



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LAIRANNE COSTA DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO EFETIVA PARA SUB-
BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ARROIO DILÚVIO – PORTO ALEGRE/RS**

João Pessoa

2017

LAIRANNE COSTA DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO EFETIVA PARA SUB-
BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ARROIO DILÚVIO – PORTO ALEGRE/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Engenharia Ambiental, como pré-requisito
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental pela Universidade
Federal da Paraíba.

Orientador: Prof.º Dr. Adriano Rolim da Paz

JOÃO PESSOA

2017

O48a Oliveira, Lairanne Costa de

Avaliação da estimativa de precipitação efetiva para sub-bacias hidrográficas do Arroio Dilúvio – Porto Alegre/RS./ Lairanne Costa de Oliveira. – João Pessoa, 2017.

72f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Ambiental) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. NRCS-CN 2. Precipitação efetiva 3. Arroio Dilúvio I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 504 (043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LAIRANNE COSTA DE OLIVEIRA

AValiação da Estimativa de Precipitação Efetiva para Sub-Bacias Hidrográficas do Arroio Dilúvio – Porto Alegre/RS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 27/11/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Adriano Rolim da Paz
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO.

Ana Cristina Souza da Silva

Ana Cristina Souza da Silva
UFPB

APROVADO

Gustavo Barbosa Lima da Silva

Gustavo Barbosa Lima da Silva
UFPB

APROVADO

Prof. Adriano Rolim da Paz

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela saúde e disposição que me permitiu a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Dione Meneses e Edmo José, por todo o amor e apoio recebido para minha formação pessoal e profissional.

À João Vitor pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.

Ao professor Adriano Rolim da Paz, pela confiança, orientação e conhecimentos passados na elaboração deste TCC.

À Sarah Veeck pela paciência e tempo dedicado no acompanhamento deste trabalho.

À professora Elisângela Rocha pelos direcionamentos e apoio.

Aos professores Gustavo Lima e Ana Cristina por terem aceitado fazer parte da banca de avaliação deste trabalho.

Às minhas amigas Marília Michele e Cecília Flávia pela amizade sincera e por compreenderem os momentos em que estive ausente durante a realização deste estudo.

Às minhas amigas Jamille Amorim e Flavia Gomes pela bons momentos vividos durante a graduação.

À todos os professores que fizeram parte da minha caminhada estudantil, contribuindo com o meu crescimento pessoal e intelectual.

Agradeço também a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O método da Curva Número do National Resources Conservatoin Center (NRCS-CN) é um dos mais simples e utilizados para estimar a precipitação efetiva proveniente de um evento de chuva. Entretanto, por ter sido elaborado para bacias hidrográficas com perfis específicos, vários autores questionam o seu uso generalizado. Uma das críticas mais frequentes feitas ao método é o fato do coeficiente de abstração inicial (λ) ter seu valor fixado em 0,2. Vários estudos apontam que esse valor é inadequado e portanto alguns autores sugerem que sejam usadas outras formulações alternativas ao método para o cálculo da precipitação efetiva. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a estimativa da precipitação efetiva em sub-bacias hidrográficas pertencentes a bacia do Arroio Dilúvio, em Porto Alegre (RS), por meio da análise do desempenho do método do NRCS-CN calculado com diferentes valores de λ , e também de formulações alternativas. Foram analisadas as sub-bacias Cascata 1, Saint-Hilaire, Casa de Portugal, Beco Carvalho e Bela Vista. Para isso, foram utilizadas séries de chuva-vazão disponíveis para as cinco sub-bacias. Tendo sido realizado o cálculo da precipitação efetiva por meio da fórmula do método do NRCS-CN, onde o λ foi variado em valores específicos, e por meio das fórmulas propostas por Ajmal et al. (2014) e Jain et al. (2006a), nas três condições antecedentes de escoamento superficial. Então, foram gerados gráficos de dispersão a fim de comparar os resultados das precipitações efetivas calculadas com as observadas. Os métodos testados também foram avaliados a partir do cálculo da raiz do erro quadrático médio. E além disso, também foi determinado o valor de λ ótimo para cada evento. A partir dos resultados, tornou-se possível concluir que o método original do NRCS não é satisfatório para representar a precipitação efetiva observada nas sub-bacias do Arroio Dilúvio. Indicando que o λ deve ser calibrado a partir de séries chuva-vazão disponíveis para a área de estudo. Já os modelos analisados demonstraram ser consistentes na estimativa da precipitação efetiva, porém também apresentaram falhas, devendo ser utilizados com cautela.

