UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA

Sheila Mena Barreto Silveira

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS DE ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO EM PEQUENAS BACIAS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO - RS

Porto Alegre

DEZEMBRO 2018

Sheila Mena Barreto Silveira. Porto Alegre: Engenharia Hídrica/UFRGS, 2018.

Sheila Mena Barreto Silveira

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS DE ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO EM PEQUENAS BACIAS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO - RS

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO AO INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÀULICAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO HÍDRICO.

Orientador/a: Profº Alfonso Risso

Co-orientador/a: Profº Alexandre Beluco

Porto Alegre

DEZEMBRO 2018

Sheila Mena Barreto Silveira. Porto Alegre: Engenharia Hídrica/UFRGS, 2018.

CIP - Catalogação na Publicação

Silveira, Sheila Mena Barreto
COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS DE ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO EM PEQUENAS BACIAS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO - RS / Sheila Mena Barreto Silveira. -- 2018.
61 f.
Orientador: Alfonso Risso.

Coorientador: Alexandre Beluco.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. SIG. 2. GEOPROCESSAMENTO. 3. POTENCIAL HIDROELÉTRICO. I. Risso, Alfonso, orient. II. Beluco, Alexandre, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Folha de Aprovação

Sheila Mena Barreto Silveira

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA REALIZAÇÃO DE ESTUDOS DE ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO EM PEQUENAS BACIAS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO - RS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 12/12/2018 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Alexandre Beluco – Departamento de Hidromecânica e Hidrologia – UFRGS

.....
Prof. Dr. Elton G. Rossini – UERGS

.....
Prof. Dr. José de Souza – Fundação Liberato – Novo Hamburgo/RS

Conceito:.....

Dedico este trabalho a todos que me “aguentaram” por
livre e espontânea vontade durante esta nova graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família (especialmente à minha mãe) pela ajuda, compreensão e apoio em todos os momentos da minha vida; aos meus amigos, por ainda gostarem de mim, depois de tantas ausências e ao Bruno por todo o companheirismo ao longo da graduação.

Agradeço ao Alfonso e demais professores por toda dedicação em primar por um ensino de qualidade acompanhado de respeito tanto dentro quanto fora de sala de aula.

Tenho juízo, mas não faço tudo certo, afinal
todo paraíso precisa de um pouco de
inferno.

Martha Medeiros

RESUMO

SILVEIRA, S. M. B. Comparação de metodologias para realização de estudos de estimativa de potencial hidroelétrico em pequenas bacias: estudo de caso na bacia do Arroio São João - RS**.** 2018. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Hídrica - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O presente trabalho apresenta a comparação de quatro bases de dados distintas e seus resultados associados, para avaliação do potencial hidroelétrico de uma pequena bacia, sendo uma baseada em dados obtidos diretamente em campo, denominada de método tradicional, enquanto que as outras três foram utilizados modelos digitais de elevação (MDE) com resoluções distintas e uso de ferramentas computacionais de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Scartazzini, Lanna e Risso (1994) realizaram a comparação entre o método tradicional e o uso de softwares de geoprocessamento, com a digitalização de cartas topográficas para geração de um MDE, ao passo que neste trabalho utilizou-se como dados de entrada MDE com resolução de 30 e 90 metros, obtidas através do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), no ambiente do software ArcGis®. O estudo de caso foi realizado na bacia do Arroio São João, localizado no município de Sinimbu, Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos referem-se à área, formato e declividades da bacia, vazão de referência (Q95), quantidade de quedas e à potência hidráulica disponível ao longo de toda a bacia hidrográfica. Como esperado, alguns resultados assemelharam entre si e, também, com os obtidos por Scartazzini, Lanna e Risso (1994), tais como a área e formato da bacia, entretanto, todos os demais divergiram, principalmente, por causa dos diferentes dados de entrada.

Palavras-chave: potencial hidroelétrico; geoprocessamento; SIG.

ABSTRACT

SILVEIRA, S. M. B. Comparison of methodologies for atteinment hydroelectric potential estimation studies in small basins: case study in Arroio São João - RS. 2018. 61 p. Undergraduate Thesis - Hydraulic Engineering - Hydraulic Research Institute. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The present work shows the comparison of four different databases and their associated results for the evaluation of the hydroelectric potential of a small basin, one based on data obtained directly in situ, called traditional method, while the other three models were used digital elevation model (DEM) with different resolutions and use of computational tools of Geographic Information System (GIS). Scartazzini, Lanna and Risso (1994) performed the comparison between the traditional method and the use of geoprocessing softwares, with the digitization of topographic charts for the generation of an DEM, whereas in this work was used DEM input data with resolution of 30 and 90 meters, obtained through the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), in the ArcGis® software. The case study was carried out in the Arroio São João basin, located in the municipality of Sinimbu, Rio Grande do Sul. The results obtained refer to the area, shape and slopes of the basin, reference discharge (Q95), number of falls and hydraulic power available throughout the hydrographic basin. As expected, some results resembled each other, as well as those obtained by Scartazzini, Lanna and Risso (1994), such as the area and shape of the basin, however, all the others diverged mainly because of the different input data.

Keywords: hydroelectric potential; geoprocessing; GIS.

RESUMEN

SILVEIRA, S. M. B. Comparación de metodologías para la realización de estudios de estimativa de potencial hidroeléctrico en pequeñas cuencas: estudio de caso en la cuenca del Arroio São João - RS. 2018. 61 p. Trabajo de conclusión de curso - Ingeniería Hidrica - Instituto de estudios hidraulicos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabajo presenta la comparación de cuatro bases de datos distintas y sus resultados asociados, para evaluar el potencial hidroeléctrico de una pequeña cuenca, siendo una basada en datos obtenidos directamente en campo, denominada método tradicional, mientras que las otras tres fueron utilizados modelos digitales de elevación (MDE) con resoluciones distintas y el uso de herramientas computacionales de Sistema de Información Geográfica (SIG). Scartazzini, Lanna y Risso (1994) realizaron la comparación entre el método tradicional y el uso de softwares de geoprocesamiento con la digitalización de mapas topográficos para la generación de un MDE, mientras que en este trabajo se utilizaron como datos de entrada MDE con resoluciones de 30 y 90 metros, obtenidas a través del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), en el ambiente del software ArcGis. El estudio de caso fue realizado en la cuenca del Arroio São João, ubicado en el municipio de Sinimbu, Rio Grande do Sul. Los resultados obtenidos se refieren al área, la forma, pendiente de la cuenca, caudal de referencia (Q95), cantidad de caídas y potencia hidráulica disponible a lo largo de toda la cuenca hidrográfica. Como se esperaba, algunos resultados se asemejaron entre sí, y también, a los resultados obtenidos por Scartazzini, Lanna y Risso (1994), tales como el área y la forma de la cuenca, sin embargo, todos los demás divergieron, principalmente, debido a los diferentes datos de entrada.

palabras lhave: potencial hidroeléctrico; geoprocesamiento; SIG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Potencial tecnicamente aproveitável para geração de energia hidroelétrica no mundo. 11
Figura 02: Matriz Energética Mundial. 11
Figura 03: Matriz energética brasileira. 12
Figura 04: Matriz Elétrica Mundial. 13
Figura 05: Matriz Elétrica do Brasil. 13
Figura 06: Imagem de Satélite extraída do Google Earth® do município da área de estudo. . 17
Figura 07: Imagem de Satélite extraída do Google Earth da área de estudo. 18
Figura 08: Bacia do Arroio São João delimitada por Scartazzini, Lanna e Risso (1994). 18
Figura 09: Regiões Hidrográficas do Rio Grande do Sul. 19
Figura 10: Bacia Hidrográfica da Região Hidrográfica do Guaíba. 19
Figura 11: MDE da Área de Interesse na resolução de 30 metros. 24
Figura 12: MDE da Área de Interesse na resolução de 90 metros. 25
Figura 13: Principais etapas realizadas para delimitação de bacias hidrográficas a partir de dados SRTM. 25
Figura 14: Código de Direção da ferramenta Direção de Fluxo, ou Flow Direction do software ArcGis. 26
Figura 15: Direção de Fluxo, ou Flow Direction, da área de interesse, obtido utilizando o MDE e o software ArcGis. 27
Figura 16: Fluxo Acumulado, ou Flow Accumulation, da área de interesse, obtido utilizando o MDE e o software ArcGis. 28
Figura 17: Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros. 31
Figura 18: Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros. 32
Figura 19: Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando os MDE's de resolução de 30 e 90 metros. 33
Figura 20: Mapa de Declividades da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros. 34
Figura 21: Mapa de Declividades da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros. 34
Figura 22: Mapa de Q95 da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros. 36
Figura 23: Mapa de Q95 da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros. 37
Figura 24: Mapa das quedas da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros. 38
Figura 25: Mapa das quedas da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros. 38
Figura 26: Histograma das quedas da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros. 39
Figura 27: Histograma das quedas da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros. 39
Figura 28: Mapa das potências da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros. 40

Figura 29: Mapa das potências da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.....41
Figura 30: Histograma das potências da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros.....42
Figura 31: Histograma das potências da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.....42
Figura 32: Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando dados de carta topográfica de escala 1:50.000, dados de SRTM de 90 metros de resolução e dados de SRTM de 30 metros de resolução, em sentido horário da esquerda para a direita.....43

LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Estado (valores em MW) 16
Quadro 02: Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Bacia Hidrográfica (valores em MW).....16
Quadro 03: Comparação entre o potencial obtido através do método tradicional e a metodologia utilizando SIG.....20
Quadro 4: Comparação entre parâmetros estatísticos da declividade da bacia hidrográfica do Arroio São João. 35
Quadro 05: Áreas das Bacias obtidas com as diferentes metodologias.....44
Quadro 06: Classificação por alturas de quedas de água na bacia do Arroio São João. 44
Quadro 07: Quedas na Bacia Hidrográfica do Arroio São João.....45
Quadro 08: Percentual de Quedas na Bacia Hidrográfica do Arroio São João. 45
Quadro 09: Comparação entre o potencial levantado em campo e o localizado pelo SGI para as metodologias utilizadas por Scartazzini, Lanna e Risso (1994) na bacia hidrográfica do Arroio São João. 46
Quadro 10: Comparação entre o potencial hidroelétrico das metodologias propostas pela Autora e realizada no presente trabalho para a bacia hidrográfica do Arroio São João.....46
Quadro 11: Potencial Hidroelétrico da Bacia do Arroio São João - RS.....47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de declividade e tipo de relevo. 29

LISTA DE SIGLAS

ABRAPCH	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PCHs E CGHs
ANA	AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
CGH	CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA
EMBRAPA	EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA
EPE	EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA
FEPAM	FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER - RS
IEA	INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
MDE	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO
NASA	NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
NGA	NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY
PCH	PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA
PROINFA	PROGRAMA DE INCENTIVO ÀS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA ELÉTRICA
SEMA – RS	SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO RIO GRANDE DO SUL
SIG	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

SIPOT	SISTEMA DE INFORMAÇÕES DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO BRASILEIRO
SRTM	SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION
UHE	USINAS HIDRELÉTRICA
UFRGS	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
USGS	UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 8

2. JUSTIFICATIVA 8

3. OBJETIVOS 9

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 10
4.1 A HIDROELETRICIDADE NO BRASIL E NO MUNDO 10
4.2 LEGISLAÇÃO APLICADA AO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO NO BRASIL 13
4.3 ESTUDOS DE ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO 15
4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO - RS) 17
4.5 ESTUDO DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO REALIZADO POR SCARTAZZINI, LANNA E RISSO (1994) 20
4.6 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) 21
4.7 SRTM E MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO 22

5. MATERIAIS E MÉTODOS 24

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES 31
6.1 BACIA HIDROGRÁFICA 31
6.2 MAPA DE DECLIVIDADES 33
6.3 Q95 36
6.4 QUANTIFICAÇÃO DE QUEDAS 37
6.5 POTENCIAL HIDROELÉTRICO 40

7. COMPARAÇÃO ENTRE OS ESTUDOS 43
7.1 FORMATO E ÁREA DA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO 43
7.2 CLASSIFICAÇÃO POR ALTURAS DE QUEDAS NA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO 44
7.3 POTÊNCIA NAS QUEDAS NA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO 45

8. CONCLUSÃO 48

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 49

1. INTRODUÇÃO

Historicamente países como o Brasil, classificados como em desenvolvimento, requerem uma grande demanda por energia elétrica. Associado a esta necessidade energética está o incentivo pelo uso de energias renováveis, como é o caso da hidroeletricidade. Portanto, a possibilidade de reavaliar o potencial hidráulico de bacias hidrográficas é uma alternativa, em alguns casos, de viabilizar empreendimentos, que devido à carência de tecnologia e/ou dados mais exatos, não eram viáveis no passado.

O presente trabalho demonstra, através da análise de resultados de potencial hidrelétrico de uma pequena bacia, a relevância dos dados e do método de processamento para a obtenção dos mesmos.

2. JUSTIFICATIVA

Considerando que a matriz energética brasileira está em constante expansão, acarretando o aumento da demanda por empreendimentos geradores de energia, principalmente as denominadas renováveis, a reavaliação de bacias cujos potenciais hidrelétricos já foram estabelecidos no passado, é uma alternativa que possibilita a ampliação da gama de opções de locais para a implantação destas obras hidráulicas. Neste viés, o presente trabalho apresenta a comparação de quatro metodologias e consequentemente dos resultados, dos estudos de estimativa de potencial hidroelétrico da bacia do Arroio São João - RS. Scartazzini, Lanna e Risso (1994) apresentaram o método tradicional e uso de SIG a partir de uma base cartográfica em escala de 1:50.000, enquanto que no presente trabalho exibe os estudos realizados com duas novas bases de dados geográficos com diferentes resoluções espaciais, oriundos da missão espacial denominada de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), em ambiente de SIG do software ArcGis®.

3. OBJETIVOS

O Objetivo Geral do presente trabalho é comparar diferentes fontes de dados, metodologias e seus resultados associados, utilizados para realização dos estudos de Estimativa do Potencial Hidroelétrico da bacia do Arroio São João – RS.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a estimativa do potencial hidroelétrico da bacia do Arroio São João - RS utilizando um modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 30 metros e as rotinas do software ArcGis®;
- Avaliar a estimativa do potencial hidroelétrico da bacia do Arroio São João - RS utilizando um modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 90 metros e as rotinas do software ArcGis®;
- Comparar os resultados obtidos através das diferentes metodologias, dos estudos de estimativa do potencial hidroelétrico da bacia do Arroio São João - RS.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será realizada uma breve revisão bibliográfica dos assuntos abordados neste trabalho, no intuito de permitir um embasamento teórico mínimo sobre os temas discorridos no mesmo.

4.1 A HIDROELETRICIDADE NO BRASIL E NO MUNDO

Notadamente sabe-se que o desenvolvimento econômico de uma sociedade está associado ao consumo de energia elétrica, logo, para que haja o incremento positivo, é necessário se produzir cada vez mais energia. Devido as constantes motivações ecológicas, o uso de energias consideradas limpas está aumentando, e é neste viés que se encontram as expansões de obras hidráulicas de produção de energia elétrica, as denominadas, no Brasil, de Pequena Central Hidrelétrica (PCH), Central Geradora Hidrelétrica (CGH) e Usinas Hidrelétricas (UHE) (ABRAPCH, 2018a; EVANGELISTA, 2012; MAURIZ, 2008).

