, de 34,43, refere-se à vazão máxima da bacia “Q” em m³/s. De acordo com o Plano de Drenagem de Juiz de Fora, o valor de “Q” para a bacia BD-36 nos períodos de cheia é de 36,21 m³/s. A diferença entre o valor encontrado pela ferramenta e o valor informado no plano de drenagem é de 4,91%. Essa diferença ainda pode ser reflexo da resolução do grid, tendo em vista que células de 10 x 10 metros não reproduzem de forma 100% fiel os materiais de cobertura do solo, influenciando no valor do coeficiente total da bacia e consequentemente do valor da vazão máxima da mesma. Ainda assim, o valor encontrado mostra-se confiável, tendo em vista a diferença pequena em relação ao valor do plano de drenagem.

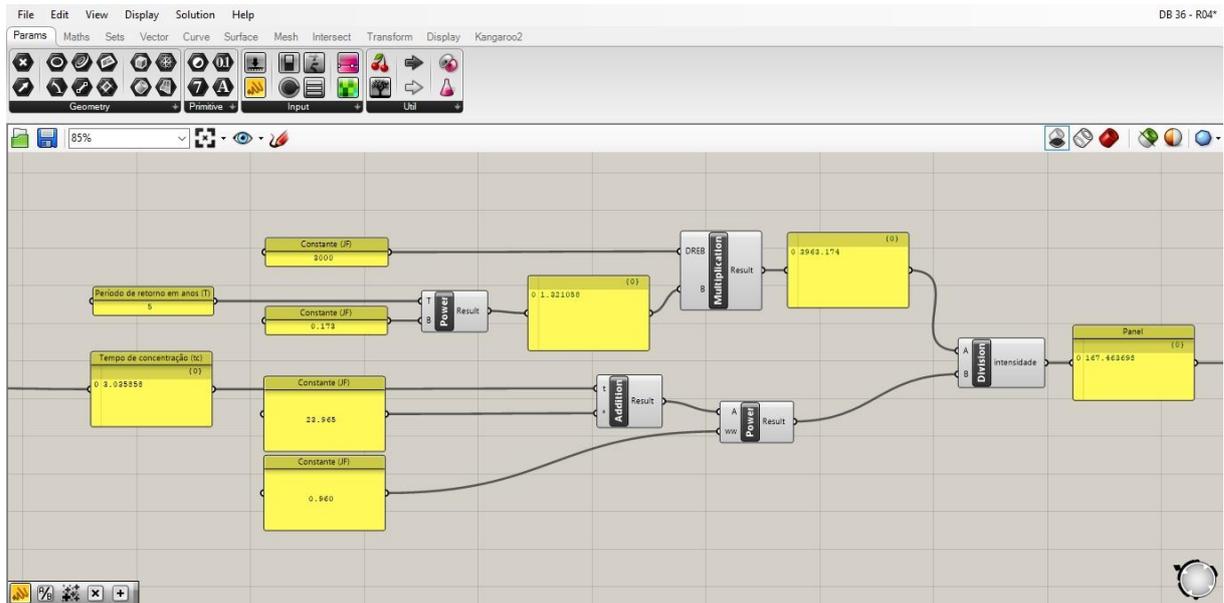
Figura 15 – Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

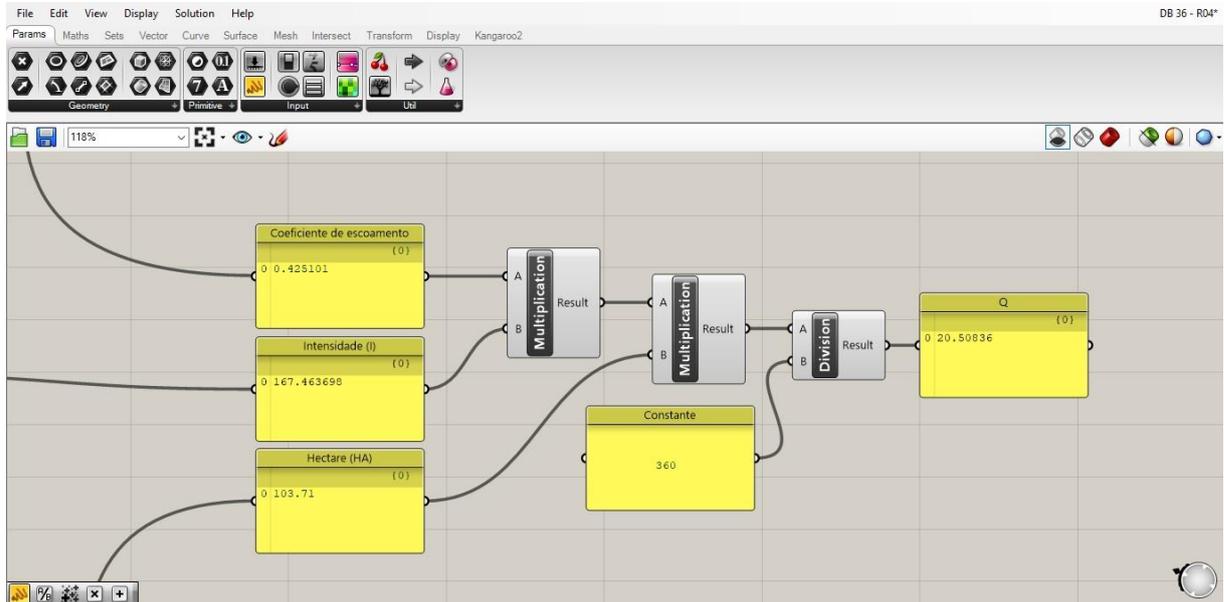
Alterando o valor do tempo de retorno para 5, equivalente a precipitações menos intensas, automaticamente o valor da intensidade da precipitação “I” diminui para 167,463701 (Figura 16), acarretando mudanças também no valor da vazão máxima “Q”: 20,50 m³/s (Figura 17). De acordo com o plano de drenagem de Juiz de Fora, o valor de “Q” para os períodos de seca é de 21,60 m³/s. Esse resultado demonstra uma diferença de 5,09% entre o valor obtido e o valor informado pelo Plano, mantendo a mesma média de diferença encontrada no período de cheia. Cabe aqui a mesma explicação dada anteriormente pela possível diferença de valores entre o que foi encontrado pela ferramenta e o que foi informado pelo Plano de Drenagem.

Figura 16 – Intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 17 - Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 01 são apresentados todos os valores encontrados na simulação da sub bacia BD-36, assim como os valores indicados pelo Plano de Drenagem de Juiz de Fora e a diferença percentual entre os dois valores.

Tabela 01 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados para a sub bacia BD-36.

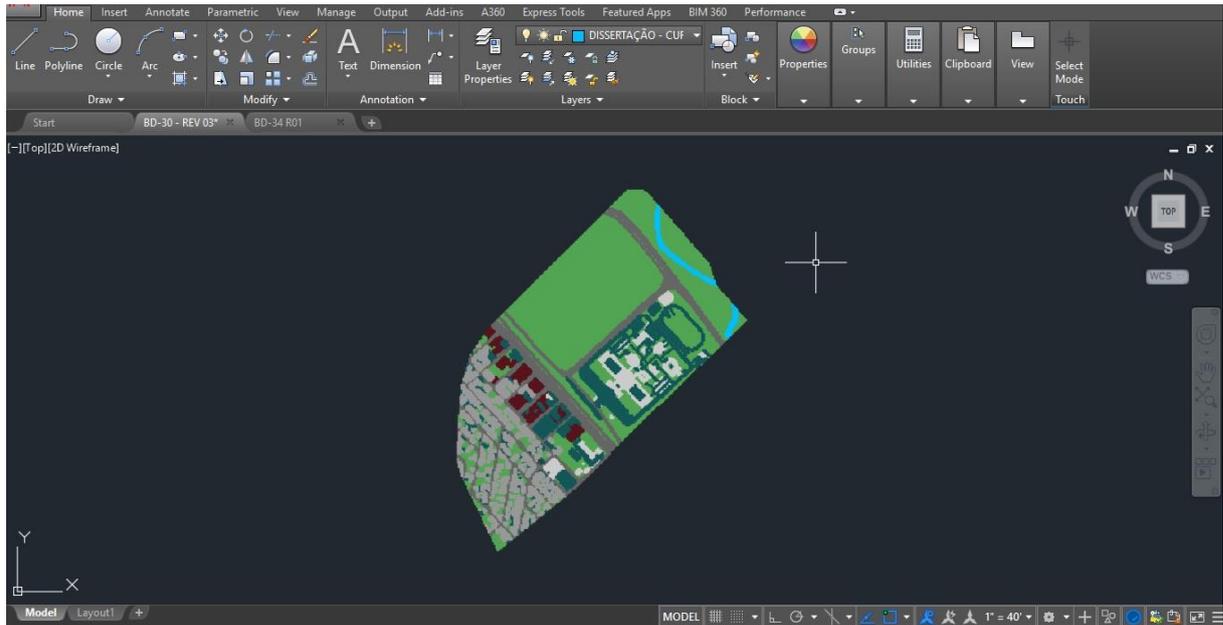
Valores finais – BD-36	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Ferramenta	0,42
Plano de drenagem de Juiz de Fora	0,40
Variação	5%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Ferramenta	34,43m ³ /s
Plano de drenagem de Juiz de Fora	36,21m ³ /s
Variação	4,91%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Ferramenta	20,50m ³ /s
Plano de drenagem de Juiz de Fora	21,60m ³ /s
Variação	5,09%

Fonte: Autor, 2018.

4.2.2. Simulações na sub bacia BD-30

Para o segundo experimento, optou-se pela sub bacia BD-30, de 0,67 km². O procedimento de levantamento do perímetro da sub bacia e o reconhecimento da cobertura dos solos foi idêntico ao realizado na sub bacia BD-36, porém, para que se possa ter mais exatidão ao fazer o reconhecimento da cobertura do solo, áreas estimadas e se alcançar um coeficiente de escoamento superficial mais preciso, optou-se por utilizar células de 5 x 5 metros, deixando o levantamento com um número mais de células e, conseqüentemente, o *grid* mais denso (Figura 18).

Figura 18 - Células desenvolvidas no *software* AutoCAD representando a sub bacia BD-30.

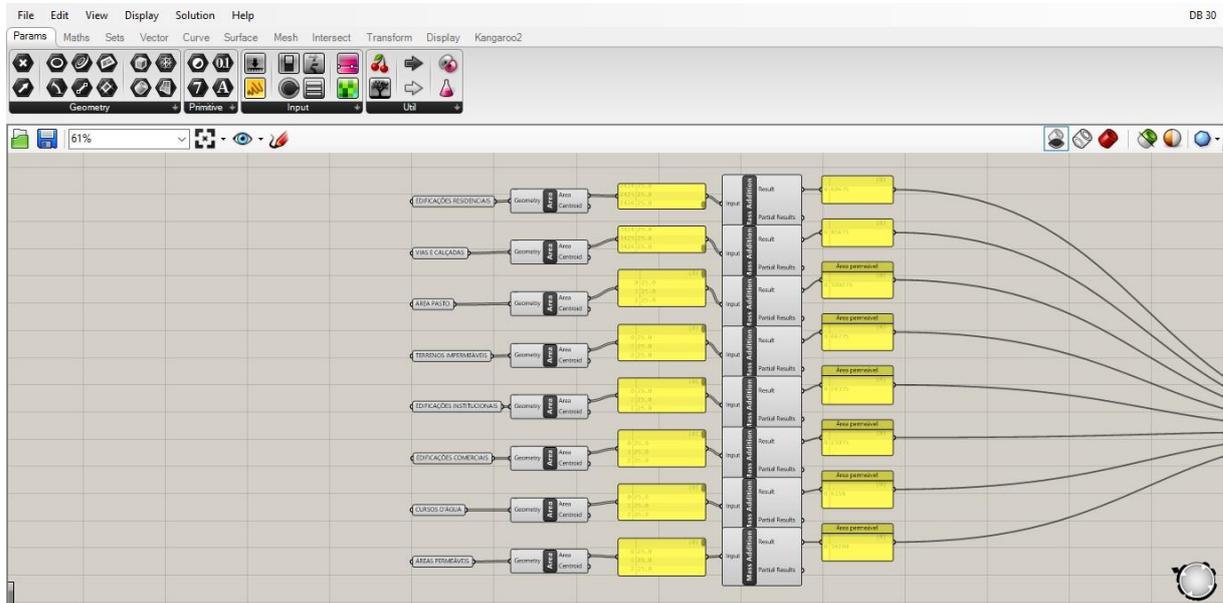


Fonte: Autor, 2018.

Outra alteração feita em relação ao estudo anterior foi a caracterização no AutoCAD, por meio de “*layers*”, de uma quantidade maior de materiais de cobertura do solo (vias e calçadas, edificações residenciais, edificações comerciais, edificações institucionais, área permeável, pasto, terrenos impermeáveis e cursos d’água). A cobertura que ocupa a maior parte da superfície de cada célula continua a determinar o material que aquela célula representa.

Após importado o arquivo para o Rhinoceros e Grasshopper, as células foram vinculadas a componentes “*Geometry*” referentes à sua classificação: (1) vias e calçadas, (2) edificações residenciais, (3) edificações comerciais, (4) edificações institucionais, (5) áreas permeáveis, (6) pasto, (7) terrenos impermeáveis e (8) cursos d’água. Os componentes “*Geometry*” foram criados em número proporcional ao número de revestimentos de solo encontrados na bacia (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8), e à cada componente foi vinculado determinado números de células de 5 por 5 metros que representam determinada cobertura do solo, conforme figura 19.

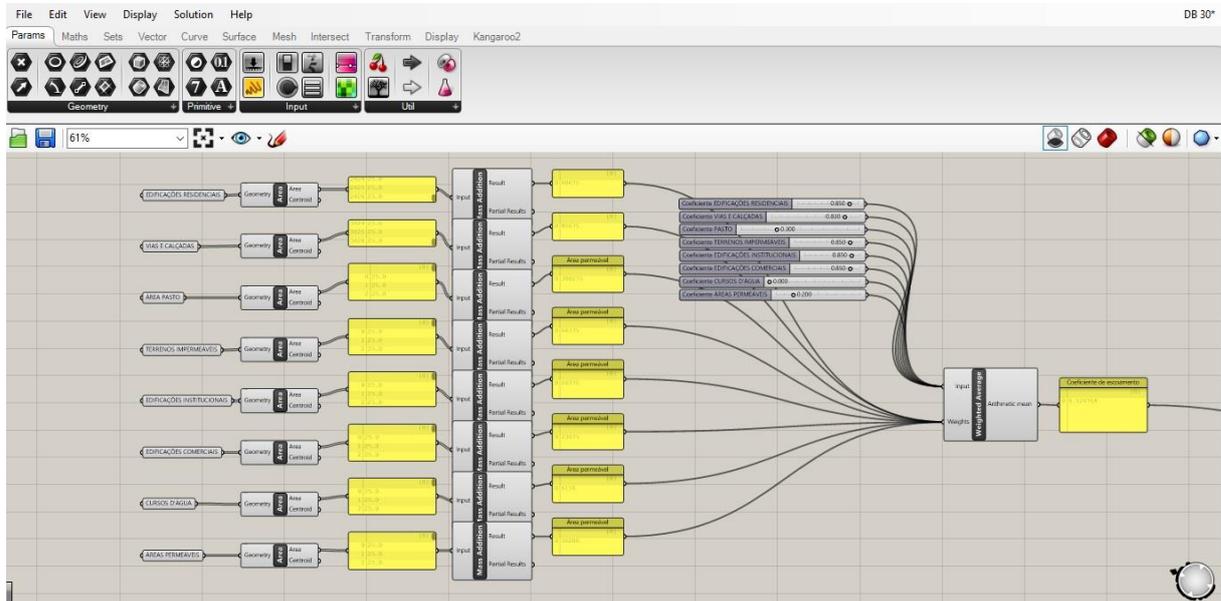
Figura 19 - Componentes “Geometry” criados em número proporcional ao número de revestimentos de solo encontrados na sub bacia BD-30.



Fonte: Autor, 2018.

Utilizando o componente “*Weighted Average*” foi atribuído à cada material de revestimento do solo um coeficiente de escoamento superficial. Os valores específicos referentes aos coeficientes de escoamento de cada material permanecem editáveis, de forma que se torna possível fazer simulações com a aplicação de outros materiais como revestimento de solo, que detém outros coeficientes de escoamento. Na figura 20 pode-se observar que a partir da inserção dos diferentes materiais que compõem a superfície da bacia e seus respectivos coeficientes de escoamento no componente “*Weighted Average*” foi possível identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.

Figura 20 - Componente “*Weighted Average*” permite identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.

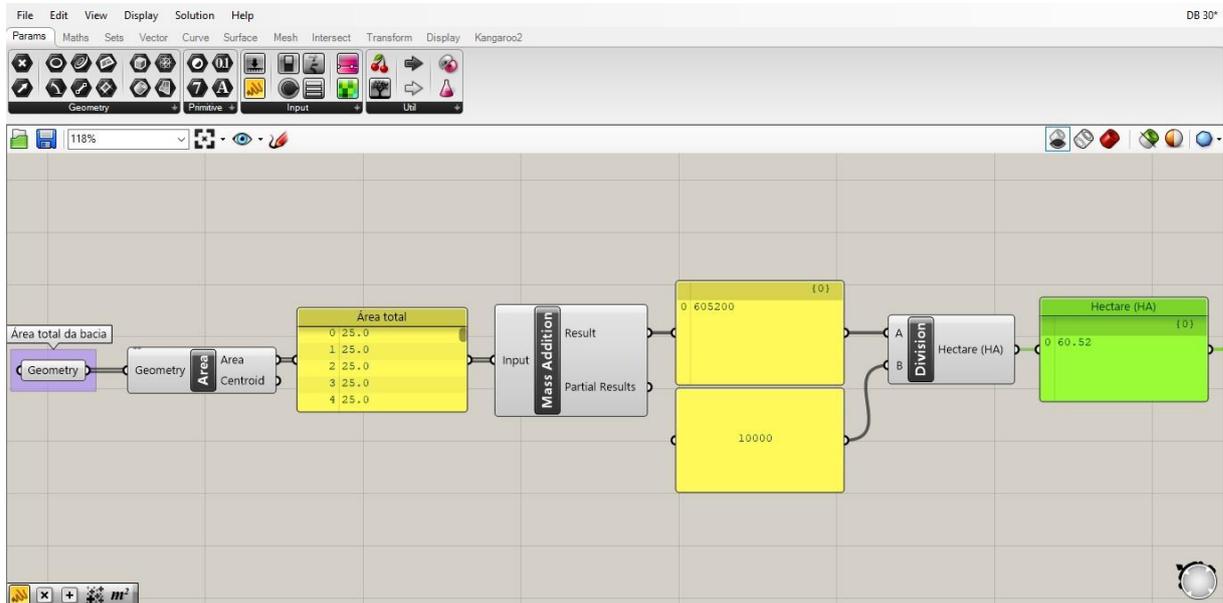


Fonte: Autor, 2018.

De acordo com o diagnóstico do Plano de Drenagem de Juiz de Fora (2011) o coeficiente de escoamento da sub bacia BD-30 é de 0,53. O valor obtido com a ferramenta desenvolvida é de 0,52, apresentando diferença de 1,8% no resultado final. Essa diferença se apresenta consideravelmente inferior a diferença encontrada na sub bacia BD-36, que foi de 5%. Essa diferença se apresenta em razão da redução do tamanho das células, o que deixa a leitura mais precisa, e pelo aumento do número de materiais de cobertura do solo identificados, possibilitando uma análise mais criteriosa.

Após encontrado o valor de “C” da fórmula do método racional, vinculou-se à um componente “*Geometry*” todas as células presentes no arquivo do *Rhinoceros*, que compõe a sub bacia, para se encontrar a área da sub bacia, conforme ilustrado na figura 21. Divide-se o valor encontrado por 10000, utilizando o componente “*Division*”, pois a fórmula do método racional pede a área da bacia em hectares (HA). O valor encontrado para a sub bacia BD-30 foi de 60,52 ha.

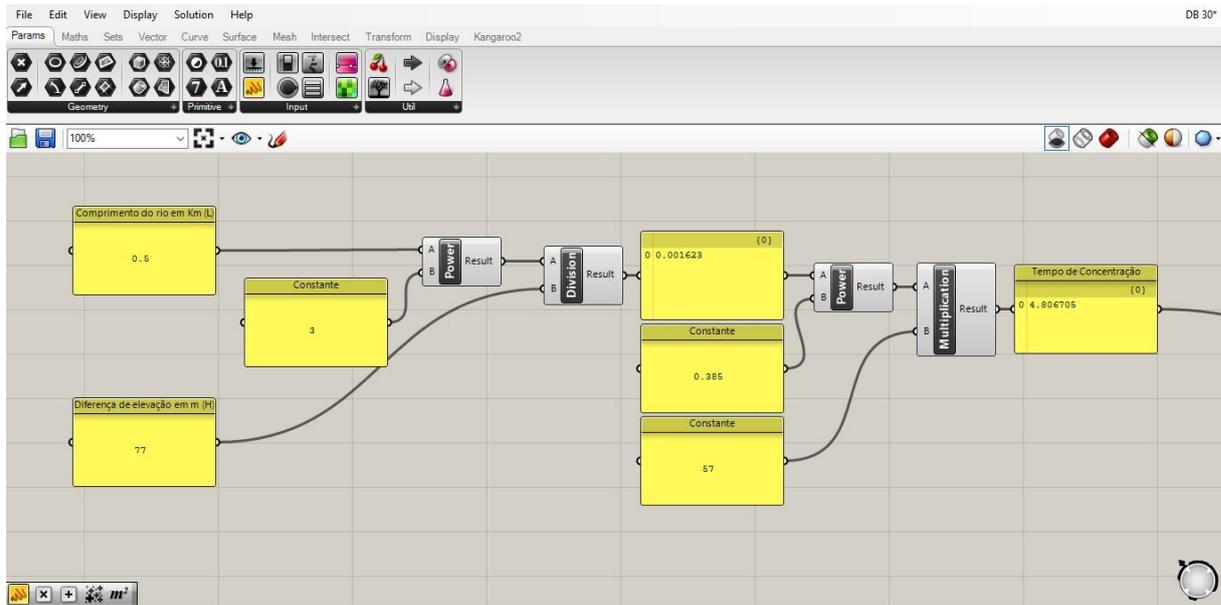
Figura 21 - Todas as células presentes no arquivo do *Rhinceros* vinculadas à um componente “*Geometry*” para se obter a área total da bacia.



