

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

João Vítor Faustini Sonogo

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA
DIFERENTES MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE USO DO SOLO**

Porto Alegre

Mai 2021

JOÃO VÍTOR FAUSTINI SONEGO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA
DIFERENTES MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE USO DO SOLO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Joel Avruch Goldenfum

Coorientador: Benício Emanuel Omena Monte

Porto Alegre

Maio 2021

JOÃO VÍTOR FAUSTINI SONEGO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA
DIFERENTES MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DE USO DO SOLO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do Título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Banca Examinadora.

Porto Alegre, maio de 2021.

Prof. Joel Avruch Goldenfum

Ph. D. pelo Imperial College/University of London
Orientador

Benício Emanuel Omena Monte

Doutorando pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Joel Avruch Goldenfum (UFRGS)

Ph. D. pelo Imperial College/University of London

Benício Emanuel Omena Monte (UFRGS)

M. Sc. pela Universidade Federal de Alagoas

Alfonso Risso (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Fernando Dornelles (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Os métodos existentes para determinar hidrogramas em estudos hidrológicos podem causar subestimação ou superestimação nos resultados, devido a incertezas de parâmetros hidráulicos e hidrológicos. Objetivou-se avaliar se a adoção de métodos distintos de classificação do uso do solo pode causar diferenças relevantes nas estimativas de vazão de pico e de volume escoado em uma bacia hidrográfica urbana. Cinco mapas de uso e ocupação do solo foram feitos para a bacia do arroio Manteiga, localizada em São Leopoldo – RS, sendo dois classificados pelo método não supervisionado, dois pelo método supervisionado e outro classificado manualmente utilizando ferramentas de edição vetorial, todos gerados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Cada um destes forneceu dados para parametrização da *Curve Number* (CN), possibilitando a geração de hidrogramas de escoamento para cada um dos mapas gerados por meio da convolução de hidrogramas unitário triangular, considerando um hietograma de projeto desenvolvido pelo método dos blocos alternados com duração de chuva de 24 h e tempo de retorno de 25 anos. Verificou-se que, para este estudo, a diferença da vazão de pico e do volume escoado não foi superior a $\pm 3,10\%$ para as classificações não supervisionadas e supervisionadas em comparação com a manual. Isto indica que, possivelmente, os métodos não supervisionado e supervisionado possam ser utilizados em estudos hidrológicos em detrimento da classificação manual, pois requerem menos recursos para sua execução. Entretanto, outros estudos em outras bacias hidrográficas devem ser realizados para garantir que o método para classificação do uso do solo não interferirá nos resultados do escoamento superficial.

Palavras-Chave: Hidrograma. Vazão de pico. Volume escoado. Classificação supervisionada. Classificação não supervisionada.

ABSTRACT

The existent methods to determine hydrographs in hydrological researches may cause an underestimation or overestimation on the results, due to the uncertainty of hydraulic and hydrological parameters. The objective of this study is to evaluate if distinct methods of land use classification can cause relevant differences on the estimation of peak flow and runoff volume in an urban drainage basin. Five land use and coverage maps were elaborated for the Manteiga basin, located in São Leopoldo – RS, Brazil. Of these, two were classified through unsupervised method, two through supervised method and the other was classified manually through shapefiles editing tools, all generated in Geographic Information System (GIS) environment. Each of these provided data for the parameterization of the Curve Number (CN), allowing the elaboration of the surface runoff hydrographs for each map through the convolution of triangular unit hydrographs considering a hyetograph developed by the alternating block method with a 24-hour rainfall and a 25-year storm. It was verified that, for this study, the difference in the peak flow and in the runoff volume was not higher than $\pm 3,10\%$ for the unsupervised and supervised classification in comparison with the manual classification. This indicates that, possibly, unsupervised and supervised methods can be used in hydrological researches to the detriment of the manual classification, as they require less resources for their execution. However, other studies in different basins must be carried out to ensure that the usage of different methods of land use classification will not substantially interfere on the surface runoff results.

Keyword: Hydrograph. Peak flow. Runoff volume. Supervised classification. Unsupervised classification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da metodologia deste estudo.....	13
Figura 2 - Áreas urbana e rural da bacia hidrográfica do arroio Manteiga.	14
Figura 3 - Fluxograma para classificação não supervisionada.....	18
Figura 4 - Fluxograma para classificação supervisionada.....	20
Figura 5 - Fluxograma para classificação manual.....	22
Figura 6 - Modelo hidrograma unitário triangular.....	25
Figura 7 - Hidrograma unitário triangular adotado.....	26
Figura 8 - Modelo do método blocos alternados.....	28
Figura 9 - Hietograma de projeto.....	28
Figura 10 - Mapa São Leopoldo – RS.....	31
Figura 11 - Área de estudo e macrodrenagem do município.....	33
Figura 12 - Pedologia da área de estudo.....	34
Figura 13 - Resultado classificações não supervisionada integrada.....	36
Figura 14 - Amostras para classificação supervisionada.....	38
Figura 15 - Resultados classificações supervisionadas.....	39
Figura 16 - Resultado classificação manual.....	42
Figura 17 - Comparação das áreas das classes para cada método de classificação.....	43
Figura 18 - Hidrogramas	45
Figura 19 - Comparação entre hidrogramas das classificações manual e integradas.....	46
Figura 20 - Comparação entre hidrogramas das classificações manual e separadas.....	47
Figura 21 - Comparação entre hidrogramas das classificações não supervisionadas.....	49
Figura 22- Comparação entre hidrogramas das classificações supervisionadas.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores de CN para as diferentes classes.	23
Quadro 2 - Áreas e CN para classificação não supervisionada integrada.	37
Quadro 3 - Áreas e CN para classificação não supervisionada separada.	37
Quadro 4 - Áreas e CN para classificação supervisionada integrada.	39
Quadro 5 - Áreas e CN para classificação supervisionada separada.	40
Quadro 6 - Áreas e CN para classificação manual.	41
Quadro 7 - Comparativo de áreas entre métodos	43
Quadro 8 - Comparativo percentual do valor de CN com a classificação manual	44
Quadro 9 - Ordenadas do hidrograma unitário.	44
Quadro 10 - Comparativo percentual dos parâmetros hidrológicos com a classificação manual.	48
Quadro 11 - Comparativo percentual dos parâmetros hidrológicos entre classificações integradas e separadas.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo Principal	12
1.2.2	Objetivo Específico.....	12
1.3	Escopo.....	12
2	METODOLOGIA.....	13
2.1	Determinação das áreas urbana e rural	13
2.2	Classificação do Uso do Solo.....	14
2.2.1	Classificação Não Supervisionada.....	16
2.2.2	Classificação Supervisionada.....	19
2.2.3	Classificação Manual	21
2.3	Determinação do CN.....	22
2.4	Tempo de Concentração.....	23
2.5	Hidrograma Unitário	24
2.6	Curvas IDF.....	26
2.7	Hietograma de Projeto	27
2.8	Determinação dos Hidrogramas.....	29
2.9	Critério de Avaliação	30
3	ÁREA DE ESTUDO	31
3.1	Pedologia.....	33
4	RESULTADOS	35
4.1	Classificação do Uso do Solo.....	35
4.1.1	Classificação Não Supervisionada.....	35
4.1.2	Classificação Supervisionada.....	38
4.1.3	Classificação Manual	41

4.2	Hidrogramas.....	44
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	50
6	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Durante os séculos XX e XXI, constatou-se um aumento da população e das áreas urbanas no Brasil e ao redor do mundo. Conforme dados obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), desde 1900 a densidade demográfica no Brasil cresceu em todos os anos censitários, passando de 2,05 hab./km² em 1900 para 22,43 hab./km² em 2010.

Dentre as razões que levaram a este aumento populacional, constam: o aumento da expectativa de vida, a redução da taxa de mortalidade (CARVALHO, 2004). O início dessa mudança da área rural para área urbana deveu-se a revolução industrial, sendo um marco inicial para melhoria na qualidade de vida e do desenvolvimento tecnológico. Entretanto, esse fenômeno desencadeou uma relação de desequilíbrio entre o homem e a natureza por conta da limitação de recursos naturais presentes no planeta. (FRIEDE, 2020).

O crescimento populacional caracterizou-se pela irregularidade ou até mesmo inexistência de legislações municipais específicas para ordenamento da expansão do espaço urbano, tais como planos diretores e normas de loteamentos. Nos casos em que estas legislações tiveram participação no desenvolvimento das cidades, grande parte dos planos não abordavam aspectos ambientais e de drenagem urbana, assim como seus possíveis efeitos (CRUZ e TUCCI, 2008).

O desenvolvimento urbano atrofiado é um dos motivos do aumento da impermeabilização do solo. De acordo com Lucas *et al.* (2010), este fator acarreta mudanças significativas no regime hídrico e do escoamento superficial, afetando diretamente fatores como vazão de pico, volume escoado e tempo de concentração da bacia hidrográfica para diferentes eventos pluviais.

Em virtude disso, observa-se que ao longo do tempo, aumentou a demanda por projetos e planos de drenagem urbana que proponham alternativas para mitigar as ocorrências de inundações e alagamentos. Além disso, conforme Cunha *et al.* (2015), é importante para execução destes projetos, que os estudos hidrológicos que os compõe, garantam eficiência e segurança hidráulica do sistema. Isso se converte em viabilidade de execução das medidas apresentadas.

Apesar disso, diversas são as variáveis que formam este tipo de estudo, sendo os principais: área da bacia hidrográfica em questão, tipo e ocupação do solo, relevo e precipitação. Por conta da natureza e variabilidade das características supracitadas, análises hidrológicas apresentam incertezas na sua implementação, e a escolha da metodologia adotada para a sua

realização devem se adequar as características intrínsecas a área de estudo e a precariedade ou inexistências de dados, fatores determinantes nos parâmetros de um modelo hidrológico.

Dentre os parâmetros que podem influenciar significativamente nos resultados do escoamento superficial em um modelo chuva-vazão teórico, é o parâmetro “Curva Número” (CN), desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (*Soil Conservation Service – SCS*), considerado o de maior impacto na vazão de escoamento (ALLASIA e VILLANUEVA, 2007). Para cada bacia hidrográfica, este parâmetro é determinado em função do uso e ocupação do solo, taxa de infiltração e capacidade de armazenamento dos diferentes tipos de solo. Sendo assim, a identificação e análise dos tipos de solos, como o seu atual uso e ocupação na região estudada, se tornam etapas significativas para a determinação de parâmetros relacionados ao escoamento superficial.

O rápido avanço de sensoriamento remoto nos últimos 40 anos aumentou a variedade de tecnologias existentes, assim como a quantidade e rapidez para coleta de informações (CUI *et al.*, 2018). Isto permitiu não somente avaliar o cenário atual como também avaliar a progressão a partir de cenários passados e projetar cenários futuros com o auxílio de SIGs, que propiciam a criação de banco de dados e facilitam a manipulação de uma grande quantidade de informações, a fim de representar de uma melhor forma a realidade (MACHADO *et al.*, 2003).

Desta forma, métodos disponíveis para o mapeamento do uso e ocupação do solo aumentaram e ficaram mais acessíveis. Sendo assim, avaliar se a adoção de diferentes métodos para classificação do uso do solo pode ocasionar diferenças, quanto a estimativas do escoamento superficial, permite a escolha do modelo mais adequado para o estudo a ser realizado.

1.1 Justificativa

Imprecisões na classificação do uso do solo podem gerar resultados subestimados ou superestimados no escoamento superficial. A subestimação impacta na segurança e eficácia do projeto, e a superestimação pode acarretar elevados custos ou até mesmo a inviabilidade financeira para execução. Ainda, a demanda por classificações mais precisas em trechos urbanizados é maior, considerando que a maior concentração da população se encontra em áreas urbanas e que diferenças substanciais podem causar danos à sociedade.

Entretanto, a busca por resultados mais próximos da realidade pode requisitar um aumento de pessoas, tempo e recursos financeiros para execução. Assim, métodos mais ágeis e que não alterem significativamente os resultados podem ser alternativas viáveis. Portanto, a

análise quantitativa das diferenças entre diferentes métodos para a classificação do uso dos solos, para uma determinada área de estudo, permite à equipe responsável a adoção da técnica com viabilidade financeira e temporal aceitável para sua execução.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho distinguem-se em principal e específicos e são descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo Principal

Analisar se a adoção de métodos distintos de classificação do uso do solo gera diferenças relevantes nas estimativas de vazão de pico e volume escoado em uma bacia hidrográfica em ambiente urbano.

1.2.2 Objetivo Específico

Avaliar se a vazão de pico e o volume escoado alteram-se substancialmente quando as áreas urbanas e rurais de um determinado município são classificadas em separado e se a adoção de métodos distintos de classificação de uso do solo ocasiona possíveis diferenças.

1.3 Escopo

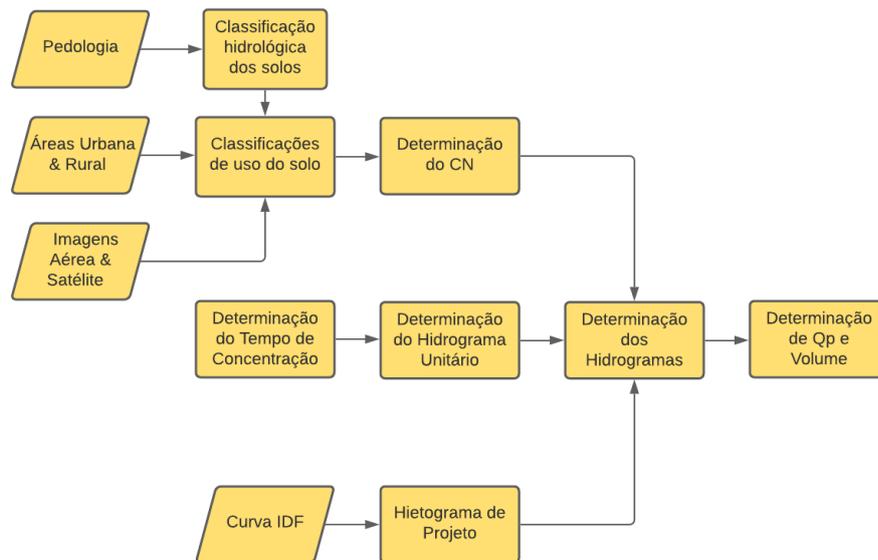
O estudo será realizado por meio do uso de imagens aéreas e de satélite disponibilizadas por órgãos públicos. Além destes, serão utilizados recursos computacionais para processamento dos dados e modelos teóricos de hidrologia. Ademais, este estudo estará limitado às condições destes materiais, às informações fornecidas, às ferramentas adotadas e à área de estudo em questão.

2 METODOLOGIA

Para determinação da vazão de pico e do volume escoado serão elaborados mapas de uso do solo utilizando três métodos de classificação: não supervisionada, supervisionada e manual. Destes, serão obtidos valores de CN que serão utilizados para a determinação do hidrograma de escoamento superficial de cada mapa gerado. Assim, cada método de classificação será avaliado a partir da variação do valor CN e dos resultados da vazão de pico e volume escoado relacionados.