Segundo MAURIZ (2008), apenas um quarto do volume de água precipitada está efetivamente disponível para aproveitamento hidráulico, valor este considerado sem qualquer análise referente as condições do local de instalação do aproveitamento, tais como a topografia do terreno assim como o tipo de chuva, presença de aglomerações antrópicas e áreas de preservação ambiental. A Figura 01 ilustra este potencial, no qual é possível destacar que o Brasil como uma das áreas com elevado valor de potencial aproveitável para a geração de energia hidroelétrica.

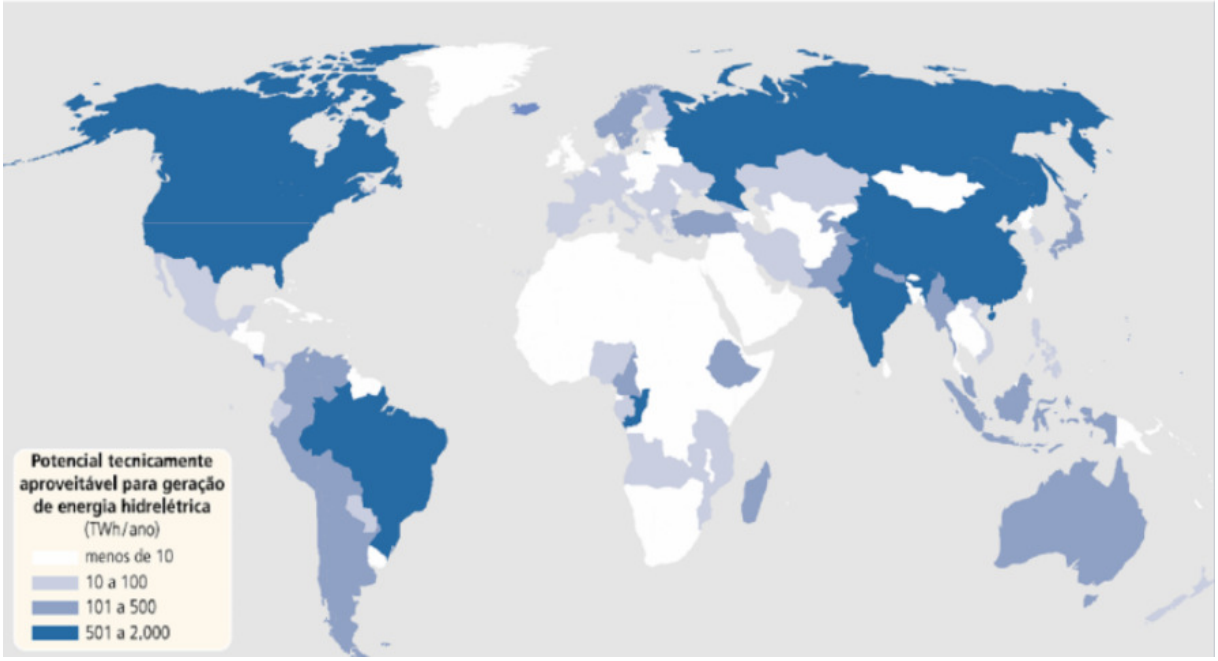


Figura 01: Potencial tecnicamente aproveitável para geração de energia hidroelétrica no mundo.

Fonte: MAURIZ, 2008.

Como, no mundo, existem áreas em que não há potencial para geração de energia hidroelétrica e a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia ainda possui valores aceitáveis, apesar da crescente demanda pela utilização de energias não renováveis, a matriz energética mundial ainda é baseada em energias não renováveis, conforme exposto na Figura 02.

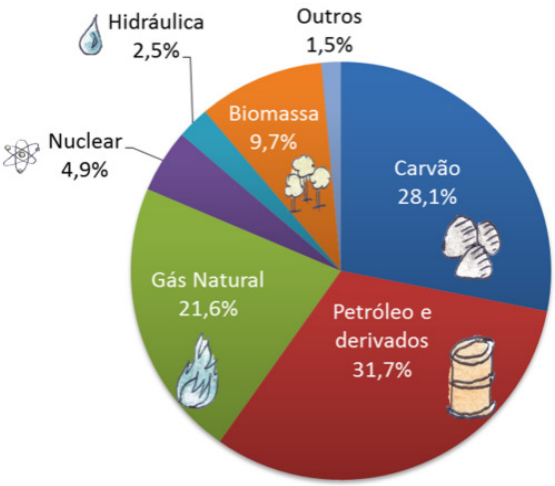


Figura 02: Matriz Energética Mundial.

Fonte: EPE, 2018a.

No Brasil, este panorama é totalmente distinto, tanto que EVANGELISTA (2008) e EPE (2018b) afirmam que é o país com a matriz energética mais renovável do mundo industrializado. Este fato se deve, principalmente, ao grande incentivo, a partir dos anos 1970, para a construção de obras hidráulicas para produção de energia elétrica, incorporando assim um aumento significativo na matriz energética brasileira de energia hidroelétrica e acarretando, consequentemente, a iniciativa de aumento de fontes de energia renováveis, tais como a eólica e a biomassa (ABRAPCH, 2018b; BRASIL, 2011; BRASIL, 2015; EPE., 2018a). Na Figura 03 é possível verificar os componentes da matriz energética do Brasil, sendo a hidráulica contabilizada como 12,6%.

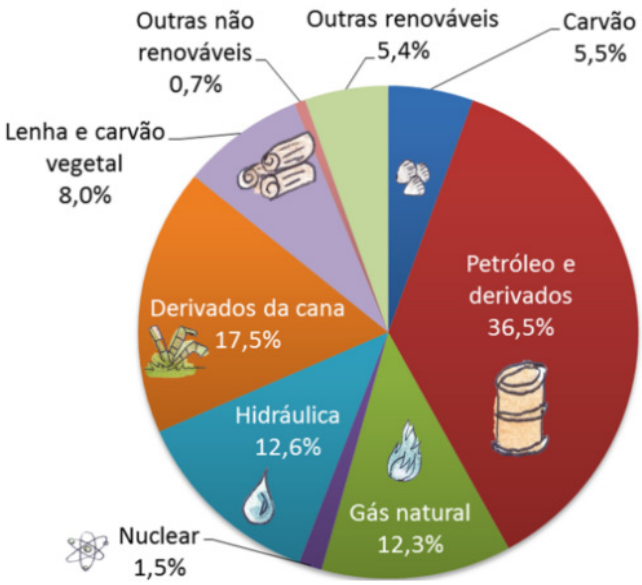


Figura 03: Matriz energética brasileira.

Fonte: EPE, 2018a.

As Figuras 04 e 05 apresentam, respectivamente, a matriz elétrica mundial e brasileira, as quais apresentam pouca semelhança pois quase 70% da energia elétrica do Brasil é advinda da hidroeletricidade, enquanto que a mundial este percentual se reduz à 16%.

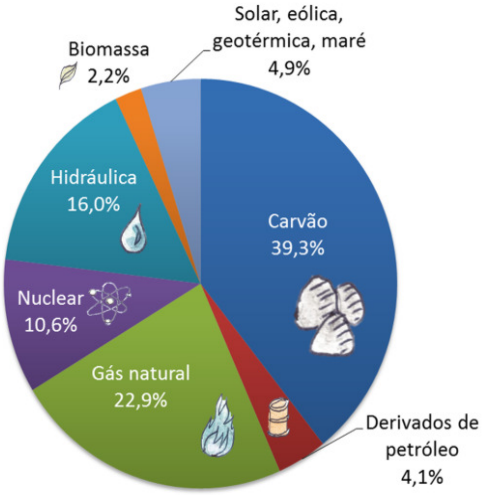


Figura 04: Matriz Elétrica Mundial.

Fonte: EPE, 2018a.

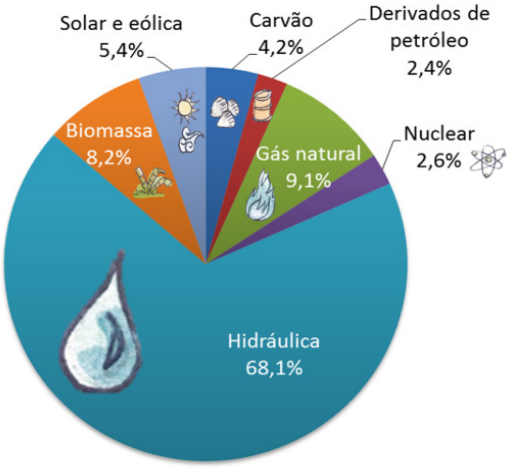


Figura 05: Matriz Elétrica do Brasil.

Fonte: EPE, 2018a.

.

De acordo com a EPE (2018b), em 2017 o consumo de energia elétrica no Brasil foi de 465,13 GWh, sendo 65% deste valor do consumo em residências e indústrias do país, considerando que a quantidade de energia elétrica consumida per capita é de 2,52 MWh, (IEA, 2018).

Considerando que o Brasil possui uma vasta rede hidrográfica com topografias adequadas para a geração de energia associado ao inventivo para construção de obras hidráulicas para geração de energia, houve a necessidade de implantação de legislações específicas para a regulação dos estudos e construção das UHE'S, PCH'S e CGH'S, algumas das quais serão apresentadas abaixo.

4.2 LEGISLAÇÃO APLICADA AO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO NO BRASIL

Este subitem visa citar as principais leis e decretos federais relativos às fases de estudos e projetos para implantação de um aproveitamento hidroelétrico no Brasil. Destaca-se que a legislação ambiental, estaduais e municipais não serão abordadas, visto suas inúmeras singularidades e variações regionais.

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 estabeleceu em seu artigo 20° que os potenciais de energia hidráulica são bens da União e em seu artigo 21° que compete à União explorar, diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão os serviços e instalações de energia elétrica e o aproveitamento energético dos cursos de água, em articulação com os Estados onde se situam os potenciais hidroenergéticos.

A Lei Federal nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989 que instituiu, para os Estados, Distrito Federal e Municípios, a compensação financeira pelo resultado da exploração de petróleo ou gás natural, de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica, de recursos minerais em seus respectivos territórios, plataforma continental, mar territorial ou zona econômica exclusiva.

A Lei Federal n° 9.074 de 07 de julho de 1995 estabeleceu as normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos, tais como a concessão para os aproveitamentos de potenciais hidráulicos de potência superior a 50.000 kW (cinquenta mil quilowatts) destinados à produção independente de energia elétrica e de autorização os aproveitamentos de potenciais hidráulicos de potência superior a 5.000 kW (cinco mil quilowatts) e igual ou inferior a 50.000 kW (cinquenta mil quilowatts) destinados a uso exclusivo do autoprodutor e a produção independente de energia.

As Leis Federais nº 9.427 de 26 de dezembro de 1996 que institui a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e a nº 10.847, de 15 de março de 2004 que autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

A Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

A Lei Federal n° 10.438 de 26 de dezembro de 2002 que dentre as diversas disposições, criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) que tem o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos de Produtores Independentes Autônomos, concebidos com base em fontes eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa, no Sistema Elétrico Interligado Nacional.

O Decreto nº 7.154, de 9 de abril de 2010 que sistematizou e regulamentou a atuação de órgãos públicos federais, estabelecendo procedimentos a serem observados para autorizar e realizar estudos de aproveitamentos de potenciais de energia hidráulica e sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica no interior de unidades de conservação bem como para autorizar a instalação de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica em unidades de conservação de uso sustentável.

4.3 ESTUDOS DE ESTIMATIVA DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO

BRASIL (2007) afirma que as etapas de estudos e projetos para a implantação de um aproveitamento hidroelétrico são compostas por: Estimativa do Potencial Hidroelétrico, Inventário Hidroelétrico, Viabilidade, Projeto Básico e Projeto Executivo.

Os primeiros estudos são os que englobam a fase denominada de Estimativa do Potencial Hidroelétrico e são compostos, basicamente, do levantamento de informações básicas da Bacia Hidrográfica de interesse, tais como os aspectos topográficos, hidrológicos, geológicos e ambientais, todos no intuito de verificar sua vocação para a geração de energia elétrica (BRASIL, 2007). Atualmente, esta fase é predominantemente baseada em dados públicos acessíveis a qualquer cidadão, sem necessidade de realizar levantamentos em campo, visto a grande disponibilidade e acessibilidade dos mesmos. Entretanto, na época em que foram realizados os estudos de Scartazzini, Lanna e Risso (1994), o cenário era outro, visto que a metodologia dita tradicional era a realização de medições em campo, conforme exposto no item 4.5.

O Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT) apresentou em seu website os quadros 01 e 02, que se referem ao Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Estado (valores em MW) e por Bacia Hidrográfica, respectivamente. Nota-se que o Estado do Rio Grande do Sul, assim como a Bacia do Atlântico Sudeste apresentam aproximadamente 4,1% do total do Brasil.

Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Estado (valores em MW) Dezembro de 2016 *(Fonte: SIPOT Eletrobras)*							
UF	Estimado	Inventário	Viabilidade	Projeto Básico	Construção	Operação	Total
AC	1.058	63	0	0	0	0	1.121
AL	17	13	1.165	0	0	1.582	2.777
AM	12.935	7.046	0	7	0	250	20.238
AP	360	1.060	66	8	0	735	2.228
BA	324	1.628	3.038	372	0	6.859	12.221
CE	0	3	0	18	0	4	25
DF	0	0	0	0	0	30	30
ES	213	627	0	19	0	558	1.417
GO	2.066	4.054	405	116	29	5.735	12.405
MA	292	430	894	3	0	663	2.282
MG	2.512	7.255	754	701	105	12.665	23.992
MS	843	934	0	761	38	3.636	6.211
MT	5.588	11.143	75	282	1.122	2.944	21.154
PA	5.154	23.036	930	712	350	20.831	51.013
PB	6	2	0	0	0	4	11
PE	0	304	500	22	0	758	1.584
PI	0	101	230	0	0	119	450
PR	1.464	3.708	1.666	964	350	16.059	24.211
RJ	545	853	220	146	27	1.454	3.245
RN	0	2	0	0	0	0	2
RO	5.307	477	0	57	41	7.338	13.220
RR	4.262	1.301	324	0	0	5	5.892
RS	1.745	3.516	146	274	25	4.506	10.212
SC	470	2.080	146	419	167	4.108	7.390
SE	0	0	1.165	0	0	1.581	2.746
SP	770	975	2.162	233	0	11.087	15.226
TO	157	1.833	2.304	80	0	2.320	6.693
Totais	46.087	72.445	16.189	5.192	2.255	105.829	247.997

Quadro 01: Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Estado (valores em MW)
Fonte: Adaptado de SIPOT, 2018

Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Bacia Hidrográfica (valores em MW) Dezembro de 2016 *(Fonte: SIPOT Eletrobras)*							
Bacia	Estimado	Inventário	Viabilidade	Projeto Básico	Construção	Operação	Total Geral
Rio Amazonas	32.976	38.369	774	949	1.503	22.074	96.645
Rio Tocantins	1.875	8.056	3.738	120	0	13.245	27.033
Atlântico Norte e Nordeste	707	871	466	50	0	812	2.905
Rio São Francisco	1.561	3.896	6.140	234	32	10.751	22.615
Atlântico Leste	1.423	5.796	665	822	71	5.394	14.170
Rio Paraná	5.100	9.524	1.896	2.241	457	43.439	62.658
Rio Uruguai	416	4.054	292	451	152	6.359	11.723
Atlântico Sudeste	2.031	1.880	2.218	325	40	3.755	10.248
Totais	46.087	72.445	16.189	5.192	2.255	105.829	247.997

Quadro 02: Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Bacia Hidrográfica (valores em MW)
Fonte: Adaptado de SIPOT, 2018

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO - RS)

A área de estudo está inserida no município de Sinimbu, no Estado do Rio Grande do Sul, próximo ao município de Santa Cruz do Sul, conforme exibe a composição do aplicativo GoogleEarth® exposta na Figura 06.