Fonte: Autor, 2018.

Para se identificar a intensidade da precipitação “I”, utilizou-se o mesmo algoritmo para encontrar o tempo de concentração e posteriormente o algoritmo que fornece o valor da intensidade “I”. Para alimentar o algoritmo do tempo de concentração, encontrou-se o valor de 0,5 km, de acordo com o *software* Rhinoceros. De acordo com análise feita utilizando curvas de nível no AutoCAD, foi encontrado o valor de 77 metros. O algoritmo encontrou o valor de 4,806705 para o tempo de concentração. A fórmula do tempo de concentração se traduz no algoritmo descrito acima, ilustrado na figura 22.

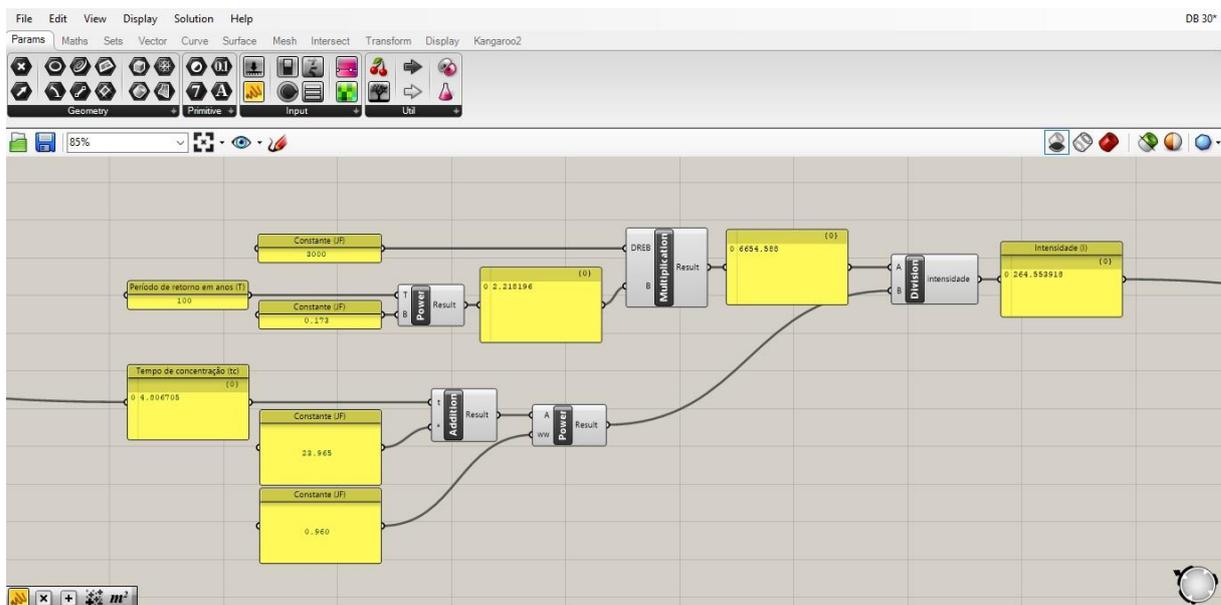
Figura 22 - Algoritmo que reproduz a fórmula do tempo de concentração.



Fonte: Autor, 2018.

Tendo acesso ao valor do tempo de concentração, é possível alimentar o algoritmo da intensidade da precipitação. No primeiro momento, foi escolhido o valor de 100 anos para o tempo de retorno. Ao desenvolver o procedimento descrito no item anterior, encontra-se o valor da intensidade da precipitação: 264,553918 (Figura 23).

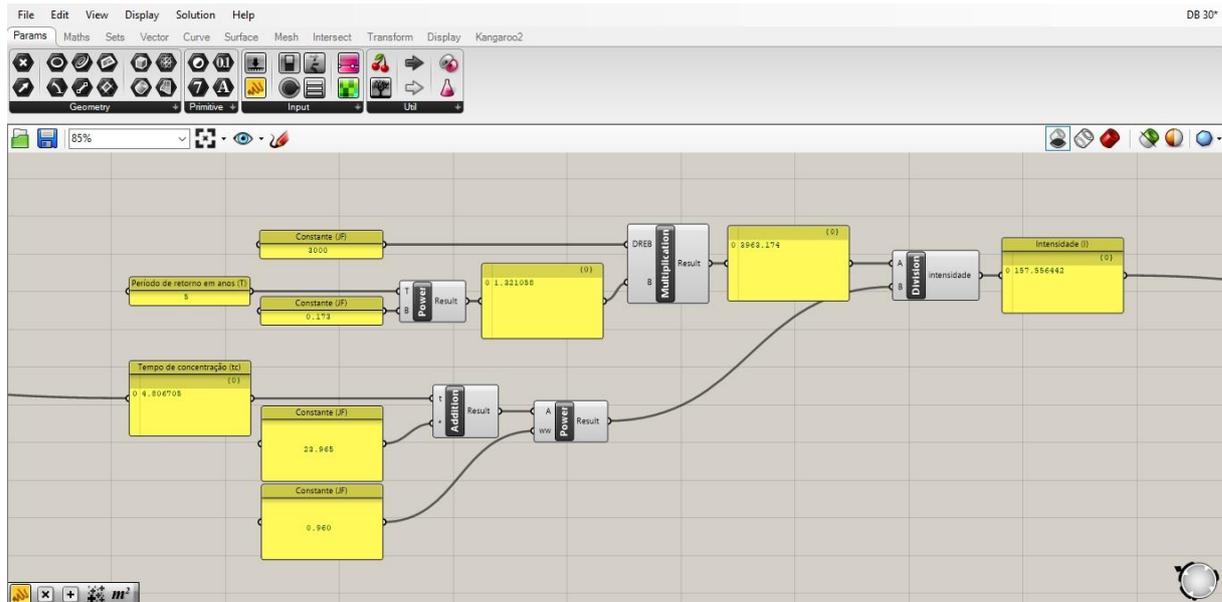
Figura 23 - Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Alterando o valor do tempo de retorno para 5, equivalente a precipitações menos intensas, automaticamente o valor da intensidade da precipitação “I” diminui para 157,556442, conforme mostra a imagem 24.

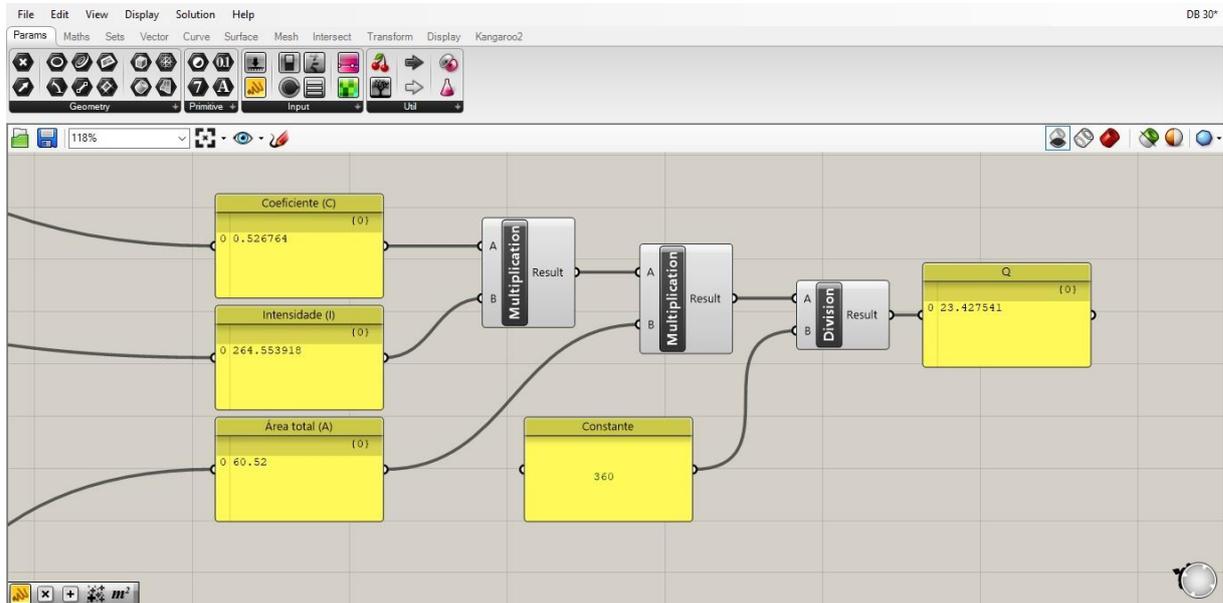
Figura 24 - Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Encontrado os valores do coeficiente de escoamento “C” (0,52), intensidade da precipitação “I” (264,553918 para tempo de retorno de 100 anos e 157,556442 para tempo de retorno de 5 anos) e área total da bacia “A” (60,52), multiplicam-se os três valores e ao final divide-se o resultado por 360, valor constante da fórmula do método racional. Para a multiplicação, foram conectados os valores de “C” e “I” à um componente “*Multiplication*” e o resultado da equação foi conectando em outro componente “*Multiplication*”, onde também foi conectado o valor de “A”. O valor obtido foi então dividido por 360 utilizando um componente “*Division*” (Figura 25).

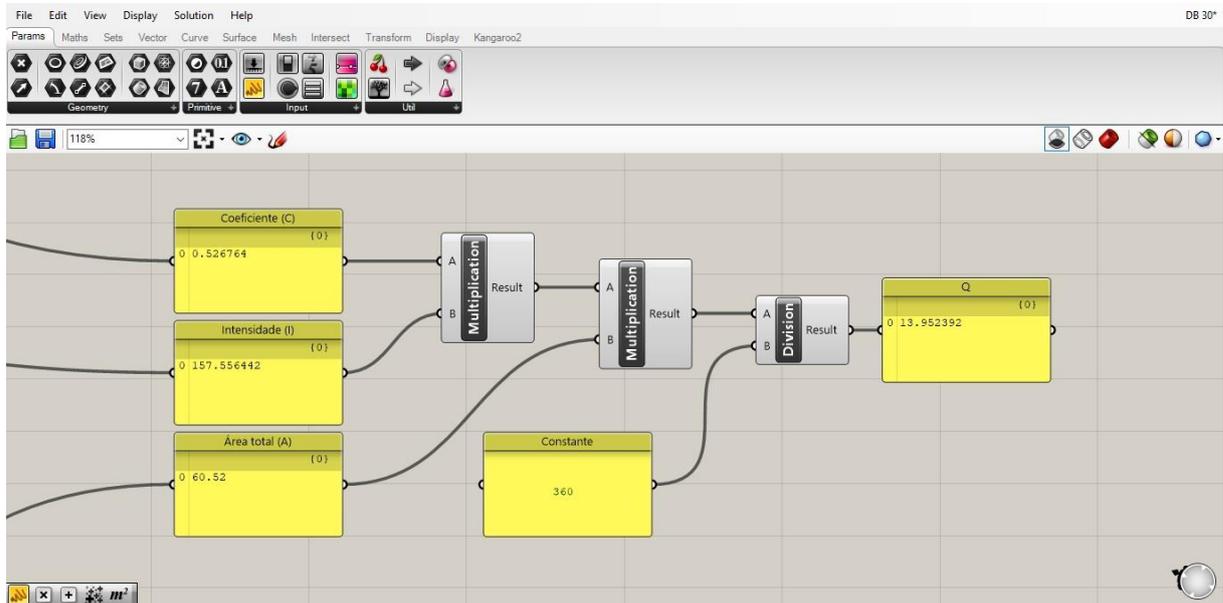
Figura 25 - Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Considerando o tempo de retorno de 100 anos, o valor final encontrado, de 23,42, refere-se à vazão máxima da bacia “Q” em m^3/s . De acordo com o Plano de Drenagem de Juiz de Fora, o valor de “Q” para a bacia BD-30 nos períodos de cheia é de 40,11 m^3/s . A diferença entre o valor encontrado pela ferramenta e o valor informado no plano de drenagem é de 41,61%. Essa diferença se mostrou gritante no caso da sub bacia BD-30, principalmente pelo fato do coeficiente de escoamento superficial ter sido mais precisa em relação à sub bacia BD-36. Alterando o valor do tempo de retorno para 5, equivalente a precipitações menos intensas, o valor da intensidade da precipitação “I” diminui para 157,556442, acarretando mudanças também no valor da vazão máxima “Q”: 13,95 m^3/s (Figura 26).

Figura 26 - Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

De acordo com o plano de drenagem de Juiz de Fora, o valor de “Q” para os períodos de seca é de 21,60 m³/s, assim como na sub bacia BD-36. Esse resultado demonstra uma diferença de 35,41% entre o valor obtido e o valor informado pelo Plano, diferença inferior em relação ao valor encontrado no período de cheia, porém ainda se mostra elevado. Em razão da diferença de valores expressiva (Tabela 02), o desenho desenvolvido no *software* AutoCAD e importado para o *software* Rhinoceros foi revisto, assim como todos os algoritmos desenvolvidos no Grasshopper, porém os valores se mantiveram iguais, assim como as diferenças em relação ao Plano de Drenagem de Juiz de Fora. Tendo em vista a fórmula utilizada nos algoritmos, fieis ao método racional, assim como os valores aceitáveis obtidos na simulação da sub bacia BD-36, não se apresentou com clareza o motivo de tamanha discrepância em relação aos valores da sub bacia BD-30. Não se teve acesso à memória de cálculos desenvolvida para o Plano de Drenagem de Juiz de Fora, dessa forma levantou-se o questionamento sobre a exatidão dos valores apresentados pelo Plano de Drenagem de Juiz de Fora. Optou-se por fazer uma nova simulação, em outra sub bacia da Região Norte da cidade de Juiz de Fora a sub bacia BD-34.

Tabela 02 – Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados para a sub bacia BD-30.

Valores finais – BD-30	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Ferramenta	0,52
Plano de drenagem de Juiz de Fora	0,53
Variação	1,8%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Ferramenta	23,42m ³ /s
Plano de drenagem de Juiz de Fora	40,11m ³ /s
Variação	41,61%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Ferramenta	13,95m ³ /s
Plano de drenagem de Juiz de Fora	21,60m ³ /s
Variação	35,41%

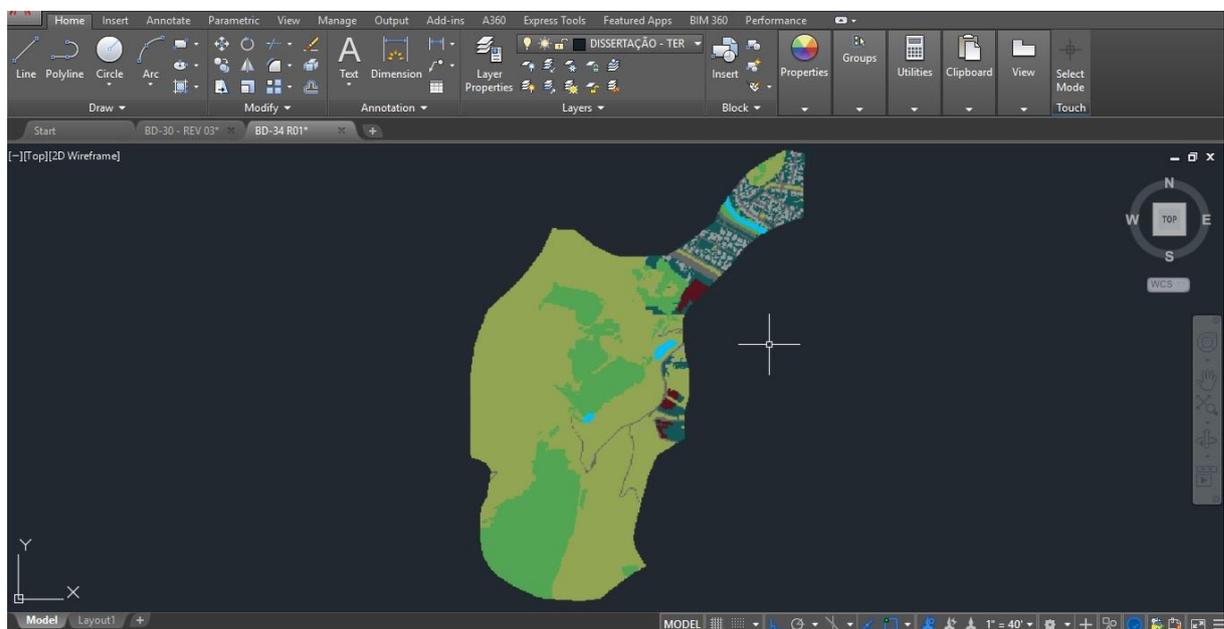
Fonte: Autor, 2018.

4.2.3. Simulações na sub bacia BD-34

Para o terceiro experimento, optou-se pela sub bacia BD-34, de 1,27 km². O procedimento de levantamento do perímetro da sub bacia e o reconhecimento da cobertura dos solos foi idêntico ao realizado na sub bacia BD-30, lançando mão de células de 5 x 5 metros. Manteve-se também a mesma caracterização da quantidade de materiais de cobertura do solo (vias e calçadas, edificações residenciais, edificações comerciais, edificações institucionais, área permeável, pasto e cursos d'água). A cobertura que ocupa a maior parte da superfície de cada célula continua a determinar o material que aquela célula representa.

Após importado o arquivo para o Rhinoceros e Grasshopper, as células foram vinculadas a componentes “*Geometry*” referentes à sua classificação: (1) vias e calçadas, (2) edificações residenciais, (3) edificações comerciais, (4) edificações institucionais, (5) áreas permeáveis, (6) pasto, (7) terrenos impermeáveis e (8) cursos d'água. Os componentes “*Geometry*” foram criados em número proporcional ao número de revestimentos de solo encontrados na bacia (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7), e à cada componente foi vinculado determinado números de células de 5 por 5 metros que representam determinada cobertura do solo, conforme figura 27.

Figura 27 - Células desenvolvidas no *software* AutoCAD representando a sub bacia BD-34.

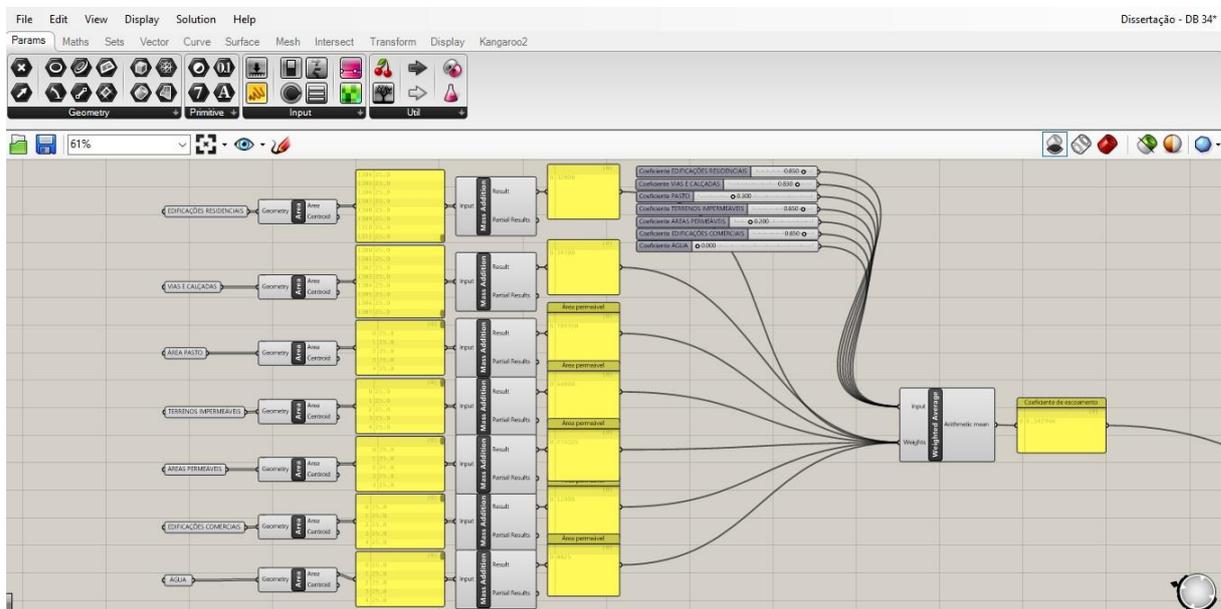


Fonte: Autor, 2018.

Utilizando o componente “*Weighted Average*” foi atribuído à cada material de revestimento do solo um coeficiente de escoamento superficial, determinado a partir de

informações extraídas de tabelas existentes, encontradas em literatura especializada. Os valores específicos referentes aos coeficientes de escoamento de cada material permanecem editáveis, de forma que se torna possível fazer simulações com a aplicação de outros materiais como revestimento de solo, que detém outros coeficientes de escoamento. Na figura 28 pode-se observar que a partir da inserção dos diferentes materiais que compõem a superfície da bacia e seus respectivos coeficientes de escoamento no componente “*Weighted Average*” foi possível identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.