Outros parâmetros e variáveis hidrológicas, como curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF), hietograma de projeto, tempo de concentração e hidrograma unitário, serão mantidos constantes para todos os casos desenvolvidos. Com isso, os procedimentos realizados seguirão o fluxograma representado na Figura 1, sendo que cada passo será melhor detalhado ao longo deste item.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia deste estudo.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

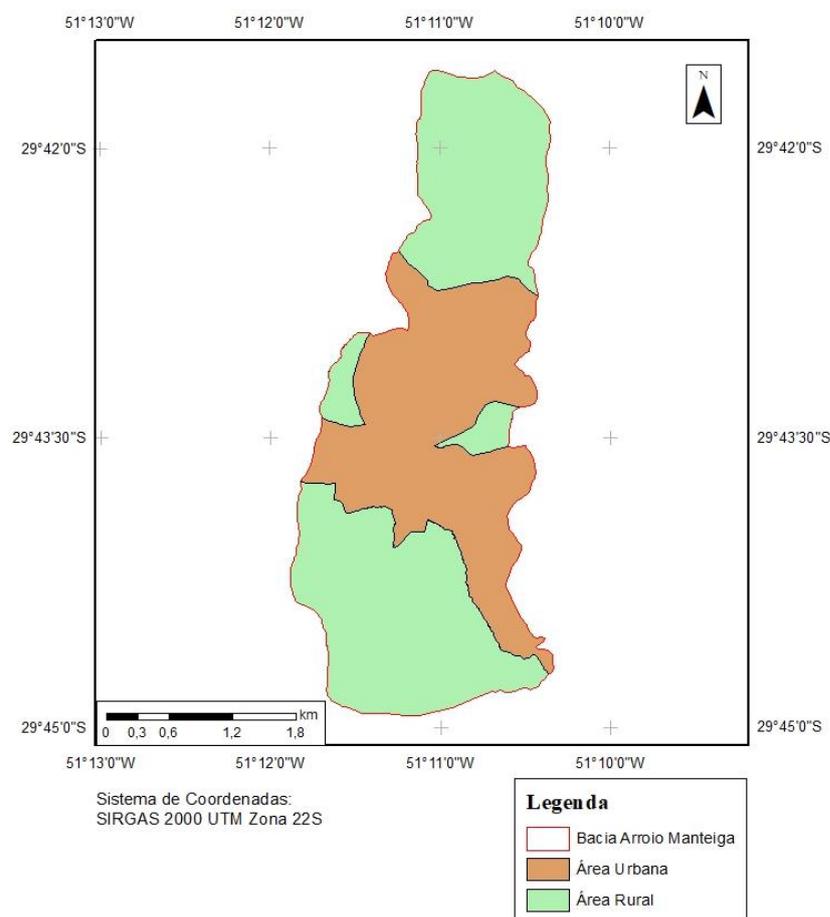
2.1 Determinação das áreas urbana e rural

Partindo da premissa de que os métodos computacionais de classificação realizam seus procedimentos baseados na resposta espectral contida nas diferentes camadas que compõe a cena representada em uma imagem e que certas respostas similares possam ser encontradas em diferentes classes, é esperado que alguns *pixels* de diferentes classes sejam classificados como uma só. Por conta disso, será avaliado se a classificação das áreas urbanas e rurais quando

classificadas em separado resultarão em diferenças substanciais nos hidrogramas para os respectivos métodos.

Para divisão das áreas urbanas e rurais da bacia a ser estudada, fez-se uso do levantamento das sub-bacias do arroio Manteiga (localizada em São Leopoldo-RS) realizado para o município e considerou-se aquelas que não possuíssem concentrações de residências e vias pavimentadas como áreas rurais. A partir disso, os métodos de classificação computacionais serão replicados para as áreas urbana e rural (Figura 2) separadamente, permitindo avaliar se a separação acarreta diferenças na vazão de pico e no volume escoado.

Figura 2 - Áreas urbana e rural da bacia hidrográfica do arroio Manteiga.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

2.2 Classificação do Uso do Solo

Imagens obtidas por meio de instrumentos de sensoriamento remoto podem ser interpretadas a fim de se extrair informações contidas nelas por meio de interpretação visual ou processamento digital. Atualmente, ambas as práticas são possíveis de serem utilizadas para a

classificação de uso e ocupação do solo, entretanto possuem custos diferentes para sua execução.

A classificação visual pode ser realizada utilizando mapas digitais ou impressos e são interpretadas a partir da análise visual da imagem. Podem ter alto custo para sua execução por requerer mais tempo, profissionais capacitados e, em alguns casos, visitas de campo para complementar a análise da imagem (BAKKER *et al.*, 2009).

Já as classificações digitais são realizadas por meio do processamento digital da imagem utilizando programas e modelos que interpretam a resposta espectral dos elementos presentes. Os dados são agrupados seguindo modelos estatísticos, sendo os mais comuns os métodos de máxima verossimilhança e mínima distância para média. Ainda, por conta da classificação ser automatizada, este tipo de interpretação requer que seus resultados sejam validados (BAKKER *et al.*, 2009).

A etapa de classificação consiste em determinar a ocupação do solo da bacia do arroio Manteiga por meio de métodos supervisionados e não supervisionados disponíveis no software *ArcGIS* e comparar os hidrogramas resultantes dessas com o hidrograma de uma classificação realizada manualmente. Os métodos computacionais serão então reaplicados nas áreas urbanas e rurais da bacia de maneira separada.

Os dados utilizados para esta etapa consistem em imagens ortorretificadas resultantes de um levantamento aéreo realizado em 2016 para o município de São Leopoldo com resolução espacial de 20 cm e 3 bandas espectrais (vermelho, verde e azul). Por conta do fato deste levantamento ter sido realizado principalmente nas áreas urbanas da cidade, partes do município não estão contempladas nas imagens, por isso, imagens do satélite *Rapid Eye* obtidas no ano de 2014 com resolução espacial de 5 m foram utilizadas de modo complementar para abranger toda a área de estudo. Para as imagens do *Rapid Eye*, adotou-se a composição da imagem por meio das bandas 3, 2 e 1 (RGB) que correspondem as faixas espectrais do vermelho, verde e azul, respectivamente. As bandas 4 e 5, que correspondem ao infravermelho limítrofe e ao infravermelho próximo, foram consideradas nas classificações não supervisionada e supervisionada além das outras três já citadas.

A classificação busca categorizar a ocupação do solo em 5 diferentes classes, baseadas na definição feita pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture – USDA*, 2002) que classifica o uso do solo, de modo geral, como as áreas cultivadas e/ou com solo exposto, áreas de pasto, grama e/ou vegetação rasteira, matas e áreas não cultiváveis, como áreas impermeáveis, por construções e rodovias, e corpos

hídricos. Como a bacia hidrográfica deste estudo não apresenta áreas significativas que estejam sendo cultivadas, optou-se pela separação das seguintes classes:

- a) Mata – Compreende as áreas que possuem majoritariamente conjunto de árvores e plantas de grande porte;
- b) Vegetação rasteira – Áreas que predominem grama e plantas de baixo porte;
- c) Solo exposto – Regiões onde a camada de solo esteja descoberta e trechos de vias públicas não pavimentadas;
- d) Área construída – Compreende as áreas ocupadas por construções, vias públicas pavimentadas e trechos de cobertura do solo impermeável;
- e) Água – Todos os corpos d’água presentes na bacia, por exemplo, rios, arroios, lagos, canais artificiais, dentre outros.

2.2.1 Classificação Não Supervisionada

A classificação não supervisionada será realizada a partir da ferramenta “*Iso Cluster Unsupervised Classification*” (Classificação Não Supervisionada Iso Cluster) disponível na barra de ferramentas (*toolbar*) de classificação de imagem do programa computacional *ArcGIS*. O procedimento de classificação é realizado aglomerando *pixels* da imagem a partir do método estatístico de máxima verossimilhança e de “*Iso Cluster*”, que agrupa células das imagens que possuem respostas espectrais semelhantes.

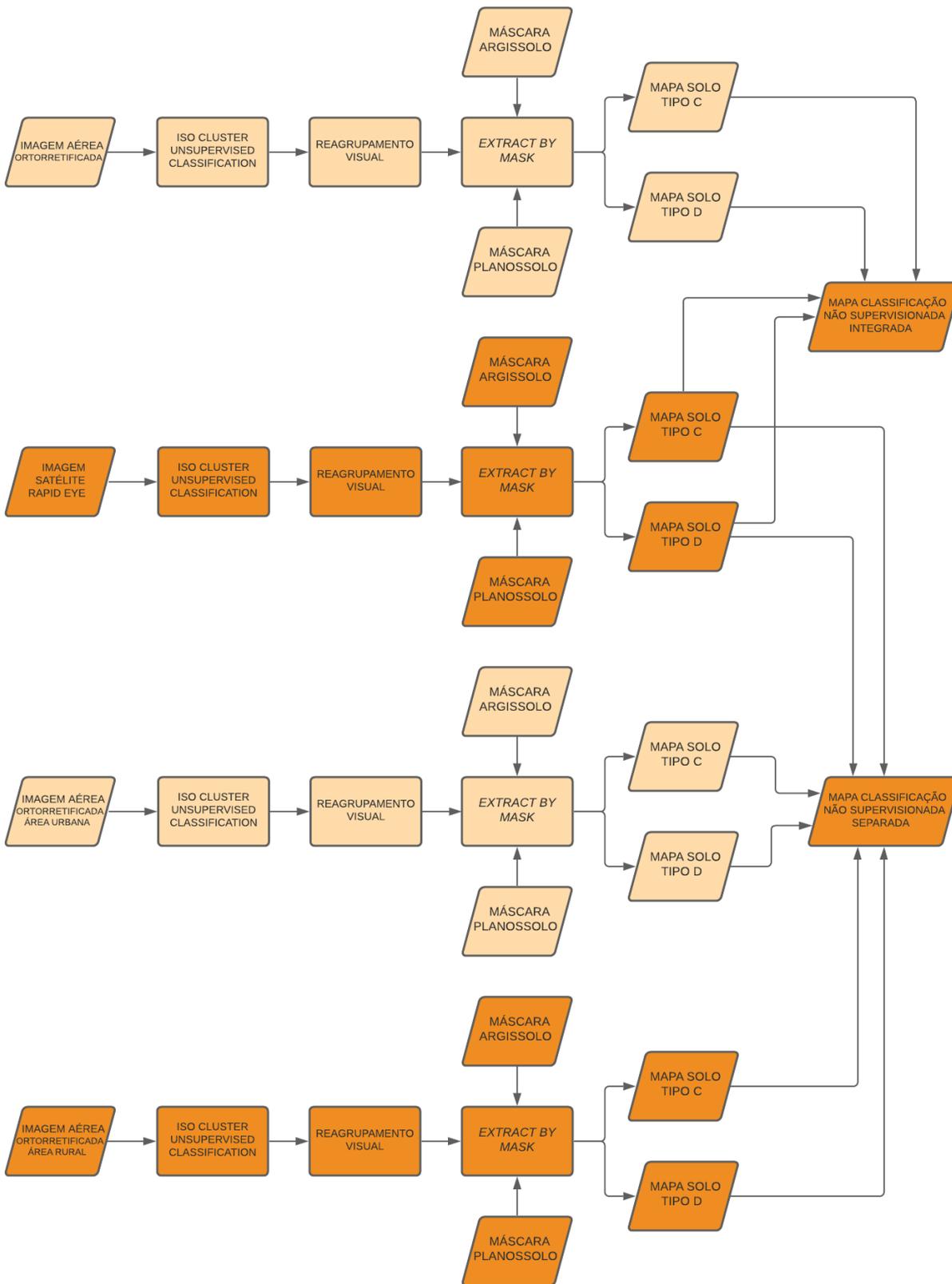
A sintaxe da ferramenta requer, além da imagem a ser classificada, a informação de 3 dados para sua execução: número de classes, tamanho mínimo da classe e intervalo da amostra. O número de classes é a única variável que deve ser informada pelo usuário, já o tamanho mínimo da classe e o intervalo da amostra podem ser alterados, mas que por padrão são adotados 20 e 10, respectivamente. Neste trabalho, o número de classes adotados para a realização deste procedimento foi estabelecido empiricamente como 60, tanto para as imagens aéreas ortorretificadas quanto para a imagem do satélite *Rapid Eye*.

Os 60 grupos a serem gerados serão então reclassificados visualmente seguindo as 5 classes propostas no item 2.2. Os grupos que possuírem células pertencentes a mais de uma classe serão classificadas de acordo com aquela que representa o maior número de *pixels* do respectivo grupo. Variações na classificação podem ocorrer nesta etapa de acordo com a avaliação dos elementos por diferentes operadores, porém, a influência deste fator pode não ser expressiva se considerar que a classificação seja executada por um usuário capacitado.

Ao fim deste procedimento, o modelo gerado será um arquivo do tipo matricial contendo 60 grupos categorizados segundo as 5 classes propostas e contendo a contagem de células contidas em cada grupo. Conforme dito anteriormente, a imagem aérea possui resolução espacial de 20 cm e a imagem do satélite *Rapid Eye* de 5 m, isso significa que cada *pixel* destas representam 0,04 m² e 25 m², respectivamente. Com isso, é possível determinar a área de cada classe multiplicando a quantidade de células pela área que cada célula representa.

Em seguida, para determinar as regiões que contém solos tipos C e D, fez-se uso da ferramenta de geoprocessamento “*Extract by Mask*” (Extração por Máscara), utilizando como máscara os arquivos vetoriais de representam as zonas que compreendem argissolos e planossolos na bacia hidrográfica. O resultado desta operação divide o mapa já classificado em dois, um para cada tipo de solo. A Figura 3 apresenta o fluxograma para a classificação não supervisionada.

Figura 3 - Fluxograma para classificação não supervisionada.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

2.2.2 Classificação Supervisionada

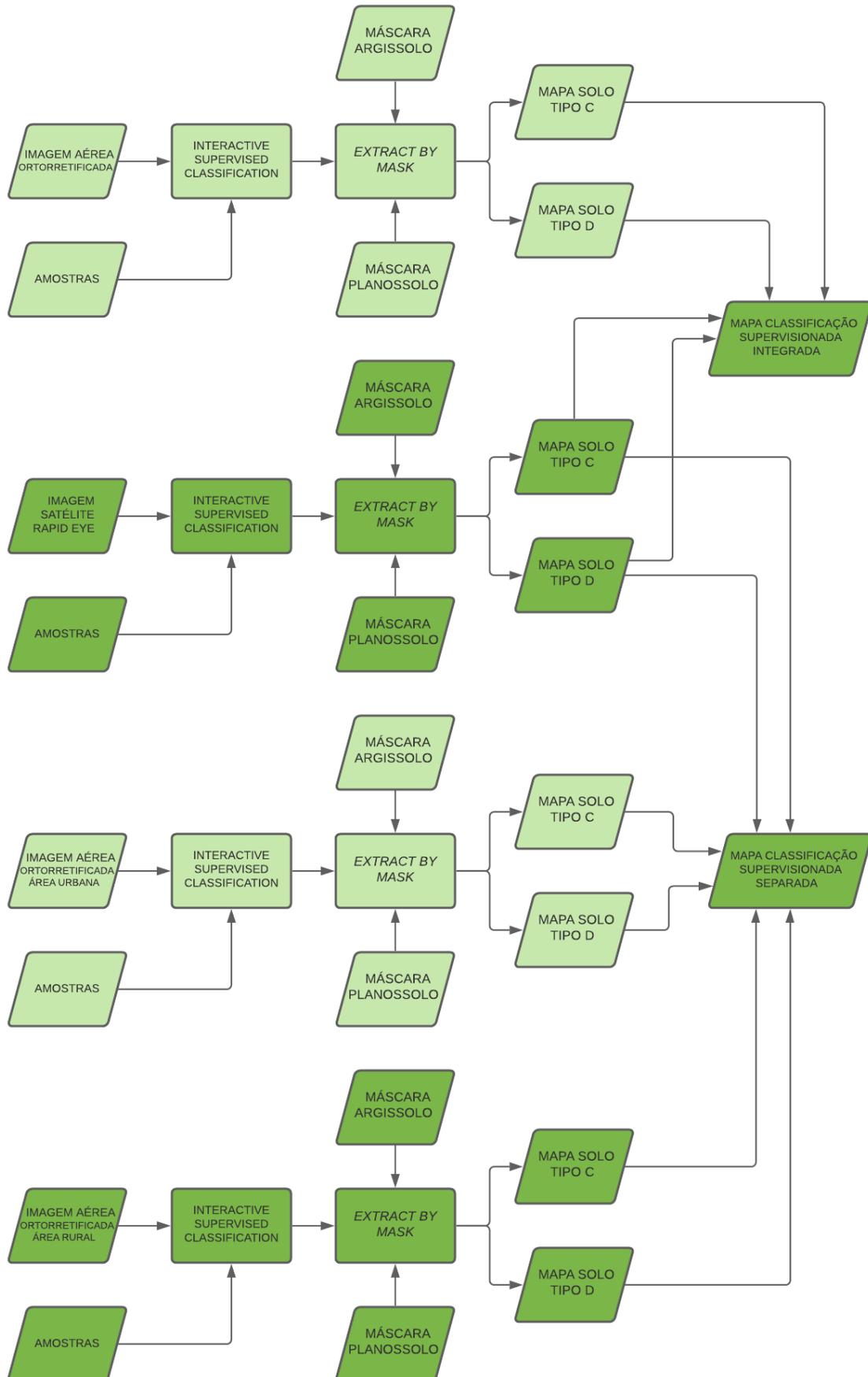
A ferramenta do *ArcGIS* utilizada para esta etapa será a “*Interactive Supervised Classification*” (Classificação Supervisionada Interativa). Assim como na classificação não supervisionada, a classificação supervisionada também é realizada a partir de modelo estatístico de máxima verossimilhança da resposta espectral das células da imagem a ser analisada. O que diferencia estes dois métodos é que o segundo é executado a partir de amostras de *pixels* fornecidas pelo usuário que representem cada uma das classes. Simplificando, isso significa que a classificação supervisionada é realizada de modo que programa recebe dados relativos às cores presentes (representadas computacionalmente como um dado numérico associado a resposta espectral) antes de executar o processo computacional da classificação, enquanto a não supervisionada a classificação precede a interação do usuário com a imagem.