Figura 06: Imagem de Satélite extraída do Google Earth® do município da área de estudo.

Fonte: Própria da Autora

A Figura 07 apresenta a área de estudo de forma mais detalhada, com imagem de satélite atual (base GoogleEarth). Scartazzini, Lanna e Risso (1994) apresentaram em seu trabalho, a fim de contextualizar a área de estudo, a bacia hidrográfica do recurso hídrico denominado de Arroio São João, exibida na Figura 08. Comparando as imagens é possível identificar as semelhanças nas feições geomorfológicas entre ambas. Quanto ao recurso hídrico denominado de Arroio São João, o mesmo circunda a estrada que foi desenvolvida após os estudos realizados pelos autores supracitados.

Figura 07: Imagem de Satélite extraída do Google Earth da área de estudo.

Fonte: Própria da Autora

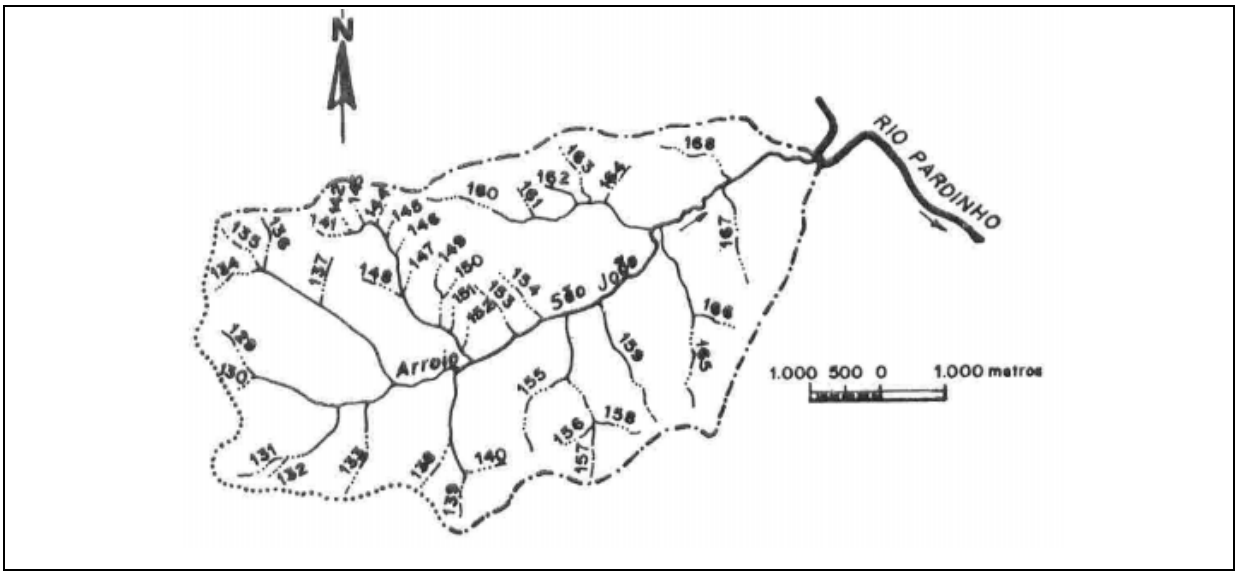


Figura 08: Bacia do Arroio São João delimitada por Scartazzini, Lanna e Risso (1994).

Fonte: Scartazzini, Lanna e Risso (1994).

A Região Hidrográfica da área de estudo é a do Guaíba (Figura 09), que conta com uma área de 84.763,54 Km^2 e corresponde a 30% da área total do Estado do Rio Grande do Sul (FEPAM, 2018). A Bacia Hidrográfica é a do Rio Pardo, conforme exibida na Figura 10, com área de 3.658,34 km², população estimada em 209.060 habitantes e o principal uso da água é a irrigação (SEMA-RS, 2018).

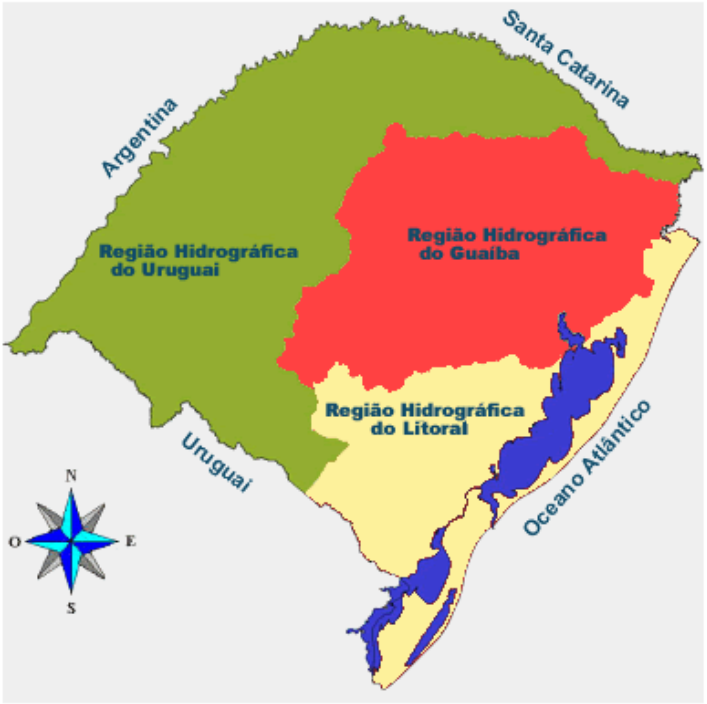


Figura 09: Regiões Hidrográficas do Rio Grande do Sul.

Fonte: FEPAM, 2018

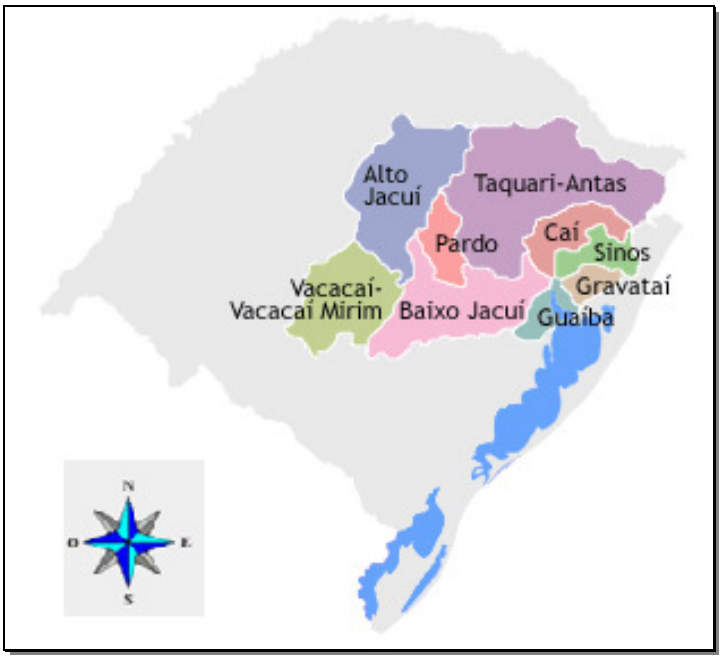


Figura 10: Bacia Hidrográfica da Região Hidrográfica do Guaíba.

Fonte: SEMA-RS, 2018

4.5 ESTUDO DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO REALIZADO POR SCARTAZZINI, LANNA E RISSO (1994)

Scartazzini, Lanna e Risso (1994) realizaram a comparação entre o método tradicional e o uso de SIG com dados obtidos de cartas topográficas do exército para a análise do potencial hidroelétrico do Arroio São João – RS, obtendo os valores expostos no Quadro 03.

FAIXA DE POTÊNCIA (kW)	MÉTODO ADOTADO			
	TRADICIONAL		SIG	
	Número de Ocorrências	%	Número de Ocorrências	%
De 50 a 300	44	54.3	30	17.7
De 301 a 600	24	29.6	30	26.5
De 601 a 1.000	4	4.9	29	25.6
De 1.001 a 2.000	7	8.6	28	24.8
Acima de 2.000	2	2.4	6	5.3
Total	81	100	113	100

Quadro 03: Comparação entre o potencial obtido através do método tradicional e a metodologia utilizando SIG.
Fonte: Adaptado de Scartazzini, Lanna e Risso, 1994.

A metodologia tradicional é composta basicamente da campanha de campo, na qual o técnico percorre de forma sistemática todos os cursos d'água da bacia supracitada, a fim de realizar a determinação da vazão e as medições de alturas das quedas. Ressalta-se que foi adotado o critério de inventariar quedas com altura igual ou superior a 2 metros e vazões mínimas iguais ou superiores a l litro por segundo.

O método utilizando GIS foi realizado usando as informações extraídas da carta topográfica do exército na escala 1:50.000 e inseridas no software utilizando uma mesa digitalizadora, obtendo assim o modelo numérico do terreno (MNT) com malha de 44 x 44 metros (escolha baseada na melhor resolução para o processador e memória do computador disponível na época), possibilitando realizar a determinação da bacia e a matriz de declividades e, também, o mapa de drenagem superficial, este representando as superfícies

com área superior a 0,25 Km^2 que drena para o ponto desejado uma vazão superior a 2 l/s com 95 % de permanência.

Destaca-se que para ambas metodologias foi utilizada a equação (01), sugerida por ELETROBRÁS (1985), para estimar o potencial hidráulico de uma queda de água assim como a técnica de regionalização para determinar a vazão de referência, cuja equação está em explicitada em (02) e foi proposta por CEEE (1991).

$$P = 7,5.q.h \quad (01)$$

onde P é a potência em kW, q é a vazão de referência em m^3/s, h é a altura total da queda em metros; o fator constante de 7,5 leva em consideração as perdas de carga e o rendimento do grupo turbinagerador.

$$Q95 = 0,00458.A^{0,981} \quad (02)$$

onde Q95 é a vazão com 95 % de permanência em m3/s, e A é a área de drenagem em km^2.

4.6 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Segundo AMARAL (2008), o conceito de Sistema de Informações Geográficas (SIG) começou a ser desenvolvido nos anos 60, mas somente a partir dos anos 80 que foi mais aceito, sendo que depois dos anos 90 começou a ser aplicado em maior escala, apresentando como principal consequência desta evolução, a melhoria contínua das técnicas associadas. No Brasil, o crescente aumento na utilização de SIG, a partir dos anos 2000, foi devido à redução dos custos de aquisição de computadores, ao aumento da capacidade computacional, à grande quantidade de informações espaciais públicas disponibilizadas, além da diversidade de softwares desenvolvidos para este fim (TRINDADE, 2012; PAZ e COLLISCHONN, 2008).

Geoprocessamento é o conjunto de técnicas utilizadas para compilar e tratar informações geográficas em dados digitais (FAN, 2011), enquanto que SIG são os sistemas automatizados que permitem aos usuários realizarem estas operações (TRINDADE, 2012).

Ao longo do tempo foram desenvolvidos inúmeros softwares de SIG, tanto comerciais, cuja licença é comprada, quanto "livres" ou "*free*", que possuem código aberto e são disponibilizados de forma gratuita. Destaca-se que os softwares do primeiro tipo possuem, normalmente, maior robustez no processamento de dados, além de possuírem maior número de ferramentas e interface mais amigável do que os do segundo tipo (FAN, 2011; TRINDADE, 2012).

O software comercial ArcGis®, desenvolvido pelo *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) é uma ferramenta computacional de geoprocessamento muito utilizada, sendo, inclusive, a escolhida para a aplicação no presente trabalho. Esta opção se deve à parceria da ESRI com a UFRGS, permitindo aos alunos utilizar o software, com fins acadêmicos, e, também, por possuir em seu módulo ArcMap todas as ferramentas necessárias para a realização do mesmo.

4.7 SRTM E MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

A missão espacial desenvolvida com o objetivo de obter dados referentes à topografia da superfície terrestre, denominada de *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), realizada em 2000, por órgãos públicos dos Estados Unidos da América, originou um vasto banco de dados digitais de elevação de terreno de alta resolução, disponíveis de forma gratuita pela USGS em seu website (CASTRO *et al.* 2011; WEBER, HASENACK e FERREIRA, 2004). Os dados SRTM foram processados, antes da disponibilização pública, segundo as normas de acurácia da Agência de Inteligência Geoespacial dos Estados Unidos (NIMA) (CARVALHO e BAYER, 2008) e de acordo com CASTRO *et al.* (2011) a confiabilidade dos dados disponibilizados para o público é de 90%.

O resultado da primeira missão espacial foram modelos digitais de elevação de terreno denominados de SRTM-1 e SRTM-3, possuindo o primeiro a resolução de aproximadamente

30 metros e correspondendo um pixel a 1 *arc-second* enquanto que o segundo as valorações são de aproximadamente 90 metros e 3 *arc-second*. Os produtos de melhor resolução eram apenas disponibilizados para os Estados Unidos, entretanto em 2014, foram disponibilizadas para todos (CARVALHO e BAYER, 2008).

Os modelos digitais de terreno (MDT), modelos digitais de elevação (MDE), modelos numéricos de terreno (MNT) e modelos numéricos de superfície (MNS) são modelos de representação matemática que representa uma característica topográfica espacialmente. Estes são modelos matriciais (RASTER), apresentados na forma de grades regulares, onde a cada célula ou *pixel* é atribuída uma cota relacionada com um referencial estabelecido (CARVALHO e BAYER, 2008; CORREA et al. 2017; FAN et al. 2013; PAZ e COLLISCHONN, 2008).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa das duas metodologias propostas neste trabalho consistiu na obtenção dos dados para gerar o Modelo Digital de Elevação de Terreno (MDE) da área de interesse com resolução de 30 e 90 metros. Para tanto foram utilizadas duas matrizes altimétricas da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) distintos; para o primeiro, os dados brutos foram retirados de USGS (2018), enquanto que para o segundo, utilizou-se os dados processados por WEBER, HASENACK e FERREIRA (2004).

Para o processamento destes dados utilizou-se o módulo ArcMap versão 10.3.0.4322 do software ArcGis®, no qual as matrizes SRTM em formato GEOTIFF (16 bits) e foram convertidas para a projeção espacial SIRGAS 2000, UTM, Zona 22S. Para a definição utilizou-se a ferramenta "*Define Projection Tools*", que permitiu o adequado georreferenciamento do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de interesse, que corresponde a área de estudo e entorno, conforme exibido nas Figuras 11 e 12, que correspondem, respectivamente às resoluções aproximadas de 30 e 90 metros.