Palavras-chave: NRCS-CN, precipitação efetiva, Arroio Dilúvio.

ABSTRACT

The U.S. Natural Resources Conservation Service curve number (NRCS-CN) method is one of the simplest and most used to estimate the excess rainfall depth from a rainfall event. However, as this method was elaborated for specific watersheds, it has been criticized by several authors because of its general utility. One of the most recurrent criticisms of the method is that the initial abstraction coefficient (λ) has its value set at 0.2. Several researches point out that this value is inappropriate, therefore some authors suggest that alternative formulations other than the NRCS method might be used. In this context, the main objective of this study is to evaluate the excess rainfall depth in the sub-basins that belong to the Arroio Dilúvio watershed, located in Porto Alegre (RS), through the analysis of the performance of the NRCS-CN method calculated with different λ values, as well as other NRCS-CN-based rainfall runoff models. The sub-basins Cascata 1, Saint-Hilaire, Casa de Portugal, Beco Carvalho and Bela Vista were analyzed. To make these analysis, rainfall-runoff series were used for the five sub-basins. The calculation of the effective precipitation was carried out using the formula of the NRCS-CN method, where λ was varied in specific values, and through the formulas proposed by Ajmal et al. (2014) and Jain et al. (2006a), in the three antecedent runoff condition (ARC). Then, dispersion graphs were generated in order to compare the excess rainfall depth calculated results with those observed. The methods were also evaluated from the root mean square error (RMSE) calculation. Moreover, the optimal λ value was also determined for each event. From the results, it became possible to conclude that the original NRCS method is not satisfactory to represent the observed excess rainfall depth in the Arroio Dilúvio's sub-basins. This analysis indicates that λ should be set from rainfall-flow series available for the study area. On the other hand, the analyzed models demonstrated to be consistent in the estimation of effective precipitation, but also presented flaws and should be used with caution.

Key Words: NRCS-CN, excess rainfall depth, Arroio Dilúvio.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DE ESTUDO	28
FIGURA 2 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DILÚVIO	30
FIGURA 3 – MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DILÚVIO	31
FIGURA 4 – GRÁFICOS DA SUB-BACIA CASCATA I PARA DIFERENTES VALORES DE λ	39
FIGURA 5 – GRÁFICOS DA SUB-BACIA CASCATA I PARA DIFERENTES ARCs	40

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONDIÇÕES DE UMIDADE ANTECEDENTE DO SOLO.....	19
TABELA 2 – CONVERSÃO DAS CURVAS CN PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE DO SOLO.....	19
TABELA 3 – VALORES DE CN ESTIMADOS COM BASE NO TIPO DE SOLO E OCUPAÇÃO DA SUPERFÍCIE	20
TABELA 4 – DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE SOLO EM PORTO ALEGRE	29
TABELA 5 – DISTRIBUIÇÃO DO PARÂMETRO CN EM PORTO ALEGRE	30
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS DADOS POR SUB-BACIA E NÚMERO DE EVENTOS SELECIONADOS	32
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA CASCATA I.....	33
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT-HILAIRE	33
TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA CASA DE PORTUGAL.....	34
TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA BECO CARVALHO	34
TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA BELA VISTA.....	35
TABELA 12 – VALORES DO CN MÉDIO PARA A SUB-BACIA CASCATA I UTILIZADOS NESSE TRABALHO.....	36
TABELA 13 – VALORES DO CN MÉDIO PARA A SUB-BACIA SAINT-HILAIRE UTILIZADOS NESSE TRABALHO.....	36
TABELA 14 – TABELA DE ONDE FORAM RETIRADOS OS VALORES DE CN PARA AS SUB-BACIAS CASA DE PORTUGAL, BECO CARVALHO E BELA VISTA	36
TABELA 15 – MODELOS ANALISADOS.....	38
TABELA 16 – COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS BASEADA NO CÁLCULO DA RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (RSME).	42
TABELA 17 – DESEMPENHO DOS MODELOS EM ORDEM DECRESCENTE	43
TABELA 18 – VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA CASCATA I.....	45
TABELA 19 – VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA SAINT-HILAIRE	46