Para que as amostras fornecidas ao modelo possam representar da melhor maneira possível a classe da qual pertencem, é de suma importância que estas sejam coletadas ao longo de toda a imagem e estejam homoganeamente espalhadas ao longo de toda sua área. Além disso, é necessário que cada amostra contenha apenas células pertencentes a uma única classe, e que amostras de diferentes classes não ocupem o mesmo espaço.

Ressalta-se que, assim como na classificação não supervisionada, é esperado que células pertencentes a diferentes classes sejam agrupadas em uma mesma classe devido à proximidade de suas respostas espectrais. Nos casos em que isto ocorrer não serão realizadas correções dos resultados obtidos, em vista de que se avalie o método sem interferências do usuário além das que são requisitadas pelo próprio modelo e programa.

Os processos de geoprocessamento realizados ao final da classificação não supervisionada são repetidos nesta etapa também. Com isso, são obtidos, de maneira análoga, as áreas das classes e dos respectivos tipos de solo. A Figura 4 apresenta o fluxograma para a classificação supervisionada.

Figura 4 - Fluxograma para classificação supervisionada.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

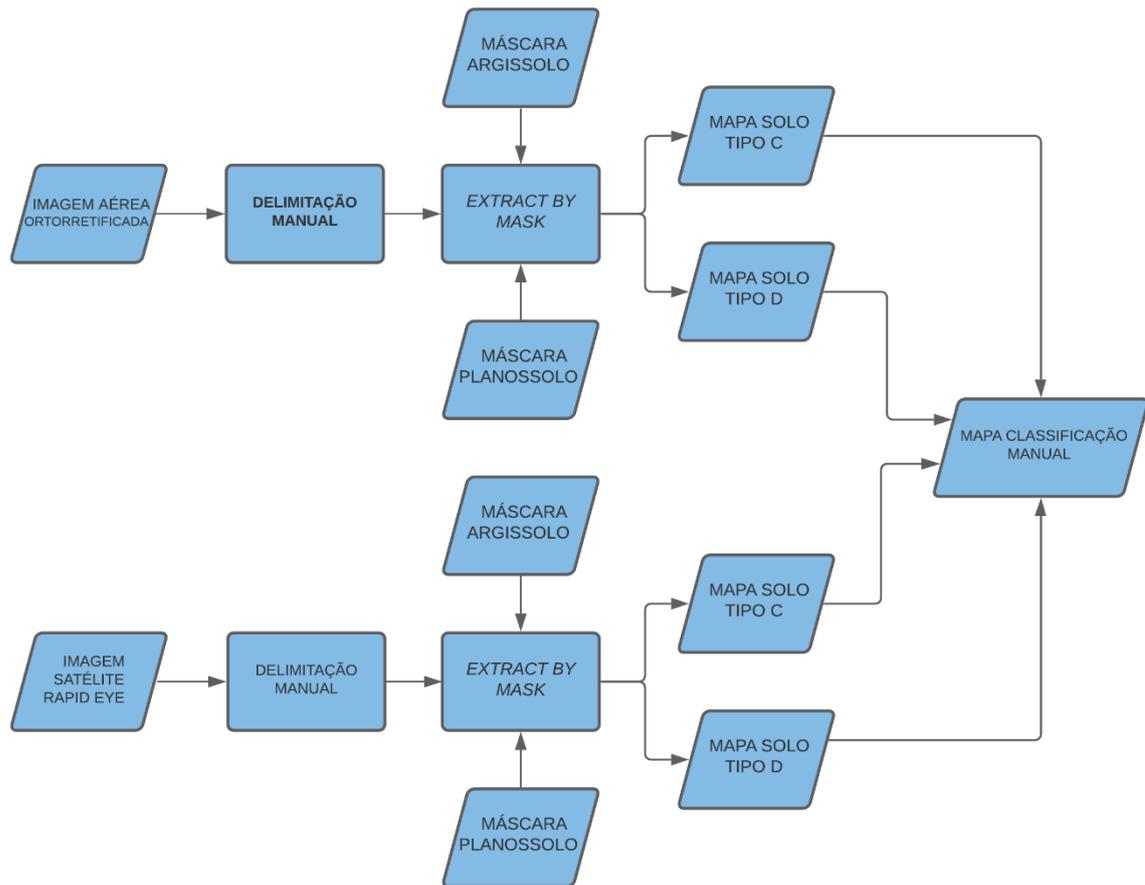
2.2.3 Classificação Manual

A classificação manual é executada a partir da análise visual das imagens e, por meio de ferramentas de geoprocessamento para criação e edição de arquivos vetoriais, delimita-se as regiões correspondentes a cada uma das classes. Baseado na explicação de Bakker *et al.* (2009), a classificação realizada pela análise visual deve ser realizada avaliando sete componentes da imagem para sua interpretação e classificação: tonalidades, texturas, padrões, formatos, tamanhos, alturas e localização dos elementos presentes na imagem.

O resultado desta etapa será um arquivo vetorial composto de diversos elementos. Para se facilitar a determinação das áreas, aplica-se a ferramenta “*Dissolve*” (Dissolver) para agrupar os elementos de mesma classe em um único grupo, inserindo como atributo agrupador as classes. A função retorna novamente um arquivo vetorial com apenas 5 elementos, cada um representando uma classe.

Por fim, aplica-se a ferramenta “*Intersect*” (Interseção) entre os mapas obtidos nesta etapa com os arquivos vetoriais de representam as zonas que compreendem argissolos e planossolos na bacia hidrográfica. Com isso, são obtidos dois arquivos vetoriais correspondendo a classificação manual para cada tipo de solo. A partir destes, são obtidas as áreas correspondentes por meio da função disponível no *ArcGIS* adotando o sistema de coordenadas projetadas cartesianas Universal Transversa de Mercator (UTM) com referencial geodésico SIRGAS 2000 zona 22S. A Figura 5 apresenta o fluxograma para a classificação manual.

Figura 5 - Fluxograma para classificação manual.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

2.3 Determinação do CN

Atualmente, o método CN desenvolvido pelo SCS tem resultado em superdimensionamento de estruturas hidráulicas em bacias hidrográficas brasileiras (CUNHA *et al.*, 2015), o que acarreta custos elevados para execução destes projetos. Em contrapartida, este modelo tem sido usualmente adotado para determinação de vazões de pico e volumes de escoamento superficial devido sua simplicidade, praticidade e versatilidade.

A determinação do valor de CN para os 5 mapas obtidos através das classificações descritas ao longo do item 2.2 se deu através de média ponderada, cujo atributo de ponderação adotado é a área correspondente a cada uma das 5 classes. A Equação 1 apresenta a formulação para determinação dos mapas.

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot CN_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

Onde:

n é o número de classes;

A_i é a área correspondente a classe “i”, em km²;

CN_i é o coeficiente CN adotado para a classe “i”.

De acordo com a especificação proposta pela USDA (2004), os tipos de ocupação que mais se adequam para as classes consideradas nesse projeto são:

- a) Mata com boa condição hidrológica (*Woods - Good*) para classe “Mata”;
- b) Grama com boa condição hidrológica (*Pastures, grassland or range continuous forage for grazing – Good*) para classe “Vegetação Rasteira”;
- c) Solo exposto (*Fallow – Bare Soil*) para classe “Solo Exposto”;
- d) Área Impermeáveis (*Impervious Areas – Paved parking lots, roofs, driveways, etc.*) para classes “Área Construída” e “Água”;

O Quadro 1 apresenta os valores de CN adotadas para as classes de ocupação indicados pela USDA (2004).

Quadro 1 - Valores de CN para as diferentes classes.

CLASSE	C	D
Mata	70	77
Vegetação Rasteira	74	80
Solo Exposto	91	94
Água	98	98
Área Construída	98	98

(Fonte: USDA, 2004.)

2.4 Tempo de Concentração

Segundo Silveira (2005), o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica pode ser definido como o tempo necessário para que toda a área da bacia esteja contribuindo com escoamento superficial direto em seu exutório e que surge da hipótese que este se comporte de maneira linear ao longo de todo o trajeto, desconsiderando efeitos naturais como o armazenamento. De maneira análoga, Collischonn e Dornelles (2015) o definem como “o tempo de viagem da gota de chuva que atinge a região mais remota da bacia [...] até o momento em que atinge o exutório”. Assim, é possível afirmar que o tempo de concentração é um parâmetro intrínseco à bacia em questão, de maneira que este varia de acordo com as

características físicas do local, tais como área, declividade, comprimento do canal principal, dentre outros.

Devido à complexidade para definição de um modelo matemático que defina este parâmetro, diversos métodos foram propostos ao longo dos anos, de modo que cada um apresenta suas peculiaridades e limitações quanto a aplicabilidade. Por conta disso, a escolha do método a ser adotado deve se adequar à área de estudo, assim, Silveira (2015) sugere que o método de Carter (Equação 2) é o mais indicado para bacias urbanas com área até 11 km².

$$T_c = 0,0977 * L^{0,6} * S^{-0,3} \quad (2)$$

Onde:

T_c é o tempo de concentração da bacia, em h;

L é o comprimento do canal principal, em km;

S é a declividade média do canal principal, em m/m;

Por meio de ferramentas de geoprocessamento, a partir do software *ArcGIS* e de dados fornecidos pela Prefeitura de São Leopoldo, obteve-se um comprimento do canal principal de aproximadamente 4,79 km e uma diferença de cota entre sua nascente e exutório de aproximadamente 28,57 m, o que resulta em uma declividade média de 0,006 m/m. Aplicando a Equação 2 com estes dados, o tempo de concentração para a bacia de estudo é de aproximadamente 71 minutos.

2.5 Hidrograma Unitário

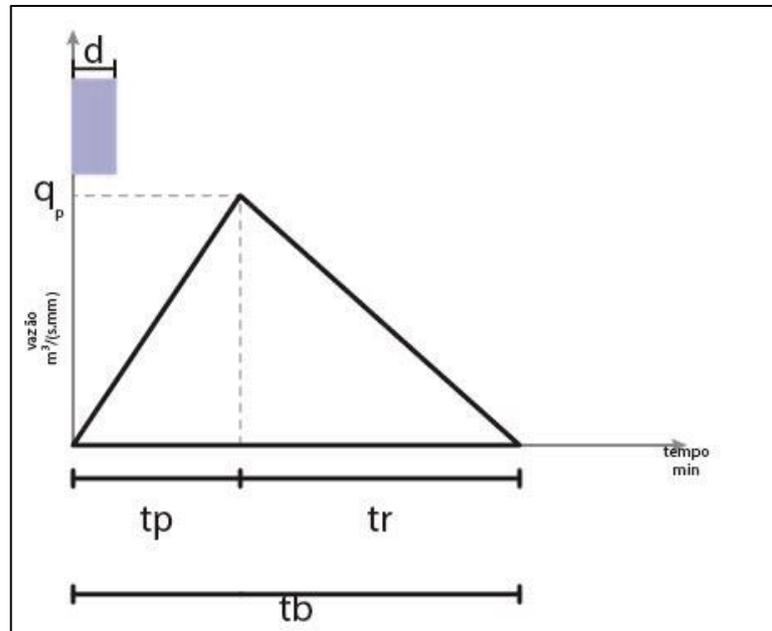
Hidrogramas, de um modo geral, são representações gráficas da variação da vazão em função do tempo. Por sua vez, hidrogramas unitários são representações das respostas da vazão de escoamento superficial para ocorrências de chuva unitária (geralmente 1 mm ou 1 cm) para um certo tempo de duração. De acordo com a USDA (2007), estes se baseiam em três princípios:

- Invariância: Para uma dada bacia e um dado evento pluvial, o hidrograma é constante;
- Sobreposição: O hidrograma para sucessivos eventos pode ser obtido através da sobreposição de seus hidrogramas;
- Proporcionalidade: As ordenadas do hidrograma são proporcionais a intensidade da chuva efetiva.

Para este trabalho, fez-se uso do método Hidrograma Unitário Triangular (HUT) desenvolvido pelo SCS. O modelo sugere que o hidrograma de um evento pluvial pode ser

simplificado no formato de um triângulo em função do tempo de duração da chuva e da área e tempo de concentração da bacia. A Figura 6 exemplifica o modelo proposto pelo SCS:

Figura 6 - Modelo hidrograma unitário triangular.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Os parâmetros que compõe o hidrograma são determinados a partir das Equações 3, 4, 5 e 6, apresentadas a seguir.

$$t_p = 0,6 * Tc + \frac{d}{2} \quad (3)$$

$$t_r = 1,67 * t_p \quad (4)$$

$$t_b = t_p + t_r \quad (5)$$

$$q_p = \frac{0,208 * A}{t_p} \quad (6)$$

Onde:

t_p é o tempo de pico do hidrograma unitário, em h;

Tc é o tempo de concentração da bacia, em h;

d é a duração da chuva, em h;

t_r é o tempo de recessão do hidrograma unitário, em h;

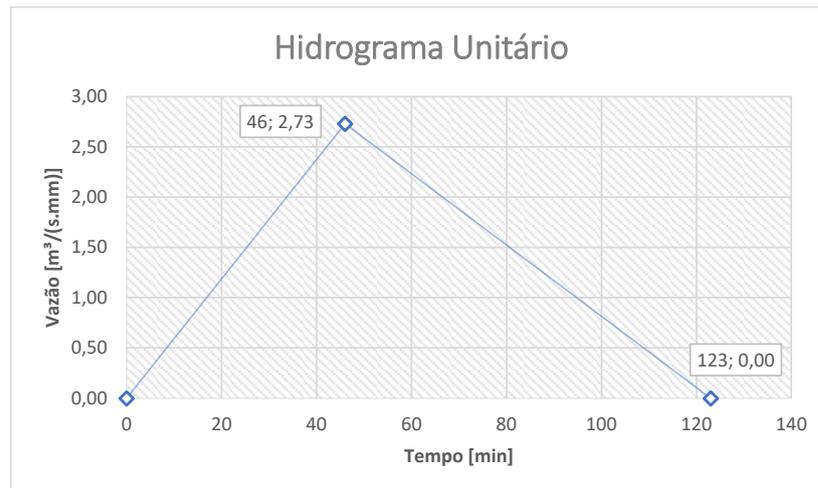
t_b é o tempo de base do hidrograma unitário, em h;

q_p é a vazão de pico do hidrograma unitário, em $m^3/(s.mm)$;

A é a área da bacia hidrográfica, em km^2 ;

Utilizando o tempo de concentração encontrado no item anterior e adotando um tempo de duração de chuva de 5 minutos, obteve-se um tempo de pico “ t_p ” e um tempo de recessão “ t_r ” de aproximadamente 46 e 77 minutos, respectivamente, o que resultou num tempo de base de 123 minutos. Já a vazão de pico para este hidrograma unitário é de aproximadamente $2,73 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{mm})$. A Figura 7 representa o HUT desenvolvido para este trabalho.