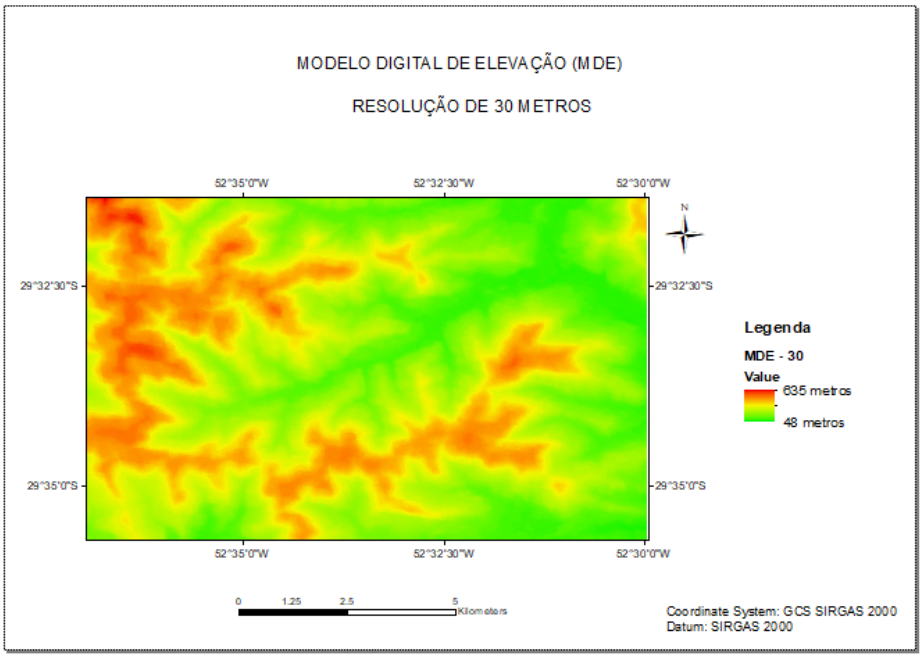


Figura 11: MDE da Área de Interesse na resolução de 30 metros.

Fonte: Própria da Autora

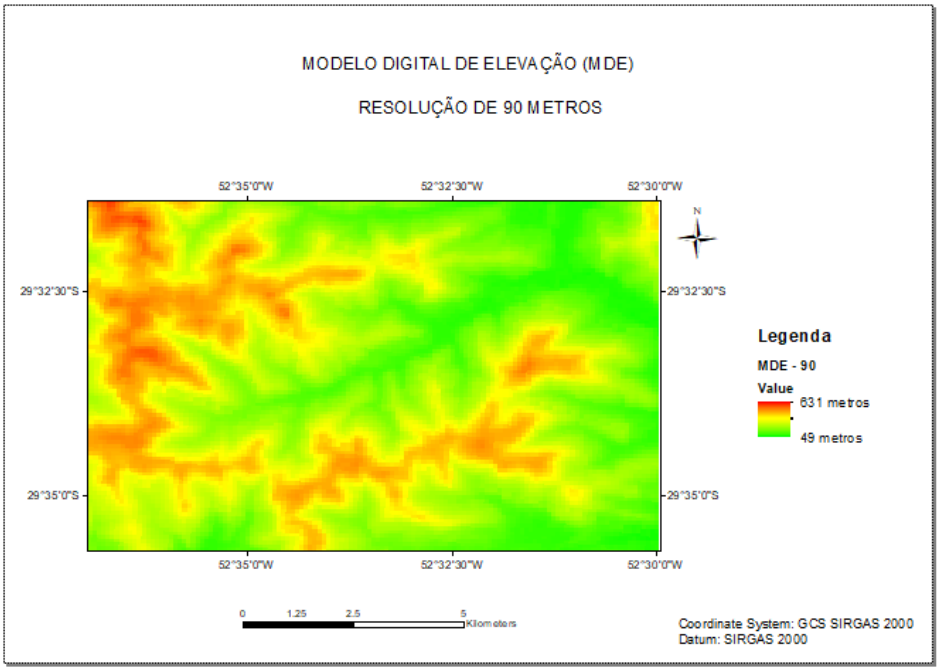


Figura 12: MDE da Área de Interesse na resolução de 90 metros.

Fonte: Própria da Autora

Destaca-se que todas as etapas descritas nesta metodologia foram realizadas para as matrizes altimétricas com resolução de 30 e 90 metros, sendo apresentados, com fins ilustrativos, apenas os resultados parciais da simulação com pior resolução (90 metros).

A Figura 13 ilustra as principais etapas de processamento do MDE desde a correção do mesmo até a delimitação da Bacia Hidrográfica, ferramentas disponibilizadas no módulo Hidrologia (*Hydrology*), das Ferramentas de Análise Espacial (*Spatial Analyst Tools*) do ArcMap, que são: Preenchimento (ou *Fill*), Direção de Fluxo (ou *Flow Direction*), Fluxo Acumulado (ou *Flow Accumulation*) e Delimitação da Bacia Hidrográfica (ou *Watershed*).

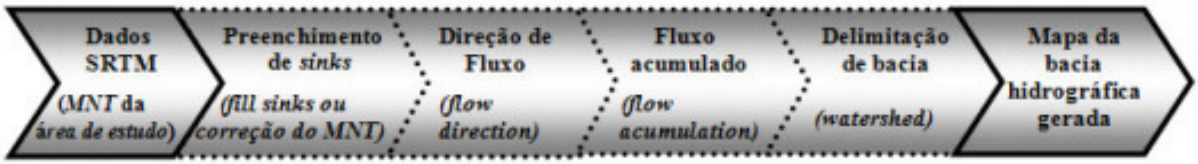


Figura 13: Principais etapas realizadas para delimitação de bacias hidrográficas a partir de dados SRTM.

Fonte: SOBRINHO *et al*. 2010

A etapa de Preenchimento, ou *Fill*, corresponde à correção do MDE em relação a falhas, denominadas de *sinks*, que se caracterizam por serem depressões naturais ou artefatos artificiais decorrentes dos processos de obtenção do MDE. Estes erros ocorrem, principalmente, em locais próximos de corpos hídricos e com relevo acidentado (superfícies com inclinação acima de 20°), devendo ser corrigido para gerar um modelo mais robusto e consistente, diminuindo a possibilidade de erros nas etapas subsequentes do trabalho (SOBRINHO *et al*. 2010).

Sobre o MDE consistido, utilizou-se a ferramenta denominada de Direção de Fluxo, ou *Flow Direction*, que visa estabelecer a direção que o fluxo tende a percorrer. Com esta ferramenta é possível gerar um mapa que indica, através da escala ilustrada na Figura 14, a direção para cada célula da matriz. A ferramenta utilizada para estimativa da direção de fluxo, utiliza como referência a célula vizinha com maior declividade a jusante em relação a célula central, também conhecida como método D8 (JENSON and DOMINGUE, 1988). A Figura 15 apresenta o mapa originado na área de interesse (SOBRINHO *et al*. 2010).

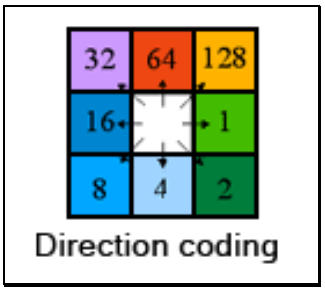


Figura 14: Código de Direção da ferramenta Direção de Fluxo, ou *Flow Direction* do software ArcGis.
Fonte: Adaptado de Tutorial do software ArcGis.

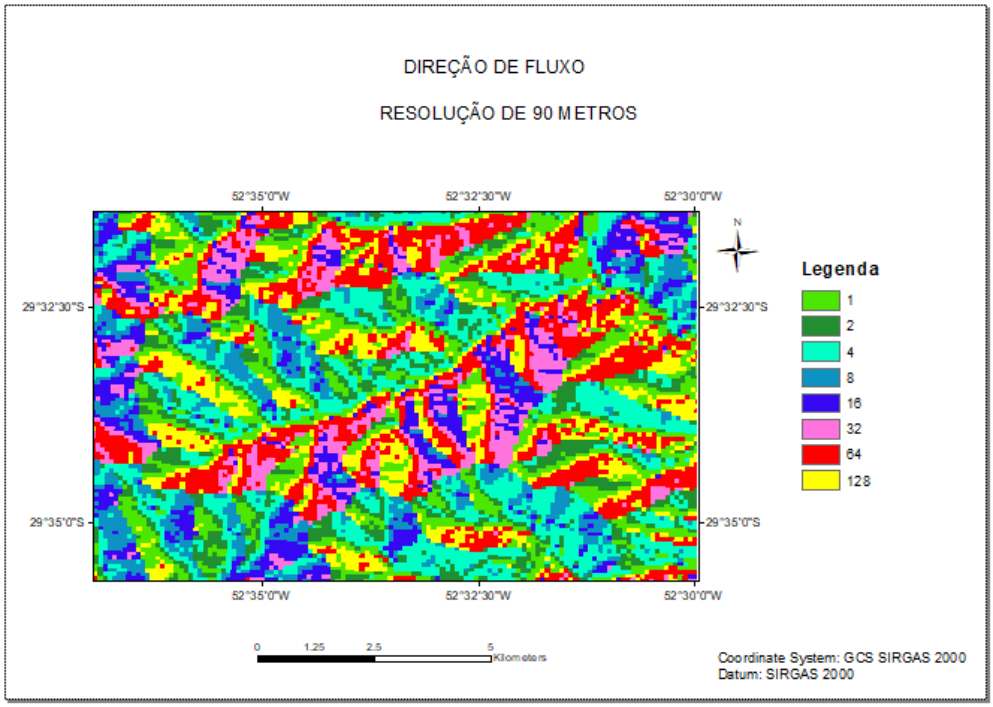


Figura 15: Direção de Fluxo, ou *Flow Direction*, da área de interesse, obtido utilizando o MDE e o software ArcGis.

Fonte: Própria da Autora

O Fluxo Acumulado, ou *Flow Accumulation*, é uma ferramenta que estima a área de contribuição a montante de cada célula do MDE, a partir do mapeamento das direções de fluxo gerados na etapa anterior. O produto obtido nesta etapa, permite a visualização do diagrama unifilar da hidrografia ajustada a topografia do modelo. A Figura 16 apresenta o mapa gerado nesta etapa.

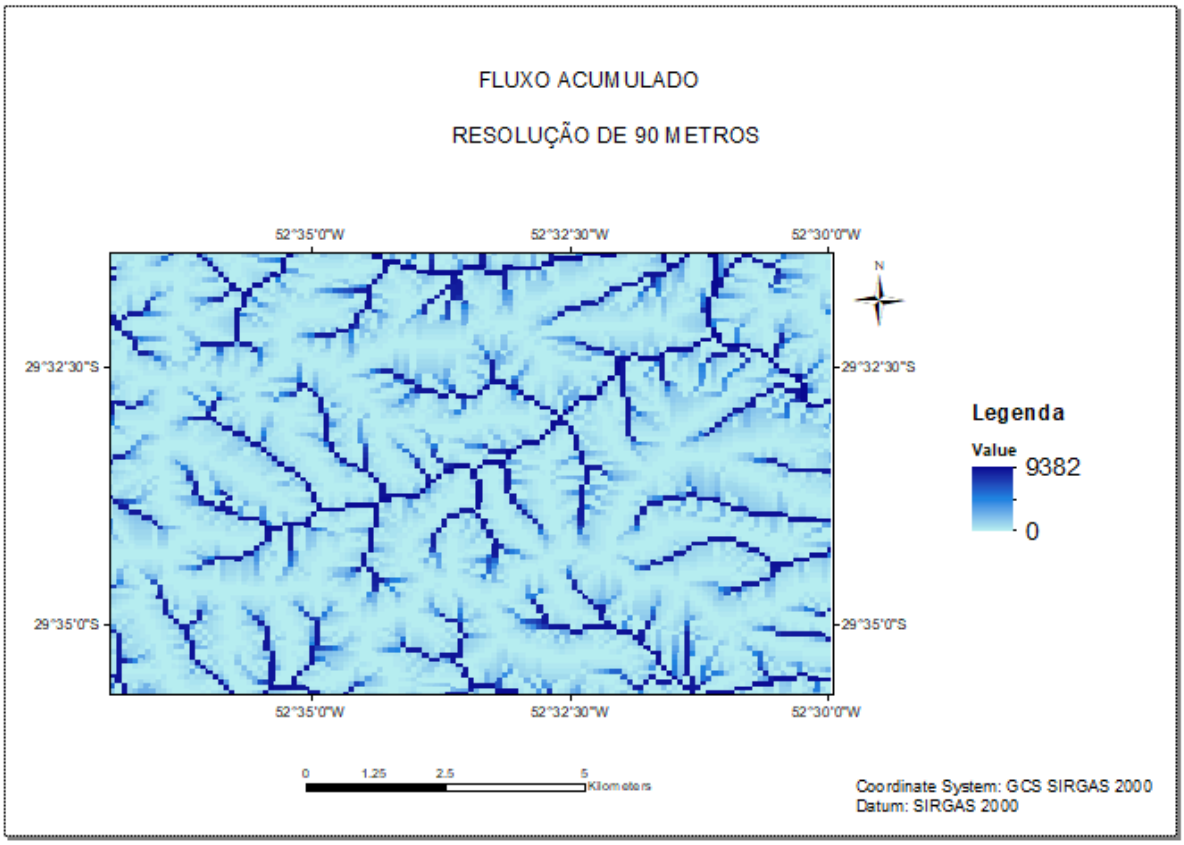


Figura 16: Fluxo Acumulado, ou *Flow Accumulation*, da área de interesse, obtido utilizando o MDE e o software ArcGis.

Fonte: Própria da Autora

A última fase deste processamento é a delimitação da Bacia Hidrográfica propriamente dita. Para isto é utilizada a ferramenta denominada de Delimitação da Bacia, ou *Watershed*, que utiliza os dados de direção de fluxo e um ponto vetorial referente ao exutório inserido pelo usuário. No caso do presente trabalho, a foz do Arroio São João corresponde ao mesmo ponto utilizado por Scartazzini, Lanna e Risso (1994).

Para gerar o mapa de declividades, foi utilizada a ferramenta *Slope* disponível no módulo ArcMap do software ArcGis®, sendo que a matriz de entrada foi o próprio MDE, gerando um modelo de declividade em porcentagem (tangente do ângulo multiplicado por 100), para se adequar as classes enquadradas de acordo com EMBRAPA (2004), as quais estão demonstradas na Tabela 01.

Tabela 1: Classes de declividade e tipo de relevo.

Declividade		Relevo
Classe	(%)	Tipo
A	0 a 3	Plano
B	3 a 8	Suave ondulado
C	8 a 13	Moderadamente ondulado
D	13 a 20	Ondulado
E	20 a 45	Forte ondulado
F	> 45	Montanhoso e escarpado

Fonte: EMBRAPA, 2004

O cálculo da área da bacia hidrográfica consistiu na utilização da ferramenta *Raster Calculator*, disponível no módulo ArcMap do software ArcGis®, onde foi aplicada a equação 03, que utiliza o Raster do *Flow Accumulation* e a resolução do MDE para obter os valores.

$$A = C.R.10^{-6} \quad (03)$$

Onde A = área de drenagem (km²), C = Contagem das células do MDE e
R = Resolução do MDE (m²).

Para determinar a Q95, utilizou-se a ferramenta *Raster Calculator*, disponível no módulo ArcMap do software ArcGis®, primeiramente para efetuar o cálculo da área da drenagem em cada pixel, e depois para efetivamente calcular a vazão de referência, de acordo com a Equação 02. Destaca-se que a aplicação direta gera os resultados em m³/s, e como os resultados de Scartazzini, Lanna e Risso (1994) estavam em l/s, multiplicou-se por 1.000 a vazão encontrada.