TABELA 20 - VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA CASA DE PORTUGAL	47
TABELA 21 - VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA BECO CARVALHO..	47
TABELA 22 - VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA BELA VISTA	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1 O DESENVOLVIMENTO URBANO E AS SUAS CONSEQUÊNCIAS	14
3.2 A MODELAGEM NA HIDROLOGIA	15
3.2.1 MODELOS CHUVA-VAZÃO.....	16
3.2.2 O MÉTODO NRCS-CN	17
3.3 DESVANTAGENS E CONTRIBUIÇÕES AO MÉTODO NRCS-CN	21
3.3.1 DESVANTAGENS DO MÉTODO.....	21
3.3.2 CONTRIBUIÇÕES AO MÉTODO.....	22
4 METODOLOGIA.....	27
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
4.2 DADOS DISPONÍVEIS E ANÁLISE PRELIMINAR	31
4.2.1 DADOS DE CHUVA-VAZÃO.....	31
4.2.2 DETERMINAÇÃO DO CN	35
4.3 CÁLCULOS.....	37
4.3.1 CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO EFETIVA USANDO O MODELO DO NRCS-CN COM DIFERENTES VALORES DE λ E OUTRAS FORMULAÇÕES ALTERNATIVAS	37
4.3.2 DETERMINAÇÃO DO λ ÓTIMO PARA CADA SUB-BACIA NAS TRÊS ARCS	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1 DISCUSSÃO DOS GRÁFICOS DO APÊNDICE 1	39
5.1.2 QUALIDADE DE AJUSTE	41
5.2 COEFICIENTE DE ABSTRAÇÃO INICIAL (λ) ÓTIMO PARA CADA EVENTO...	45

6 CONCLUSÃO.....	49
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
APÊNDICE 1 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS GERADOS POR SUB-BACIA E POR ARC	54

1 INTRODUÇÃO

O crescimento urbano, intensificado na segunda metade do século XX, tem ocorrido de forma insustentável em grande parte das cidades brasileiras. Isso trouxe diversos incômodos sócioambientais, entre eles, problemas na infraestrutura de recursos hídricos. Problemas de drenagem urbana são comuns e causam uma série de inconvenientes como inundações nas áreas ribeirinhas e urbanas. (TUCCI, 2005a; TUCCI, 2002).

Para se realizar projetos de engenharia, como obras de drenagem urbana e técnicas de manejo agrícola, é necessário que seja feito um dimensionamento baseado em estudos hidrológicos. Dessa forma, é possível obter dados de vazão de projeto para períodos de retorno estabelecidos, evitando que a obra fique superdimensionada ou subdimensionada. Consequentemente, a eficiência e segurança das estruturas hidráulicas serão garantidas. (CUNHA et al. 2015).

Para tanto, o escoamento superficial é um fator muito importante a ser considerado nos dimensionamentos. Porém, sua determinação é complexa por estar atrelada a aspectos relacionados com a topografia, intensidade e distribuição das chuvas, tipos e cobertura do solo, entre outros. (SARTORI et al., 2005).

Na escassez de dados hidrológicos disponíveis, situação corriqueira em algumas bacias de drenagem brasileiras, são utilizados modelos hidrológicos que buscam representar o comportamento das bacias hidrográficas. Nesse aspecto, modelos de transformação de precipitação em vazão são muito úteis para se obter séries maiores e mais representativas de vazões, para diversos projetos de recursos hídricos. Tais modelos tornam possível completar vazões desconhecidas ou estimá-las para episódios futuros. (TUCCI, 2005b).

Dentre os vários modelos de chuva-vazão disponíveis, um dos mais utilizados na prática da engenharia, para determinação da precipitação efetiva, é o método desenvolvido pelo Natural Resources Conservation Service (NRCS). Esse modelo tem como principal parâmetro a curva número (CN), que depende da classificação hidrológica do solo, das condições de umidade antecedentes e do tipo de uso e ocupação do solo. (CUNHA et al., 2015).

Embora o método NRCS-CN possua vantagens consideráveis sobre os demais, a exemplo da sua simplicidade e aplicabilidade, existem diversas críticas e

dúvidas em relação à sua generalização. Como consequência, vários autores propuseram novas formulações ao método e versões melhoradas dele, entre eles: Suresh Babu e Mishra (2012), Ponce e Hawkins (1996), Ajmal e Kim (2014), Durán Barroso et al. (2016) e Bartlett et al. (2016).

Um dos temas que levam a constantes discussões no meio científico é a relação entre a abstração inicial (I_a) e a retenção potencial máxima (S), uma vez que o coeficiente de abstração inicial (λ), que os relaciona diretamente, teve seu valor fixado em 0,2 na metodologia original do NRCS-CN. Por ser um parâmetro regional e climático, alguns autores afirmam que esse valor de λ não é apropriado para o uso em outras bacias hidrográficas além daquelas que foram utilizadas em sua derivação. Desse modo a seleção de um valor de λ adequado é muito importante para a estimativa correta do escoamento superficial ao se utilizar o método do NRCS. (JAIN et al. 2006a).