Figura 7 - Hidrograma unitário triangular adotado.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

2.6 Curvas IDF

A curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) é uma equação e/ou conjunto de curvas que compõe um gráfico que relacionam as três variáveis que a denominam: Intensidade máxima da chuva, tempo de duração do evento e sua frequência de excedência (tempo de recorrência). Em projetos de drenagem urbana, estas são usualmente utilizadas para a determinação da “chuva de projeto”, o que permite estimar outros parâmetros relacionados a estudos hidrológicos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

Curvas IDF são geralmente obtidas por meio de análise estatística de longas séries de dados (pelo menos 15 anos) coletados para uma determinada estação pluviométrica (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). Por conta disso, estas representam apenas as características do determinado local em que os dados foram coletados, conseqüentemente, para cada projeto deve-se adotar a que melhor representa a localidade em que se está analisando, ou seja, preferencialmente com dados coletados na própria área de estudo.

De maneira oficial, São Leopoldo não possui uma curva IDF recomendada para determinação da chuva de projeto para estudos realizados no município. O estudo de Gonçalves (2011) equacionou curvas IDF para todos os municípios brasileiros com população acima dos

100.000 habitantes, a partir de estimativas de precipitação por satélite. Neste estudo optou-se pela adoção do resultado obtido para São Leopoldo, que é representado pela Equação 7:

$$I = \frac{3022T_r^{0,16}}{(t+23,5)^{0,91}} \quad (7)$$

Onde:

I é intensidade da chuva, em mm/h;

Tr é o tempo de retorno, em anos;

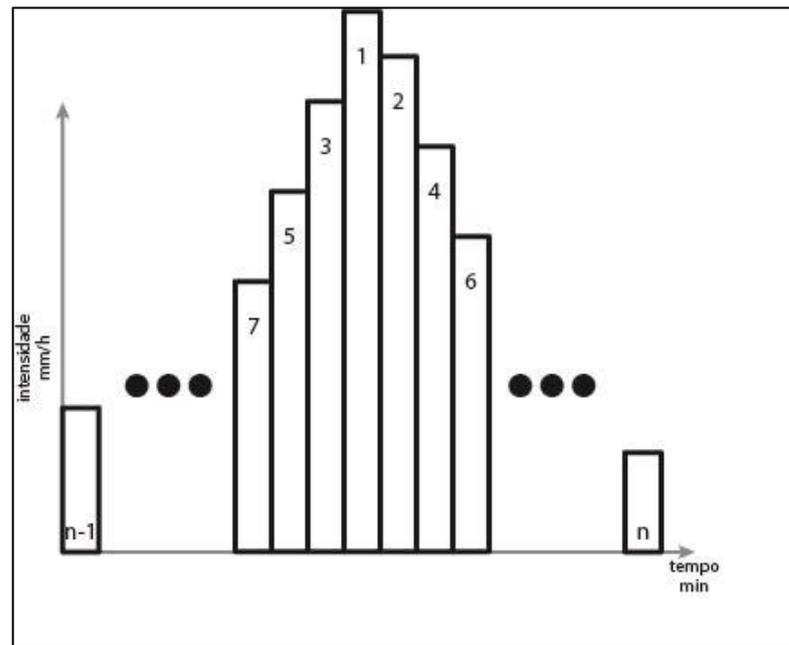
t é o tempo de duração da chuva, em min;

2.7 Hietograma de Projeto

O hietograma é a representação gráfica da variação da intensidade da chuva ao longo de sua duração. No presente estudo, o hietograma de projeto foi elaborado a partir do modelo dos blocos alternados, que parte do pressuposto de que a maior intensidade ocorre na metade do tempo de duração do evento pluvial. Para isto, discretiza-se o tempo total de duração em intervalos de tempo idênticos, e para cada um desses intervalos se determina a intensidade de chuva para um dado tempo de retorno (Tr) por meio de uma curva IDF. Estas intensidades são multiplicadas pela duração de seu respectivo intervalo para se obter a precipitação média para cada intervalo, e a diferença entre as precipitações de instantes consecutivos são denominadas de incremento da precipitação. Por fim, os incrementos são ordenados de maneira decrescente e então reorganizados seguindo o modelo genérico para “n” blocos presente na Figura 8 (CHOW, *et al.*, 1988).

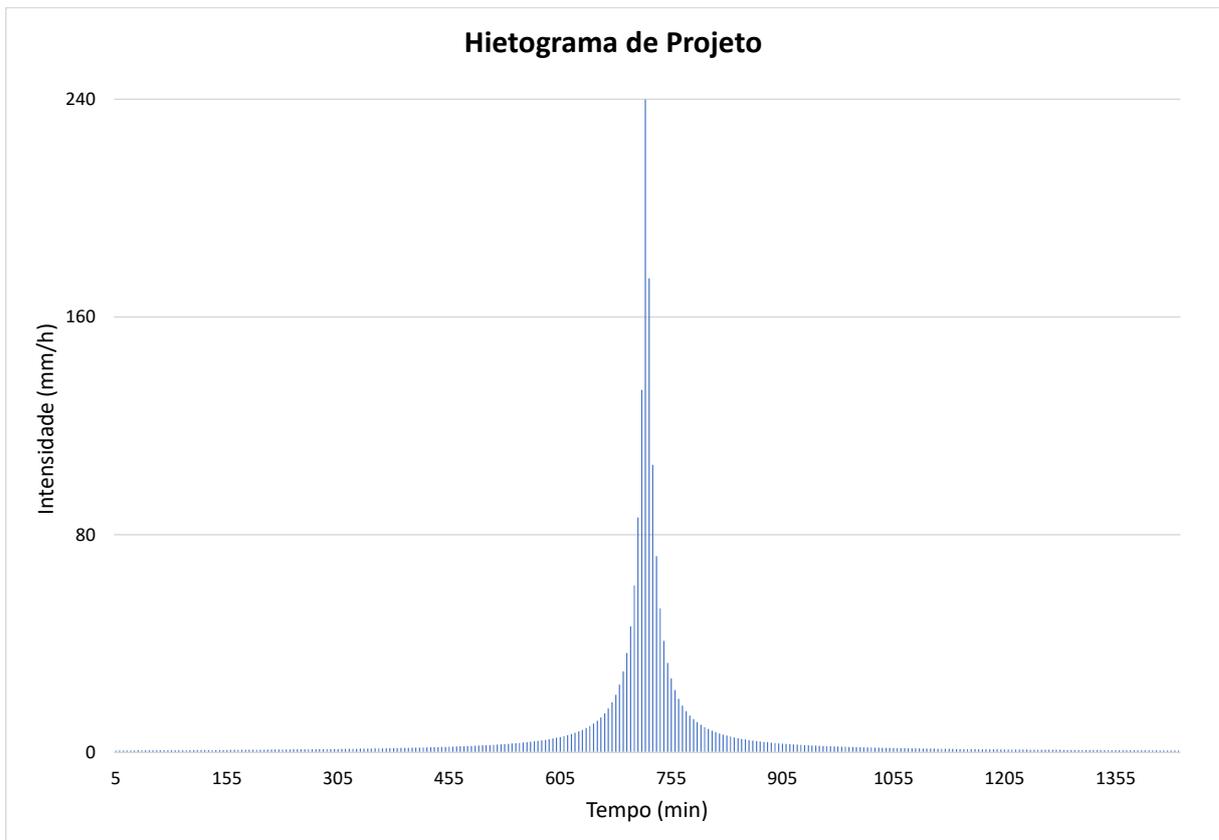
Para estudos da macrodrenagem de uma bacia é usual adotar um tempo de retorno entre 10 e 25 anos (PORTO ALEGRE, 2005). Por isso, neste trabalho, desenvolveu-se o hietograma de projeto para um Tr de 25 anos e um tempo de duração de chuva de 24 horas discretizado em intervalos de 5 minutos, de modo que, ao fim, sejam obtidos 288 blocos que representem os ditos incrementos de precipitação. Sendo assim, obteve-se um uma intensidade máxima de aproximadamente 240 mm/h no instante 720 minutos (12 horas) e o hietograma de projeto é apresentado na Figura 9.

Figura 8 - Modelo do método blocos alternados.



(Fonte: Adaptado de Chow *et al.*, 1988.)

Figura 9 - Hietograma de projeto.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

2.8 Determinação dos Hidrogramas

A partir dos princípios da sobreposição e proporcionalidade descritos no item 2.5 é possível determinar o hidrograma por meio do método matemático de “Convolução”. Com isso, é possível obter o gráfico referente ao escoamento superficial aplicando o hidrograma unitário deste projeto às precipitações efetivas de cada instante de tempo (princípio da proporcionalidade) e então sobrepor os hidrogramas para cada instante resultando no hidrograma do escoamento superficial (sobreposição). Para isso, precisou-se discretizar o hidrograma unitário em intervalos de tempo iguais para que se pudesse obter o valor das ordenadas para os mesmos instantes em que a precipitação fora discretizada, neste caso, 5 minutos.

A precipitação efetiva é considerada como aquela que gera efetivamente escoamento superficial e é determinada, inicialmente, acumulando as precipitações instantâneas do hietograma de projeto para todo o evento. Em seguida, o modelo SCS-CN propõe que antes de haver vazão de escoamento superficial, cerca de 20% da capacidade de armazenamento do solo é ocupada pela abstração inicial da precipitação acumulada. Sendo assim, assume-se que no instante em que a precipitação acumulada for superior a estas perdas iniciais ocorrerá o início do escoamento. Ainda, o método determina que a precipitação efetiva acumulada segue o equacionamento apresentado na Equação 10.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (8)$$

$$I_a = 0,2 * S \quad (9)$$

$$P_{efACUM} = \begin{cases} \text{Se } P_{ACUM} > I_a \rightarrow \frac{(P_{ACUM}-I_a)^2}{(P_{ACUM}-I_a+S)} \\ \text{Se } P_{ACUM} \leq I_a \rightarrow 0 \end{cases} \quad (10)$$

Onde:

S é o parâmetro de armazenamento;

I_a é a abstração inicial;

P_{efACUM} é a precipitação efetiva acumulada, em mm;

P_{ACUM} é a precipitação acumulada, em mm;

A subtração entre a precipitação efetiva acumulada determinada em um instante e no instante anterior, é considerada a precipitação efetiva. Cada precipitação efetiva obtida é então multiplicada pelas ordenadas do hidrograma unitário e os resultados para um mesmo instante são somados seguindo o modelo de convolução representado na Equação 11.

$$\begin{bmatrix} \text{Pef}_1 \text{h}_1 \\ \text{Pef}_1 \text{h}_2 + \text{Pef}_2 \text{h}_1 \\ \text{Pef}_1 \text{h}_3 + \text{Pef}_2 \text{h}_2 + \text{Pef}_3 \text{h}_1 \\ \vdots \\ \dots \quad \vdots \\ \dots \quad \text{Pef}_n \text{h}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Q}_1 \\ \text{Q}_2 \\ \text{Q}_3 \\ \vdots \\ \text{Q}_{n+m-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde:

Pef é a precipitação efetiva, em mm;

h é a ordenada do hidrograma unitário, em m³/(s.mm);

n é o número de blocos do hietograma de projeto;

m é a quantidade de instantes discretizados do hidrograma unitário;

A representação gráfica dos valores obtidos ao final da aplicação do modelo é considerada o hidrograma de escoamento superficial concentrado no exutório da bacia hidrográfica para um modelo chuva-vazão teórico. A vazão de maior valor é considerada a vazão de pico e a área sob o gráfico é considerada o volume escoado, deste modo, o volume pode ser definido através da integração da vazão em função do tempo. Entretanto, como o hidrograma não pode ser definido por uma equação, se torna necessário a utilização de integração numérica para que se possa determiná-lo. Com isso, optou-se pela adoção do método dos trapézios para obtenção do volume de escoamento, representado pela Equação 12.

$$\text{Vol} = \frac{d}{2} (\text{Q}_1 + 2 \sum_{i=2}^{n-1} \text{Q}_i + \text{Q}_n) \quad (12)$$

Onde:

Vol é o volume escoado, em m³;

d é o intervalo de discretização do tempo, em s;

Q_i é a vazão para o instante “i”, em m³/s;

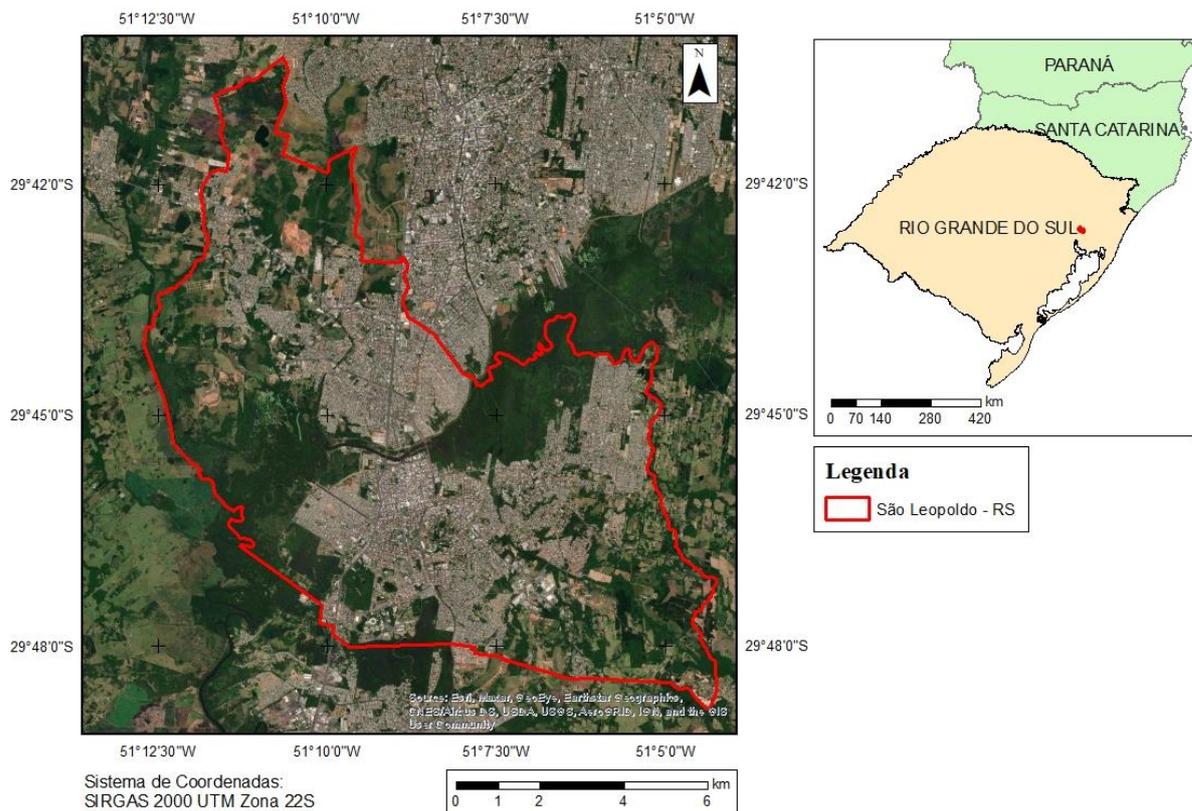
2.9 Critério de Avaliação

Baseado nos resultados obtidos por Allasia e Villanueva (2007), o critério adotado para avaliação dos resultados deste foi a comparação da vazão de pico e do volume total escoado dos hidrogramas obtidos pelas classificações não-supervisionada e supervisionada com o hidrograma da classificação manual. Com isso, comparações que apresentem uma variação superior a ±10% foram consideradas “Variações Significativas” e valores inferiores a este intervalo foram consideradas “Variações Pouco Significativas”. O mesmo critério foi utilizado para comparar os hidrogramas resultantes da classificação que separa as áreas urbana e rural com a classificação pelo mesmo método na bacia.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do arroio Manteiga, localizada em São Leopoldo-RS. O município está localizado na região leste do estado do Rio Grande do Sul e forma, junto com outros municípios, a região metropolitana de Porto Alegre. Segundo o último censo realizado pelo IBGE (2010), possui população de 214.087 habitantes, sendo o 9º município mais populoso do estado. Apresenta uma elevada ocupação urbana, de modo que 213.238 habitantes residem em aproximadamente 65% do território municipal, em outras palavras, aproximadamente, 99,6% da população vive em regiões urbanizadas. Segundo Robaina *et al.* (1999), a elevada taxa de urbanização ocorre por conta da alta concentração de indústrias, trazendo desenvolvimento para a região do Vale dos Sinos (região do estado em que São Leopoldo está contida) até a atualidade.