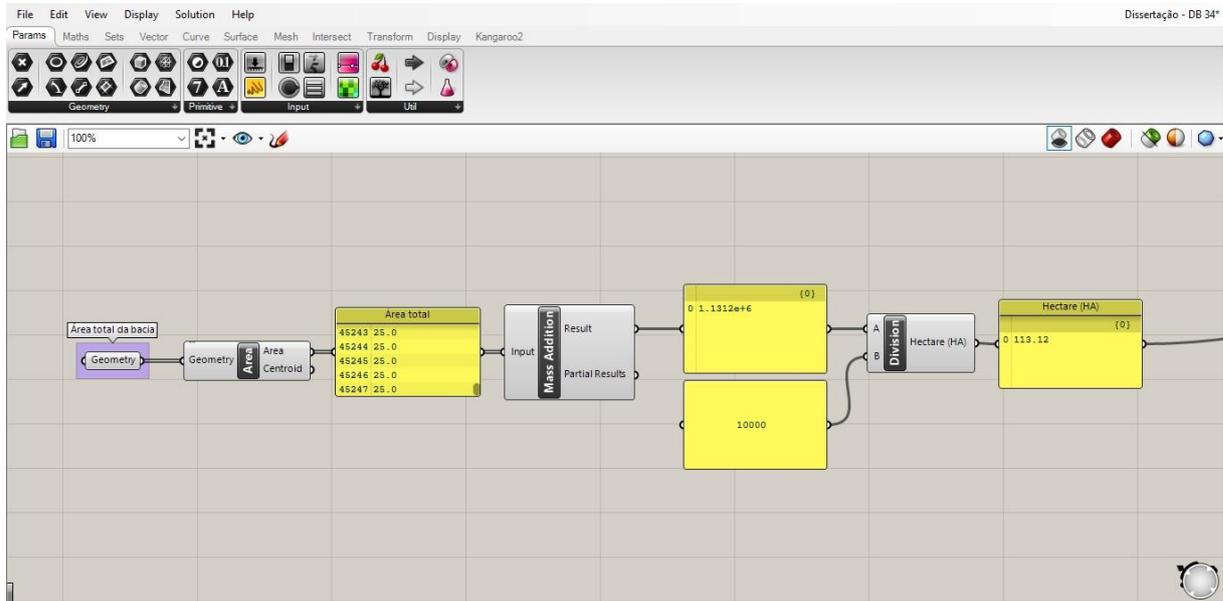
Figura 28 - Componente “*Weighted Average*” permite identificar o coeficiente de escoamento da bacia, a partir de uma média ponderada.



Fonte: Autor, 2018.

De acordo com o diagnóstico do Plano de Drenagem de Juiz de Fora (2011) o coeficiente de escoamento da sub bacia BD-34 é de 0,34. O valor obtido com a ferramenta desenvolvida é de 0.34, apresentando resultado idêntico ao informado pelo Plano. Após encontrado o valor de “C” da fórmula do método racional, vinculou-se à um componente “*Geometry*” todas as células presentes no arquivo do *Rhinoceros*, que compõe a sub bacia, para se encontrar a área da sub bacia, conforme ilustrado na figura 29. Divide-se o valor encontrado por 10000, utilizando o componente “*Division*”, pois a fórmula do método racional pede a área da bacia em hectares (HA). O valor encontrado para a sub bacia BD-34 foi de 113,12 ha.

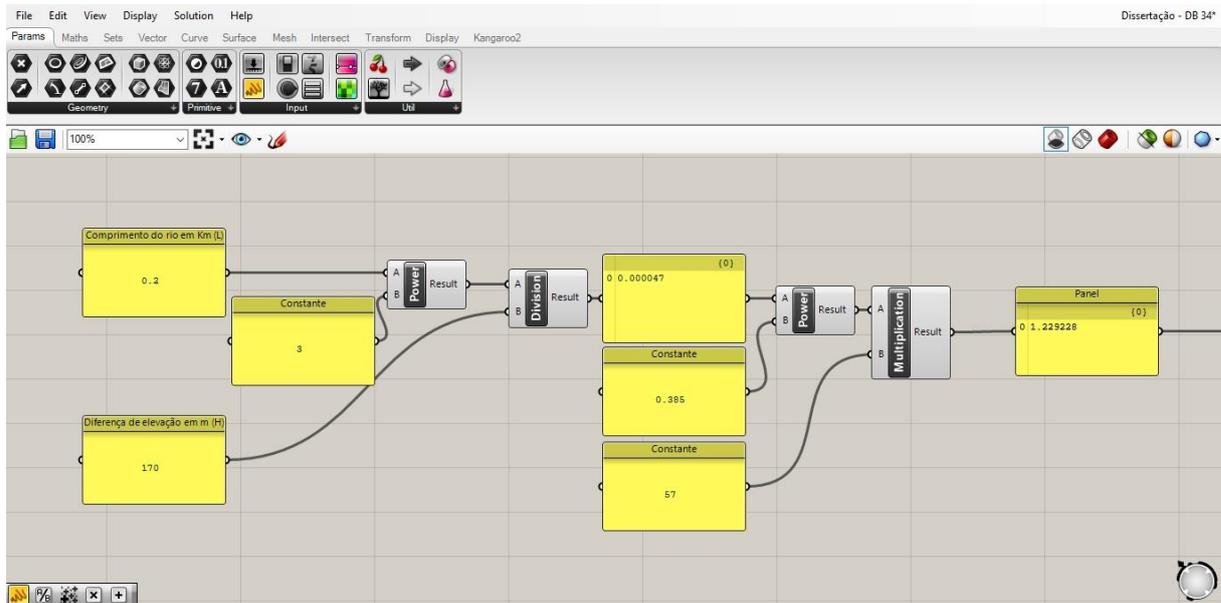
Figura 29 - Todas as células presentes no arquivo do *Rhinceros* vinculadas à um componente “*Geometry*” para se obter a área total da bacia.



Fonte: Autor, 2018.

Para se identificar a intensidade da precipitação “*I*”, utilizou-se o mesmo algoritmo para encontrar o tempo de concentração e posteriormente o algoritmo que fornece o valor da intensidade “*I*”. Para alimentar o algoritmo do tempo de concentração, encontrou-se o valor de 0,2 km, de acordo com o *software* Rhinoceros. De acordo com análise feita utilizando curvas de nível no AutoCAD, foi encontrado o valor de 170 metros. O algoritmo encontrou o valor de 1,229228 para o tempo de concentração (Figura 30).

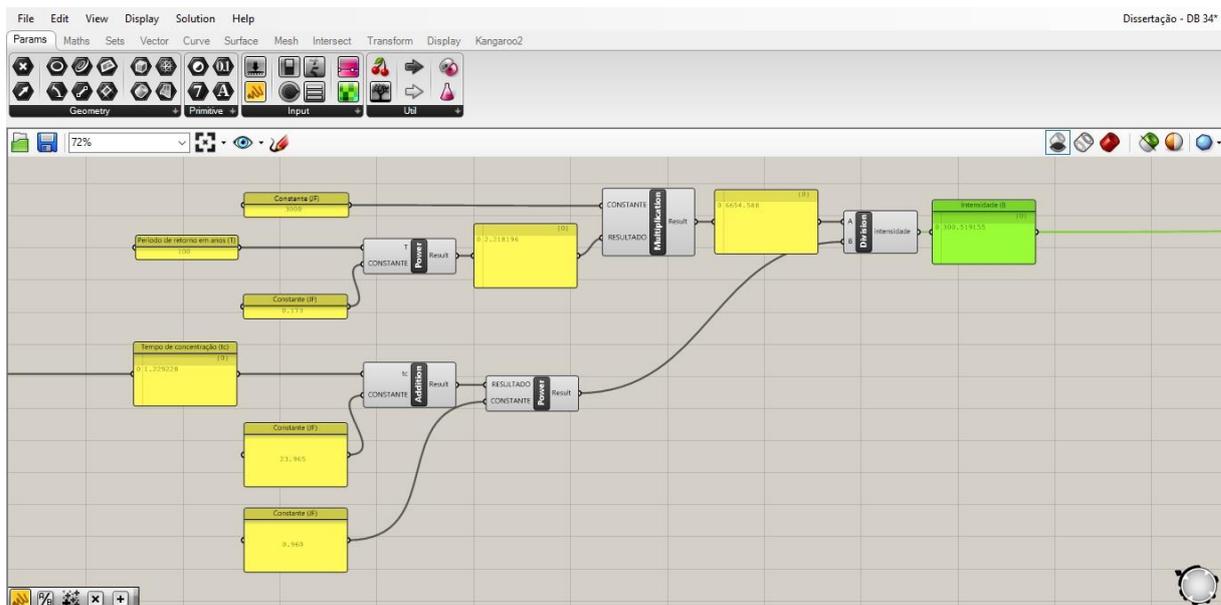
Figura 30 - Algoritmo que reproduz a fórmula do tempo de concentração.



Fonte: Autor, 2018.

Tendo acesso ao valor do tempo de concentração, é possível alimentar o algoritmo da intensidade da precipitação. No primeiro momento, foi escolhido o valor de 100 anos para o tempo de retorno. Ao desenvolver o procedimento descrito no item anterior, encontra-se o valor da intensidade da precipitação: 300,519155 (Figura 31).

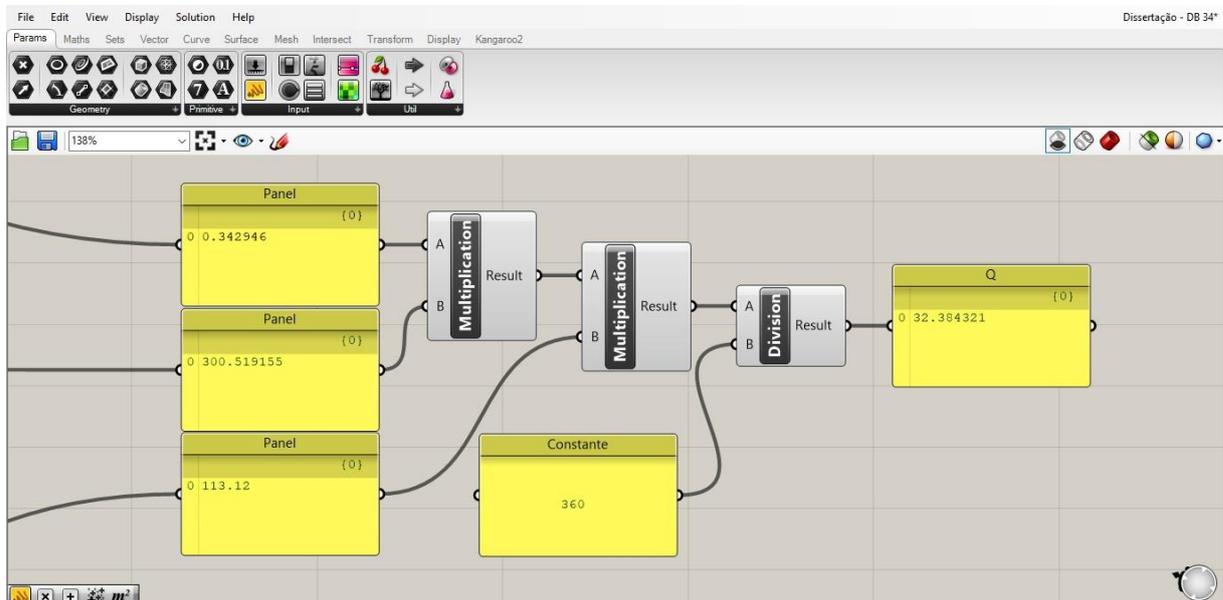
Figura 31 - Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Encontrado os valores do coeficiente de escoamento “C” (0,34), intensidade da precipitação “I” (300,519155) e área total da bacia “A” (113,12), multiplicam-se os três valores e ao final divide-se o resultado por 360, valor constante da fórmula do método racional. Para a multiplicação, foram conectados os valores de “C” e “I” à um componente “*Multiplication*” e o resultado da equação foi conectando em outro componente “*Multiplication*”, onde também foi conectado o valor de “A”. O valor obtido foi então dividido por 360 utilizando um componente “*Division*” (Figura 32).

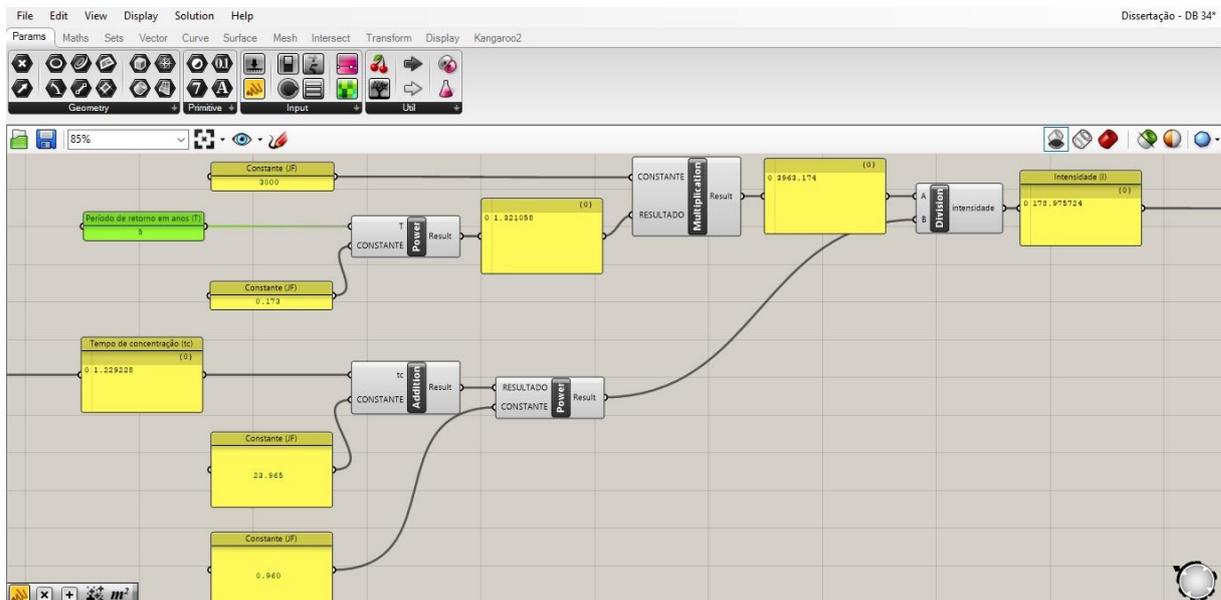
Figura 32 - Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

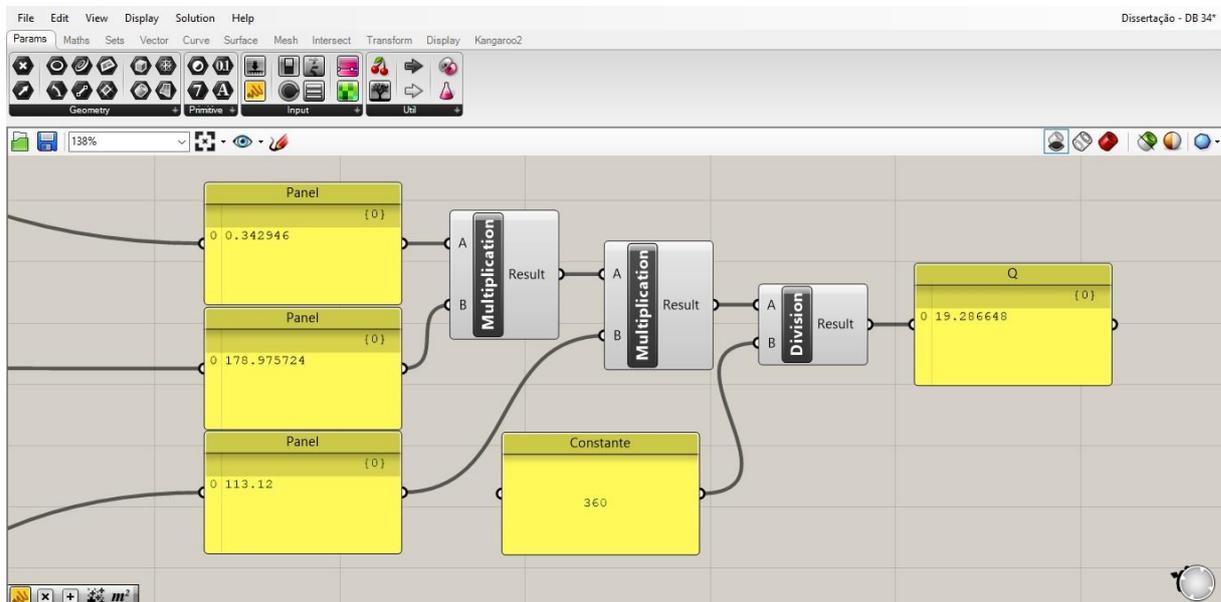
O valor final encontrado, de 32,38, refere-se à vazão máxima da bacia “Q” em m^3/s . De acordo com o Plano de Drenagem de Juiz de Fora, o valor de “Q” para a bacia BD-34 nos períodos de cheia é de $38,41 \text{ m}^3/\text{s}$. A diferença entre o valor encontrado pela ferramenta e o valor informado no plano de drenagem é de 15,69%. Essa diferença se mostrou inferior à simulação feita na sub bacia BD-30 e superior à sub bacia BD-36. Alterando o valor do tempo de retorno para 5, equivalente a precipitações menos intensas, automaticamente o valor da intensidade da precipitação “I” diminui para 178,975724 (Figura 33), acarretando mudanças também no valor da vazão máxima “Q”: $19,28 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 34).

Figura 33 - Algoritmo utilizado para identificar a intensidade da precipitação “I” considerando o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 34 - Algoritmo utilizado para identificar a vazão máxima “Q” considerando o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

De acordo com o Plano de Drenagem de Juiz de Fora, o valor de “Q” para os períodos de seca é de 21,74 m³/s, o que demonstra uma diferença de 11,3% entre o valor obtido e o valor informado pelo Plano.

Na Tabela 03 são apresentados os valores encontrados pela ferramenta, os valores apresentados pelo Plano de Drenagem de Juiz de Fora e o comparativo entre os dois valores. Tendo em vista os resultados obtidos, a ferramenta se mostra satisfatória do ponto de vista de sua precisão. Todos os valores apresentaram variações percentuais baixas, com exceção dos valores obtidos na simulação da vazão máxima da sub bacia BD-30, tanto nos tempos de cheia quanto nos tempos de seca.

Tabela 03 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados para a sub bacia BD-34.

Valores finais – BD-34	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Ferramenta	0,34
Plano de drenagem de Juiz de Fora	0,34
Variação	-
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Ferramenta	32,38m ³ /s
Plano de drenagem de Juiz de Fora	38,41m ³ /s
Variação	15,69%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Ferramenta	19,28m ³ /s
Plano de drenagem de Juiz de Fora	21,74m ³ /s
Variação	11,30%

Fonte: Autor, 2018.

5. SIMULAÇÕES COM A FERRAMENTA

Neste capítulo serão apresentadas as simulações computacionais da utilização do asfalto poroso e telhado verde, práticas comuns do conceito de drenagem urbana conhecida como desenvolvimento urbano de baixo impacto, nas sub bacias selecionadas para este trabalho (BD-36, BD-30 e BD-34). Para as simulações iniciais, estabeleceu-se que os pisos permeáveis serão utilizados nas vias públicas e calçadas, enquanto em simulações posteriores avaliarão a aplicação de telhados verdes em edificações comerciais existentes nas sub bacias.

Ao promover as simulações, tem-se a intenção de verificar se os coeficientes de escoamento superficial e volume de vazões máximas de cada sub bacia sofrerão alterações significativas, e dessa forma verificar a aplicabilidade dessas práticas do desenvolvimento urbano de baixo impacto como forma de combate às enchentes urbanas, assim como constatar a relevância da ferramenta como fornecedora de dados para elaboração de projetos de drenagem urbana.

5.1. SIMULAÇÕES COM A UTILIZAÇÃO DO ASFALTO POROSO

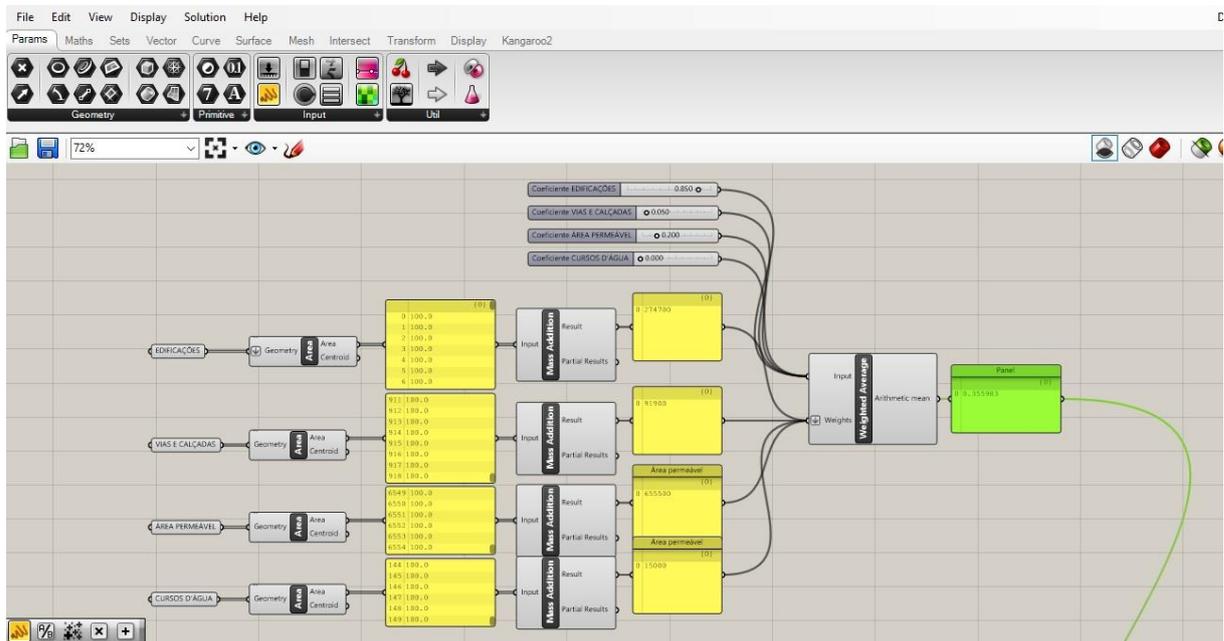
Como descrito anteriormente, toda área das sub bacias foi sobreposta por um *grid*, composto por um conjunto de células, onde cada célula representa determinado material de cobertura do solo. Entre os materiais, encontra-se o asfalto e a célula que o representa: “vias e calçadas”. Nas simulações efetuadas com a ferramenta, vinculou-se cada uma dessas células à um componente “*Geometry*” referente ao material que ela representa no *software* Grasshopper e foram atribuídos valores do coeficiente de escoamento superficial “C” a cada um deles. Conectando os valores e os componentes “*Geometry*” ao componente “*Weighted Average*” encontra-se o coeficiente de escoamento da sub bacia, por meio de média ponderada. Alterando qualquer um dos valores atribuídos à algum material de cobertura do solo, altera-se automaticamente o valor do coeficiente de escoamento total da sub bacia.