Diante do exposto, esse trabalho visa comparar o desempenho do método do NRCS-CN, calculado com diferentes valores de λ , e também de formulações alternativas, por meio da análise de séries chuva-vazão observadas e calculadas na bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio em Porto Alegre (RS).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a estimativa da precipitação efetiva, em sub-bacias hidrográficas do Arroio Dilúvio em Porto Alegre (RS), por meio do método do NRCS-CN, calculado com diferentes valores de λ , e outras formulações alternativas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Examinar o desempenho do modelo do NRCS-CN calculado com diferentes valores do coeficiente de abstração inicial (λ).
- Examinar o desempenho de modelos alternativos ao do NRCS-CN nas sub-bacias estudadas.

- Determinar o coeficiente de abstração inicial (λ) ótimo para cada evento das sub-bacias analisadas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O DESENVOLVIMENTO URBANO E AS SUAS CONSEQUÊNCIAS

Historicamente, as civilizações desenvolveram-se no entorno de rios, que a princípio não sofreram grandes mudanças em suas características físicas. Porém, com o crescimento das populações e o surgimento de novas tecnologias, tais cursos de água passaram a ser modificados por meio da construção de canais, pavimentos, pontes e tiveram a consequente ocupação de sua calha secundária. (RIGHETTO et al., 2009)

A expansão urbana no Brasil tem sido significativa nas últimas décadas, isso fez com que a população se concentrasse em um pequeno espaço territorial gerando diversos problemas sociais e ambientais. A falta de controle sobre o espaço das cidades trouxe uma série de consequências como a poluição da água e do ar, deficiência dos sistemas de abastecimento de água e saneamento, inundações e sistema de transportes deficitário. (TUCCI, 2005a).

O desenvolvimento das cidades promove a substituição da cobertura vegetal dando cada vez mais espaço a áreas impermeabilizadas. Dessa forma, o escoamento superficial intensificou-se nas cidades trazendo consequências como inundações mais frequentes tanto em áreas ribeirinhas como nos centros urbanos. (TUCCI, 2005a).

Nos últimos anos, a busca por uma evolução urbana mais sustentável tem apresentado um impacto positivo na concepção dos sistemas de drenagem. Ultimamente, cada vez mais soluções inovadoras de engenharia tem sido buscadas, uma delas é o uso da modelagem hidrológica com modelos do tipo chuva-vazão, que simulam os processos de escoamento na bacia e podem ser usados em projetos para estimar os níveis de enchente ou na avaliação do impacto da urbanização sobre a drenagem. (RIGHETTO et al. 2009).

Dessa maneira, o desenvolvimento do planejamento em áreas urbanas deve ser feito de forma integrada, considerando aspectos como o uso e ocupação do solo e recursos hídricos. (TUCCI, 2002).

3.2 A MODELAGEM NA HIDROLOGIA

A modelagem pode ser considerada como um procedimento teórico que envolve técnicas elaboradas com o intuito de representar de modo simplificado o mundo. Nesse sentido, a modelagem de sistemas ambientais tem como objetivo retratar os fenômenos da natureza e favorecer a compreensão desses. (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Os modelos são normalmente agrupados em: físicos, analógicos e matemáticos, sendo os modelos físicos a representação de um sistema por meio de um protótipo em menor escala. Os analógicos se prevalecem da analogia das equações que regem diferentes fenômenos, para dessa forma modelar o processo pretendido. Já os modelos matemáticos buscam representar, por meio de equações matemáticas, a natureza de um sistema. Um dos benefícios de trabalhar com modelos matemáticos é a possível avaliação de diferentes cenários. (TUCCI, 2005b; SÁNCHEZ, 2013).

O campo hidrológico foi amplamente favorecido com o surgimento da modelagem. Há cada vez mais interesse dos pesquisadores em avaliar técnicas e usos de modelos na análise dos recursos hídricos, fazendo com que esse setor receba contribuições frequentes. (CHRISTOFOLETTI, 1999).

A hidrologia dedica-se a estudar os fenômenos naturais complexos do ciclo hidrológico. Fenômenos a exemplo da evaporação, precipitação, infiltração e escoamento superficial são difíceis de serem analisados já que dependem de muitas variáveis. Desse modo, modelos que visam representá-los também são complexos, porém extremamente necessários. (TUCCI, 2005b).