Figura 10 - Mapa São Leopoldo – RS.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

O município de São Leopoldo está situado na bacia hidrográfica do rio dos Sinos, mais especificamente na parte de seu curso baixo, rio este que corta o município de leste a oeste na região central da cidade. Historicamente, o rio foi, e ainda é, um recurso importante para o desenvolvimento econômico da região, de modo que as suas margens passaram a ser ocupadas

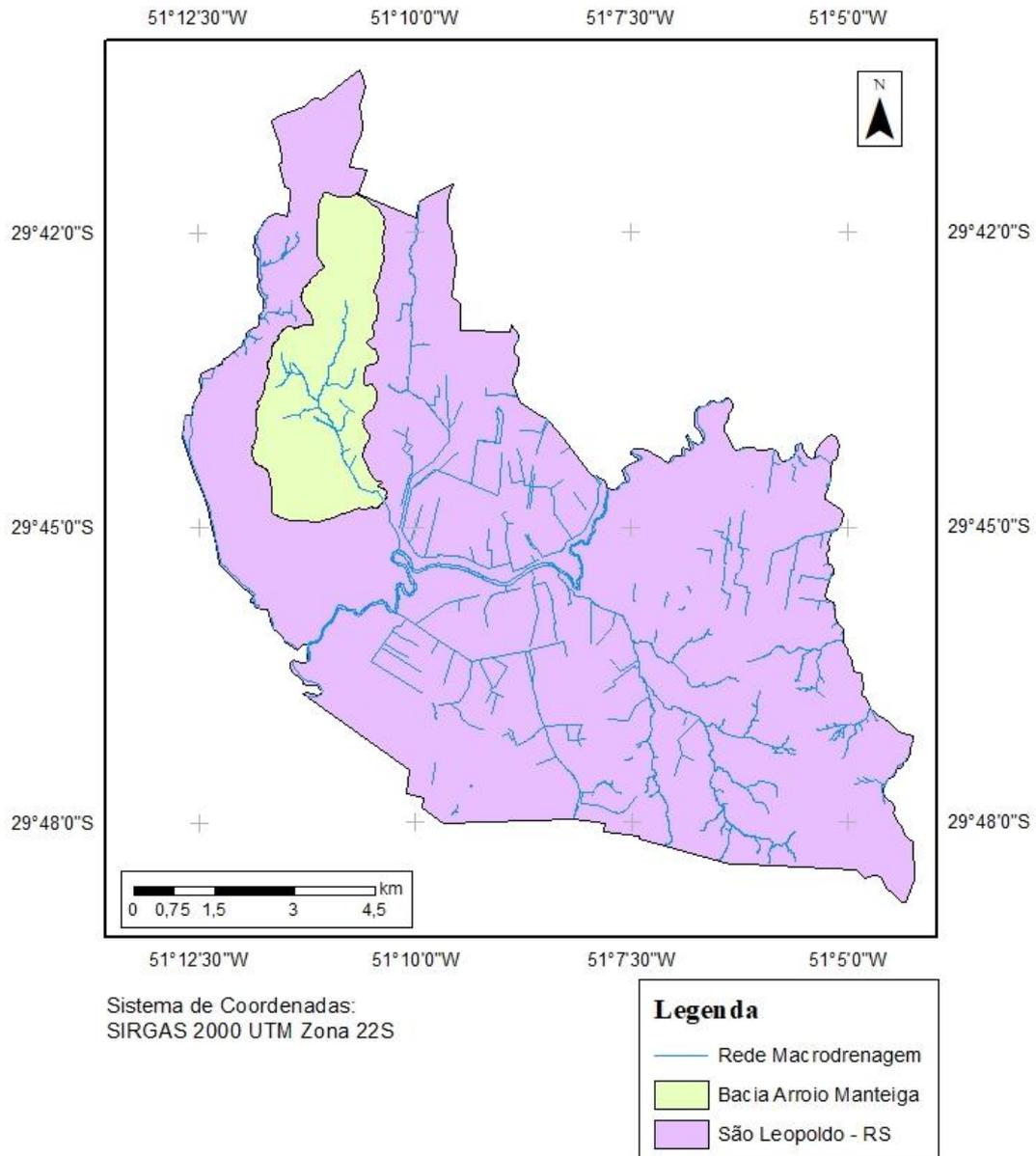
a partir da década de 1950 para instalação de indústrias (ROBAINA *et al.*, 2000). De acordo com o COMITESINOS (2021), sua bacia hidrográfica é formada por 30 municípios e está contida integralmente no estado do Rio Grande do Sul com área total de aproximadamente 3,694 km².

Durante toda sua história, o município de São Leopoldo vem sofrendo com inundações e alagamentos. Os eventos ocorridos em 1941 e 1965 são considerados como as maiores inundações da cidade, com isso, a partir da década de 1960, foram iniciados os estudos para implantação de um sistema de controle de enchentes na região. Por conta deste projeto, o município conta hoje com aproximadamente 20 km de diques e 5 casas de bombas em ambas as margens do rio dos Sinos, no trecho que corta a cidade. Sendo assim, todo o volume de água gerado pelo escoamento no município desagua no rio dos Sinos, seja através de arroio, condutos ou pelas casas de bombas. No total, 10 sub-bacias do rio dos Sinos estão presentes no município, sendo que a maioria delas é compartilhada com outras cidades da região.

A bacia do arroio Manteiga é uma das sub-bacias que está contida integralmente nos limites municipais. Localizada na parte norte do município de São Leopoldo, possui área de aproximadamente 10,06 km² e o principal curso d'água é o que dá nome à bacia. De acordo com o plano diretor da cidade, a bacia está inserida hoje tanto em regiões urbanas quanto destinadas a expansão urbana, o que implica com que esta possua características tanto urbanas quanto rurais, visto que as áreas de expansão presentes na bacia apresentam, ainda, características naturais, como vegetação nativa e vegetação rasteira. Ocupando partes dos bairros Boa Vista e Arroio da Manteiga em seu trecho de ocupação urbana, ambos são caracterizados como bairros residenciais, com predominância de construções unifamiliares.

A hidrografia da bacia ocorre em sua grande parte em trechos naturais, havendo poucas ocorrências de condutos, galerias e canais artificiais, de acordo com o cadastro da macrodrenagem disponibilizado pelo órgão municipal responsável. Não havendo casa de bombas em seu exutório, este está situado na margem direita da porção mais a jusante do trecho do rio dos Sinos presente na cidade.

Figura 11 - Área de estudo e macrodrenagem do município.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

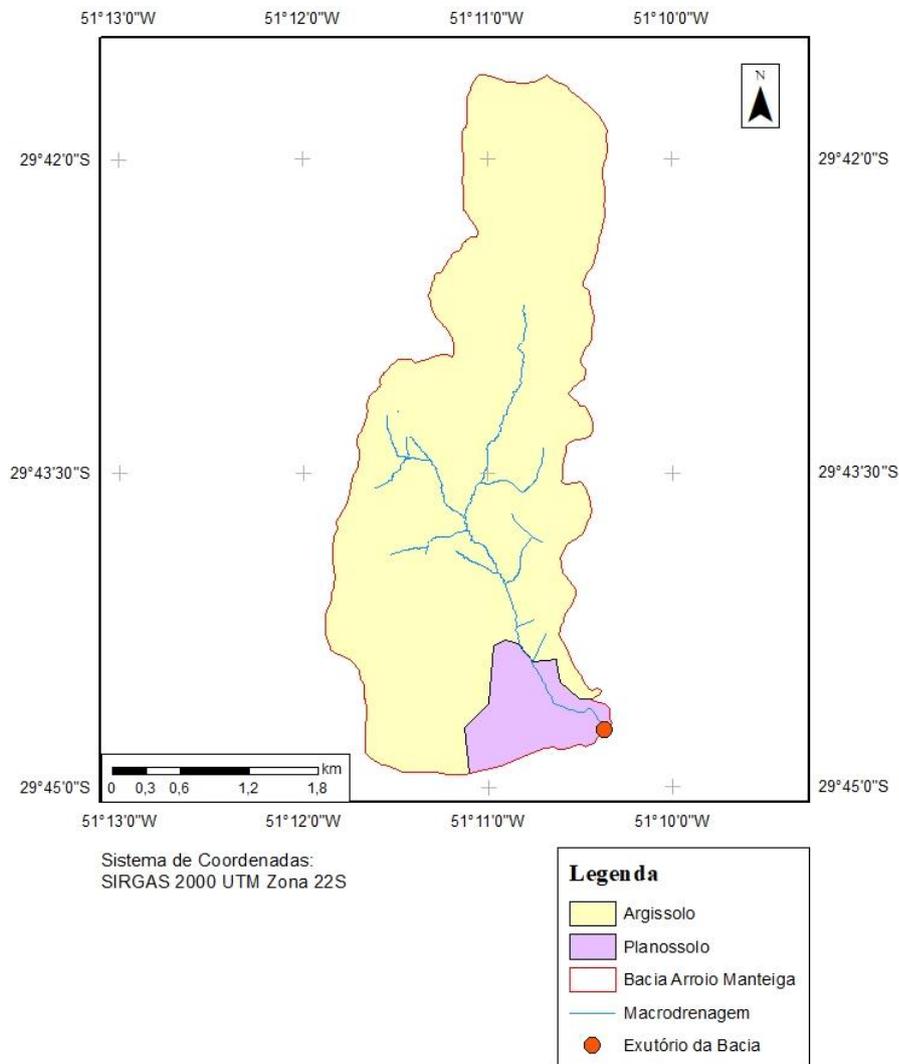
3.1 Pedologia

De acordo com o levantamento realizado pelo IBGE realizado em 2019 para o estado do Rio Grande do Sul com escala de 1:250.000, há a predominância de dois tipos de solo no município: Argissolo Vermelho-Amarelo Alítico (com texturas arenosa-argilosa, arenosa-média e média-argilosa e mudança de textura abrupta) e Planossolo Háplico Eutrófico (com texturas arenosa-média e média argilosa).

Como, pode ser observado na Figura 12, ambos os tipos de solo estão presentes também na bacia do arroio Manteiga. O argissolo é o tipo mais predominante na área de estudo,

compreendendo boa parte da bacia, enquanto o planossolo é encontrado na região mais a jusante da bacia, próximo a seu exutório no rio dos Sinos.

Figura 12 - Pedologia da área de estudo.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Sartori et al. (2005) classificaram os solos brasileiros quanto às suas propriedades hidrológicas seguindo o modelo proposto pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (SCS), de modo que os solos possam ser definidos pelos grupos A, B, C e D. Solos do grupo A possuem alta taxa de infiltração e baixo potencial de escoamento (taxa de infiltração superior a 7,62 mm/h), solos do grupo B e C possuem baixas taxas de infiltração quando completamente molhados (taxas de infiltração entre 3,81 e 7,62 mm/h e entre 1,27 e 3,81 mm/h, respectivamente) e solos do grupo D possuem alto potencial de escoamento (taxa de infiltração inferior 1,27 mm/h). De acordo com esta definição, o argissolo presente no município é identificado como solo do grupo C e o planossolo é identificado como solo do grupo D.

4 RESULTADOS

4.1 Classificação do Uso do Solo

Neste tópico são apresentados os mapas resultantes dos processos de classificação dispostos no item 2.2, assim como suas respectivas áreas para cada classe e os valores de CN obtidos.

4.1.1 Classificação Não Supervisionada

A classificação não supervisionada da imagem aérea ortorretificada retornou 60 grupos de classes, destes, 13 foram classificados como mata, 28 como vegetação rasteira, 6 como solo exposto e 13 como área construída e nenhum dos grupos apresentou número de células representativas para ser considerada como classe de Água. Analisando visualmente as regiões que possuem corpos d'água, observou-se que estes foram classificados ora juntos com vegetação rasteira, ora com solo exposto e ora com área construída. Para este último caso, os resultados não são afetados, visto que para este estudo ambas as classes foram consideradas como áreas impermeáveis com um mesmo valor de CN.

Já a classificação não supervisionada da imagem do satélite *Rapid Eye* retornou apenas 17 grupos de classes, em outras palavras, das 60 solicitadas, o algoritmo do programa só detectou 17 padrões respostas espectrais. Destes 17, 4 grupos foram classificados como mata, 11 como vegetação rasteira e 2 como solo exposto, não retornando dados relativos às classes área construída e água, de modo que até mesmo analisando a imagem visualmente, as áreas impermeáveis são pouco identificadas.

Considerando a classificação das áreas urbanas e rural em separado, como a imagem de satélite encontra-se completamente em trecho rural, não se realizou novo procedimento de classificação para esta imagem. Já com relação a imagem aérea, tanto sua porção urbana como rural retornaram 60 grupos cada.

Para o trecho urbano 10 grupos foram classificados como mata, 23 como vegetação rasteira, 6 como solo exposto, 2 como água e 19 como área construída. Em comparação com a classificação realizada sem a separação já possível observar que o algoritmo conseguiu classificar melhor as áreas de corpos d'água, mesmo havendo ainda conflito com as classes vegetação rasteira, solo exposto e área construída.

Já para o trecho rural 14 grupos foram classificados como mata, 34 como vegetação rasteira, 2 como solo exposto, 2 como água e 8 como área construída. Assim como na área

urbana foi possível observar áreas em conflito, porém os resultados apontaram áreas com corpos d'água melhor classificados em comparação com a classificação em que não se realizou separação.

A partir destes resultados, juntou-se as classificações da imagem aérea com a do satélite *Rapid Eye*, a fim de formar os mapas das classificações não supervisionadas. A Figura 13a apresenta o mapa de classificação de uso do solo da bacia do arroio Manteiga e a Figura 13b apresenta o mapa com as áreas urbana e rural classificadas em separado e o tempo necessário para implementação da metodologia e elaboração de ambos os mapas foi de aproximadamente 1 dia.

Figura 13a - Resultado classificações não supervisionada integrada.

Figura 13b - Resultado classificações não supervisionada separada.