A fim de determinar as faixas de intervalos de quedas utilizou-se a ferramenta *Raster Calculator*, disponível no módulo ArcMap do software ArcGis®, sendo que foram manipulados os dados para se considerar a direção do fluxo tanto como o tamanho do pixel (no caso de ser nas direções 1, 4, 16 e 64 do *Flow Direction*) quanto a diagonal do mesmo (nos casos de ser nas direções 2, 8, 32 e 128 do *Flow Direction*) associados com a declividade.

Para se obter as faixas de potências utilizou-se a ferramenta *Raster Calculator* presente no módulo ArcMap do software ArcGis® para se calcular a equação 01. Os dados de entrada foram as matrizes de Q95 e alturas de queda e, também, a constante numérica 7.5, que corresponde às perdas de carga e o rendimento do grupo turbina gerador.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através dos modelos digitais de elevação com resolução de 30 e 90 metros serão apresentados, concomitantemente, nos subitens do presente trabalho.

6.1 BACIA HIDROGRÁFICA

As Figuras 17 e 18 apresentam, respectivamente, as bacias hidrográficas obtidas utilizando os modelos digitais de elevação com resolução de 30 e 90 metros. A primeira possui a área de 32.42722 km² enquanto que a segunda, 32.40113 km². Com estes dados é possível perceber a leve diferença de valores, o que demonstra que para a aplicação de delimitação de pequenas bacias hidrográficas, a utilização de qualquer um dos dois modelos numéricos de terreno é satisfatória.

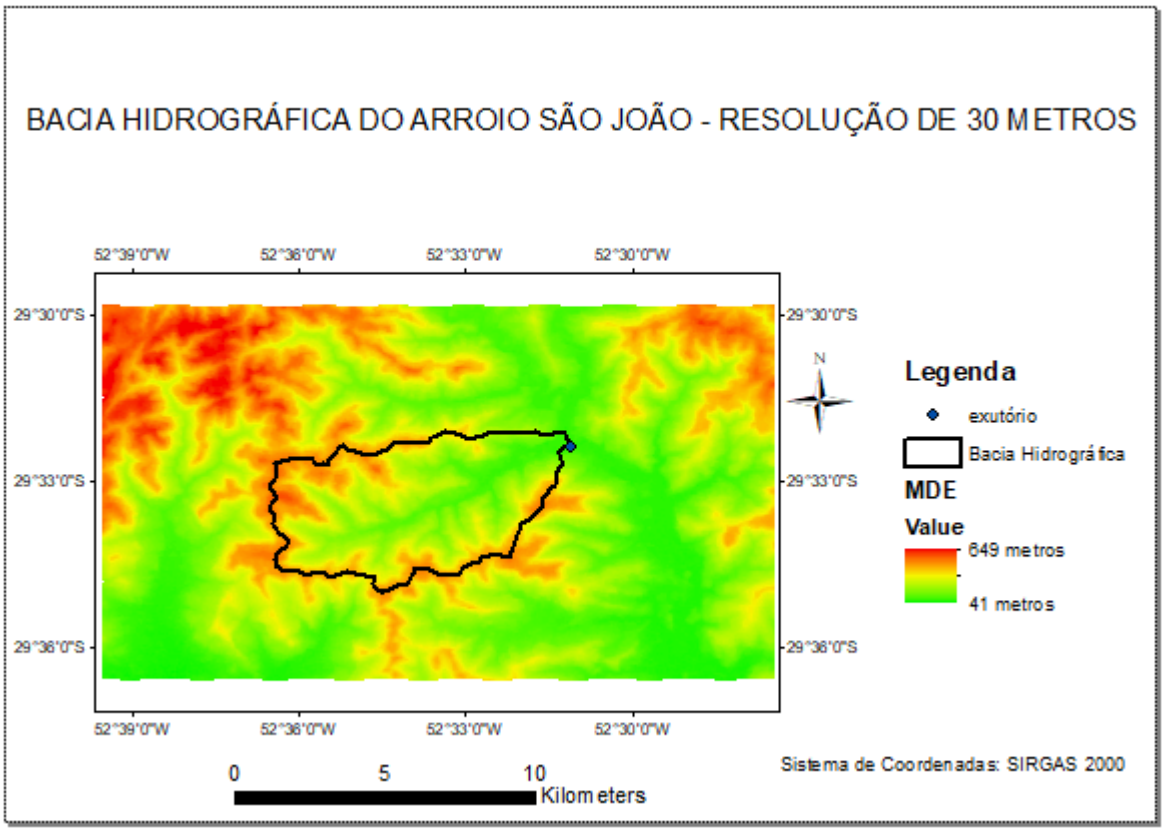


Figura 17: Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros.

Fonte: Própria da Autora

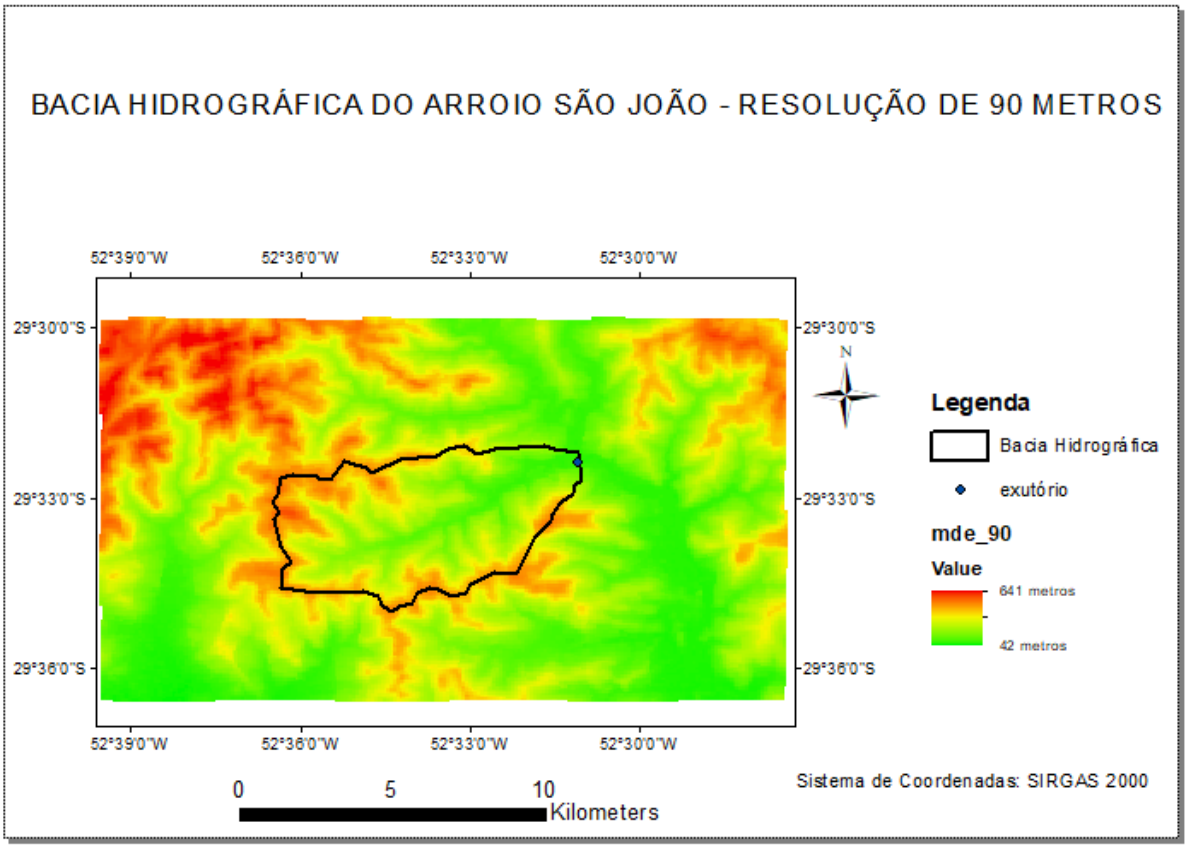


Figura 18: Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.

Fonte: Própria da Autora

A Figura 19 mostra as duas bacias hidrográficas delimitadas sobrepostas, sendo possível identificar que a bacia com o MDE de melhor resolução apresenta contornos mais suaves.

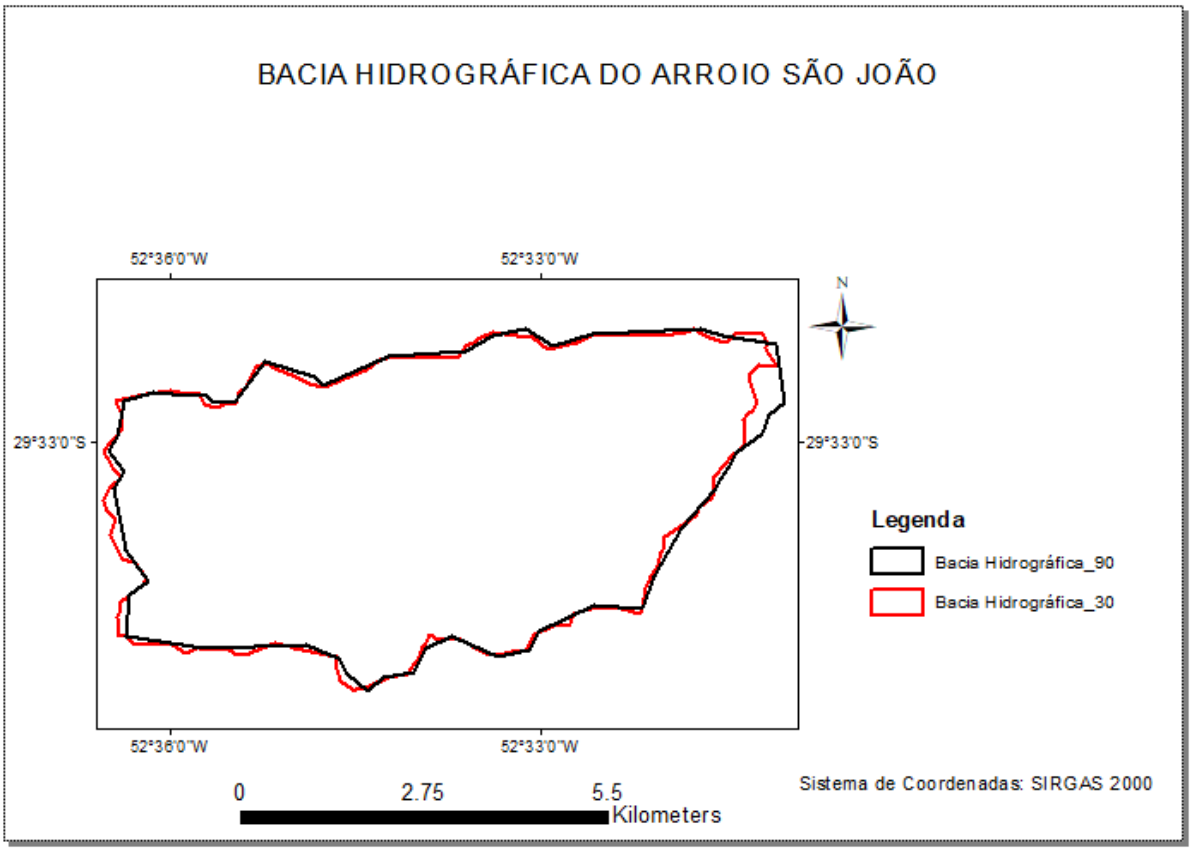


Figura 19: Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando os MDE's de resolução de 30 e 90 metros.

Fonte: Própria da Autora

6.2 MAPA DE DECLIVIDADES

Os mapas de declividades realizados para os dois modelos digitais de elevação estão ilustrados nas Figuras 20 e 21, respectivamente. Analisando-os é possível notar a forte influência da resolução do MDE na obtenção dos resultados, visto que no mapa de melhor resolução a declividade é mais íngreme, devido ao maior detalhamento.

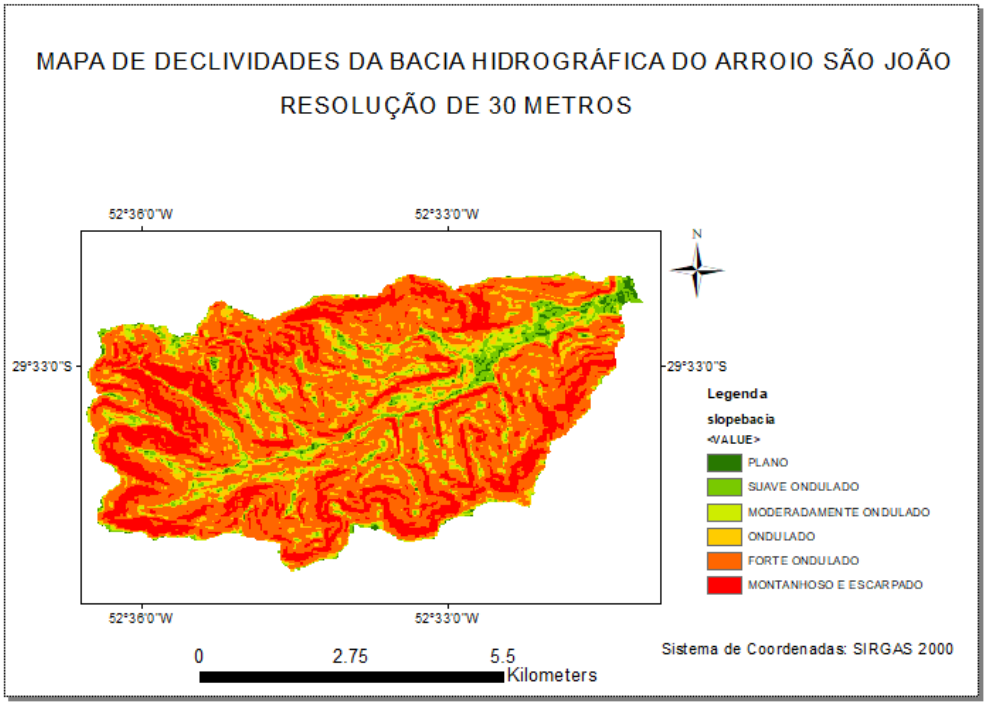


Figura 20: Mapa de Declividades da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros.