Modelos hidrológicos são instrumentos que foram desenvolvidos com o propósito de compreender e retratar o comportamento de bacias hidrográficas. Eles podem representar o impacto da urbanização em uma bacia antes que ela ocorra, fazer previsões de enchentes em tempo real, avaliar o impacto da alteração de um rio, entre outros. (TUCCI, 2005b).

Tal modelagem encontra dificuldades pelo fato de uma bacia apresentar considerável heterogeneidade física e possuir uma extensa variedade de processos envolvidos. Consequentemente, há uma grande diversidade de modelos que distinguem-se pelos dados utilizados, prioridades da representação e objetivos almejados. Outras limitações encontradas na simulação hidrológica são a qualidade dos dados hidrológicos, dificuldade de simular matematicamente determinados processos e a simplificação do comportamento de variáveis e fenômenos. (TUCCI, 2005b).

3.2.1 MODELOS CHUVA-VAZÃO

Os modelos de transformação chuva-vazão simulam a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão no rio, buscando integrar os processos. Estão incluídas nessa representação a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, fluxo de água através do solo, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio. (TUCCI, 2005b).

Tais modelos surgiram com o objetivo de se obter séries hidrológicas de vazão mais longas e expressivas. A partir de dados de precipitação é possível preencher ou estimar séries de vazão para cenários efetivos ou calculados de uma bacia hidrográfica. (TUCCI, 2005b).

Em relação à discretização da bacia hidrográfica os modelos podem ser concentrados ou distribuídos. Em um modelo concentrado toda a bacia e seus processos hidrológicos são modelados por variáveis concentradas no espaço. Já para modelos distribuídos por sub-bacias há uma subdivisão que é feita de acordo com a drenagem principal, sendo os parâmetros e a precipitação tidos como uniformes por sub-bacia. (TUCCI, 2005b).

As principais variáveis temporais de entrada usadas nos modelos chuva-vazão são a precipitação, a evapotranspiração e a vazão. Já com relação a classificação os modelos podem ser: Empíricos, quando as equações matemáticas não tem relação com o comportamento dos processos físicos; conceituais, quando utilizam a equação da continuidade combinada com equações empíricas e físicos, que são modelos que além de utilizarem a equação da continuidade, usam também equações sobre a dinâmica dos processos. (TUCCI, 2005b).

3.2.2 O MÉTODO NRCS-CN

O método NRCS-CN, anteriormente conhecido por Soil Conservation Service – SCS-CN, foi desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Recursos Naturais (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Este modelo empírico é utilizado para estimar a precipitação efetiva e tornou-se muito popular por ser de fácil aplicação, ter poucos parâmetros, possuir grande aceitação da comunidade científica e pelo fato de que a instituição que o elaborou possui grande autoridade. (SURESH BABU et al., 2012).

O desenvolvimento desse método deu-se por meio de pesquisas feitas na primeira metade do século XX. Tais pesquisas tiveram como principal foco experiências realizadas em pequenas bacias rurais na região centro-oeste dos Estados Unidos da América. Contudo, com o passar dos anos o método ganhou grande visibilidade, sendo um dos mais utilizados no cotidiano de engenheiros. Como consequência, sua aplicação foi ampliada a circunstâncias bem diferentes daquelas empregadas na sua formulação inicial. (CUNHA et al., 2015).

Esse modelo é fundamentado na equação do balanço hídrico, (EQUAÇÃO 1), e na hipótese conceitual de igualdade entre o quociente do volume de chuva disponível para escoar superficialmente ($P - I_a$) sobre o volume instantâneo de escoamento direto (Q) (mm), e o quociente do volume máximo potencial de retenção (S) (mm) pelo volume de infiltração (F). Sendo P o volume total de chuva (mm) e I_a as perdas iniciais. Tal relação está demonstrada na EQUAÇÃO 2. (CUNHA et al., 2015).

$$P = I_a + Q + F \quad (1)$$

$$\frac{P - I_a}{Q} = \frac{S}{F} \quad (2)$$

A combinação das equações 1 e 2 gera a equação do modelo NRCS-CN (EQUAÇÃO 3), apresentada a seguir:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{S + P - I_a} \quad (3)$$

Onde P deve ser maior ou igual a Ia, caso contrário Q = 0.