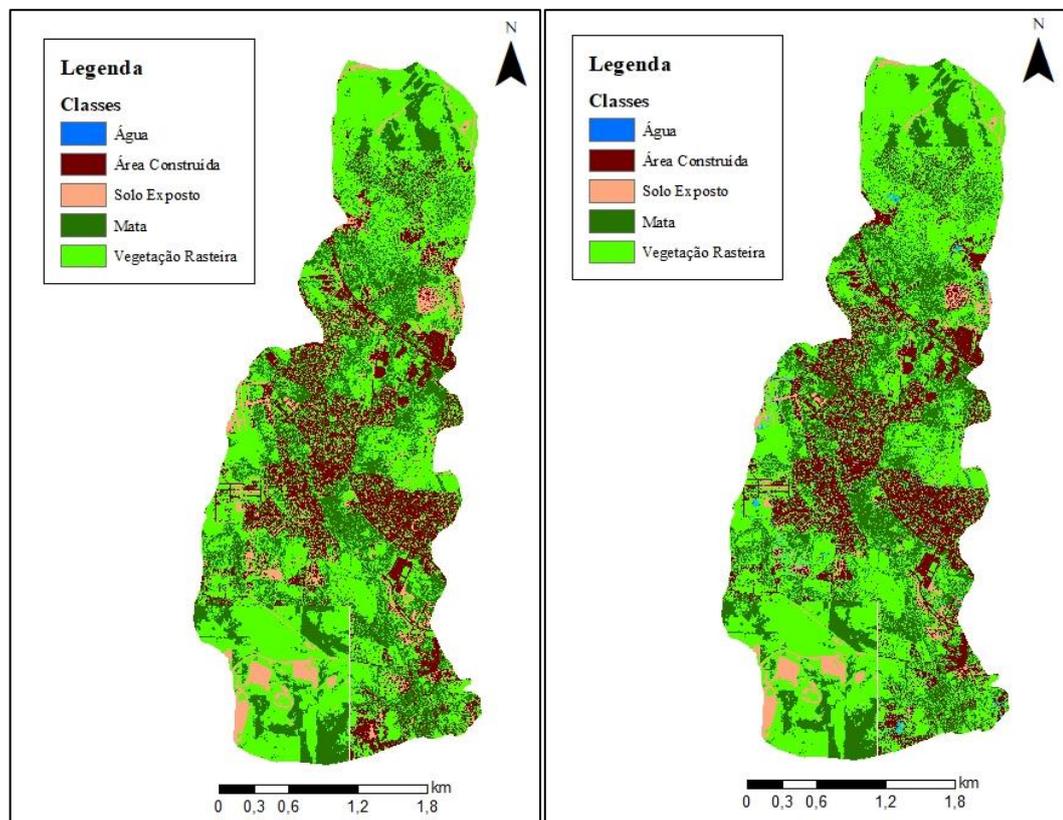


Figura 13a

Figura 13b

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Com isso e realizando os procedimentos de geoprocessamento descritos no item 2.2.1, determinou-se as áreas relativas a cada uma das classes para cada tipo de solo presentes na área de estudo, assim como o seu valor de CN. O Quadro 2 apresenta as áreas e o valor de CN relativo assim como o CN para o mapa com a classificação realizada de maneira integrada e o

Quadro 3 apresenta os mesmos valores para a classificação realizada separando regiões urbana e rural.

De uma maneira geral, pode-se observar que os valores das áreas para todas as classes obtidos em ambos os mapas apresentaram poucas variações, ou seja, a tendência é de que os resultados do hidrograma para este método de classificação sejam similares independente da separação das áreas urbana e rural. Este fato se torna mais esperado ainda ao analisar os resultados do CN, onde este aumentou aproximadamente 0,2% da classificação integrada para a separada.

Quadro 2 - Áreas e CN para classificação não supervisionada integrada.

Classe	Área (km ²)	CN	CN Mapa
Mata-C	2,419	70	78,87
Vegetação Rasteira-C	4,511	74	
Solo Exposto-C	0,612	91	
Água-C	0,000	98	
Área Construída-C	1,688	98	
Mata-D	0,278	77	
Vegetação Rasteira-D	0,349	80	
Solo Exposto-D	0,025	94	
Água-D	0,000	98	
Área Construída-D	0,178	98	

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Quadro 3 - Áreas e CN para classificação não supervisionada separada.

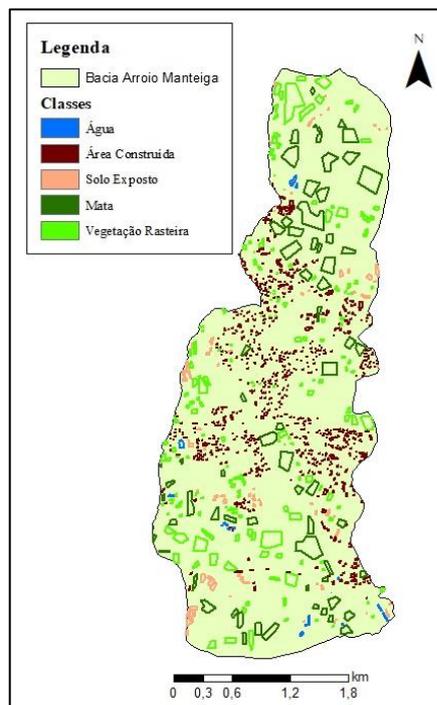
Classe	Área (km ²)	CN	CN Mapa
Mata-C	2,319	70	79,01
Vegetação Rasteira-C	4,584	74	
Solo Exposto-C	0,471	91	
Água-C	0,124	98	
Área Construída-C	1,732	98	
Mata-D	0,267	77	
Vegetação Rasteira-D	0,397	80	
Solo Exposto-D	0,008	94	
Água-D	0,016	98	
Área Construída-D	0,141	98	

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

4.1.2 Classificação Supervisionada

Neste trabalho, o número de *pixels* utilizados como amostra (Figura 14) representam cerca de 10% dos *pixels* existentes nas imagens utilizadas. Por meio deste conjunto de amostras, realizou-se o procedimento para classificação supervisionada tanto para as imagens aéreas (integradas e área urbana e rural separadas) quanto para a imagem de satélite. Novamente não se realizou mais de uma classificação na imagem do *Rapid Eye* visto que toda a região está compreendida na área rural. O mapa de uso do solo para classificação da bacia de maneira integrada está apresentado na Figura 15a enquanto a Figura 15b apresenta o mapa com as áreas urbana e rural classificadas em separado e o tempo necessário para implementação da metodologia e elaboração de ambos os mapas foi de aproximadamente 1 dia.

Figura 14 - Amostras para classificação supervisionada



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Realizando os procedimentos de geoprocessamento e de manipulação dos resultados, obtidos através dos mapas, foi possível determinar as áreas relativas a cada classe para o seu respectivo tipo de solo e o valor CN para cada um dos mapas (Quadro 4 e Quadro 5).

Figura 15a - Resultados classificações supervisionadas.

Figura 15b - Resultados classificações supervisionadas.

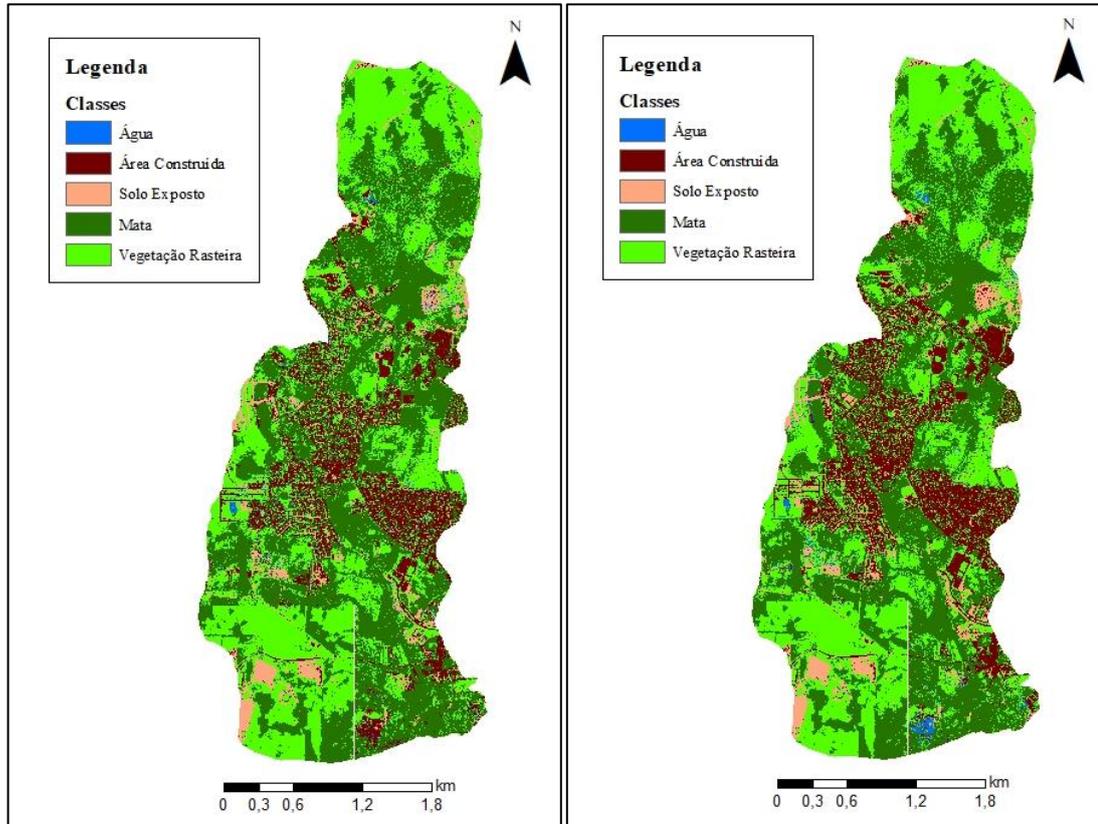


Figura 15a

Figura 15b

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Quadro 4 - Áreas e CN para classificação supervisionada integrada.

Classe	Área (km ²)	CN	CN Mapa
Mata-C	3,81	70	77,20
Vegetação Rasteira-C	3,52	74	
Solo Exposto-C	0,53	91	
Água-C	0,10	98	
Área Construída-C	1,27	98	
Mata-D	0,55	77	
Vegetação Rasteira-D	0,15	80	
Solo Exposto-D	0,02	94	
Água-D	0,01	98	
Área Construída-D	0,10	98	

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Quadro 5 - Áreas e CN para classificação supervisionada separada.

Classe	Área (km ²)	CN	CN Mapa
Mata-C	3,63	70	77,75
Vegetação Rasteira-C	3,49	74	
Solo Exposto-C	0,53	91	
Água-C	0,06	98	
Área Construída-C	1,52	98	
Mata-D	0,56	77	
Vegetação Rasteira-D	0,16	80	
Solo Exposto-D	0,02	94	
Água-D	0,03	98	
Área Construída-D	0,06	98	

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Assim como na classificação não supervisionada, é possível observar que tanto a classificação integrada quanto a separada apresentaram áreas para cada uma das classes próximas. Este fato é ainda evidenciado pelo fato do CN ter aumentado aproximadamente 0,7% ao comparar a classificação separada com a integrada. A partir disso, é possível afirmar que a tendência é que os hidrogramas de ambos os casos sejam similares também.

Comparando os resultados da classificação supervisionada com os da não supervisionada é possível observar que os valores de áreas impermeáveis (classes área construída e água) da classificação não supervisionada foram significativamente superiores aos da supervisionada. Além disso, as diferenças mais significativas são com relação as classes vegetação rasteira e mata, de modo que áreas de vegetação rasteira foram amplificadas e as áreas de mata foram reduzidas na não supervisionada em comparação com a supervisionada, isto tanto para a classificação integrada quanto para a separada.

Avaliando estes dois fatores é possível estimar que a classificação supervisionada apresentará um resultado quanto a permeabilidade do solo superior em comparação com a não supervisionada. Este fator se torna mais evidente ao avaliar o valor de CN, onde a classificação não supervisionada apresentou resultados 2,2% e 1,6% maiores do que a supervisionada para classificação integrada e separada, respectivamente, o que indica uma maior impermeabilidade do solo na bacia. Por conta disso, é esperado que o hidrograma da classificação supervisionada apresente vazão de pico e volume escoado inferior ao da não supervisionada

4.1.3 Classificação Manual

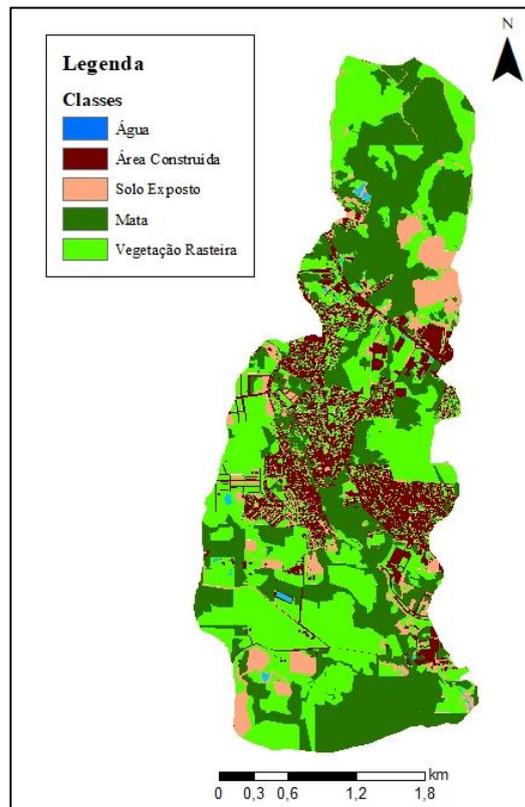
O mapa resultante para a classificação de uso do solo realizada manualmente é apresentado na Figura 16. Deste, foram obtidos os valores para as áreas das classes para os diferentes tipos de solo e o valor de CN do mapa. Tais resultados são apresentados no Quadro 6. Ainda, o tempo necessário para interpretação visual e elaboração do mapa foi de aproximadamente 30 dias para a área de estudo.

Quadro 6 - Áreas e CN para classificação manual.

Classe	Área (km ²)	CN	CN Mapa
Mata-C	2,95	70	78,35
Vegetação Rasteira-C	3,90	74	
Solo Exposto-C	0,80	91	
Água-C	0,03	98	
Área Construída-C	1,54	98	
Mata-D	0,59	77	
Vegetação Rasteira-D	0,18	80	
Solo Exposto-D	0,03	94	
Água-D	0,01	98	
Área Construída-D	0,02	98	

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Figura 16 - Resultado classificação manual.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Comparando os resultados da classificação manual com a não supervisionada, observa-se que a área de mata é maior e a vegetação rasteira menor, tanto ao ser comparada com a classificação integrada quanto com a separada. Quanto às áreas impermeáveis, a classificação não supervisionada retornou valores maiores em comparação com a manual também tanto para a integrada quanto para a separada.

Já ao ser comparada com a classificação supervisionada, o cenário se inverte para as classes de mata e vegetação rasteira. Nestas, a classificação manual retornou áreas menores para a primeira e maiores para a segunda ao confrontá-las com as obtidas na classificação supervisionada. Quanto as áreas impermeáveis os resultados foram mais próximos em relação à não supervisionada, sendo que a classificação supervisionada com áreas urbana e rural separadas apresentou os valores mais próximos tanto para a classe água quanto para a área construída.