O valor do coeficiente de escoamento “C” alimenta a fórmula do Método Racional que nos fornece a Vazão Máxima “Q”, portanto, ao se alterar o valor de “C”, conseqüentemente altera-se também o valor de “Q”. O valor atribuído ao coeficiente de escoamento das vias e calçadas é de 0.80, referente ao asfalto convencional. Como descrito no capítulo 2, adotou-se o valor de 0.05 para o asfalto poroso. Portanto, o valor atribuído ao coeficiente “C” foi alterado de 0.80 para 0.05, o que significa a alteração do asfalto convencional para o asfalto poroso.

5.1.1. Asfalto poroso nas vias públicas da sub bacia BD-36

Para efetuar a manipulação do revestimento de piso da sub bacia BD-36 e simulação da aplicação do asfalto poroso, deve-se alterar o valor do coeficiente de escoamento superficial “C” atribuído ao componente “*Geometry*” que representa as células “vias e calçadas” (Figura 35). O valor vinculado à essas células inicialmente é de 0,80, valor referente ao coeficiente de escoamento superficial do asfalto convencional. De acordo com Acioli (2005), o valor do coeficiente de escoamento superficial do asfalto poroso é de 0,05, apresentando diferença de 99,3% em relação ao valor do coeficiente de escoamento superficial do asfalto convencional.

Figura 35 – Alteração do valor do coeficiente “C” das células “vias e calçadas” da sub bacia BD-36.

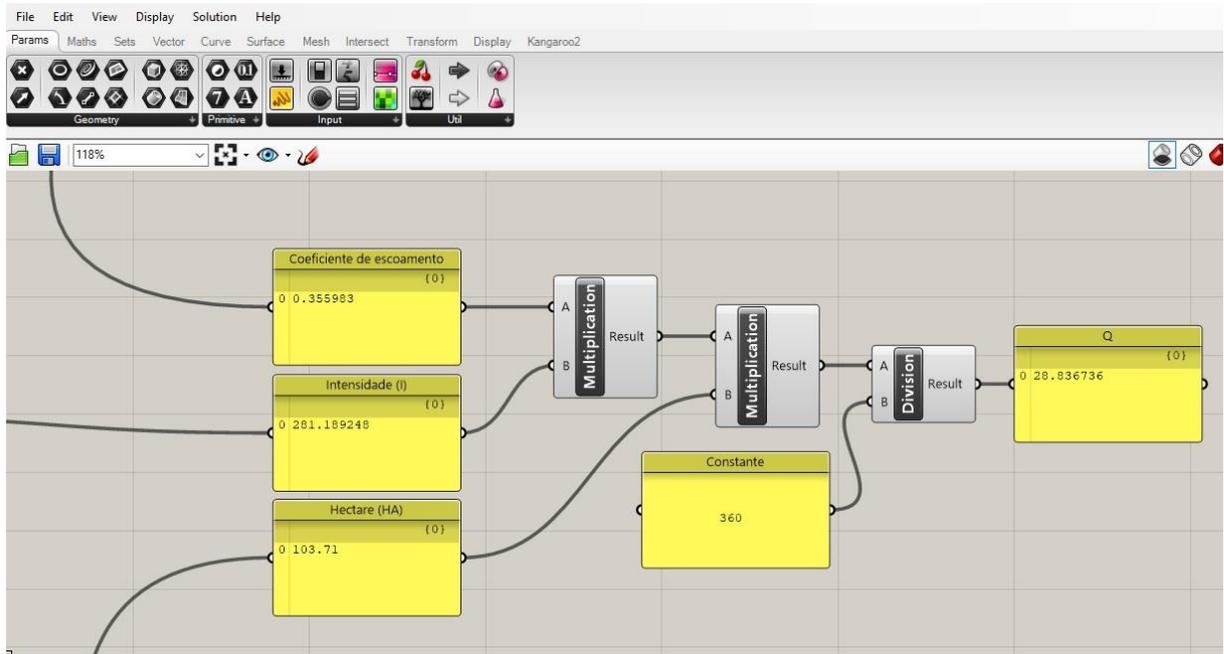


Fonte: Autor, 2018.

Após feita a alteração no valor do coeficiente de escoamento superficial vinculada às células das vias e calçadas, percebe-se também uma alteração do coeficiente de escoamento total da bacia, já que todo material que cobre parte da sub bacia é capaz de promover alterações no conjunto. O valor do coeficiente de escoamento total baixou de 0,42 para 0,35, o que representa uma redução de 16,6%.

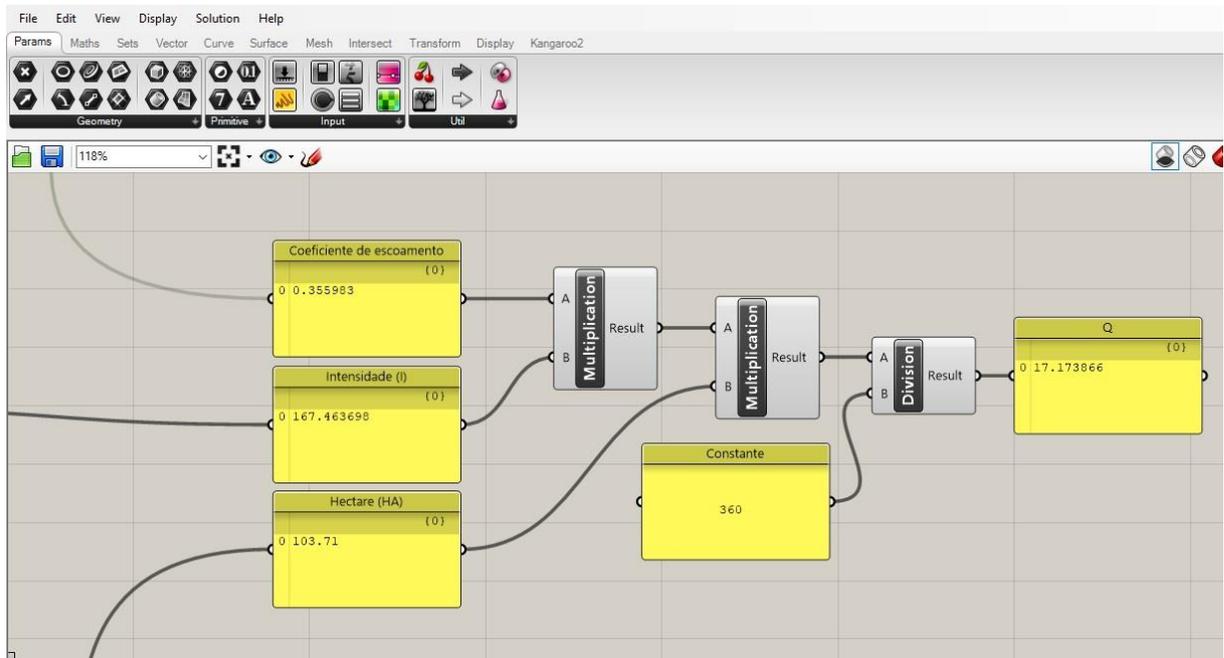
Como o valor “C” da fórmula do Método Racional foi alterada, o valor final da equação, referente à vazão máxima “Q”, também sofre alterações. Considerando-se o tempo de retorno de 100 anos, o valor da vazão máxima foi reduzido de 34,43m³/s para 28,83m³/s, apresentando queda de 16,26% em relação à situação anterior à implantação do asfalto poroso (Figura 36). Quando o tempo de retorno é reduzido para 5 anos, o valor da vazão máxima é reduzido de 20,50m³/s para 17,17m³/s (Figura 37), o que representa uma queda de 16,24% em relação à situação anterior.

Figura 36 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-36 para o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 37 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-36 para o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 04 são apresentados os valores encontrados na simulação anterior, com aplicação do asfalto convencional nas vias e calçadas da sub bacia BD-36, e os valores encontrados na simulação da troca do asfalto convencional pelo asfalto poroso. São apresentadas também as diferenças percentuais entre os valores do coeficiente de escoamento e da vazão máxima dos dois momentos.

Tabela 04 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-36.

Asfalto Poroso – BD-36	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Situação anterior	0,42
Aplicação do asfalto poroso	0,35
Redução	16,6%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Situação anterior	34,43m ³ /s
Aplicação do asfalto poroso	28,83m ³ /s
Redução	16,26%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Situação anterior	20,50m ³ /s
Aplicação do asfalto poroso	17,17m ³ /s
Redução	16,24%

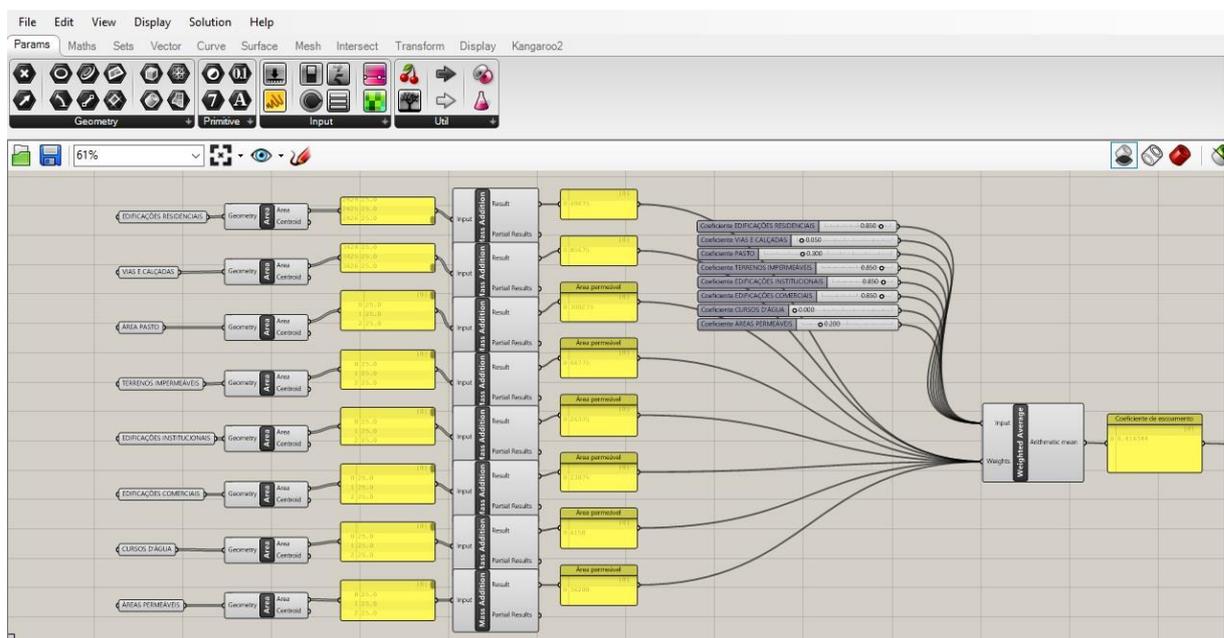
Fonte: Autor, 2018.

Ao considerarmos a porcentagem da área da sub bacia coberta por vias e calçadas, 8,85%, identificada por meio da contagem das células que representam essa cobertura (valor dado automaticamente pelo “*panel*” vinculado às células), pode-se então afirmar que a alteração do asfalto convencional para o asfalto poroso proporcionou alteração considerável no coeficiente de escoamento total da sub bacia assim como na vazão máxima da mesma. Em bacias ainda mais urbanizadas, a tendência é que a redução desses valores seja ainda maior, em termos de porcentagem, apresentado resultados que indicam alta eficiência na aplicação desse material.

5.1.2. Asfalto poroso nas vias públicas da sub bacia BD-30

O procedimento para efetuar a manipulação do revestimento de piso da sub bacia BD-30 e simulação da aplicação do asfalto poroso, é o mesmo aplicado na sub bacia BD-36. Deve-se alterar o valor do coeficiente de escoamento superficial “C” atribuído ao componente “Geometry” que representa as células “vias e calçadas” (Figura 38). O valor vinculado à essas células inicialmente é de 0,80, enquanto a valor atribuído ao coeficiente de escoamento do asfalto poroso é de 0,05, segundo Acioli (2005).

Figura 38 - Alteração do valor do coeficiente “C” das células “vias e calçadas” da sub bacia BD-30.



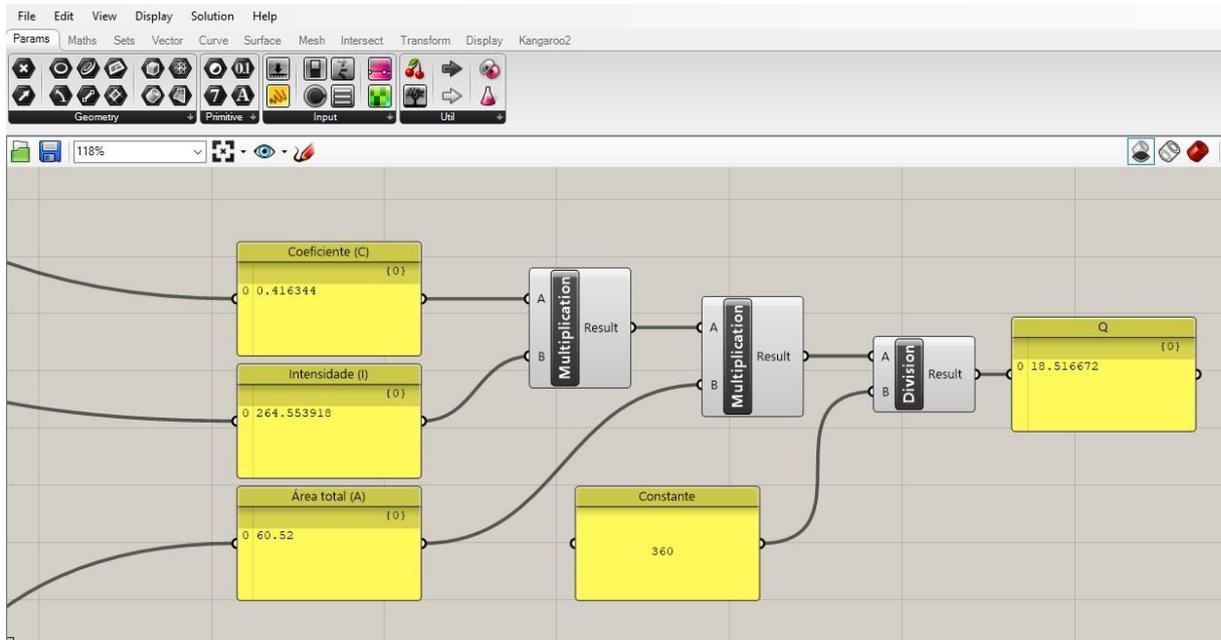
Fonte: Autor, 2018.

Após feita a alteração no valor do coeficiente de escoamento superficial vinculado às células das vias e calçadas, percebe-se também uma alteração do coeficiente de escoamento total da bacia, assim como aconteceu na sub bacia BD-36. O valor do coeficiente de escoamento total baixou de 0,52 para 0,41, o que representa uma redução de 21,15%.

Como o valor “C” da fórmula do Método Racional foi alterada, o valor final da equação, referente à vazão máxima “Q”, também sofre alterações. Considerando-se o tempo de retorno de 100 anos, o valor da vazão máxima foi reduzido de 23,42m³/s para 18,51m³/s (Figura 39), apresentando queda de 21% em relação à situação anterior à implantação do asfalto poroso. Quando o tempo de retorno é reduzido para 5 anos, o valor da vazão máxima é reduzido de

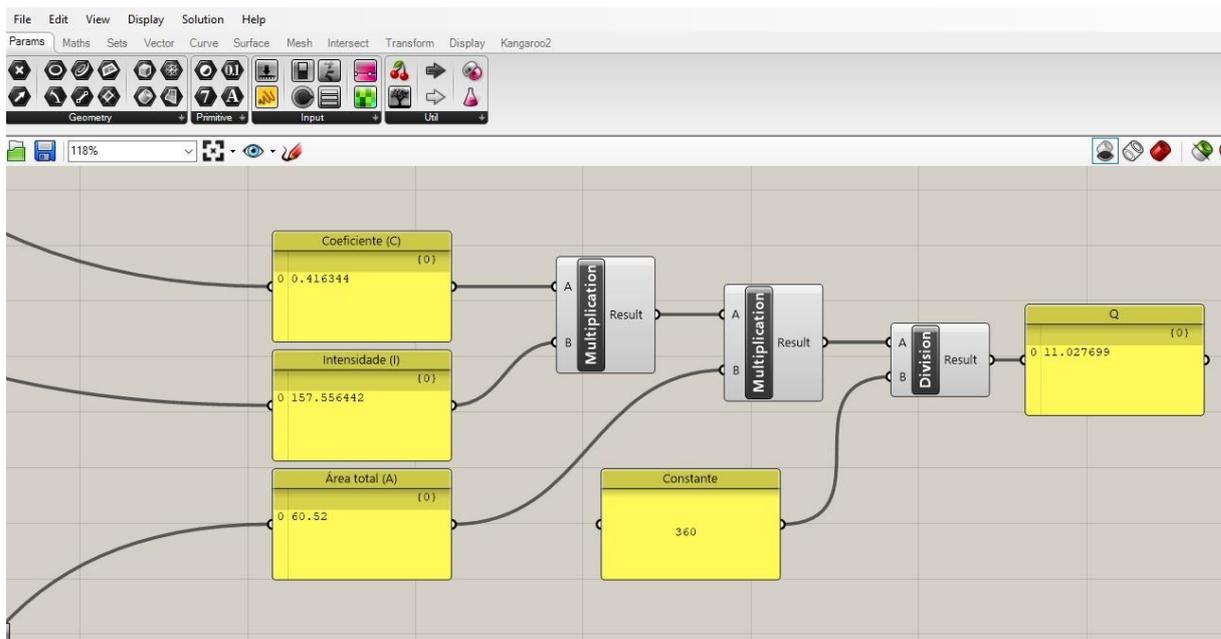
13,95m³/ para 11,02m³/s (Figura 40), o que representa uma queda de 21% em relação à situação anterior, tendo a cobertura do solo com asfalto convencional.

Figura 39 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-30 para o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 40 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-30 para o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 05 são apresentados os valores encontrados nas simulações desenvolvidas na sub bacia BD-34, com a aplicação do asfalto convencional nas vias e calçadas e a substituição do asfalto convencional pelo asfalto poroso. São apresentadas também as diferenças percentuais entre os valores encontrados nas duas simulações.

Tabela 05 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-30.

Asfalto Poroso – BD-30	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Situação anterior	0,52
Aplicação do asfalto poroso	0,41
Redução	21,15%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Situação anterior	23,42m ³ /s
Aplicação do asfalto poroso	18,51m ³ /s
Redução	21%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Situação anterior	13,95m ³ /s
Aplicação do asfalto poroso	11,02m ³ /s
Redução	21%

Fonte: Autor, 2018.

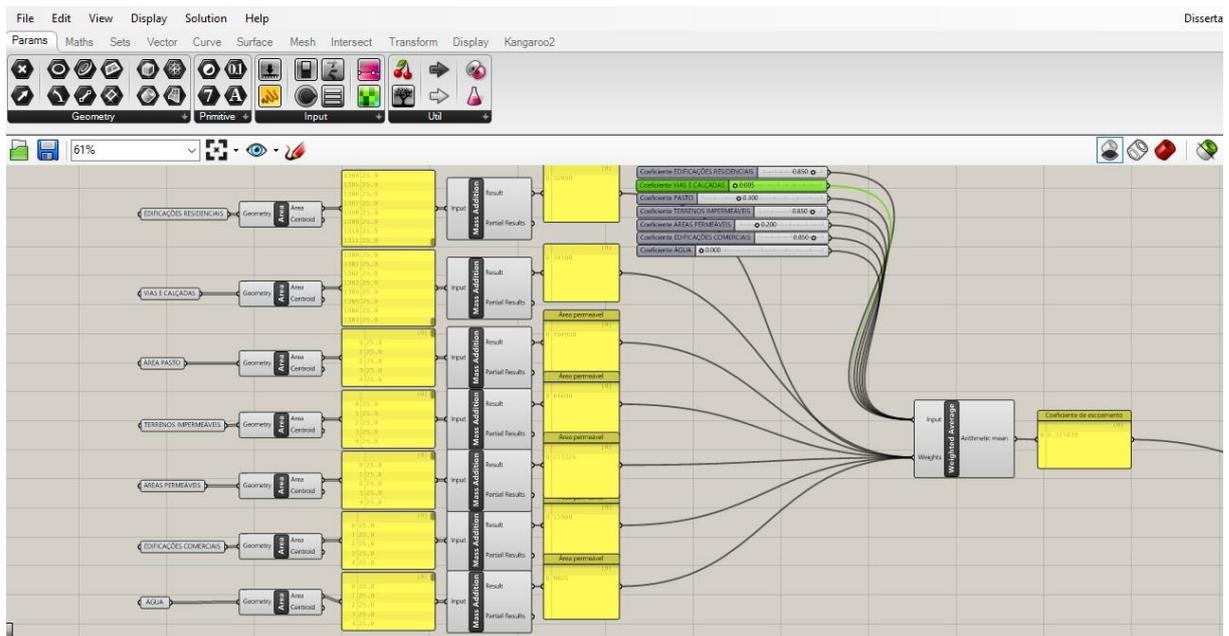
A porcentagem da área da sub bacia coberta por vias e calçadas é de 14,15%, identificada por meio da contagem das células que representam essa cobertura (valor dado automaticamente pelo “*panel*” vinculado às células). Constatou-se então, que assim como na sub bacia BD-36, a alteração do asfalto convencional para o asfalto poroso proporcionou alteração considerável no coeficiente de escoamento total da sub bacia e também na vazão máxima da mesma.

5.1.3. Asfalto poroso nas vias públicas da sub bacia BD-34

Assim como nas duas sub bacias anteriores, para efetuar a manipulação do revestimento de piso da sub bacia BD-34 e simulação da aplicação do asfalto poroso, deve-se alterar o valor

do coeficiente de escoamento superficial “C” atribuído ao componente “Geometry” que representa as células “vias e calçadas” (Figura 41). O valor vinculado à essas células inicialmente, enquanto representação do asfalto e cimento convencional, é de 0,80. De acordo com o que foi descrito anteriormente, o valor do coeficiente de escoamento superficial do asfalto poroso é de 0,05.