Fonte: Própria da Autora

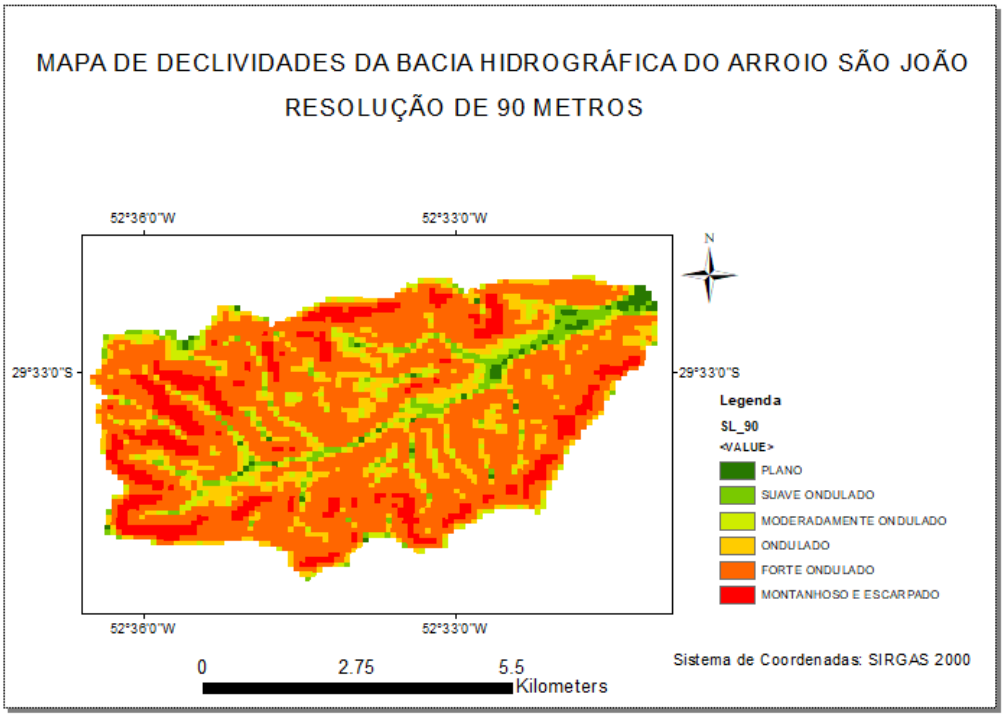


Figura 21: Mapa de Declividades da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.

Fonte: Própria da Autora

O Quadro 04 apresenta os dados estatísticos da declividade da bacia hidrográfica do Arroio São João – RS para as duas resoluções, nos quais é possível identificar semelhança em vários parâmetros analisados assim como uma grande diferença entre os valores máximos. Esta divergência é oriunda do maior detalhamento na Resolução de 30 metros, que causa maiores valores do que uma resolução inferior.

Parâmetro	Resolução de 30 metros	Resolução de 90 metros
Valor Mínimo (%)	0.0	0.28
Valor Máximo (%)	112.99	82.92
Média (%)	32.27	27.92
Desvio Padrão	16.79	13.55
Área de Declividade Plano (m²)	0.3	0.5
Área de Declividade Suave Ondulado (m²)	1.7	1.5
Área de Declividade Moderadamente Ondulado (m²)	2.1	2.4
Área de Declividade Ondulado (m²)	3.9	5.1
Área de Declividade Forte Ondulado (m²)	17.2	19.4
Área de Declividade Montanhoso e Escarpado (m²)	7.1	3.7

Quadro 4: Comparação entre parâmetros estatísticos da declividade da bacia hidrográfica do Arroio São João.

Fonte: Própria da Autora.

6.3 Q95

As Figuras 22 e 23 apresentam os mapas da vazão de referência utilizada, o Q95, nos quais é possível notar que quanto melhor a resolução, mais valores são apresentados, cujo reflexo está exibido no detalhamento da melhor resolução. Entretanto, apesar do exposto, existe uma grande proximidade entre os valores máximos de Q95 para ambos cenários.

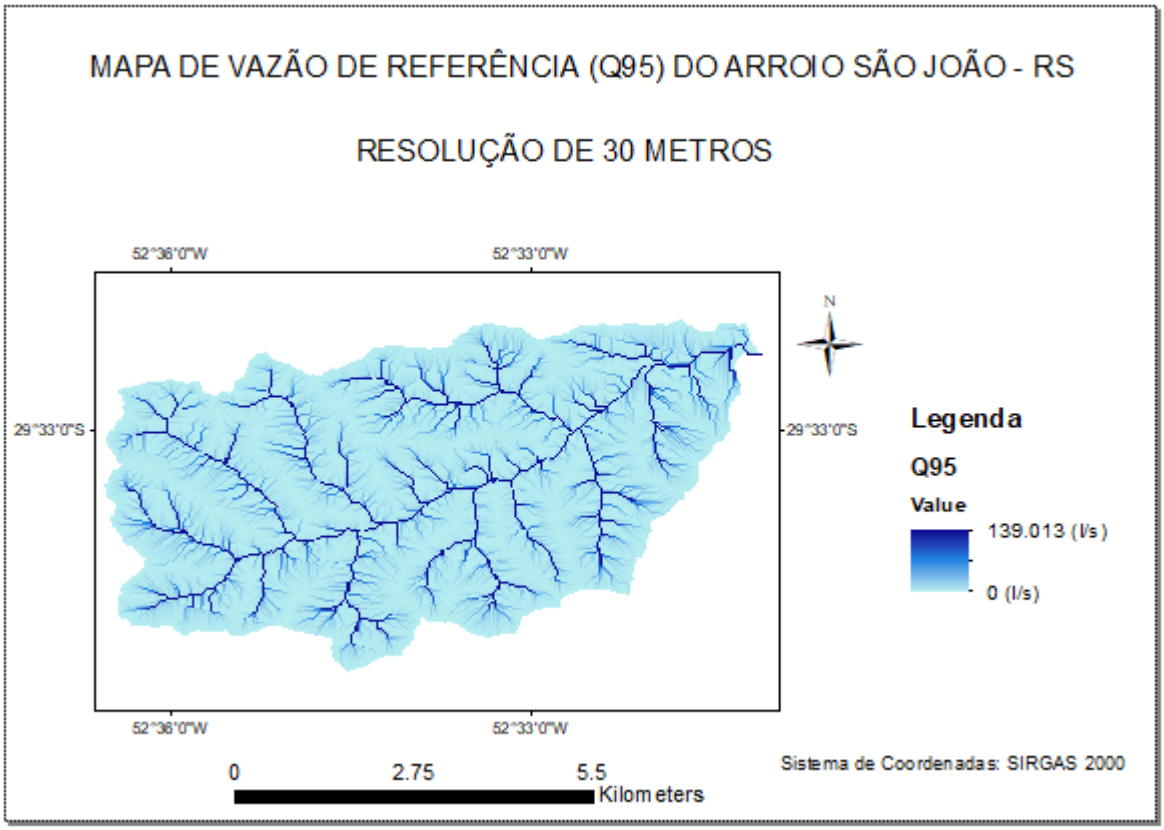


Figura 22: Mapa de Q95 da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros.

Fonte: Própria da Autora

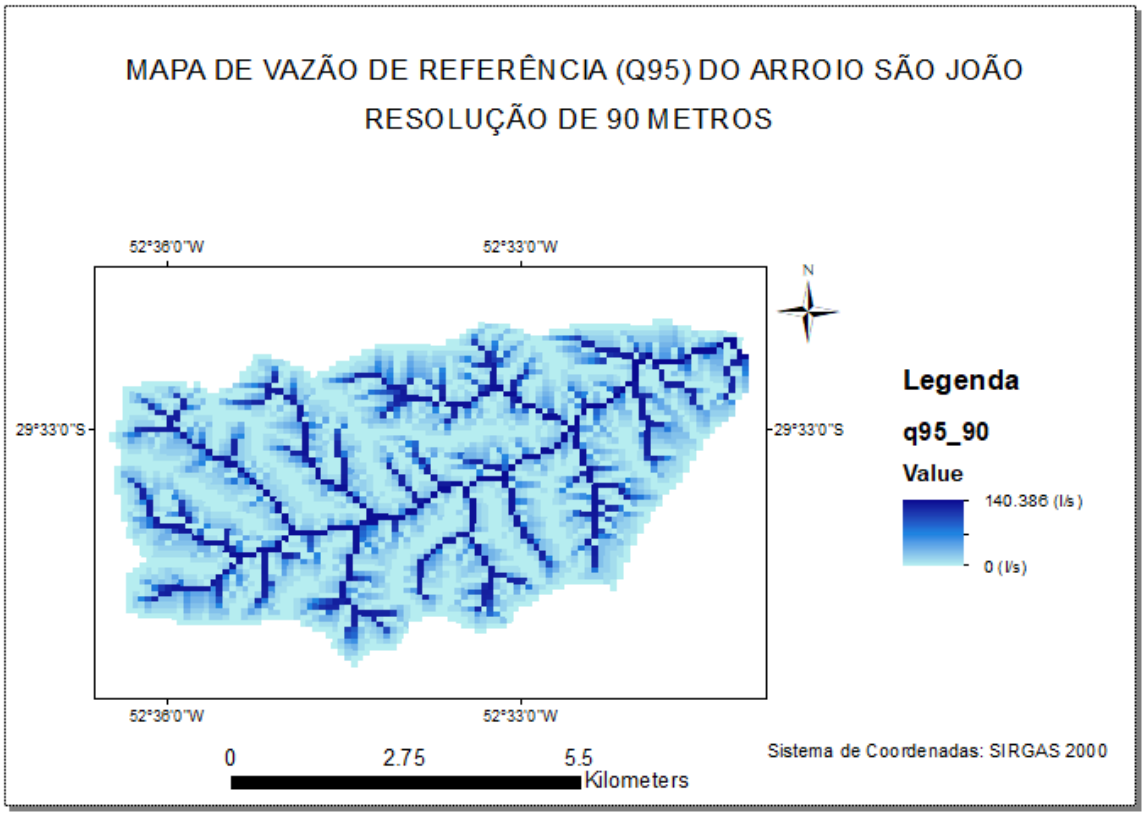


Figura 23: Mapa de Q95 da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.

Fonte: Própria da Autora

6.4 QUANTIFICAÇÃO DE QUEDAS

Os mapas ilustrados nas Figuras 24 e 25 representam as quedas da bacia hidrográfica utilizando os MDE de resolução de 30 e 90 metros. A diferença entre ambos é muito significativa, tanto quando se analisa apenas os mapas quanto os dados estatísticos associados aos mesmos (Quadro 05). Portanto, ao analisar as informações referentes à quantificação de quedas, percebe-se que a melhor resolução (30 metros) apresenta menores alturas, mas maior quantidade de quedas, quando comparado com a resolução de 90 metros.

Destaca-se que a escolha dos intervalos apresentados nos mapas foi baseada nos valores adotados por Scartazzini, Lanna e Risso (1994), a fim de permitir a comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias aplicadas na bacia hidrográfica do Arroio São João – RS.

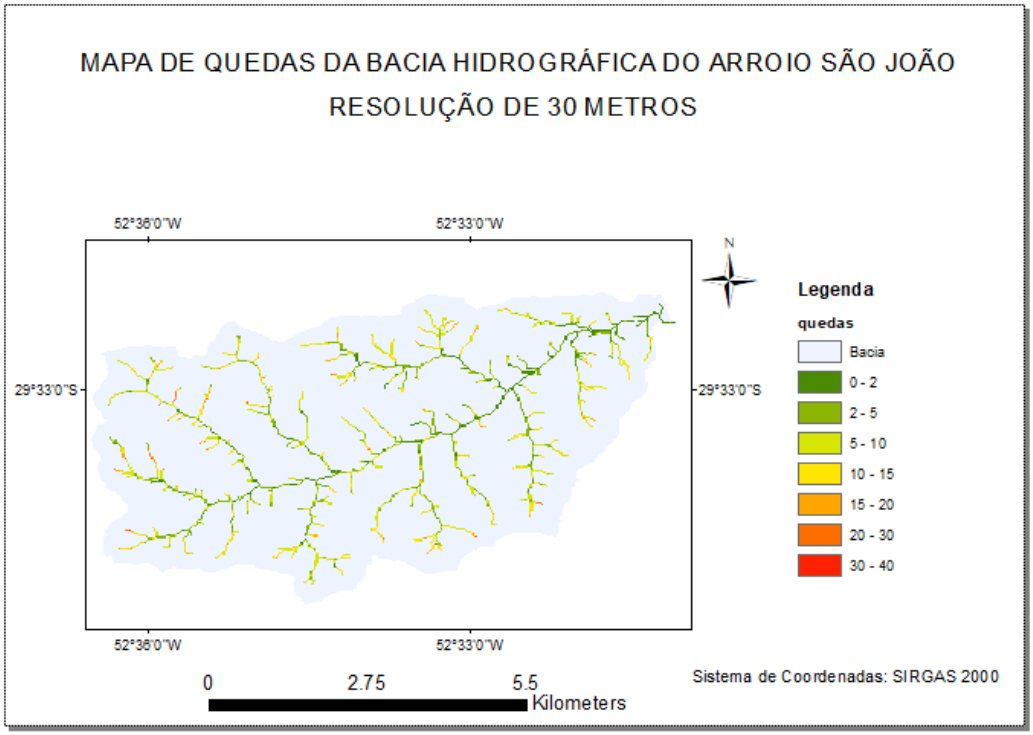


Figura 24: Mapa das quedas da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros.

Fonte: Própria da Autora

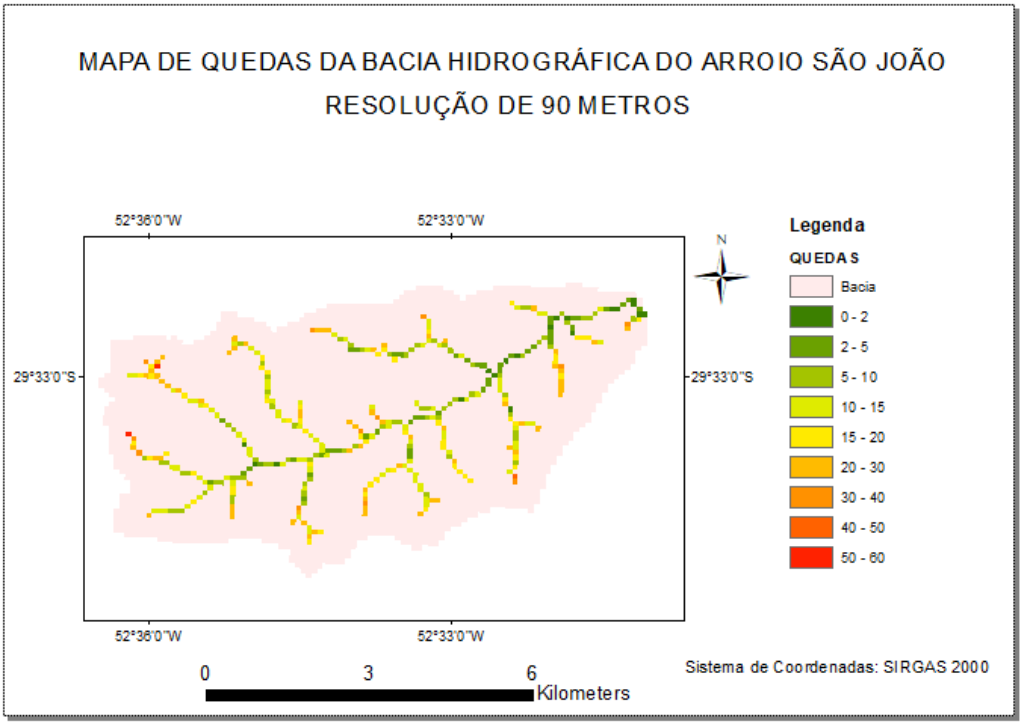


Figura 25: Mapa das quedas da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.

Fonte: Própria da Autora

Os histogramas contendo os valores de cada classe de queda para a bacia hidrográfica do Arroio São João realizado com as resoluções de MDE de 30 e 90 metros estão apresentados nas Figuras 26 e 27, comprovando assim a pouca similaridade entre ambos resultados.