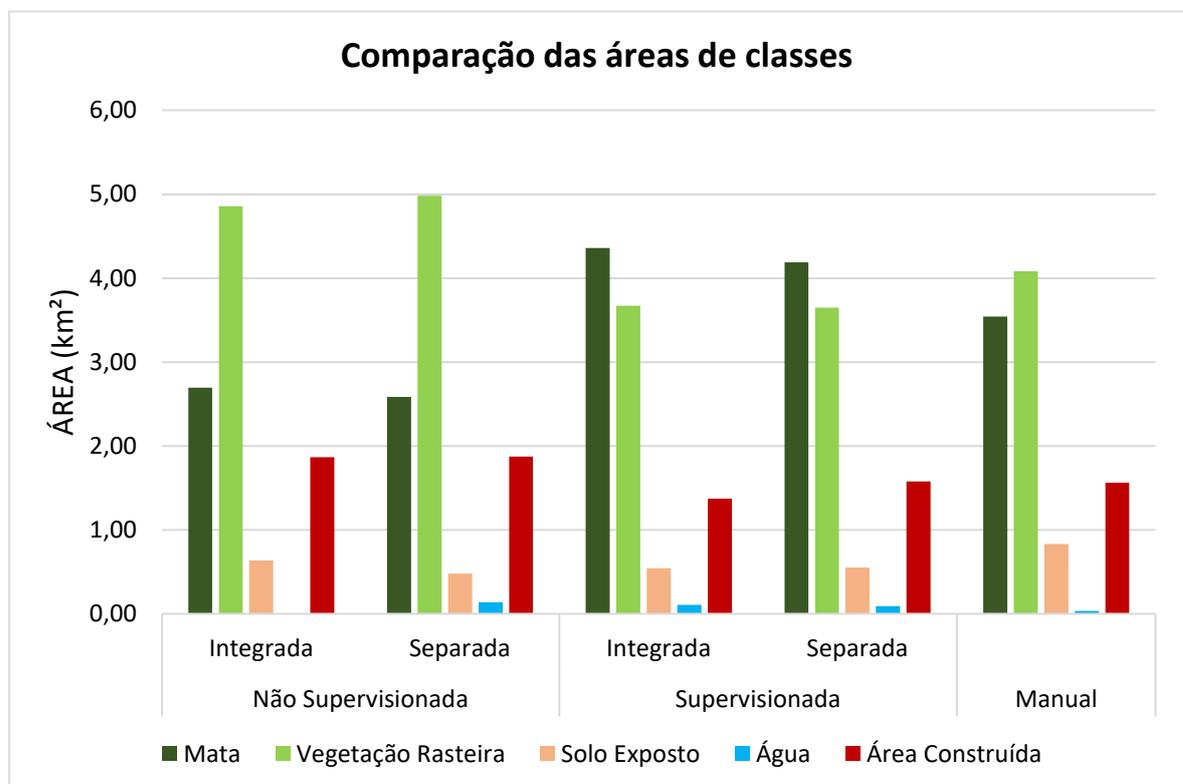
A classe solo exposto apresentou maior área na classificação manual em comparação com os outros dois métodos. O Quadro 7 apresenta um resumo das áreas das classes para todos os mapas gerados neste estudo e a Figura 17 apresenta o gráfico comparativo destas áreas.

Quadro 7 - Comparativo de áreas entre métodos

CLASSE	INTEGRADA		SEPARADA		MANUAL
	NS	SUP	NS	SUP	
Mata	2,70 km ²	4,36 km ²	2,59 km ²	4,19 km ²	3,54 km ²
Veg. Rast.	4,86 km ²	3,67 km ²	4,98 km ²	3,65 km ²	4,08 km ²
Solo Exp.	0,64 km ²	0,55 km ²	0,48 km ²	0,55 km ²	0,83 km ²
Água	-	0,11 km ²	0,14 km ²	0,09 km ²	0,04 km ²
Área Cons.	1,87 km ²	1,37 km ²	1,87 km ²	1,58 km ²	1,56 km ²

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Com relação ao parâmetro CN, ao comparar os resultados obtidos da classificação manual com os métodos computacionais, é possível observar que aquela que mais se aproximou dos CN da classificação manual foi a classificação não supervisionada integrada, com um aumento de 0,66% em comparação com a manual, seguido da classificação supervisionada separada, com redução de 0,77% do valor de CN, não supervisionada separada, com aumento de 0,84% e, por fim, a classificação supervisionada integrada com redução de 1,47% no valor de CN. O Quadro 8 apresenta esta comparação entre os CN para os diferentes mapas gerados.

Figura 17 - Comparação das áreas das classes para cada método de classificação.

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Quadro 8 - Comparativo percentual do valor de CN com a classificação manual

Comparativo	INTEGRADA		SEPARADA	
	NS	SUP	NS	SUP
CN-Manual	+0,66%	-1,47%	+0,84%	-0,77%

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

4.2 Hidrogramas

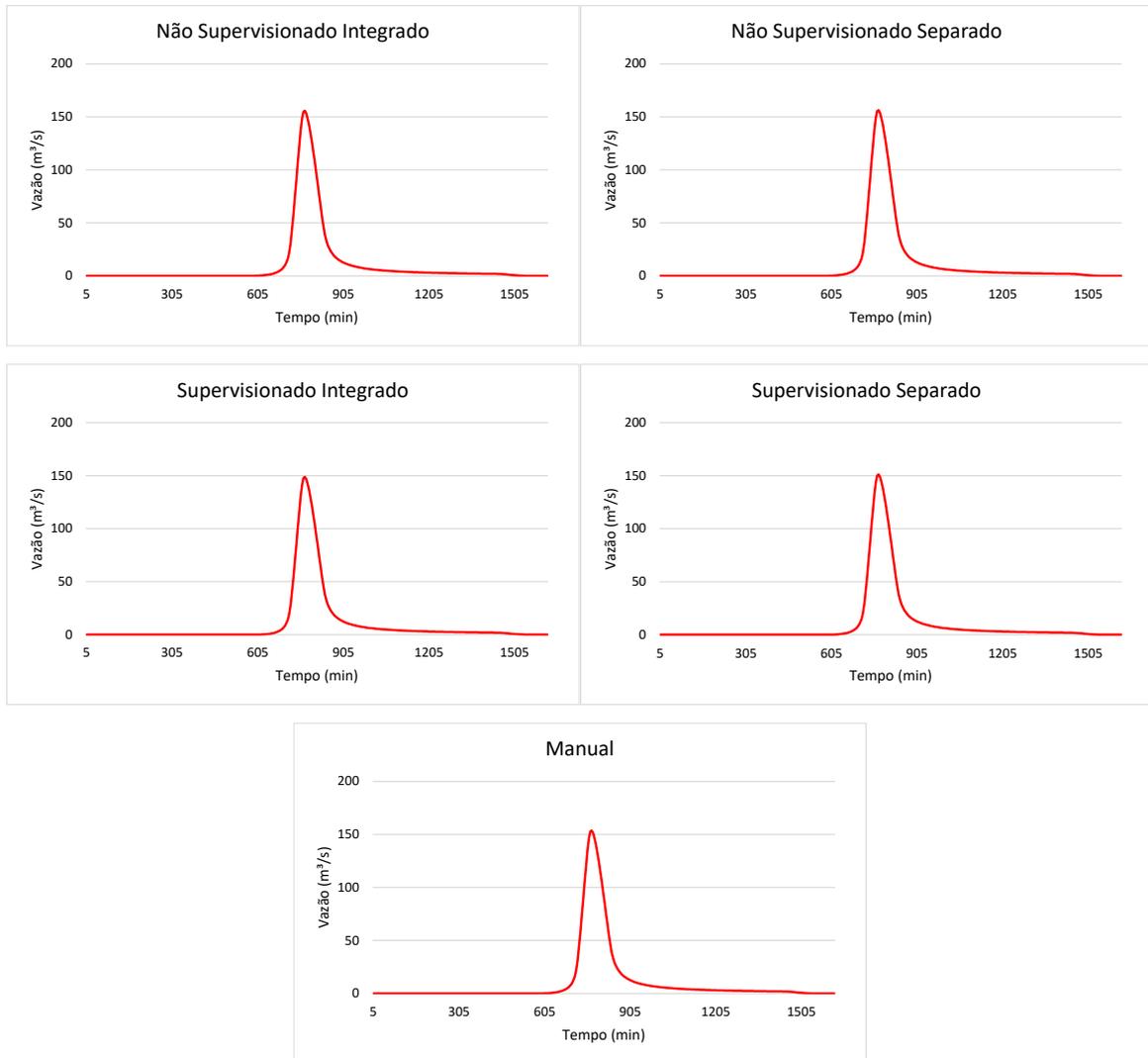
Seguindo a proposta da metodologia, os hidrogramas das classificações não supervisionadas integrada, não supervisionada separada, além das classificações supervisionadas integrada e separada foram comparados com o hidrograma da classificação manual. O Quadro 9 apresenta os valores das ordenadas do hidrograma unitário utilizados e a Figura 18 apresenta os hidrogramas desenvolvidos neste trabalho.

Quadro 9 - Ordenadas do hidrograma unitário.

Instante (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Ordenada (m³/s.mm)	0,00	0,30	0,59	0,89	1,19	1,48	1,78	2,08	2,37	2,67	2,59	2,41	2,23
Instante (min)	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
Ordenada (m³/s.mm)	2,06	1,88	1,70	1,52	1,35	1,17	0,99	0,82	0,64	0,46	0,28	0,11	0,00

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

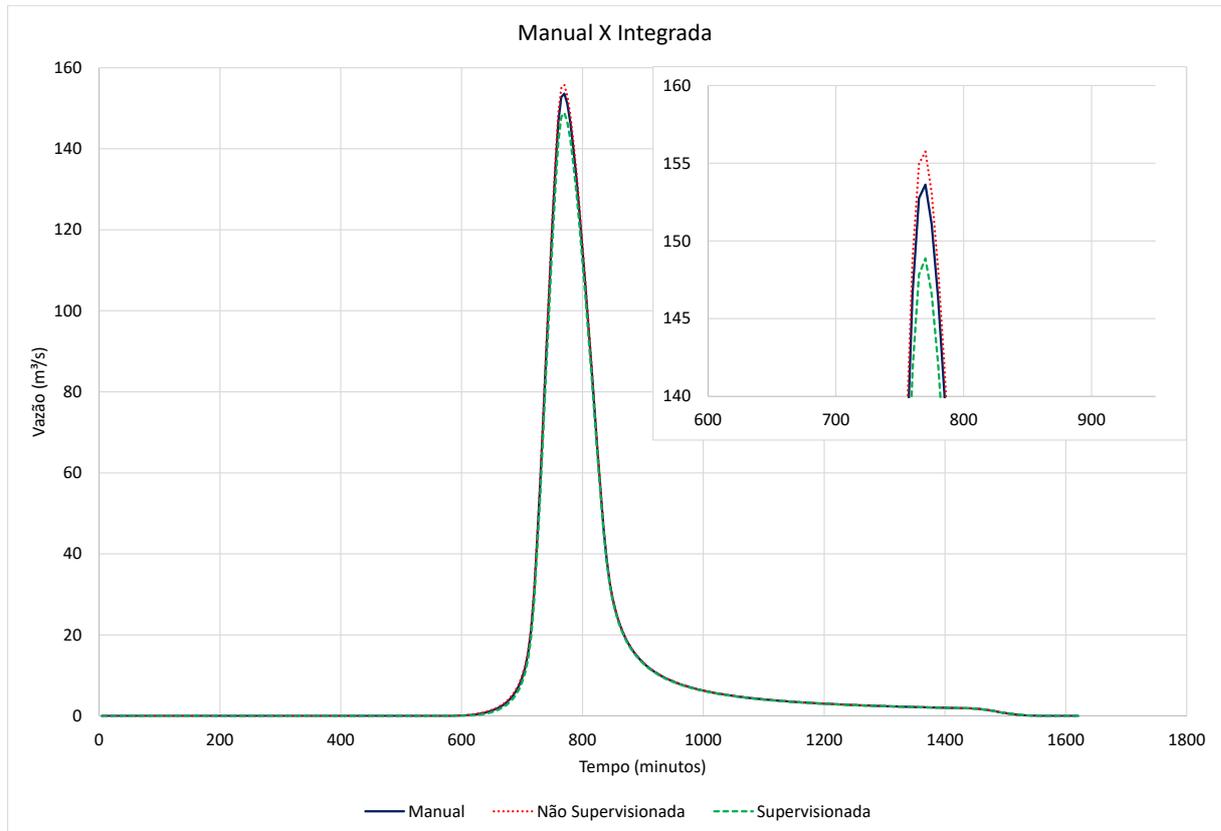
Figura 18 - Hidrogramas



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

O resultado obtido para as vazões de pico para os hidrogramas presentes na Figura 19 foram $155,8 \text{ m}^3/\text{s}$, $148,9 \text{ m}^3/\text{s}$ e $153,6 \text{ m}^3/\text{s}$ para as classificações não supervisionada integrada, supervisionada integrada e manual, respectivamente. Já com relação ao volume escoado, atingiu-se os seguintes valores: $1,0 \times 10^6 \text{ m}^3$, $9,6 \times 10^5 \text{ m}^3$ e $9,91 \times 10^5 \text{ m}^3$ e tempo de duração em que ocorre escoamento superficial de 995 minutos (16 horas e 35 minutos), 975 minutos (16 horas e 15 minutos) e 990 minutos (16 horas e 30 minutos), para não supervisionada integrada, supervisionada integrada e manual, respectivamente.

Figura 19 - Comparação entre hidrogramas das classificações manual e integradas.

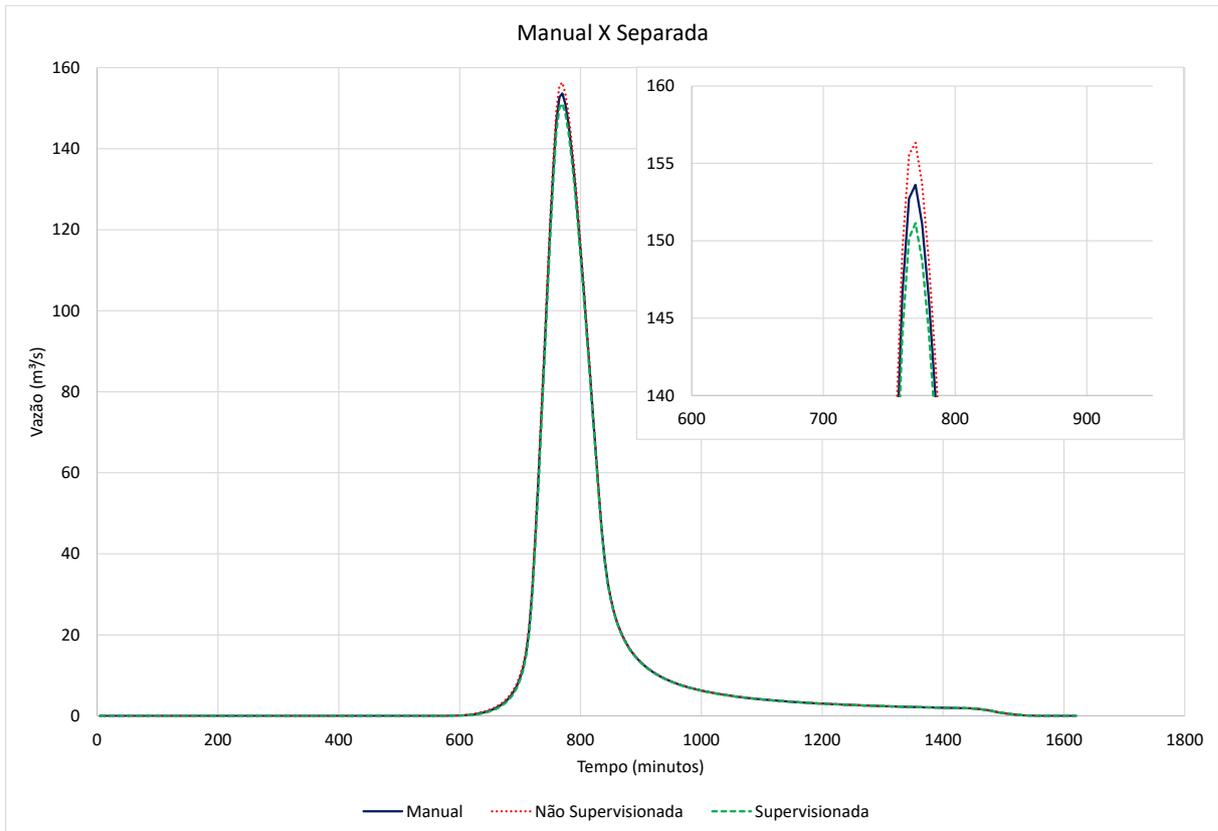


(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Destes, pode-se avaliar que, em comparação com a classificação manual, a vazão de pico aumentou aproximadamente 1,39% para a não supervisionada e reduziu em 3,09% para a supervisionada. Com relação ao volume escoado, aumentou 1,38% para a não supervisionada e reduziu em 3,05% para a supervisionada. De acordo com os critérios de avaliação proposto para esse projeto, avalia-se que tanto para a vazão de pico como para o volume escoado das classificações não supervisionada integrada e supervisionada integrada, as diferenças são consideradas “pouco significativas” com relação à classificação manual.