Figura 41 - Alteração do valor do coeficiente “C” das células “vias e calçadas” da sub bacia BD-34.

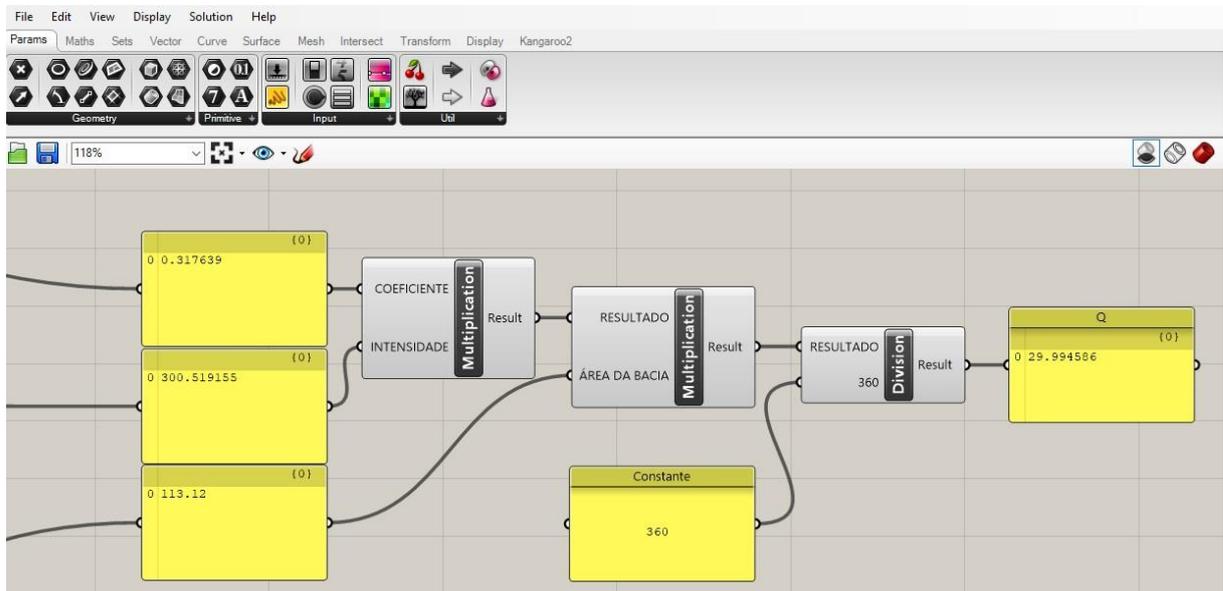


Fonte: Autor, 2018.

Após feita a alteração no valor do coeficiente de escoamento superficial vinculada às células das vias e calçadas, percebe-se também uma alteração do coeficiente de escoamento total da bacia, já que todo material que cobre parte da sub bacia é capaz de promover alterações no conjunto. O valor do coeficiente de escoamento total baixou de 0,34 para 0,31, o que representa uma redução de 8,82%.

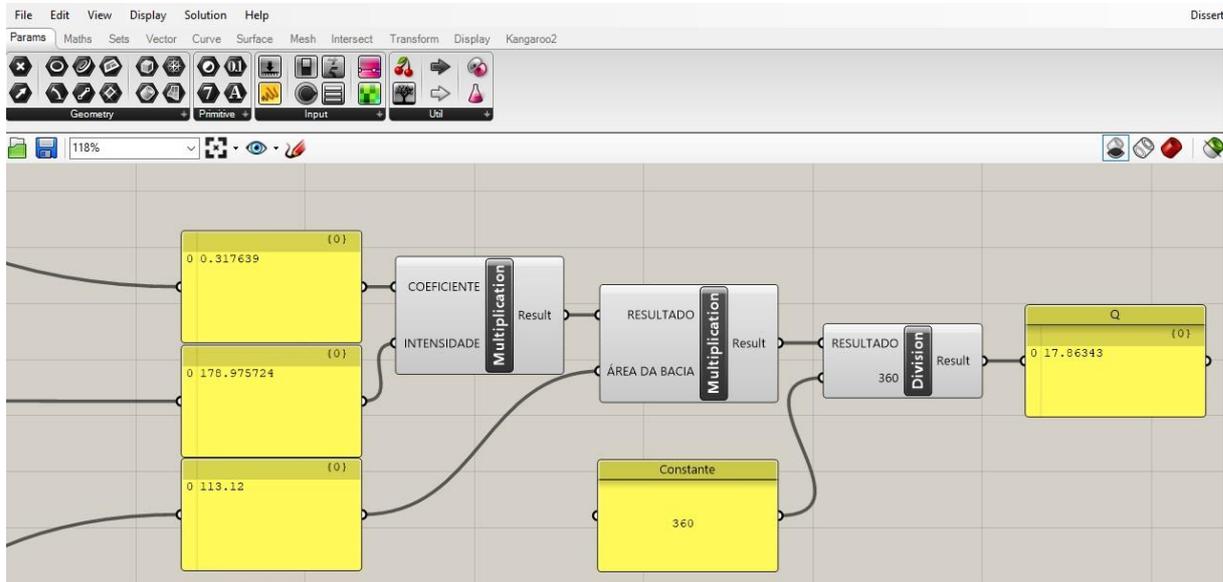
Essa alteração implica também em uma alteração na vazão máxima “Q” da sub bacia. Considerando-se o tempo de retorno de 100 anos, o valor da vazão máxima foi reduzido de 32,38m³/s para 30,12m³/s (Figura 42), apresentando queda de 6,69% em relação à situação anterior à implantação do piso permeável. Quando o tempo de retorno é reduzido para 5 anos, o valor da vazão máxima é reduzido de 19,28m³/s para 17,94m³/s (Figura 43), o que representa uma queda de 6,95% em relação à situação anterior, tendo a cobertura do solo com asfalto convencional.

Figura 42 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-34 para o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 43 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-34 para o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 06 são apresentados os valores da simulação da drenagem da sub bacia BD-34 com a aplicação do asfalto convencional nas vias e calçadas e os valores da simulação da substituição do asfalto convencional pelo asfalto poroso, assim como a variação percentual entre as duas simulações.

Tabela 06 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-34.

Asfalto Poroso – BD-34	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Situação anterior	0,34
Aplicação do asfalto poroso	0,31
Redução	8,82%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Situação anterior	32,38m ³ /s
Aplicação do asfalto poroso	30,12m ³ /s
Redução	6,69%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Situação anterior	19,28m ³ /s
Aplicação do asfalto poroso	17,94m ³ /s
Redução	6,96%

Fonte: Autor, 2018.

A porcentagem da área da sub bacia coberta por vias e calçadas é de 3,06%, identificada por meio da contagem das células que representam essa cobertura (valor dado automaticamente pelo “panel” vinculado às células). Assim como nas duas sub bacias anteriores, a alteração do asfalto convencional para o asfalto poroso proporcionou alteração considerável no coeficiente de escoamento total da sub bacia assim como na vazão máxima da mesma.

5.1.4. Considerações sobre a aplicação do asfalto poroso

Ao se analisar a redução do coeficiente de escoamento superficial total de cada sub bacia (BD-36, BD-30 e BD-34), através da simulação da troca do asfalto convencional pelo asfalto poroso como material de cobertura do solo das vias e calçadas, percebe-se que a alteração se

mostra efetiva e considerável. Quando esses valores são relacionados com a porcentagem de cada sub bacia coberta por vias e calçadas fica ainda mais evidente.

Em áreas ainda mais urbanizadas, onde a probabilidade de existir uma porcentagem ainda maior da sub bacia coberta por vias e calçadas, essa redução se mostrará ainda mais significativa, pois a porcentagem da sub bacia que terá seu coeficiente de escoamento reduzido será ainda maior. A solução se mostra viável no combate às enchentes urbanas nas áreas urbanas consolidadas, onde não há possibilidade de aplicação de soluções e práticas de drenagem de grande escala, como bacias de retenção ou retenção.

5.2. SIMULAÇÕES COM TELHADO VERDE

Para efetuar a simulação da aplicação do telhado verde nas edificações comerciais das sub bacias, foi necessário identifica-las por meio de visitas aos bairros e análises utilizando o aplicativo Google Earth e Street View, da empresa Google. Após reconhecimento das edificações foi feita a caracterização de cada célula desenvolvida no *software* AutoCAD de acordo com o uso das edificações, conforme descrito anteriormente. As edificações, de forma geral, receberam, já no *software* Grasshopper, valores do seu coeficiente de escoamento, de acordo com tabelas encontradas em bibliografia especializada, e reproduzidas aqui, no capítulo 2. O valor descrito para “C” em áreas urbanas é de 0,85, enquanto telhados verdes representam um coeficiente de escoamento “C” de 0,30, o que representa uma diferença de 64,70%. Portanto o valor atribuído ao coeficiente “C” foi alterado de 0,85 para 0,30, o que representa a alteração do telhado convencional para o telhado verde.

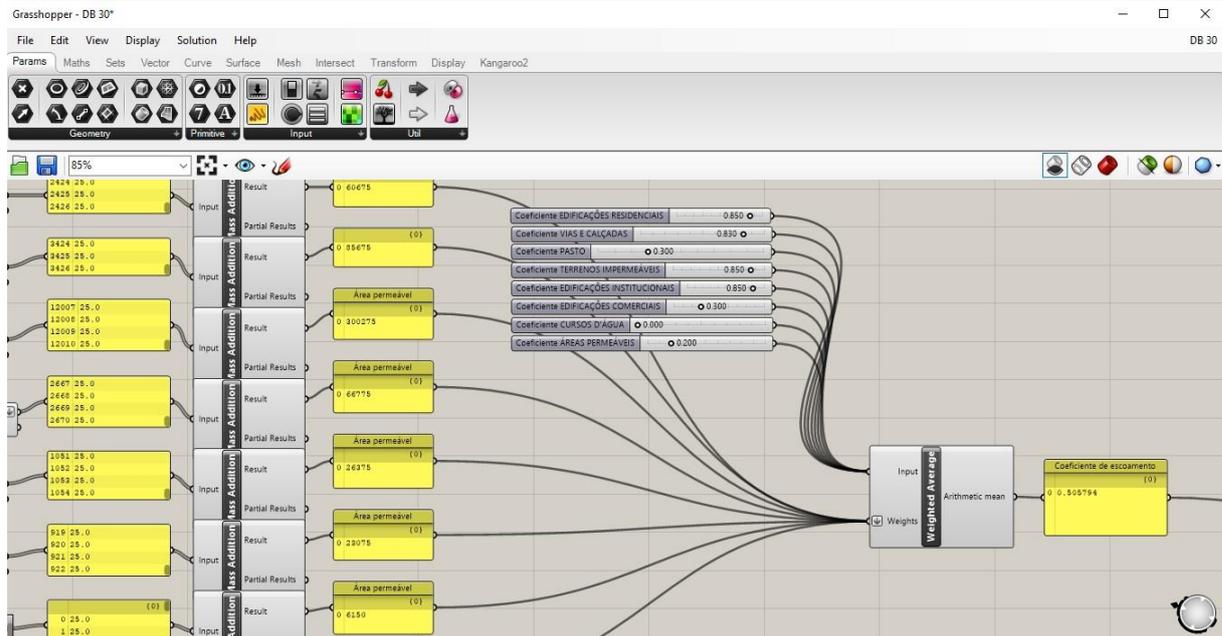
De acordo com o que foi descrito anteriormente, a sub bacia BD-36, primeira sub bacia simulada neste trabalho, não recebeu diferenciação entre os usos de suas edificações, impossibilitando a simulação da aplicação de telhados verdes nas edificações de uso comercial. Já as duas sub bacias seguintes, BD-30 e BD-34, possuem a caracterização e diferenciação de células de acordo com o tipo de edificação e seu uso, possibilitando a ampliação das simulações e manipulações de dados.

5.2.1. Simulações com telhado verde nas edificações comerciais da sub bacia BD-30

Para efetuar a simulação da aplicação revestimento de piso da sub bacia BD-30 e simulação da aplicação do piso permeável, deve-se alterar o valor do coeficiente de escoamento superficial “C” atribuído ao componente “*Geometry*” que representa as células “edificações comerciais”. O valor vinculado à essas células inicialmente é de 0,80, valor referente ao coeficiente de escoamento superficial de áreas urbanizadas, de acordo informações extraídas de bibliografia especializada, conforme descrito anteriormente. Segundo Baldessar (2012) o valor do coeficiente de escoamento superficial do telhado verde é de 0,30, apresentando diferença de 64,70% em relação ao valor do coeficiente de escoamento superficial anterior.

Após feita a alteração no valor do coeficiente de escoamento superficial vinculada às edificações comerciais, percebe-se uma alteração do coeficiente de escoamento total da bacia. O valor do coeficiente de escoamento total baixou de 0,52 para 0,50, o que representa uma redução de 3,84% (Figura 44).

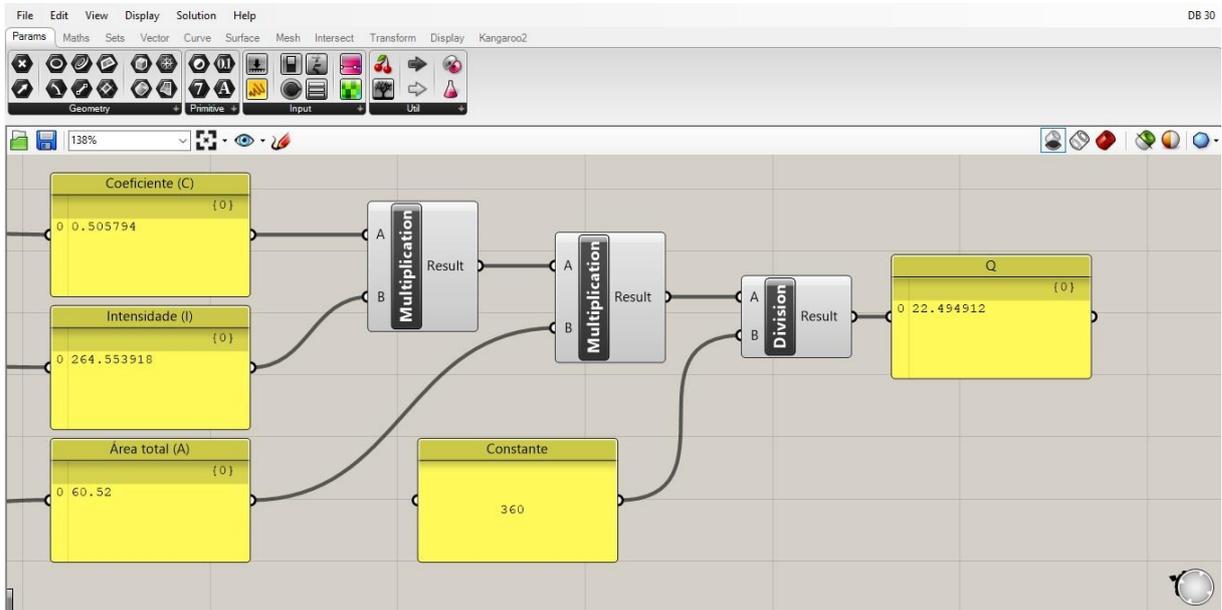
Figura 44 - Alteração do valor do coeficiente “C” das edificações comerciais da sub bacia BD-30.



Fonte: Autor, 2018.

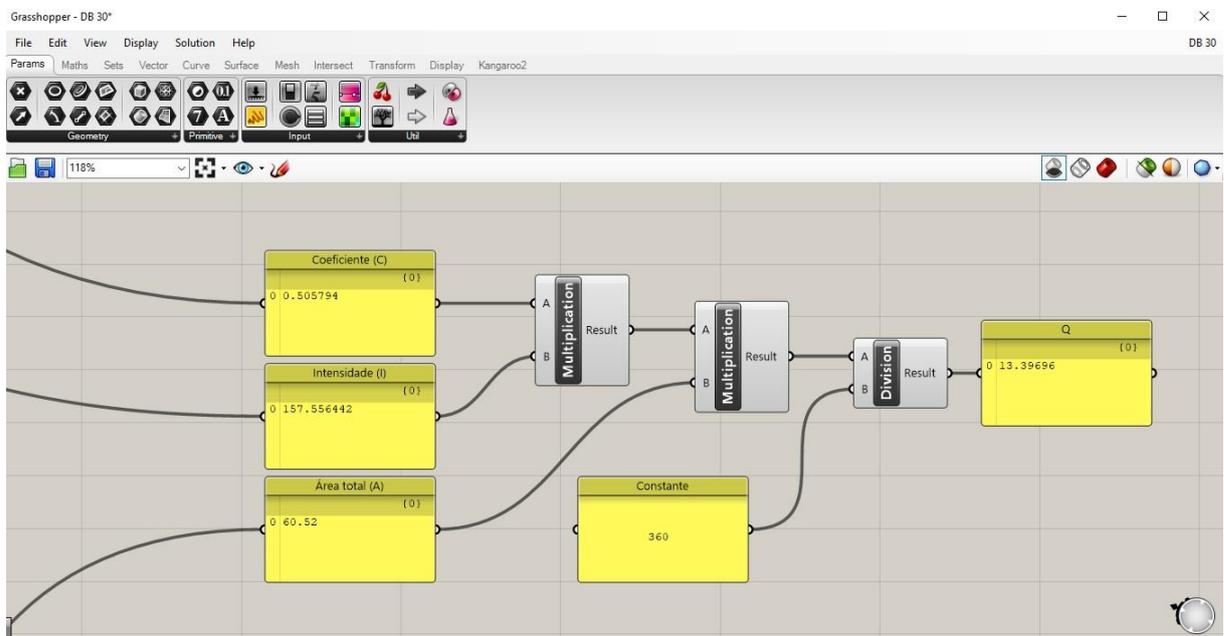
Dessa forma, o valor “C” da fórmula do Método Racional foi alterado, provocando alterações no valor final da equação, referente à vazão máxima “Q”. Considerando-se o tempo de retorno de 100 anos, o valor da vazão máxima foi reduzido de 23.42 m³/s para 22.49 m³/s (Figura 45), apresentando queda de 3,97% em relação à situação anterior à implantação do telhado verde nas edificações de uso comercial. Quando o tempo de retorno é reduzido para 5 anos, o valor da vazão máxima é reduzido de 13,95 m³/ para 13,39 m³/s (Figura 46), o que representa uma queda de 4,01% em relação à situação anterior.

Figura 45 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-30 para o tempo de retorno de 100 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 46 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-30 para o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 07 são apresentados as variações percentuais dos valores encontrados entre a simulação anterior, com cobertura convencional e a simulação da aplicação do telhado verde nas edificações comerciais da sub bacia BD-30.

Tabela 07 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-30.

Telhado Verde – BD-30	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Situação anterior	0,52
Aplicação do telhado verde	0,50
Redução	3,84%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Situação anterior	23,42m ³ /s
Aplicação do telhado verde	22,49m ³ /s
Redução	3,97%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Situação anterior	13,95m ³ /s
Aplicação do telhado verde	13,39 m ³ /s
Redução	4,01%

Fonte: Autor, 2018.

Ao considerar-se a porcentagem da área da sub bacia coberta por edificações comerciais, 3,8%, identificada por meio da contagem das células que representam essas edificações, pode-se então afirmar que a implantação dos telhados verdes proporcionou alteração no coeficiente de escoamento superior, em relação à porcentagem, que o total da sua área de ocupação. A mesma afirmação vale para a vazão máxima da sub bacia.

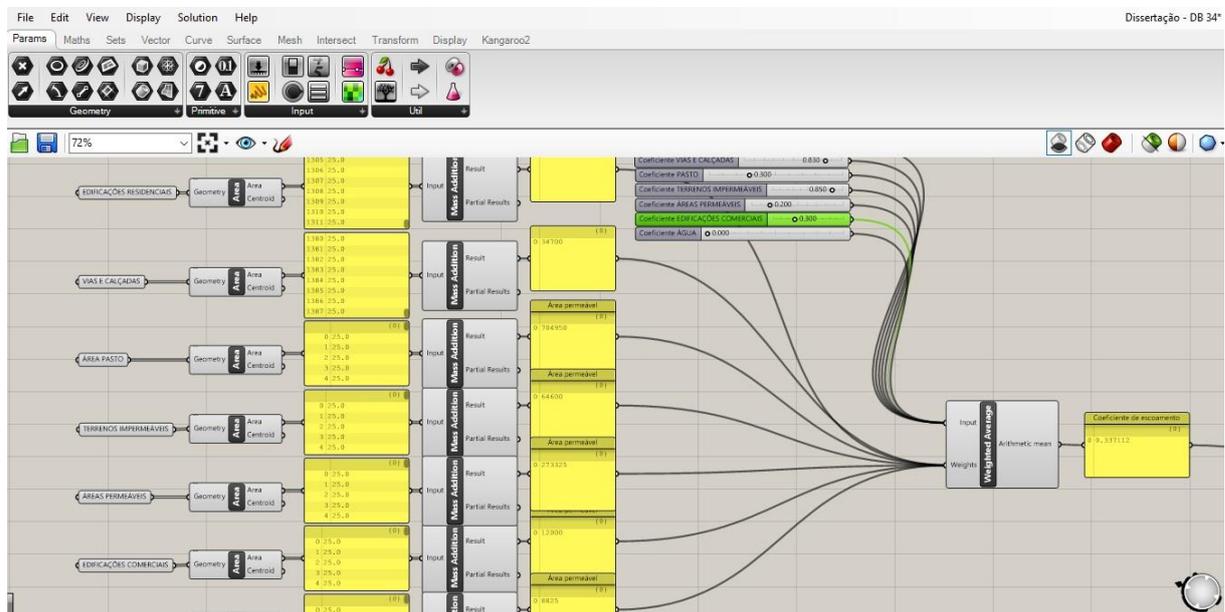
5.2.2. Simulações com telhado verde nas edificações comerciais da sub bacia BD-34

O procedimento para efetuar a manipulação do revestimento da cobertura das edificações comerciais da sub bacia BD-34 e simulação da aplicação do telhado verde, é o mesmo aplicado na sub bacia BD-30. Deve-se alterar o valor do coeficiente de escoamento superficial “C” atribuído ao componente “*Geometry*” que representa as células “edificações

comerciais”. O valor vinculado à essas células inicialmente é de 0,85 e o novo valor, atribuído ao telhado verde é de 0,30.