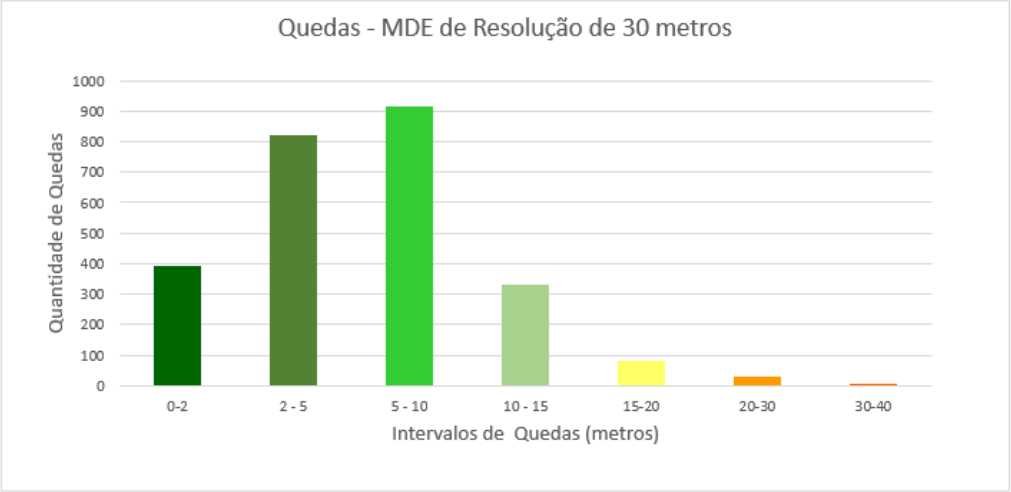


Figura 26: Histograma das quedas da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros.

Fonte: Própria da Autora

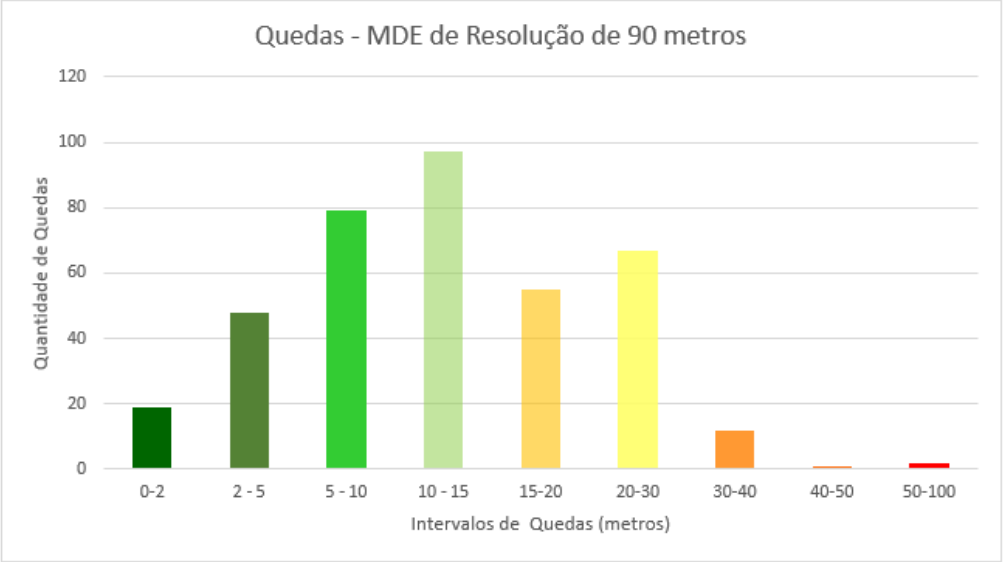


Figura 27: Histograma das quedas da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.

Fonte: Própria da Autora

6.5 POTENCIAL HIDROELÉTRICO

As Figuras 28 e 29 ilustram o mapa de potencial hidroelétrico da bacia hidrográfica do Arroio São João para os dois cenários com dados de entrada o MDE de resolução de 30 e 90 metros. Analisando-os é possível identificar que são muito distintos, uma vez que no segundo cenário (com a pior resolução) há maior quantidade de altas potências.

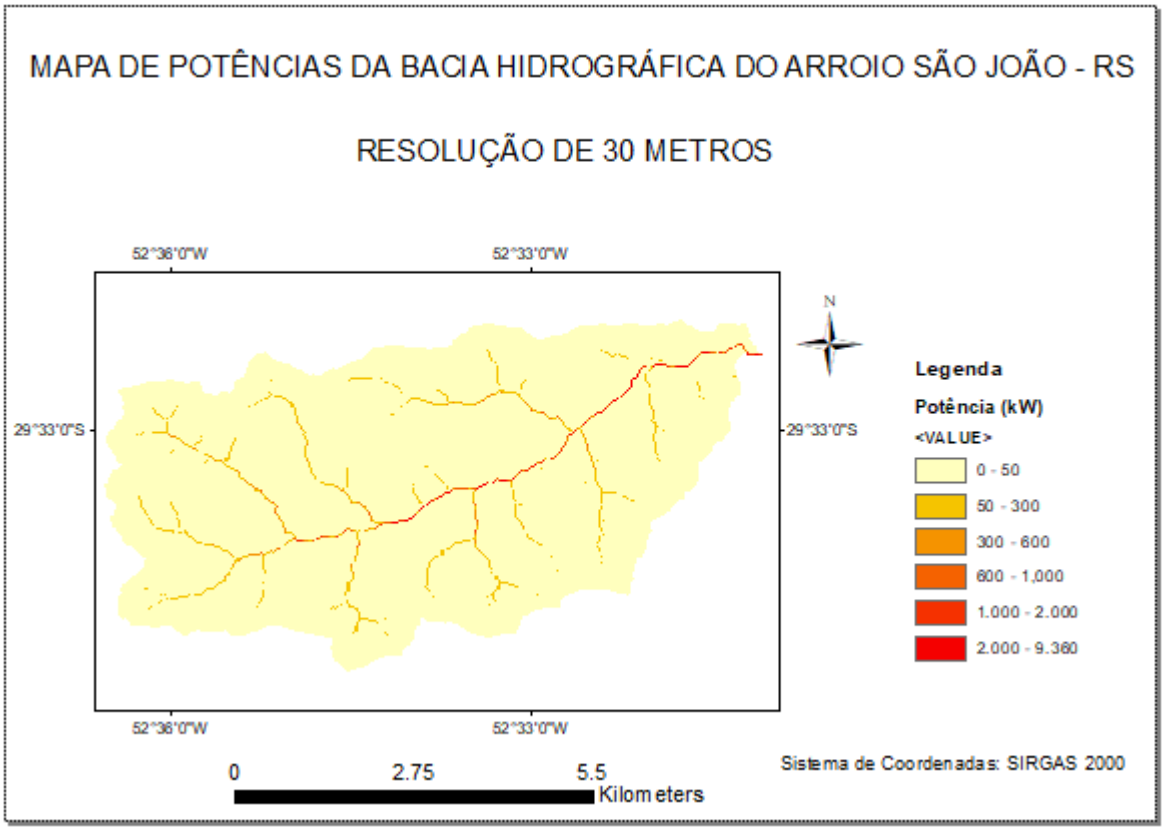


Figura 28: Mapa das potências da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros.

Fonte: Própria da Autora

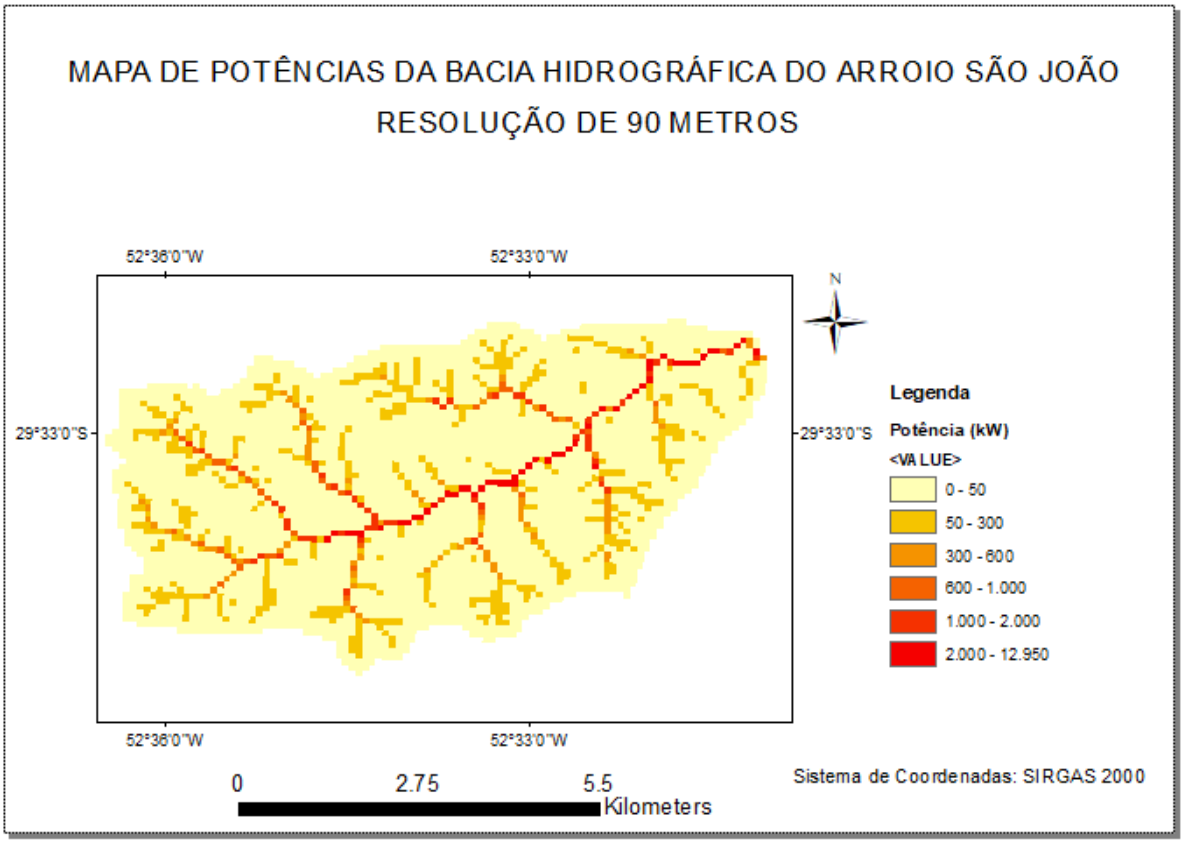


Figura 29: Mapa das potências da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.

Fonte: Própria da Autora

Os histogramas contendo os valores de cada classe de potência para a bacia hidrográfica do Arroio São João realizado com as resoluções de MDE de 30 e 90 metros estão apresentados nas Figuras 30 e 31. Na primeira imagem, estão plotados os dados excetuando as potências de 0 até 50 kW, já que como houveram 36.996 pixels com este valor, a sua presença no histograma mascararia os dados das outras potências. O mesmo ocorre na segunda imagem, cujos 3.402 pixels do mesmo intervalo foram suprimidos.

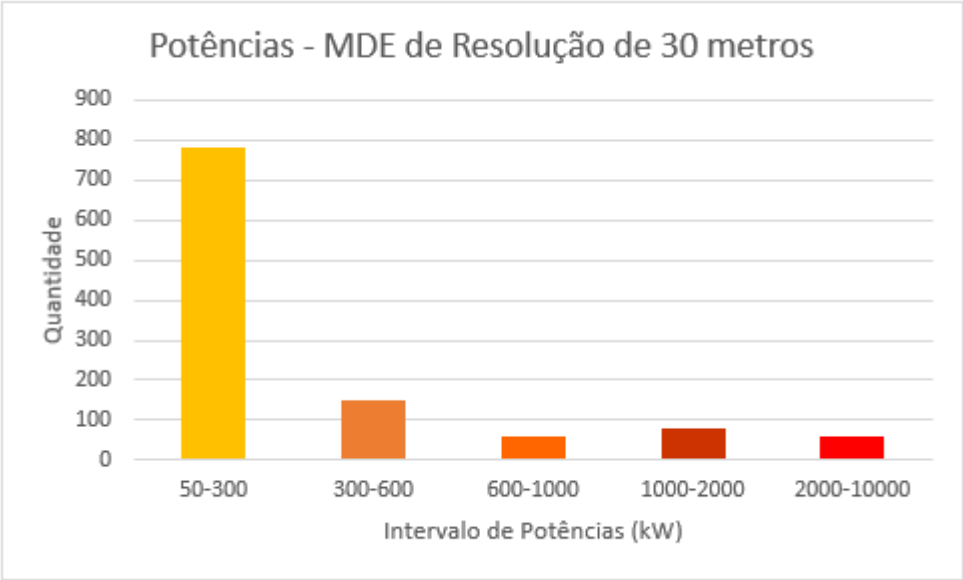


Figura 30: Histograma das potências da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 30 metros.

Fonte: Própria da Autora

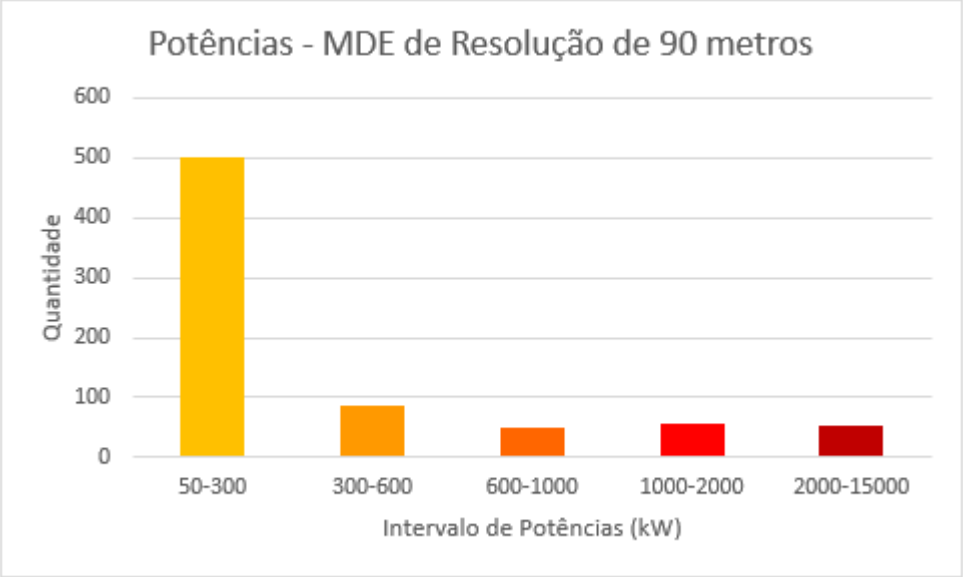


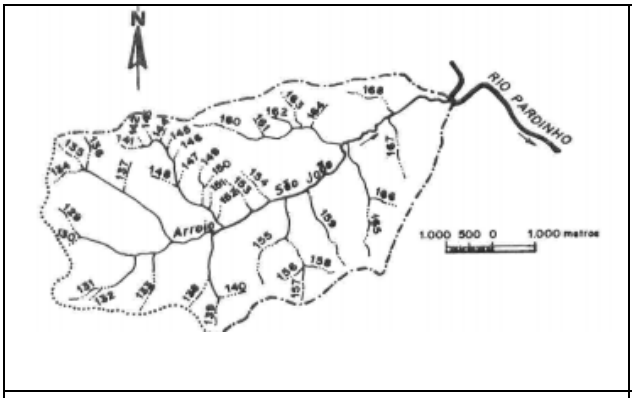
Figura 31: Histograma das potências da Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando o MDE de resolução de 90 metros.