Já os resultados obtidos por meio das classificações separando as áreas urbana e rural apresentadas na Figura 20, a vazão de pico foi de 156,3 m³/s e 151,1 m³/s para as classificações não supervisionada separada e supervisionada separada, respectivamente. Quanto ao volume escoado os resultados foram 1,0x10⁶ m³ e 9,7x10⁵ m³ e tempo de duração em que ocorre escoamento superficial de 1000 minutos (16 horas e 40 minutos) e 985 minutos (16 horas e 25 minutos) para não supervisionada separada e supervisionada separada, respectivamente.

Figura 20 - Comparação entre hidrogramas das classificações manual e separadas.



(Fonte: Elaborado pelo autor.)

A partir da análise destes resultados é possível observar que, em comparação com a classificação manual, a vazão de pico sofreu aumento de 1,77% e redução de 1,62% para as classificações não supervisionada separada e supervisionada separada, respectivamente. Já o volume escoado aumentou 1,77% e reduziu em 1,60% para as classificações não supervisionada separada e supervisionada separada, respectivamente. A partir disso, segundo os critérios propostos no item 2.9, avalia-se que tanto para a vazão de pico como para o volume escoado das classificações não supervisionada separada e supervisionada separada, as diferenças são consideradas “Pouco Significativas” com relação à classificação manual. O Quadro 10 apresenta a comparação dos resultados obtidos para os métodos computacionais com os da classificação manual.

Comparando os resultados entre as classificações integradas e separadas para os mesmos métodos, presentes no Quadro 11, observa-se que, para a classificação não supervisionada ao classificar as áreas urbana e rural em separado tanto a vazão de pico quanto o volume escoado aumentaram aproximadamente 0,38% em comparação com a integrada. Para a classificação supervisionada, a diferença foi um pouco maior, a vazão de pico da classificação separada sofreu aumento de 1,52% enquanto o volume escoado aumentou 1,50% em comparação com a

integrada. Ainda que essas diferenças existam, elas são enquadradas de acordo com a proposta deste estudo como “pouco significativas”. A Figura 21 apresenta o comparativo dos hidrogramas não supervisionados e a Figura 22 apresenta o comparativo dos hidrogramas supervisionados.

Quadro 10 - Comparativo percentual dos parâmetros hidrológicos com a classificação manual.

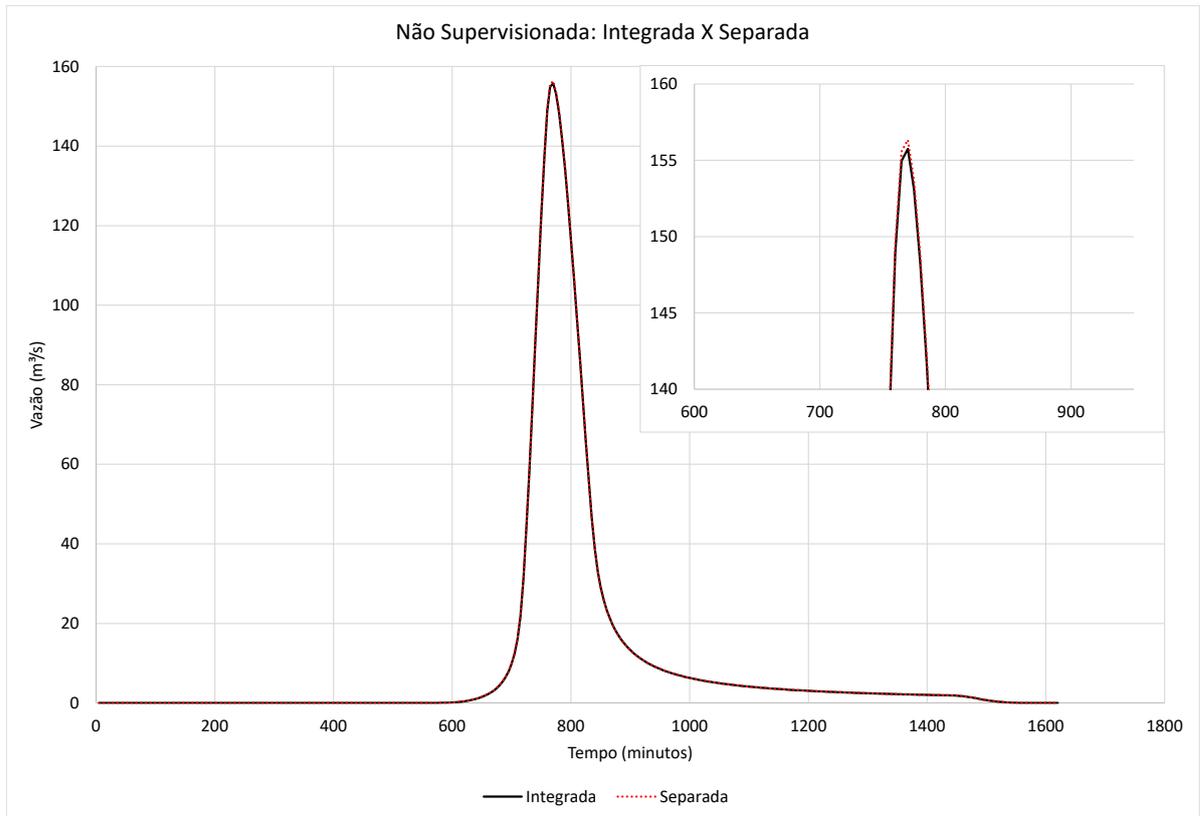
Comparativo:	Parâmetro	INTEGRADA		SEPARADA	
		NS	SUP	NS	SUP
Manual	CN	+0,66%	-1,47%	+0,84%	-0,77%
	Qp	+1,39%	-3,09%	+1,77%	-1,62%
	Vol	+1,38%	-3,05%	+1,77%	-1,60%

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

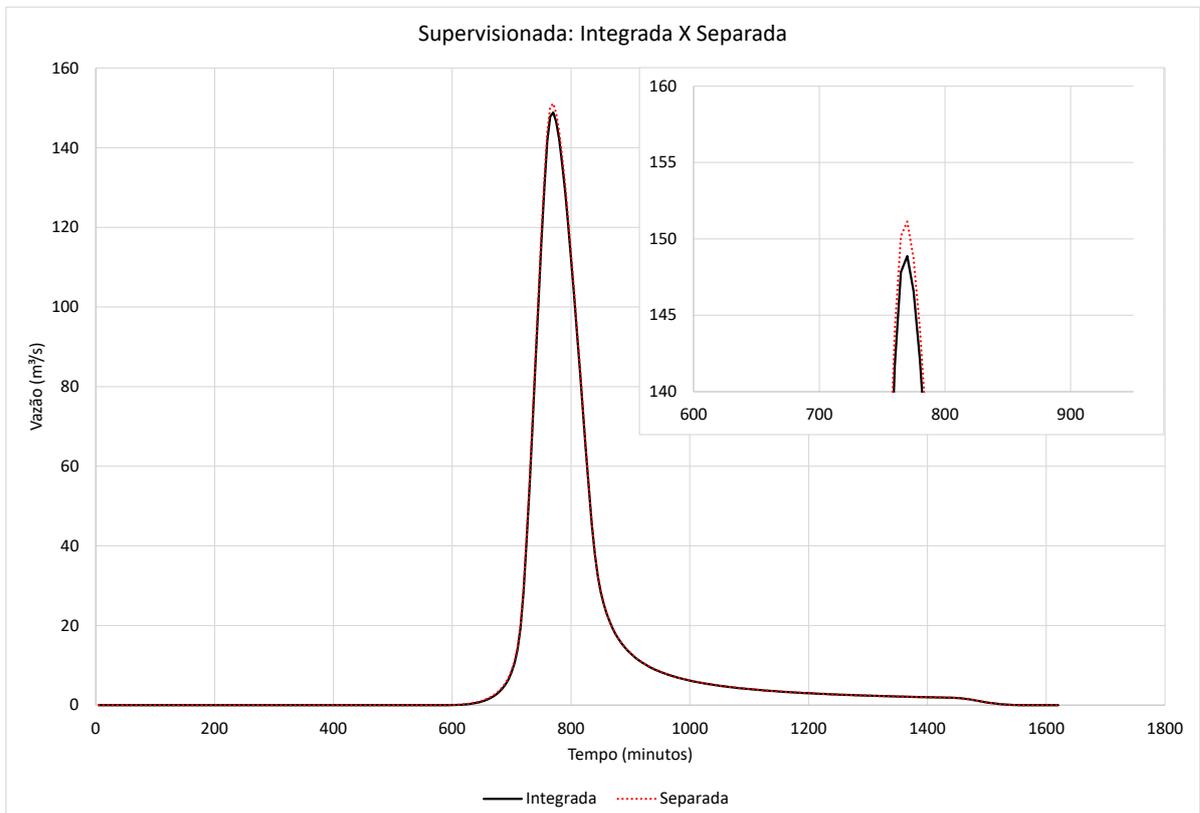
Quadro 11 - Comparativo percentual dos parâmetros hidrológicos entre classificações integradas e separadas.

Comparativo:	Parâmetro	Separada	
		NS	SUP
Integrada	CN	+0,18%	+0,71%
	Qp	+0,38%	+1,52%
	Vol	+0,38%	+1,50%

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Figura 21 - Comparação entre hidrogramas das classificações não supervisionadas.

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

Figura 22- Comparação entre hidrogramas das classificações supervisionadas.

(Fonte: Elaborado pelo autor.)

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A partir da análise dos resultados é possível afirmar que o método que apresentou valores mais próximos à classificação manual foi a classificação não supervisionada considerando áreas urbana e rural integradas. Apesar disso, todos os métodos apresentaram diferenças pouco significativas ao serem comparadas com a classificação manual, o que indica, para fins de avaliação, que o escoamento superficial na bacia hidrográfica de estudo não se altera significativamente ao se realizar a classificação de uso do solo por meio de diferentes métodos.

Além disso, as classificações considerando as áreas urbana e rural em separado apresentaram resultados superiores para os parâmetros avaliados em comparação com a classificação integrando ambas as regiões. Isto indica que esta separação pode ter a tendência a superestimar o escoamento superficial. Em contrapartida as diferenças obtidas entre separada e integrada, para um mesmo método de classificação, foram também pouco significativas, apontando que a separação não ocasiona alterações relevantes ao escoamento superficial para a bacia estudada.

Os resultados indicam, também, que os métodos de classificação supervisionada e não supervisionado, por demandarem menos tempo e recursos humanos para sua execução, podem ser utilizadas em detrimento da classificação manual, tendo em vista de que as diferenças não são significativas para parâmetros de escoamento superficial. Apesar disso, mais estudos devem ser realizados em outras bacias hidrográficas com diferentes características físicas e outros modelos hidrológicos devem ser, também, avaliados para se verificar se há o mesmo comportamento no uso do solo e hidrogramas.

Outros estudos que analisem os resultados abordando aspectos de geoprocessamento e sensoriamento remoto são necessários para validação mais abrangente dos resultados aqui apontados. Outros modelos e programas para classificação, outras imagens de diferentes sensores e resoluções espaciais, assim como outros modelos matemáticos de validação de resultados são exemplos deste tipo de abordagem.

Por fim, do ponto de vista prático de projetos de hidrologia e drenagem urbana, sugere-se também que estudos avaliando os hidrogramas em diversos pontos ao longo da rede de macrodrenagem da bacia, por exemplo, nos exutórios de cada sub-bacia ou das zonas de drenagem, sejam realizados. Os resultados destas simulações poderão indicar se a adoção de diferentes métodos acarretaria ou não em dimensionamentos diferentes para a rede.

6 REFERÊNCIAS

ALLASIA, Daniel G.; VILLANUEVA, Adolfo O. N. Custo da incerteza na macrodrenagem urbana I: Determinação dos parâmetros mais sensíveis na modelagem de macrodrenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 65-77, jan/mar 2007.

ALLASIA, Daniel G.; VILLANUEVA, Adolfo O. N. Custo da incerteza na macrodrenagem urbana II: Influência do erro na estimativa do CN sobre o custo de investimento de rede. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 79-90, jan/mar 2007.

BAKKER, Wim H., et al. **Principles of Remote Sensing: An introductory textbook**. 4. ed. Enschede: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2009.

CARVALHO, José Alberto Magno de. **Crescimento populacional e estrutura demográfica no Brasil**. Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar, 2004.

CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R. MAYS, Larry W. **Applied hydrology**. International edition: McGraw-Hill book company, 1988.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015. 366 p.

COMITESINOS. Caracterização da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos. Disponível em: <<http://www.comitesinos.com.br/bacia-hidrografica-do-rio-dos-sinos>>. Acesso em 20 abr. 2021.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Avaliação dos cenários de planejamento na drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 52, p. 59-71, jul/set 2008.

CUI, Yaokui, et al. Global water cycle and remote sensing big data: Overview, challenge and opportunities. **Big Earth Data**, 2:3, p. 282-297, 2018.

CUNHA, Stéphanie Fernandes, et al. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 135-141, out/dez 2015.

FRIEDE, Reis. Aumento populacional e degradação ambiental: A conta que não quer fechar. **Revista Augustus**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 52, p. 82-93, nov. 2020/fev. 2021.

GONÇALVES, Lidiane Souza. Relações Intensidade-Duração-Frequência com base em estimativas de precipitação por satélite. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

LUCAS, Alessandro Hirata, et. al. Proposta para seleção de áreas potenciais para implantação de trincheiras de infiltração: Estudo de caso – Campus da UFSCar, São Carlos - SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 837-848, out/dez 2015.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 727-733, 2003.

PORTO ALEGRE. Departamento de Esgotos Pluviais. **Plano diretor de drenagem urbana: manual de drenagem**. Porto Alegre, v. 6, 2005.

ROBAINA, Luís Eduardo; FIGUERÓ, Adriano Severo; CRISTO, Sandro Sidnei Vargas de. Uso do solo e dinâmica de conflito, na bacia do rio dos Sinos – municípios de Campo Bom, Novo Hamburgo e São Leopoldo, RS, Brasil. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 21, p. 119-137, 1999.

ROBAINA, Luís Eduardo de Souza; PEREIRA, João Eduardo da Silva; FORMOSO, Milton Luiz L. Caracterização da rede de drenagem e avaliação das condições sanitárias da águas do rio dos Sinos, no trecho entre os municípios de Novo Hamburgo e São Leopoldo – RS. **Geosul**, Florianópolis, v. 15, n. 30, p. 131-149, jul/dez 2000.

SARTORI, Anderson; NETO, Francisco Lombardi; GENOVEZ, Abel Maia. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 5-18, out/dez 2005.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, jan/mar 2005.

USDA. Hydrographs. In: **National engineering handbook: Part 630 Hydrology**. United States Department of Agriculture, 2007. Disponível em: <<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17755.wba>>. Acesso em: 17 mai. 2021.

USDA. Hydrologic soil-cover complexes. In: **National engineering handbook: Part 630 Hydrology**. United States Department of Agriculture, 2004. Disponível em: <<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba>>. Acesso em: 17 mai. 2021.

USDA. Land use and treatment classes. In: **National engineering handbook: Part 630 Hydrology**. United States Department of Agriculture, 2002. Disponível em: <<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=18386.wba>>. Acesso em: 17 mai. 2021.