Após feita a alteração no valor do coeficiente de escoamento superficial vinculada às células das edificações comerciais, percebe-se também uma alteração do coeficiente de escoamento total da bacia, assim como aconteceu na sub bacia BD-30. O valor do coeficiente de escoamento total baixou de 0,34 para 0,33, o que representa uma redução de 2,94% (Figura 47).

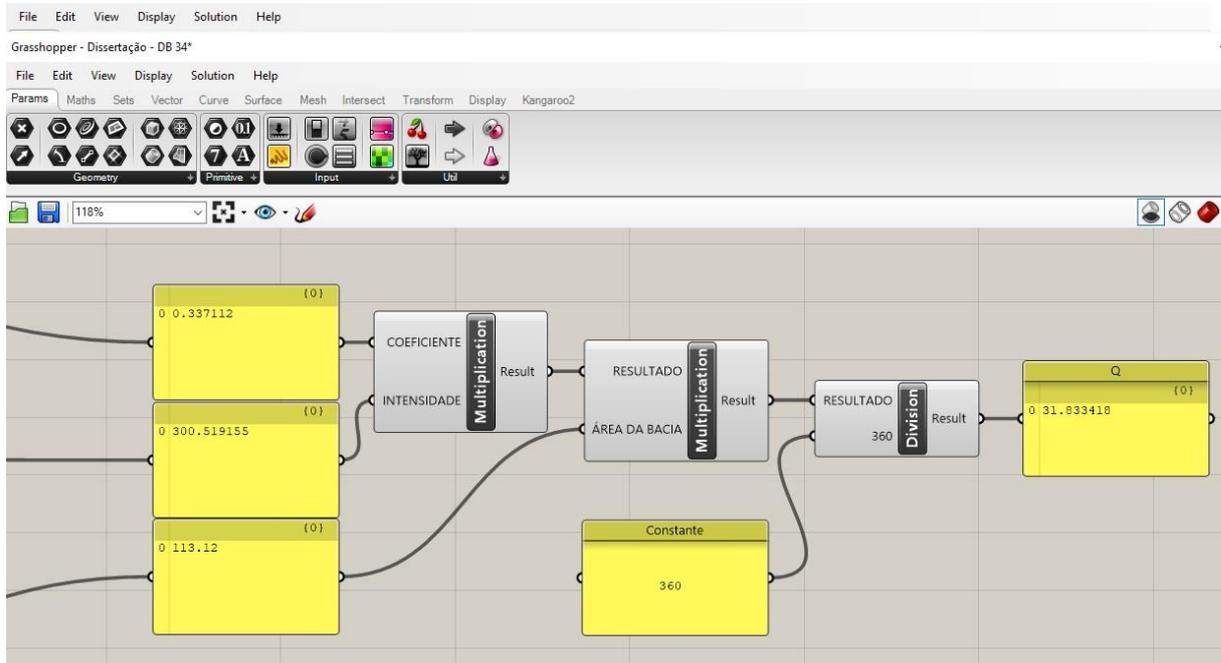
Figura 47 - Alteração do valor do coeficiente “C” das edificações comerciais da sub bacia BD-34.



Fonte: Autor, 2018.

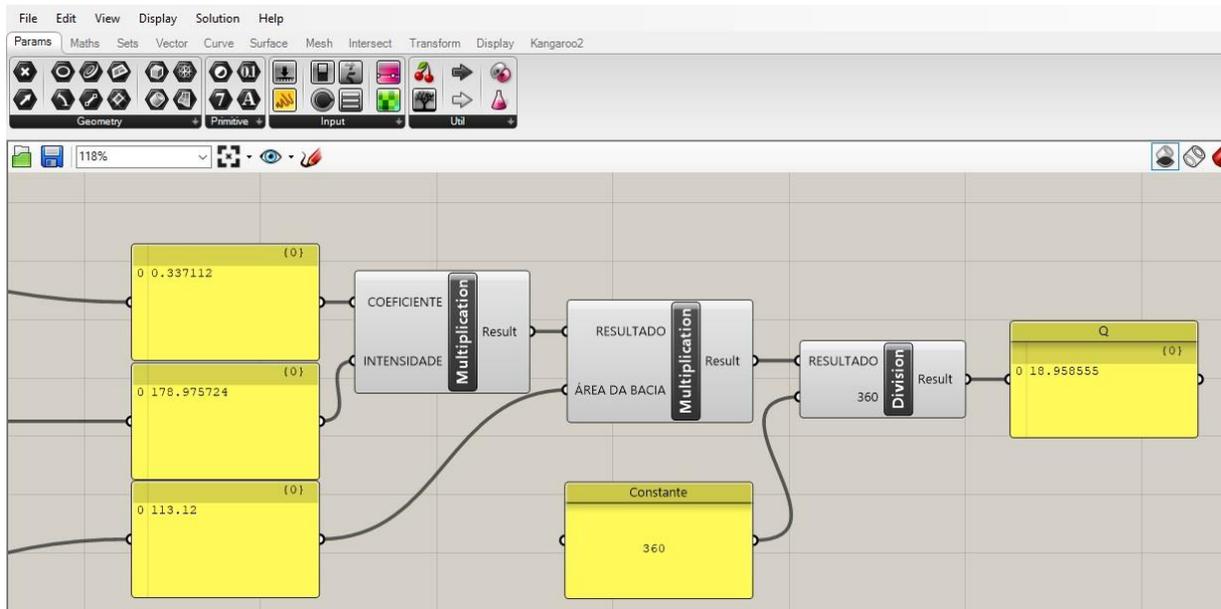
Como o valor “C” da fórmula do Método Racional foi alterada, o valor final da equação, referente à vazão máxima “Q”, também sofre alterações. Considerando-se o tempo de retorno de 100 anos, o valor da vazão máxima foi reduzido de 32,38 m³/s para 31,83 m³/s (Figura 48), apresentando queda de 1,69% em relação à situação anterior à implantação do telhado verde nas edificações comerciais. Quando o tempo de retorno é reduzido para 5 anos, o valor da vazão máxima é reduzido de 19,28 m³/s para 18,95 m³/s (Figura 49), o que representa uma queda de 1,71% em relação à situação anterior.

Figura 48 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-34 para o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 49 - Alteração do valor da vazão máxima “Q” da sub bacia BD-34 para o tempo de retorno de 5 anos.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 08 são apresentados as variações percentuais dos valores encontrados entre a simulação anterior, com cobertura convencional e a simulação da aplicação do telhado verde nas edificações comerciais da sub bacia BD-34.

Tabela 08 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-34.

Telhado Verde – BD-34	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Situação anterior	0,34
Aplicação do telhado verde	0,33
Redução	2,94%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Situação anterior	32,38m ³ /s
Aplicação do telhado verde	31,83m ³ /s
Redução	1,69%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Situação anterior	19,28m ³ /s
Aplicação do telhado verde	18,95m ³ /s
Redução	1,71%

Fonte: Autor, 2018.

A porcentagem da área da sub bacia coberta por edificações comerciais é de 1,05%, identificada por meio da contagem das células que representam essas edificações. Contata-se então que, assim como na sub bacia BD-34, a alteração nos valores do coeficiente de escoamento total da sub bacia assim como na vazão máxima da mesma foi proporcionalmente maior que porcentagem de área ocupada por edificações comerciais na sub bacia, apresentando resultado satisfatório.

5.2.3. Considerações sobre a aplicação do telhado verde nas edificações comerciais

Constata-se, com as duas simulações anteriores, que a quantidade de edificações comerciais, assim como a área total que ocupam dentro de uma sub bacia, é determinante para que a redução do escoamento superficial seja considerável e contundente no combate às

enchentes urbanas. O efeito do telhado verde foi pequeno devido à baixa densidade de edificações nas sub-bacias. Ou seja, a proporção de telhados em relação à bacia é baixa, o que já não ocorre em um terreno. Portanto, pode-se afirmar que o efeito do telhado verde em um terreno de edificação particular, pode ser significativo, proporcionalmente falando.

6. SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA NAS SUB BACIAS

De acordo com dados coletados no site da Prefeitura Municipal de Juiz de Fora, pode-se observar o índice de crescimento dos bairros da Zona Norte do município entre os anos de 1996 a 2000 (Tabela 09). Nesse intervalo de 14 anos é indicado o crescimento de 5,88% do bairro Barbosa Lage, onde encontram-se as sub bacias BD-36 e BD-34 e o crescimento de 21,65% do bairro Nova Era, onde encontra-se a sub bacia BD-30. Esses valores deram suporte às simulações desenvolvidas com a ferramenta para avaliar os impactos do crescimento urbano nesses bairros sobre o coeficiente de escoamento superficial e sobre a vazão máxima nos períodos chuvosos. Considerou-se que o nos 14 anos seguintes à elaboração do Plano de Drenagem de Juiz de Fora o crescimento dos bairros seguirá a mesma proporção que o intervalo entre os anos de 1996 a 2000. Todas as simulações desenvolvidas nesse trabalho consideraram o ano de 2011 como referência, ano em que foi elaborado o Plano de Drenagem de Juiz de Fora e ano das imagens de satélite utilizadas para reconhecimento do perímetro das sub bacias e do material de cobertura do solo. Portanto, as previsões do crescimento urbano desenvolvidas com a ferramenta serão para o ano de 2025.

Tabela 09 – Índices de crescimento dos bairros na Zona Norte do município de Juiz de Fora entre os anos de 1996 a 2000.

REGIÃO URBANA PJF	RU PJF/IBGE	BAIRROS LOTEAMENTOS COMPONENTES	ÁREA HECTARE	POPULAÇÃO 2000	DENSIDADE 2000	CRESCIMENTO 1996-2000
1	Barreira do Triunfo	Barreira do Triunfo, Novo Triunfo, Aldeia, Volta Grande	659,75	2273	3,4	38,18%
2	Represa	Represa, Náutico, Taboporanga, Jardim Paraíso, Enseada Parque Ecológico	7294,73	673	0,1	5,82%
3	Benfica	Benfica, Distrito Industrial, São Damião, Araújo, Ponte Preta, Vila do Sapê, Nova Benfica, Vila Esperança I e II	881,12	18111	20,6	13,01%
4	Santa Cruz	Santa Cruz, Vila Melo Reis, São Judas Tadeu, São Francisco de Paula, Verbo Divino, Jardim dos Alfaiates, Osvaldo Cruz, Santa Clara, Morada Nova	409,18	15514	37,9	15,89%
5	Nova Era	Nova Era, Nova Era I e II, Santa Lúcia, Jardim Santa Isabel	248,07	7781	31,4	21,65%
6	Barbosa Lage	Barbosa Lage, Cidade do Sol, Parque das Torres, Santa Amélia, Jôquei clube II, Santa Maria, Recanto da Mata	289,45	12277	42,4	5,88%
7	Remonta	Remonta, Jôquei II e III, Miguel Marinho, Jardim L'Emitage, Parque das Torres	396	>0,1	20,00%	
8	Jôquei Clube	Jôquei Clube, Vila Vidal	84,63	4807	56,8	6,70%
9	Jardim Natal	Jardim Natal	52,1	5168	99,2	-7,03%
10	Industrial	Industrial	31,65	3107	98,2	0,29%
11	Francisco Bernardino	Francisco Bernardino, Milho Branco, Amazônia, Encosta do sol, Realeza, Parque Bernardino	255,12	8354	32,7	27,27%
12	Carlos Chagas	Carlos Chagas	41,73	1861	44,6	11,57%
13	Cerâmica	Cerâmica, Parque Bernardino	86,14	3216	37,3	0,78%
14	São Dimas	São Dimas	13,76	200	14,5	-15,97%
15	Esplanada	Esplanada	24,09	3073	127,6	-0,93%
16	Monte Castelo	Monte Castelo, Jardim da Cachoeira, Monteville	105,59	5552	52,6	3,58%

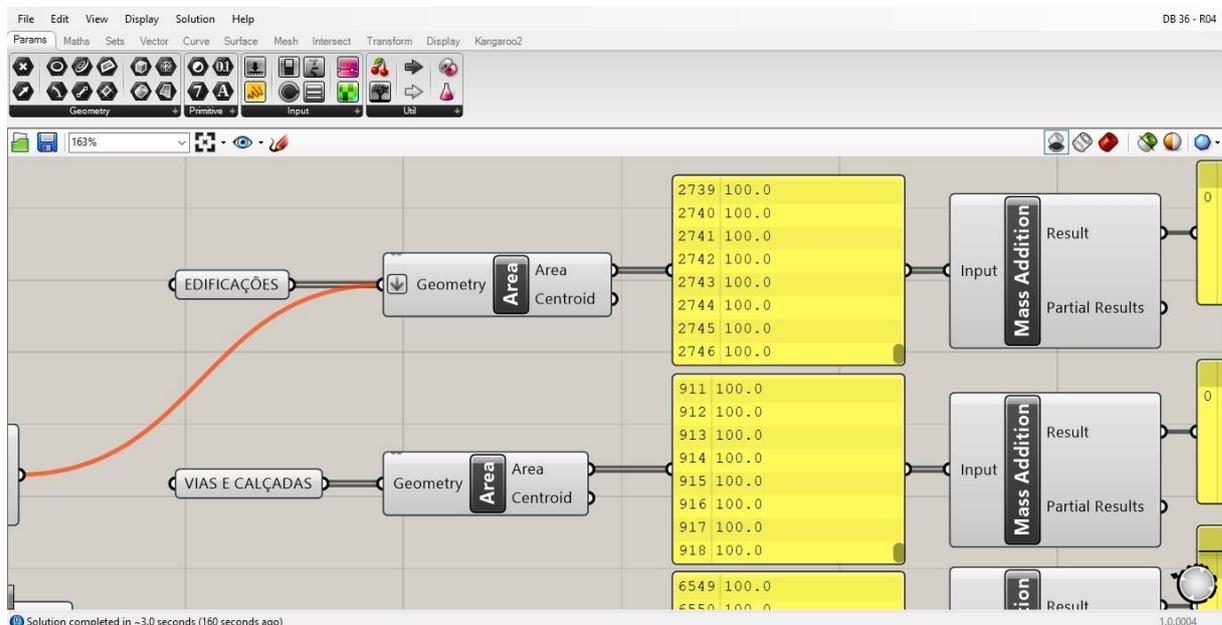
Fonte: Prefeitura Municipal de Juiz de Fora.

6.1. SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA NA SUB BACIA BD-36

Na sub bacia BD-36 encontra-se no bairro Barbosa Lage, localizado na Zona Norte do município de Juiz de Fora/MG. Conforme descrito acima, a expansão urbana do bairro entre os anos de 1996 a 2000 foi de 5,88%. Considerou-se que o crescimento do bairro se manteve constante nos anos posteriores aos da avaliação disponibilizada pela Prefeitura Municipal de Juiz de Fora. As simulações previamente apresentadas nesse trabalho foram feitas considerando o ano de 2011, portanto, as previsões apresentadas agora serão para o ano de 2025, de forma a apresentar um intervalo de 14 anos entre as datas.

Para desenvolver a simulação foi necessário identificar o número total de células que representam a área urbanizada da sub bacia. Esse valor é informado pela contagem de células vinculadas aos componentes “*Geometry*” que representam as coberturas de solo “edificações” e “vias e calçadas”. Esse número é dado automaticamente pelos “*Panels*” vinculados aos componentes “*Geometry*” e indicam 918 células representando as vias e calçadas e 2.746 células representando as edificações, totalizando 3.664 células (Figura 50).

Figura 50 – Número de células vinculadas aos componentes “*Geometry*” referentes às edificações e às vias e calçadas da sub bacia BD-36.

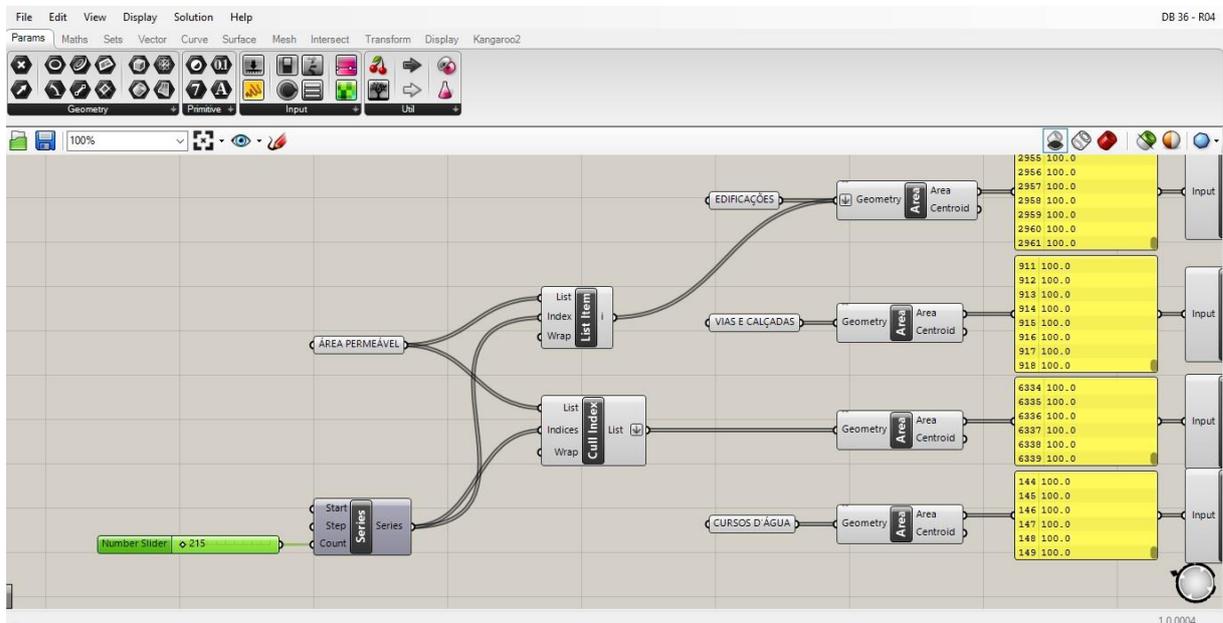


Fonte: Autor, 2018.

5,88% desse total representa o número de 215 células. Utilizando os componentes “Series”, “Cull Index” e “List Item”, além do “Number Slider” vinculados aos componentes “Geometry” referentes às áreas permeáveis e também às edificações, consegue-se transferir determinado número de células das áreas permeáveis para as células das edificações. O valor específico é inserido no “Number Slider”, conforme é mostrado na figura 51.

Com esse procedimento, 215 células que representavam áreas permeáveis foram transferidas do componente “Geometry” vinculado às áreas permeáveis para o componente “Geometry” vinculado às edificações.

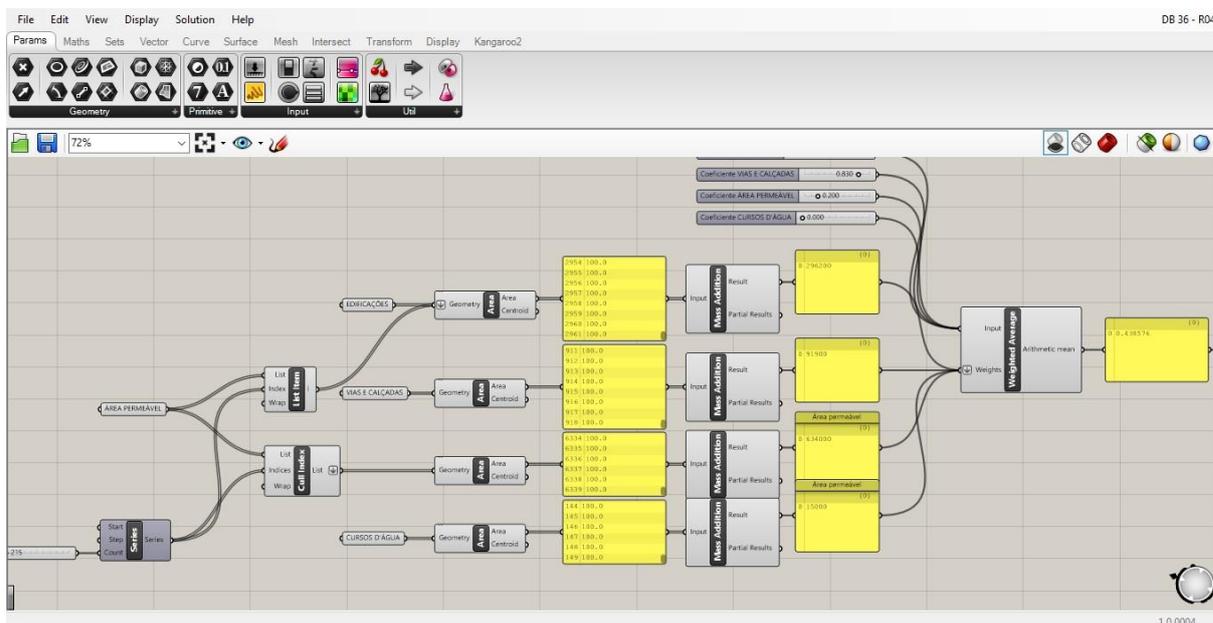
Figura 51 – Transferência de células vinculadas ao componente “Geometry” relacionado à áreas permeáveis para o componente “Geometry” relacionado às edificações.



Fonte: Autor, 2018.

Quando é inserido o número 215 no “Number Slider”, valor que representa a porcentagem de crescimento da área urbanizada do bairro Barbosa Lage em um período de 14 anos, o valor do coeficiente de escoamento superficial aumenta de 0,42 para 0,43, o que representa um aumento de 2,4% no total de escoamento superficial (Figura 52).