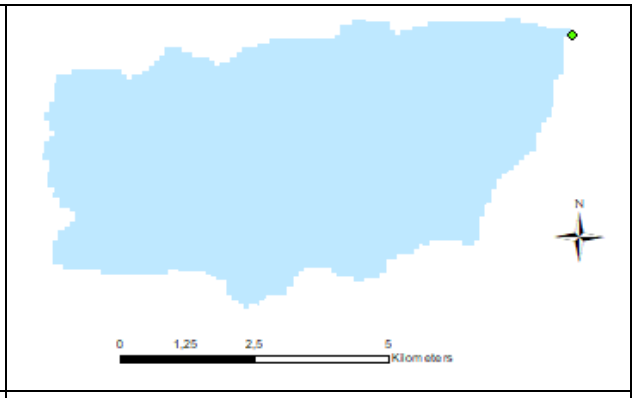
Fonte: Própria da Autora

7. COMPARAÇÃO ENTRE OS ESTUDOS

7.1 FORMATO E ÁREA DA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO

Examinando a Figura 32 é notável a semelhança das três bacias, no que tange o contorno em geral. A parte mais distinta são os pontos próximo ao exutório, fato que se deve à necessidade da localização do mesmo variar, conforme o resultado da ferramenta *Flow Accumulation* gerado em cada MDE.





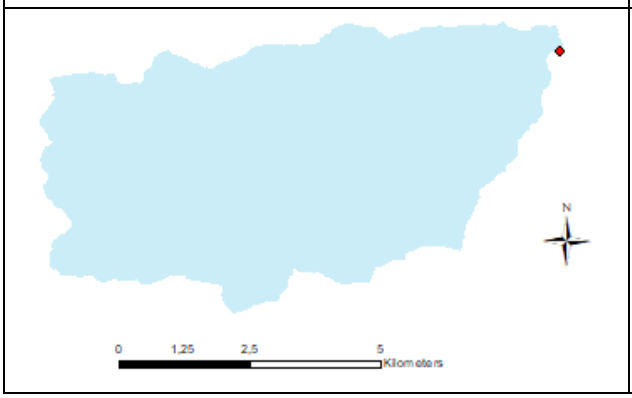


Figura 32: Bacia Hidrográfica do Arroio São João – RS obtida utilizando dados de carta topográfica de escala 1:50.000, dados de SRTM de 90 metros de resolução e dados de SRTM de 30 metros de resolução, em sentido horário da esquerda para a direita.

Fonte: Própria da Autora

Quanto às áreas das bacias hidrográficas delimitadas pelos três métodos utilizando SIG, o Quadro 05 apresenta os resultados obtidos, os quais exibem a similaridade entre eles, com menos de 1% de diferença.

Metodologia	Área da Bacia (Km²)
SIG com cartas topográficas	32.69
SIG com SRTM de 30 metros	32.42
SIG com SRTM de 90 metros	32.40

Quadro 05: Áreas das Bacias obtidas com as diferentes metodologias.
Fonte: Própria da Autora

7.2 CLASSIFICAÇÃO POR ALTURAS DE QUEDAS NA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO

Scartazzini, Lanna e Risso (1994) apresentaram o quadro contendo a classificação por alturas de quedas de água na bacia do Arroio São João utilizando dados de carta topográfica com escala de 1:50.000, conforme exibido no Quadro 06. A fim de comparação, foi realizada a mesma classificação com os resultados obtidos através da utilização de dados de SRTM com resolução de 30 e 90 metros, com valores exibidos no Quadro 07.

Classificação por alturas das quedas de água na bacia do Arroio São João	
Altura (m)	Quantidade de Quedas
De 02 a 05	36
06 a 10	24
11 a 15	10
16 a 20	03
21 a 30	03
31 a 40	03
14 a 50	01
51 a 100	01
TOTAL	81

Quadro 06: Classificação por alturas de quedas de água na bacia do Arroio São João.
Fonte: Adaptado de Scartazzini, Lanna e Risso (1994)

	Intervalos de Quedas (m)										
Intervalos de Quedas (m)	0-2	2 - 5	5 - 10	10 - 15	15-20	20-30	30-40	40-50	50-100	TOTAL	TOTAL SEM QUEDAS DE 0 - 2 METROS
Quantidades de Quedas - Scartazzini, Lanna e Risso (1994)	NA	36	24	10	3	3	3	1	1	81	81
Quantidades de Quedas -MDE de Resolução de 30 metros	394	822	914	330	83	31	1	NA	NA	2543	2149
Quantidades de Quedas -MDE de Resolução de 90 metros	19	48	79	97	55	67	12	1	2	380	361

Quadro 07: Quedas na Bacia Hidrográfica do Arroio São João.
Fonte: Própria da Autora

Para averiguar com mais detalhe os resultados obtidos, realizou-se o percentual de quedas nos intervalos, cujo valores, exibidos no Quadro 08, demonstram divergências entre si. Estas variações originam-se das diferenças de resoluções entre os modelos digitais de elevação inseridos no software de geoprocessamento.

Percentual de Quedas (%)									
Metodologia	Intervalos de Quedas (m)								
	0-2	2 - 5	5 - 10	10 - 15	15-20	20-30	30-40	40-50	50-100
Quantidades de Quedas - Scartazzini, Lanna e Risso (1994)	NA	44.44	29.63	12.35	3.70	3.70	3.70	1.23	1.23
Quantidades de Quedas -MDE de Resolução de 30 metros	18.33	38.25	42.53	15.36	3.86	1.44	0.05	NA	NA
Quantidades de Quedas -MDE de Resolução de 90 metros	5.26	13.30	21.88	26.87	15.24	18.56	3.32	0.28	0.55

Quadro 08: Percentual de Quedas na Bacia Hidrográfica do Arroio São João.
Fonte: Própria da Autora

7.3 POTÊNCIA NAS QUEDAS NA BACIA DO ARROIO SÃO JOÃO

O Quadro 09 apresenta o quadro demonstrado por Scartazzini, Lanna e Risso (1994) que relaciona as faixas de potência com a quantidade de quedas na bacia do Arroio São João realizado através do método tradicional e da metodologia usando carta topográfica e SIG. Para comparar os resultados obtidos com as técnicas propostas no presente trabalho com os gerados pelos autores supracitados, gerou-se os Quadros 10 e 11, que demonstram, respectivamente, o potencial hidroelétrico da bacia considerando a faixa de potência menor

que 50.000 Watts e desconsiderando-a. Nota-se que nenhum resultado se assemelha com outro, o que somente reforça a forte influência dos dados de entrada para a realização dos estudos de potencial hidroelétrico em uma pequena bacia.

FAIXA DE POTÊNCIA (kW)	MÉTODO ADOTADO			
	TRADICIONAL		SIG	
	Número de Ocorrências	%	Número de Ocorrências	%
De 50 a 300	44	54.3	30	17.7
De 301 a 600	24	29.6	30	26.5
De 601 a 1.000	4	4.9	29	25.6
De 1.001 a 2.000	7	8.6	28	24.8
Acima de 2.000	2	2.4	6	5.3
Total	81	100	113	100

Quadro 09: Comparação entre o potencial levantado em campo e o localizado pelo SGI para as metodologias utilizadas por Scartazzini, Lanna e Risso (1994) na bacia hidrográfica do Arroio São João.
Fonte: Adaptado de Scartazzini, Lanna e Risso, 1994.

Intervalo de Potência (kW)	Quantidade de Ocorrências - MDE de Resolução de 90 metros	Percentual de Quedas (%)	Quantidade de Quedas - MDE de Resolução de 30 metros	Percentual de Quedas (%)
0-50	2	0.53	1453	56.43
50-300	134	35.26	778	30.21
300-600	85	22.37	150	5.83
600-1000	50	13.16	58	2.25
1000-2000	56	14.74	79	3.07
2000-15000	53	13.95	57	2.21
Somatório	380		2575	

Quadro 10: Comparação entre o potencial hidroelétrico das metodologias propostas pela Autora e realizada no presente trabalho para a bacia hidrográfica do Arroio São João.
Fonte: Própria da Autora

Os resultados obtidos para as quatro metodologias para o potencial hidroelétrico da bacia hidrográfica do Arroio São João – RS estão dispostos na Tabela 6, sendo possível identificar que não convergem entre si.

POTENCIAL HIDROELÉTRICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO SÃO JOÃO - RS								
Intervalo de Potência (kW)	Quantidade de Quedas - MDE de Resolução de 90 metros	Percentual de Quedas (%)	Quantidade de Quedas - MDE de Resolução de 30 metros	Percentual de Quedas (%)	Quantidade de Quedas - Método Tradicional	Percentual de Quedas (%)	Quantidade de Quedas - MDE obtido de carta topográfica	Percentual de Quedas (%)
50-300	134	35.45	780	69.40	44	54.32	20	17.70
300-600	85	22.49	150	13.35	24	29.63	30	26.55
600-1000	50	13.23	58	5.16	4	4.94	29	25.66
1000-2000	56	14.81	79	7.03	7	8.64	28	24.78
2000-15000	53	14.02	57	5.07	2	2.47	6	5.31
Somatório	378		1124		81		113	

Quadro 11: Potencial Hidroelétrico da Bacia do Arroio São João - RS
Fonte: Própria da Autora

8. CONCLUSÃO

A aplicação de novas ferramentas computacionais, assim como a disponibilidade de dados mais precisos, é extremamente útil para possibilitar a reavaliação de potencial hidroelétrico em bacias hidrográficas, fato comprovado, para a bacia hidrográfica do Arroio São João – RS.

Como esperado, as duas metodologias aplicadas no presente trabalho apresentaram resultados distintos entre si e, também, entre os obtidos por Scartazzini, Lanna e Risso (1994), fato oriundo dos diferentes dados de entrada.

Outro ponto importante a ser destacado é que nas quatro metodologias realizadas, a vazão de referência foi calculada através de CEEE (1991) e o potencial hidroelétrico através de ELETROBRÁS (1985). Os coeficientes destas equações podem ser alterados, no caso de futuros trabalhos, já que em vez de CEEE (1991) poderia se realizar a regionalização de vazões utilizando os postos fluviométricos da região e o fator 7.5 (que considera as perdas de carga e o rendimento do grupo turbinagerador) de ELETROBRÁS (1985) poderá ser revisto.

Portanto, a proposta de comparação de metodologias e resultados para a realização de estudos de estimativa de potencial hidroelétrico em uma pequena bacia foi exitosa, visto que o trabalho mostrou que o parâmetro de dado de entrada (MDE no caso de utilização de SIG) é de suma importância para a geração de resultados que correspondam com a realidade encontrada na natureza.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAPCH, 2018a. Disponível em: http://www.abrapch.org.br/pchs/o-que-sao-pchs-e-cghs. Acessado em 23/05/2018.

ABRAPCH, 2018b. Disponível em: http://www.abrapch.org.br/pchs/entenda-melhor-o-setor Acessado em 20/05/2018.

AMARAL, L. de P. **Uso de Técnicas de Geoprocessamento na Determinação das Áreas de Preservação Permanente**. Monografia de Especialização. 65 fl. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul. Brasil. 2008.

BRASIL. 2007. **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas.** Ministério de Minas e Energia, CEPEL. Rio de Janeiro. E-papers, 2007. 684p. : il. 2007

BRASIL, 2011. Disponível em: http://www.brasil.gov.br/editoria/infraestrutura/2011/11/hidroeletricidade Acessado em 23/05/2018.

BRASIL, 2015. Disponível em: http://www.brasil.gov.br/editoria/meio-ambiente/2015/11/energia-renovavel-representa-mais-de-42-da-matriz-energetica-brasileira Acessado em 22/05/2018.

CARVALHO, T. M. e BAYER, M. **Utilização dos produtos da "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM) no mapeamento geomorfológico do estado de Goiás**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.9, n.1, p.35-41.

CASTRO et al. **Uso de imagens de radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) na espacialização da temperatura do ar no estado do Espírito Santo**. In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.8154. 2011

CEEE. **Regionalização de Vazões do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS. Volume 1. Porto Alegre. 1991.

CORREA et al. **Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 40 - 1 / 2017 p. 217-225. 2017.

ELETROBRAS. 1985. Manual de Miçrocentrais Hidroelétricas. Publicação do Ministério de Minas e Energia. Brasília. Distrito Federal. 1985.

EMBRAPA. 2004. **Avaliação de Aptidão Agrícola das Terras: proposta metodológica**. Disponível em: http://www.cnpma.embrapa.br/download/documentos_43.pdf

EPE. 2018a. Disponível em: http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica Acessado em 23/05/2018.

EPE. 2018b. Disponível em: http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-(nacional) Acessado em 21/05/2018.

EVANGELISTA, F. J. P. 2012. **Mapeamento de potencial hidrelétrico do Estado de Roraima para a construção de pequenas centrais hidrelétricas – PCHS: alternativa energética para o desenvolvimento sustentável**. Dissertação de Mestrado. 97 fl. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012

FAN. F. M. **Acoplamento entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica: Integração do Modelo MGB-IPH**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.

FAN et al. **Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18 n.3 –Jul/Set 2013,241-257 241. 2013.

FEPAM. 2018. Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asp Acessado em 25/05/2018. Acessado em 19/05/2018.

IEA. 2018. Disponível em: http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/ Acessado em 22/05/2018. Acessado em 21/05/2018.

JENSON, S. K., and J. O. Domingue. 1988. **Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11): 1593–1600.

MAURIZ, T. V. M. 2008**. Análise do Inventário Hidroelétrico da Bacia do Rio do Sono – TO, Subsídio para a Identificação de Variáveis Sócioambientais Aplicadas na Construção de um Modelo de Inventário Hidroelétrico Dinâmico**. Dissertação de Mestrado. 164 fl. Universidade Católica de Brasília. 2008.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. **Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM**. Rev. Geogr. Acadêmica, v. 2, n. 2, p. 84-95, 2008.

SCARTAZZINI, L.S., LANNA, A. E. e RISSO, A. 1994. **Inventário do potencial hidráulico de pequenas bacias com aplicação de sistema de informações geográficas**. FmE - Caderno de Recursos Hídricos v12, n.l, julho/1994

SEMA-RS. 2018. Disponível em: http://www.sema.rs.gov.br/g090-bacia-hidrografica-do-rio-pardo Acessado em 25/05/2018.

SIPOT. 2018. Disponível em: http://eletrobras.com/pt/Paginas/Potencial-Hidreletrico-Brasileiro.aspx Acessado em 22/05/2018.

SOBRINHO *et al*. 2010. **Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.1, p.46-57, jan./fev. 2010.

USGS. 2018. Disponível em: https://earthexplorer.usgs.gov/ Acessado em 10/10/2018.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C.J.S. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia. ISBN 978-85-63843-02-9. 2004.

TRINDADE, F. S. **O uso dos softwares livres de SIG como ferramenta de apoio ao ensino de Geografia no nível fundamental: Um estudo de caso a partir da elaboração de um mapa temático sobre Áreas de Risco através do software "TerraView"**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. Minas Gerais. 2012