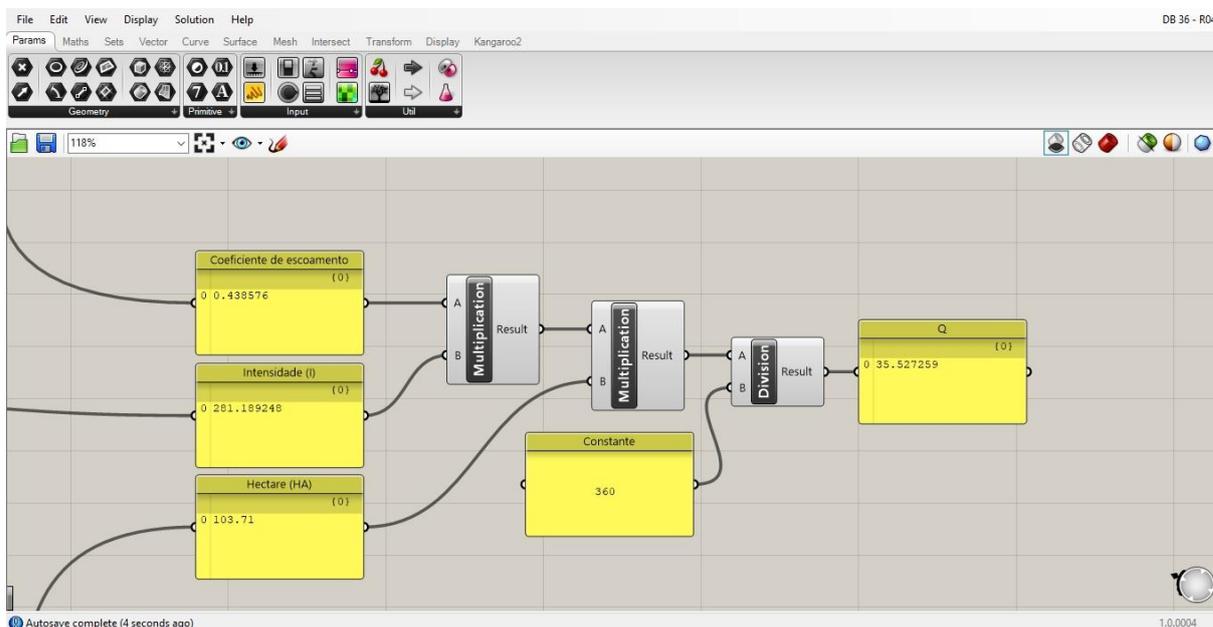
Figura 52 – Aumento do coeficiente de escoamento em razão da transferência de células.



Fonte: Autor, 2018.

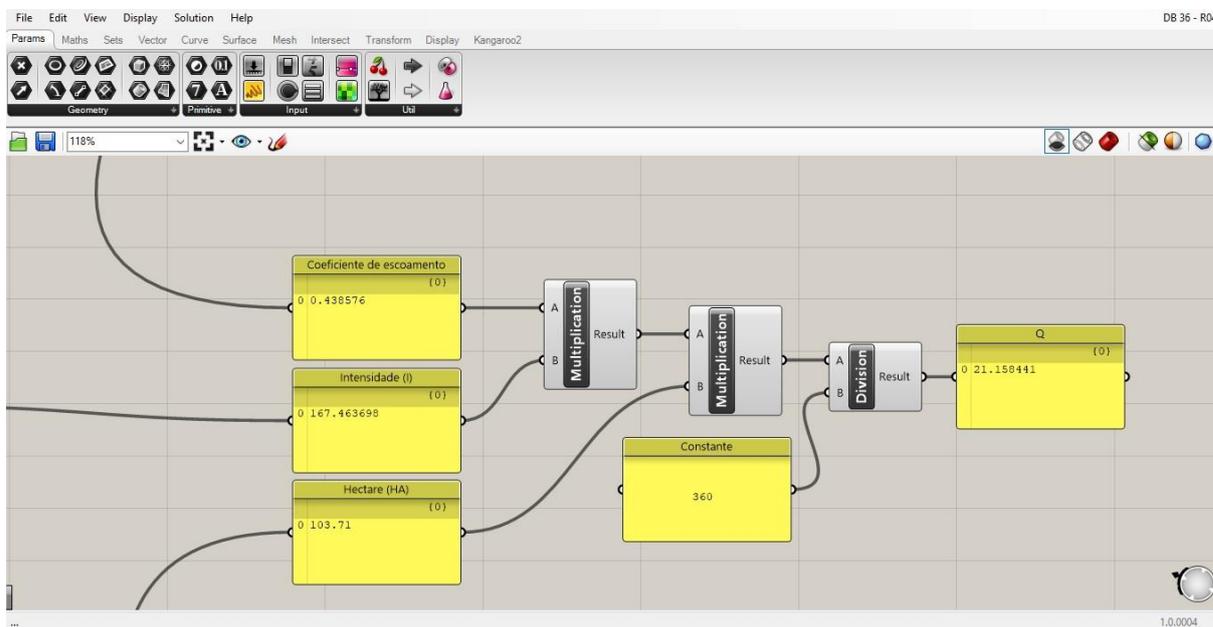
Conforme exposto em capítulos anteriores, a valor do coeficiente de escoamento alimenta a fórmula do Método Racional, que apresenta o valor da vazão máxima de determinada bacia. Com o aumento do valor do coeficiente de escoamento, o valor da vazão máxima automaticamente aumenta de $34,43\text{m}^3/\text{s}$ para $35,13\text{m}^3/\text{s}$ nos períodos de cheia (Figura 53), o que representa um aumento de 2%. Nos períodos de seca, a vazão máxima aumento de $20,50\text{m}^3/\text{s}$ para $20,92\text{m}^3/\text{s}$ (Figura 54), o que também representa um aumento de 2%.

Figura 53 – Aumento da vazão máxima nos períodos de cheia.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 54 – Aumento da vazão máxima nos períodos de seca.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 10 são apresentados os valores do coeficiente de escoamento superficial e vazão máxima encontrados na simulação feita para o ano de 2011 e os valores encontrados para a simulação do crescimento da sub bacia BD-36 até o ano de 2025, assim como a diferença percentual entre os dois valores.

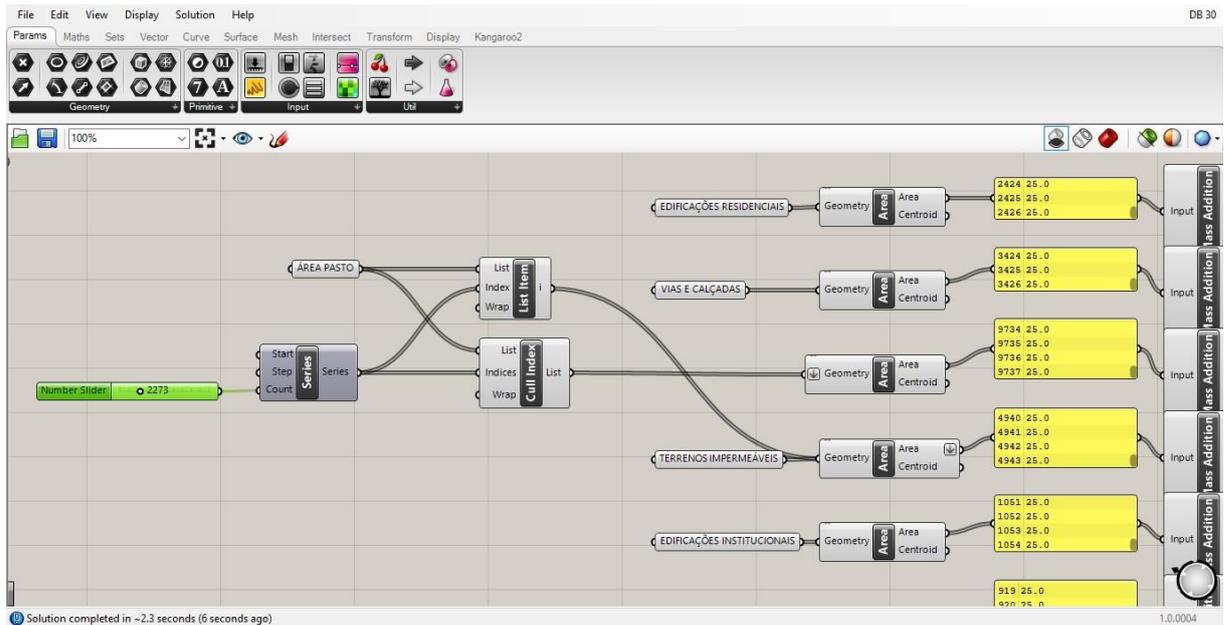
Tabela 10 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-34.

Simulação expansão sub bacia BD-36 (2011 a 2025)	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Ano de 2011	0,42
Ano de 2025	0,43
Aumento	2,94%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Ano de 2011	34,43m ³ /s
Ano de 2025	35,13m ³ /s
Aumento	2%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Ano de 2011	20,50m ³ /s
Ano de 2025	20,92m ³ /s
Aumento	2%

Fonte: Autor, 2018.

“Geometry” referentes às áreas permeáveis e áreas impermeáveis, consegue-se transferir determinado número de células que representam áreas permeáveis para o conjunto de células que representam as áreas impermeáveis. O valor específico é inserido no “Number Slider”, conforme é mostrado na figura 56.

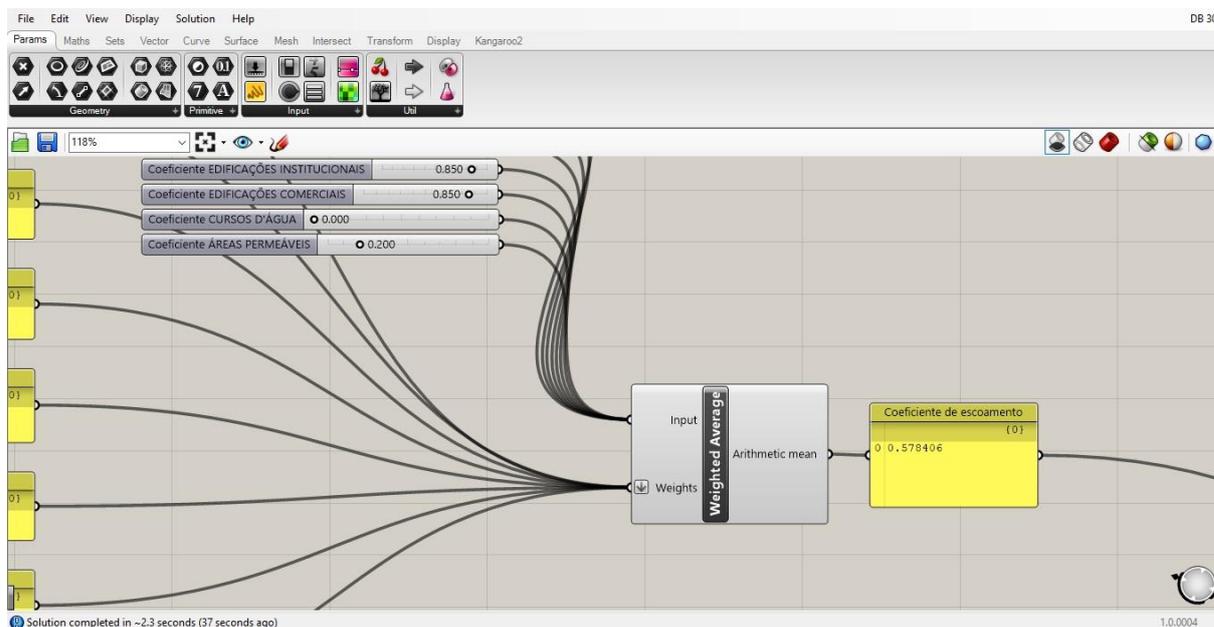
Figura 56 – Transferência de células vinculadas ao componente “Geometry” das áreas permeáveis para o componente “Geometry” das áreas impermeáveis.



Fonte: Autor, 2018.

Quando é inserido o número 2.273, ou seja, a porcentagem de crescimento da área urbanizada do bairro Barbosa Lage, no “Number Slider”, o valor do coeficiente de escoamento superficial da sub bacia automaticamente aumenta de 0,52 para 0,57 (Figura 57), o que representa um aumento de 9,6% no total de escoamento superficial.

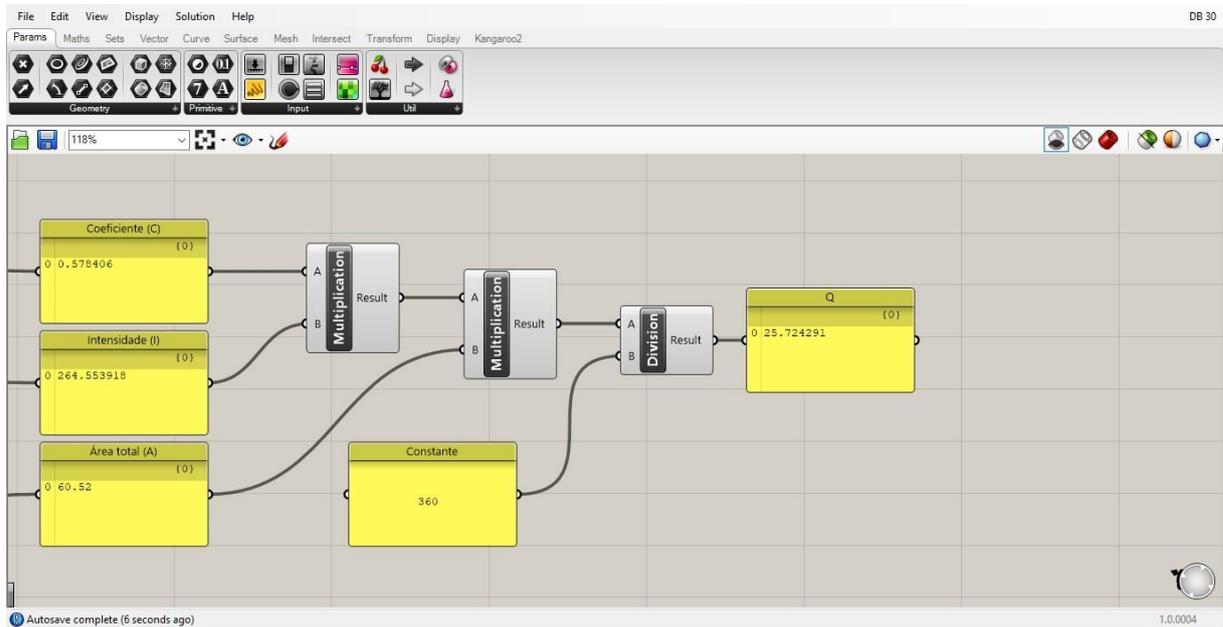
Figura 57 – Aumento do coeficiente de escoamento superficial.



Fonte: Autor, 2018.

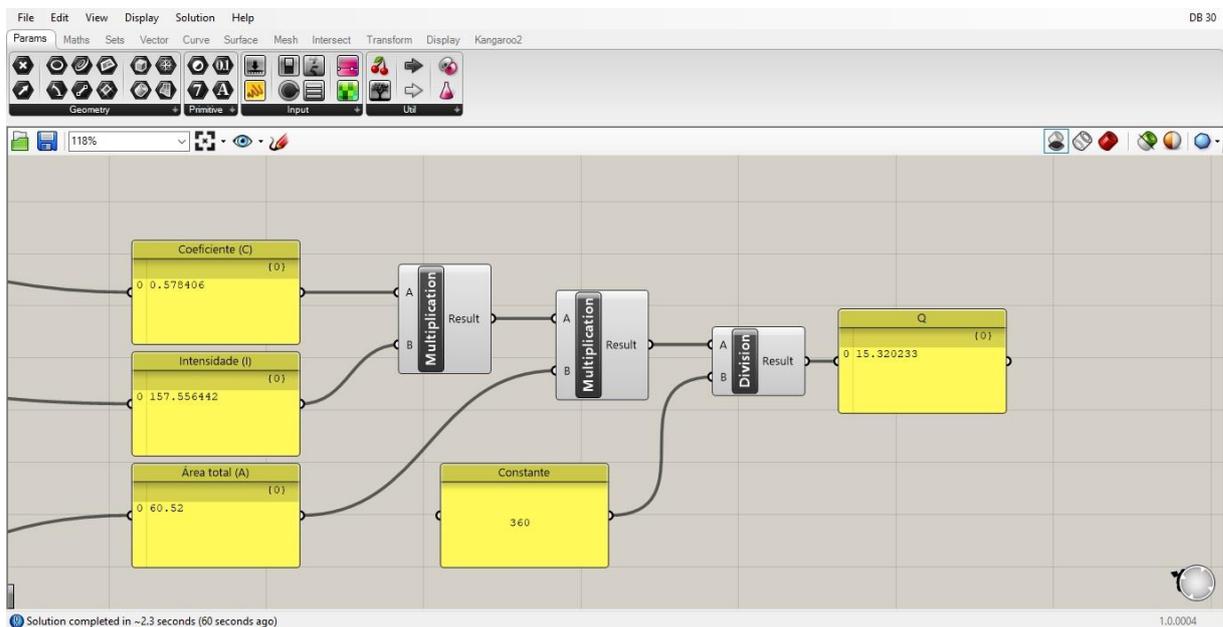
Com a alteração do valor do coeficiente de escoamento superficial, ocorreu a consequente alteração do valor das vazões máximas da sub bacia. O valor da vazão máxima aumentou de $23,42\text{m}^3/\text{s}$ para $25,72\text{m}^3/\text{s}$ nos períodos de cheia (Figura 58), o que representa um aumento de 9,8%, enquanto nos períodos de seca a vazão máxima aumentou de $13,95\text{m}^3/\text{s}$ para $15,32\text{m}^3/\text{s}$ (Figura 59), o que também representa um aumento de 9,8%.

Figura 58 – Aumento da vazão máxima nos períodos de cheia.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 59 – Aumento da vazão máxima nos períodos de seca.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 11 são apresentados os valores do coeficiente de escoamento superficial e vazão máxima encontrados na simulação feita para o ano de 2011 e os valores encontrados para a simulação do crescimento da sub bacia BD-30 até o ano de 2025, assim como a diferença percentual entre os dois valores.

Tabela 11 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-30.

Simulação expansão sub bacia BD-30 (2011 a 2025)	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Ano de 2011	0,52
Ano de 2025	0,57
Aumento	9,6%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Ano de 2011	23,42m ³ /s
Ano de 2025	25,72m ³ /s
Aumento	9,8%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Ano de 2011	13,95m ³ /s
Ano de 2025	15,32m ³ /s
Aumento	9,8%

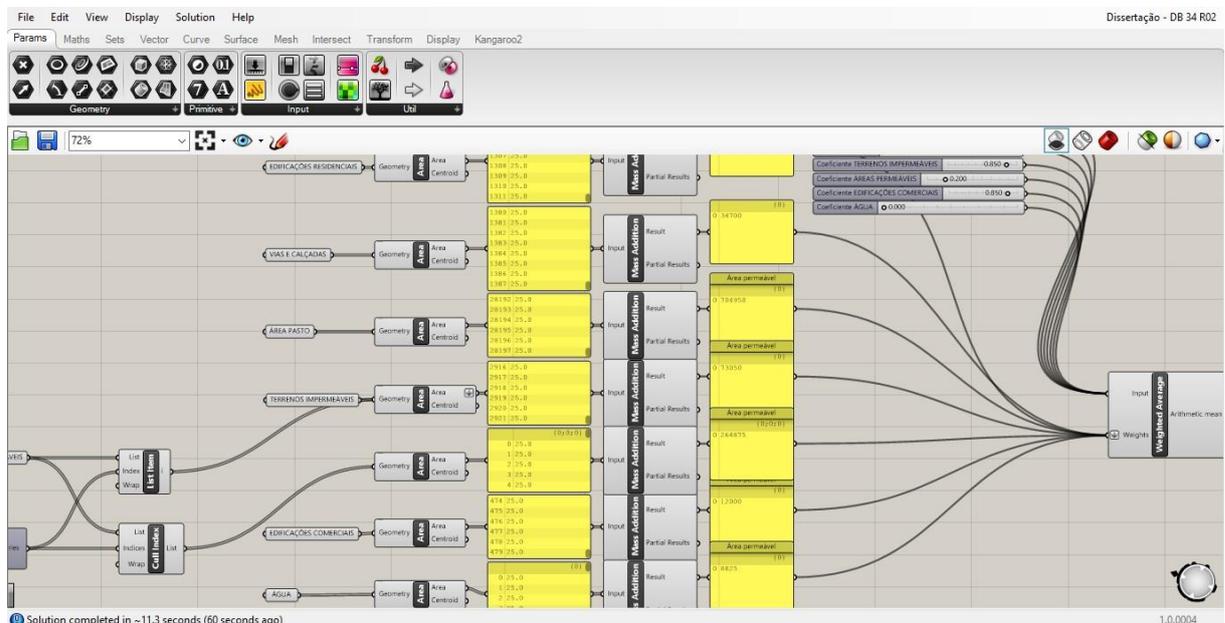
Fonte: Autor, 2018.

6.3. SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA NA SUB BACIA BD-34

Assim como a sub bacia BD-36, a sub bacia BD-34 encontra-se no bairro Barbosa Lage, localizado na zona norte do município de Juiz de Fora. Conforme descrito anteriormente, a expansão urbana do bairro entre os anos de 1996 a 2000 foi de 5,88%. As simulações previamente apresentadas nesse trabalho foram feitas considerando o ano de 2011. Considerou-se o mesmo índice de crescimento para os 14 anos seguintes, portanto, a previsão desenvolvida neste trabalho é para o ano de 2025.

Para desenvolver a simulação foi necessário identificar o número total de células que representam a área urbanizada da sub bacia. Esse valor é informado pela contagem de células vinculadas aos componentes “*Geometry*” que representam as coberturas de solo “edificações residenciais”, “edificações comerciais”, “terrenos impermeáveis” e “vias e calçadas”. Esse número é dado automaticamente pelos “*Panels*” vinculados aos componentes “*Geometry*” e indicam 1.311 células representando edificações residenciais, 479 células representando edificações comerciais, 2.583 células representando terrenos impermeáveis e 1.387 células representando as vias e calçadas, totalizando 5.760 células (Figura 60).

Figura 60 – Número de células vinculadas aos componentes “*Geometry*” da sub bacia BD-34.

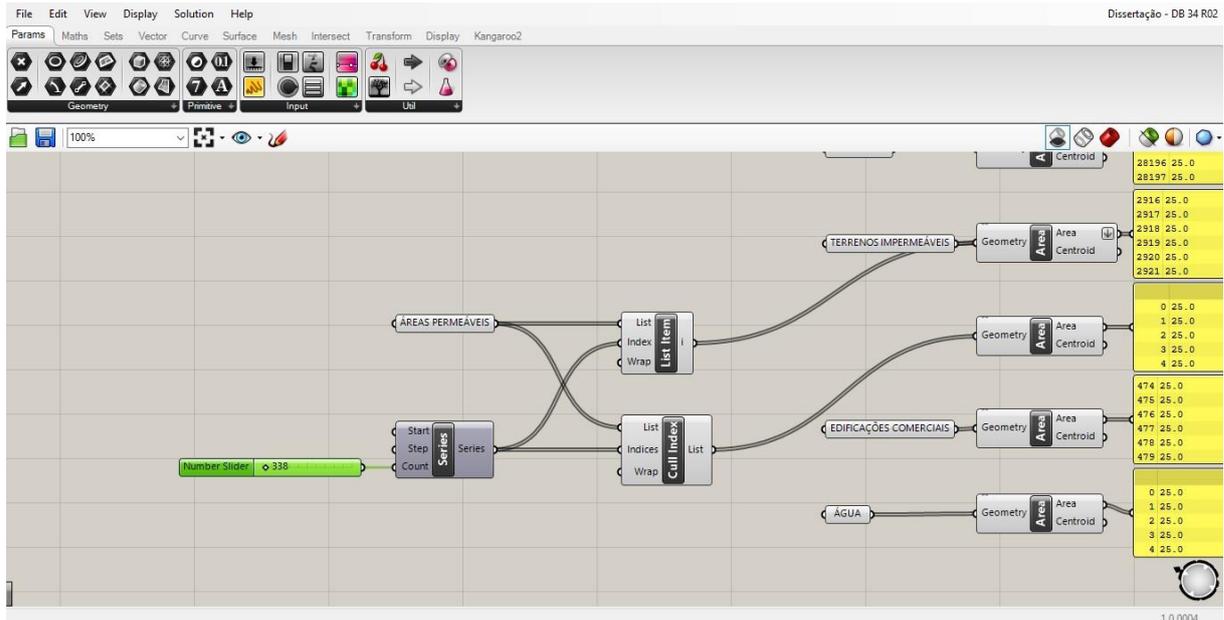


Fonte: Autor, 2018.

5,88% desse total representa o número de 338 células. Utilizando os componentes “*Series*”, “*Cull Index*” e “*List Item*”, além do “*Number Slider*” vinculados aos componentes

“Geometry” referentes às áreas permeáveis e também às edificações, consegue-se transferir determinado número de células das áreas permeáveis para as células das edificações. O valor específico é inserido no “Number Slider”, conforme é mostrado na figura 61.

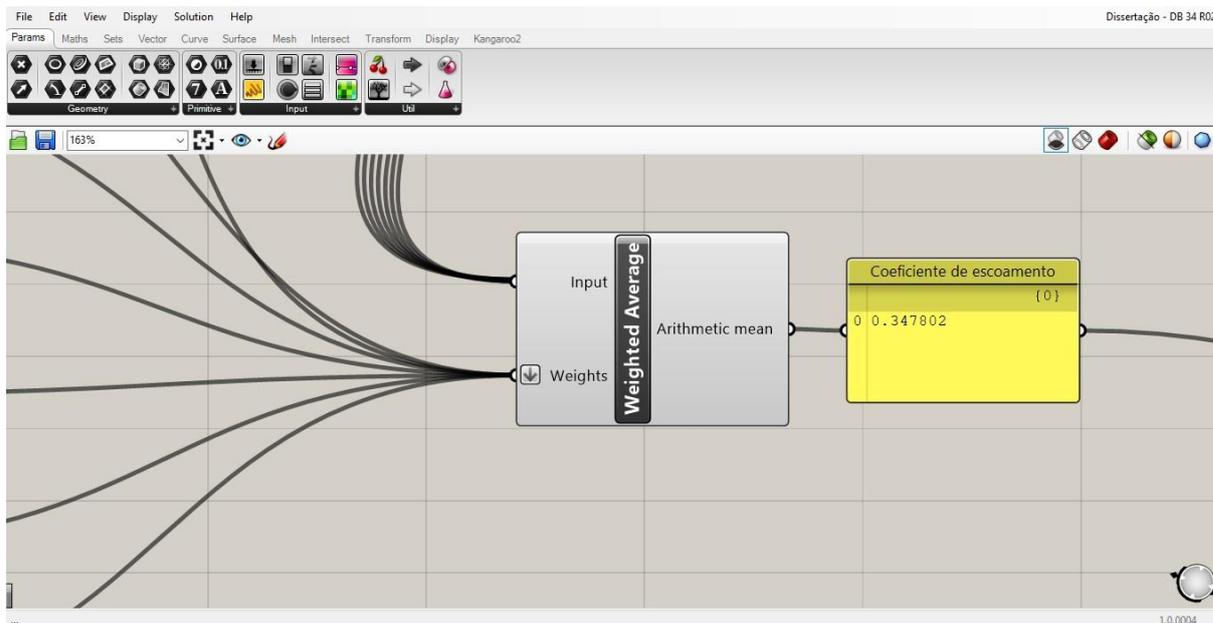
Figura 61 – Transferência de células vinculadas ao componente “Geometry” das áreas permeáveis para o componente “Geometry” das áreas impermeáveis.



Fonte: Autor, 2018.

Quando é inserido o número 338, ou seja, a porcentagem de crescimento da área urbanizada do bairro Barbosa Lage, no “Number Slider”, o valor do coeficiente de escoamento superficial da sub bacia automaticamente aumenta de 0,3429 para 0,3478, o que representa um aumento de 1,4% no total de escoamento superficial (Figura 62).

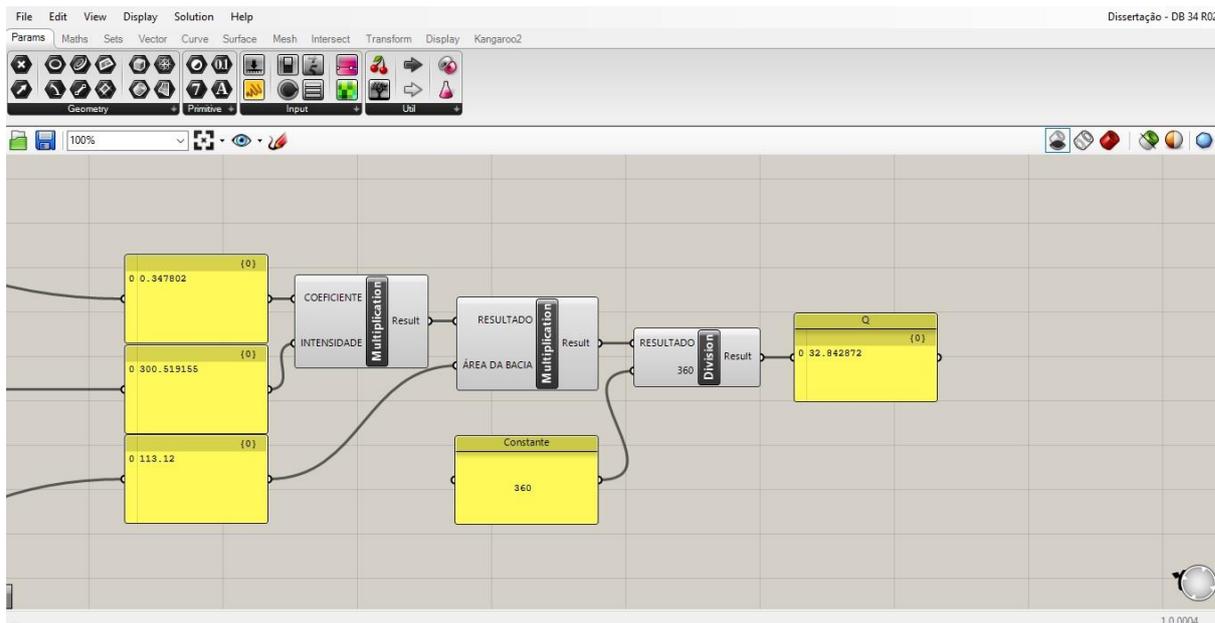
Figura 62 – Aumento do coeficiente de escoamento superficial.



Fonte: Autor, 2018.

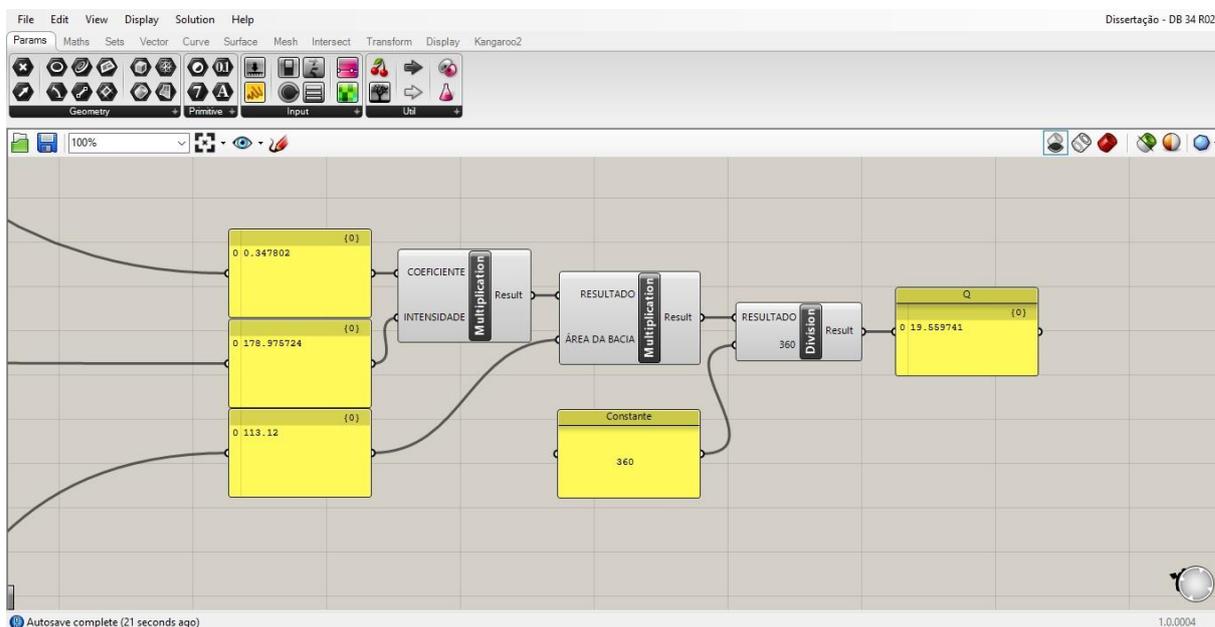
Com o aumento do valor do coeficiente de escoamento, o valor da vazão máxima automaticamente aumenta de $32,38\text{m}^3/\text{s}$ para $32,84\text{m}^3/\text{s}$ nos períodos de cheia (Figura 63), o que representa um aumento de 1,4%, número superior ao aumento da malha urbana, de 5,88%. Nos períodos de seca, a vazão máxima aumento de $19,28\text{m}^3/\text{s}$ para $19,55\text{m}^3/\text{s}$ (Figura 64), o que representa um aumento de 1,4%, número também superior ao do crescimento urbano da sub bacia.

Figura 63 – Aumento da vazão máxima nos períodos de cheia.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 64 – Aumento da vazão máxima nos períodos de seca.



Fonte: Autor, 2018.

Na tabela 12 são apresentados os valores do coeficiente de escoamento superficial e vazão máxima encontrados na simulação feita para o ano de 2011 e os valores encontrados para a simulação do crescimento da sub bacia BD-34 até o ano de 2025, assim como a diferença percentual entre os dois valores.

Tabela 12 - Valores de coeficiente de escoamento e vazão máxima encontrados na simulação da aplicação do asfalto poroso nas vias da sub bacia BD-34.

Simulação expansão sub bacia BD-34 (2011 a 2025)	
Coeficiente de Escoamento superficial	
Ano de 2011	0,3429
Ano de 2025	0,3478
Aumento	1,4%
Vazão Máxima – Períodos de cheia	
Ano de 2011	32,38m ³ /s
Ano de 2025	32,84m ³ /s
Aumento	1,4%
Vazão Máxima – Períodos de seca	
Ano de 2011	19,28m ³ /s
Ano de 2025	19,55m ³ /s
Aumento	1,4%

Fonte: Autor, 2018.

6.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES DO IMPACTO DA EXPANSÃO DAS ÁREAS URBANAS NAS SUB BACIAS

Constata-se que as simulações elaboradas apontam índices e valores importantes para a previsão do impacto da expansão das áreas urbanas na drenagem das sub bacias selecionadas, assim como oferecem diretrizes para o planejamento urbano do município. As simulações se mostraram, portanto, eficiente nesse sentido, e são desenvolvidas com rapidez, tendo em vista que a ferramenta encontra-se pronta, de forma que basta alterar o valor das células que alimentam os componentes “*Geometry*” que identificam as coberturas do solo. Para isso, basta identificar o coeficiente de crescimento da área urbana da bacia em questão.

7. CONCLUSÕES

Esta dissertação aborda a associação de conceitos paramétricos com a drenagem das águas pluviais urbanas. Optou-se por desenvolver uma ferramenta algorítmico-paramétrica capaz de fornecer dados relacionados aos índices de escoamento superficial e de vazão máxima de determinada bacia hidrográfica. Durante o processo de construção e avaliação da ferramenta, pode-se identificar pontos frágeis e pontos positivos da mesma.

Constatou-se a rapidez e facilidade na elaboração de simulações com o auxílio da ferramenta, sejam elas relacionadas à simulação da aplicação de determinados materiais como cobertura do solo ou simulações relacionadas ao impacto do crescimento urbano na drenagem de determinada sub bacia. Além disso, a ferramenta traz como contribuição e possibilidade de verificação do coeficiente de escoamento superficial e da vazão máxima em qualquer parte da sub bacia, e não somente na parte mais à jusante. As simulações e calibrações elaboradas nesse trabalho indicaram uma precisão aceitável da ferramenta, principalmente ao se considerar que os dados apontados pelo Plano de Drenagem de Juiz de Fora, elaborado pela Prefeitura Municipal de Juiz de Fora, utilizado aqui como parâmetro de comparação e calibração, também pode ter suas imprecisões.

O *grid* utilizado nas simulações para identificação da cobertura do solo, em determinados momentos se apresenta com 10x10m, em outros com 5x5m, e permite uma leitura das sub bacias de forma satisfatória. Esses valores podem ser alterados na construção da imagem no *software* AutoCAD, e quanto menor o tamanho das células, maior a resolução e, conseqüentemente, permite maior precisão na leitura.

Entre os pontos frágeis, pode-se destacar o processo trabalhoso de reconhecimento dos materiais de cobertura do solo, assim como sua reprodução no *software* AutoCAD, por meio de figuras geométricas denominadas aqui como células. Pretende-se em trabalhos posteriores tornar esse processo automatizado, conferindo ainda mais atratividade à ferramenta. Pretende-se também transforma-la em um programa executável, ou seja, um arquivo em que seu conteúdo deve ser interpretado como um programa por um sistema operacional.

De forma geral a ferramenta demonstra desempenho satisfatório e cumpre o papel proposto neste momento, possibilitando ainda que este trabalho se apresente como ponto de partida para pesquisas futuras.

8. REFERÊNCIAS

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

ALESSI, F.; KOKOT, P. J.; GOMES, J. **Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso.** *Da Vinci*, v. 3, n. 1, p. 139-156, Curitiba, 2006.

ARAÚJO, P.R.; TUCCI, C.E.M.; GOLDENFUM, J.A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial.** *RBRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos*, v. 5, n. 3, p. 21-29, jul./set 2000.

ASCE. *Design and construction of sanitary and storm sewers.* Manuals and Reports of Engineering Practice N° 37. New York. 1969.

BALDESSAR, S. M. N. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2012.

CAMPANA, N. A.; BERNARDES, R. S.; SILVA, J. A. **Controle qualitativo e quantitativo do escoamento pluvial urbanos com bacias de retenção.** *Revista Ambiente & Água*, v.2, n.3, 2007.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L.; MARQUES, D. M. **Avaliação da Evolução do Comportamento Quantitativo de Pavimentos Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial.** *RBRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos*, v. 18, n. 1, p. 263-273, jan/mar 2013.

CASTRO, W. **Plano de drenagem de Juiz de Fora.** Prefeitura Municipal de Juiz de Fora, 2011.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia científica.** São Paulo: Prentice Hall, 2002.

COELHO NETTO, A. L. **A interface Florestal-Urbana e os desastres naturais relacionados à água no maciço da Tijuca: desafios ao planejamento urbano numa perspectiva sócio-ambiental.** *Revista do Departamento de Geografia* 16, Rio de Janeiro, 2005. pp. 45-60.

CORMIER, N. S.; PELLEGRINO, P. R. **Infra-estrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana.** *Revista Paisagem e Ambiente* n. 25, São Paulo, 2008. pp. 125-142.

CHRISMAN, N. *Exploring Geographic Information Systems.* University of Washington, segunda edição. John Wiley & Sons, Inc, 2002.

FAUSTINO, J. *Planificación y gestión de manejo de cuencas*. Turrialba: CATIE, 1996.

FLORIO, W. **Modelagem Paramétrica, Criatividade e Projeto: Duas Experiências Com Estudantes de Arquitetura**. *Gestão e Tecnologia de Projetos*, São Carlos, v. 6, n. 2, p. 43-66, dezembro 2011.

FLÜGEL, W. *Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany*. *Revista Hydrological Processes*, Volume9, Issue 3-4. Abril/Maio, 1995.

FLORIO, W. **Contribuições do Building Information Modeling no processo de projeto em arquitetura**. *Anais do III Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção Civil*. Porto Alegre: Antac, 2007.

IBGE. **Cidades – Juiz de Fora**. 2015. Acesso em 02 out 2018: <http://cod.ibge.gov.br/7PF>

JUAN, A.; HUGHES, C.; FANG, Z.; BEDIENT, P. *Hydrologic Performance of Watershed-Scale Low-Impact Development in a High-Intensity Rainfall Region*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2017.

LAGIOS, K., NIEMASZ, J., REINHART, C. F. *Animated building performance simulation (abps) – linking rhinoceros/grasshopper with radiance/daysim*. Fourth National Conference of IBPSA-USA, Nova Iorque, 2010

LIMA, F. **MÉTRICAS URBANAS: Sistema (para)métrico para análise e otimização de configurações urbanas de acordo com métricas de avaliação de desempenho**. Tese (Doutorado em Urbanismo) - PROURB, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

MARTINS, H. G.; RIBEIRO, F. L.; COLCHETE FILHO, A. **A água em projetos de infraestrutura verde: O uso de jardins de chuva e lagoas de retenção**. 12º Encontro Nacional de Ensino de Paisagismo em escolas de Arquitetura e Urbanismo do Brasil – ENEPEA. Vitória, 2014.

MELLO, C. R., SILVA, A. M. **Hidrologia: Princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Universidade Federal de Lavras, Editora UFLA, Lavras, 2013.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Caxias do Sul, 2004.

PEREIRA, T. M. **Avaliação preliminar da capacidade de escoamento do trecho canalizado no terço superior do Córrego do São Pedro com auxílio da ferramenta HEC-RAS**. Trabalho Final de Graduação (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2ª ed., 2013.

RIBEIRO, C. B. M., REIS, G. R., LEAL, F. C. T. **SISHIDRO-JF – Sistema hidrológico para geração de vazões máximas na Região Norte de Juiz de Fora (MG)**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

RIBEIRO, M. J. P.; D’LAURO, A.; ANDRADE, D.; SAMPAIO, R. **Os impactos ambientais na bacia hidrográfica do Rio do Cobre em Salvador, Bahia: utilização do geoprocessamento na avaliação de impactos ambientais**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais ABRH, Bento Gonçalves, 2013.

RONQUIM, J.; CONCEIÇÃO, H. A.; SOARES, D. A.; SOARES, P. F. **Proposta de drenagem urbana de baixo impacto para a cidade de Palmas/PR**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

SANCHES, L. **Parametrização e sistemas generativos como apoio à tomada de decisões em projetos de arquitetura aplicados à legislação urbana da cidade de juiz de fora**. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

SANTOS, P. T.; SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, S. M.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S.; ANOTNINO, A. C. **Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 161-174, jan./mar. 2013.

SILVA, G. B. L. **Avaliação experimental da eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial**. 199f. 2006. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVA, R.C., AMORIM, L.M.E. **Urbanismo paramétrico: emergência, limites e perspectivas de nova corrente de desenho urbano fundamentada em sistemas de desenho paramétrico**. In V!RUS. N. 3. São Carlos: Nomads.usp, 2010. Disponível em: <http://www.nomads.usp.br/virus/virus03/submitted/layout.php?item=2&lang=pt>. Acessado em: 20/09/2018

SILVA, R. S.; MACHADO, P. J. O. **Inundações urbanas: o caso da micro-bacia hidrográfica do córrego Ipiranga – Juiz de Fora/MG**. Fórum Ambiental da Alta Paulista. V. 07, N. 02, 2011.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A.; TUCCI, C. E. **Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.17, n.2, 2012.

SOUZA, G. M.; ROMUALDO, S. S. **Inundações urbanas: a percepção sobre a problemática socioambiental pela comunidade do bairro jardim natal – juiz de fora (mg)**. XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal de Viçosa, 2009.

TEODORO, V. L.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J.; FULLER, B. B. **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. Revista UNIARA, n.20, 2007.

TUCCI, C. E. **Gerenciamento da Drenagem Urbana**. Artigo submetido à Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Ministério das Cidades, Global Water Partnership - World Bank, Unesco. 2005.

TUCCI, C. E. **Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.2, n.2, 1997.

VOLTOLINI, G. **Design paramétrico e modelagem algorítmica: os efeitos de seus conceitos e técnicas em acadêmicos de arquitetura**. Dissertação (mestrado em arquitetura), Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

XIE, Y.M., ZUO Z.H., HUANG, X., TANG, J.W., ZHAO, B., FELICETTI, P. ***Architecture and Urban Design through Evolutionary Structural Optimisation Algorithms***. Proceedings of the International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design, ALGODE Tokyo, 2011