As perdas iniciais são calculadas utilizando a EQUAÇÃO 4, onde o coeficiente de abstração inicial (λ) tem seu valor fixado como sendo 0,2. Tais perdas são causadas por fatores como a interceptação da água antes de atingir o solo, o armazenamento superficial e pela infiltração inicial. (CUNHA et al., 2015).

$$I_a = \lambda S \quad (4)$$

O potencial máximo de retenção de uma bacia hidrográfica (S) é um parâmetro que representa o tipo de solo, sua cobertura e suas condições hidrológicas. Esse parâmetro é transformado em outro parâmetro adimensional, denominado CN, por meio de uma identidade arbitrária (EQUAÇÃO 5). O valor do CN está compreendido em uma faixa que varia de 0 a 100. (DURÁN-BARROSO et al., 2016).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

O parâmetro CN é dependente de variáveis a exemplo da umidade do solo antes da ocorrência de um evento, tipo e condições de uso e ocupação do solo. A metodologia do SCS agrupa os solos em quatro grupos hidrológicos, A, B, C e D, que variam de acordo com sua aptidão para a infiltração ou geração de escoamento superficial. As definições e características pertinentes a cada tipo de solo são listadas abaixo. (MOCKUS citado por SARTORI et al., 2005):

- Grupo A: É composto essencialmente de areias e cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Tais solos possuem baixo potencial para gerar escoamento superficial e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados. Taxa mínima de infiltração: maior do que 7,62 mm/h.
- Grupo B: É composto por solos com textura moderadamente fina a moderadamente grossa, consistindo principalmente de solos razoavelmente profundos a profundos e razoavelmente drenados a bem drenados. Possuem moderada taxa de infiltração quando completamente molhados. Taxa mínima de infiltração: 3,81-7,62 mm/h.
- Grupo C: Esses solos possuem uma textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que

dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores. Taxa mínima de infiltração: 1,27-3,81 mm/h.

- Grupo D: É composto por solos predominantemente argilosos com alto potencial de expansão. Tais solos dispõem de um grande potencial para gerar escoamento superficial, possuindo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados. Taxa mínima de infiltração: menor do que 1,27 mm/h.

Em relação às condições de umidade antecedente do solo, o método prevê três condições em função da chuva ocorrida nos dias anteriores, descritas na TABELA 1. Também é possível variar o valor de CN para outra condição de umidade a partir da TABELA 2. (TUCCI, 2005b).

TABELA 1 – CONDIÇÕES DE UMIDADE ANTECEDENTE DO SOLO

AMC I	Solos secos - chuvas nos últimos cinco dias não ultrapassaram 15 mm.
AMC II	Situação média na época das cheias – as chuvas, nos últimos cinco dias, totalizaram entre 15 e 40 mm.
AMC III	Solo úmido (próximo da saturação) - as chuvas dos últimos cinco dias foram superiores a 40 mm, e as condições meteorológicas foram desfavoráveis para altas taxas de evaporação.

FONTE: TUCCI (2005b).

TABELA 2 – CONVERSÃO DAS CURVAS CN PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE DO SOLO

AMC II	AMC I	AMC III
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	2
5	2	13

FONTE: TUCCI (2005b).

Porém, tal classificação das condições de umidade antecedente (AMC) não é mais apoiada pelo NRCS pois a variabilidade espacial e temporal da chuva não era considerada. Na versão revista do modelo, a AMC passa a ser denominada como condição antecedente de escoamento superficial (ARC), sendo divididas em: baixa umidade (ARC I); condições médias (ARC II); e alta umidade (ARC III). (DURÁN-BARROSO et al., 2016).

Na TABELA 3 é possível observar a relação do parâmetro CN em relação às atividades desenvolvidas de uso e ocupação do solo, grupo hidrológico do solo e condição de umidade antecedente II. (RIGHETTO et al., 2009).

TABELA 3 – VALORES DE CN ESTIMADOS COM BASE NO TIPO DE SOLO E OCUPAÇÃO DA SUPERFÍCIE

OCUPAÇÃO DO SOLO	Tipo de solo			
	A	B	C	D
Solo cultivado				
Sem técnicas de conservação	72	81	88	91
Com técnicas de conservação	62	71	78	81
Pastagem				
Condição Precária	68	79	86	89
Condição Adequada	39	61	74	80
Área florestada				
Pouca cobertura	45	66	77	83
Grande cobertura	25	55	70	77
Parques e Jardins				
75% Área gramada	39	61	74	80
50 a 75% Área gramada	49	69	79	84
Áreas comerciais (85% de área impermeável)	89	92	94	95
Áreas Industriais (72% de área impermeável)	81	88	91	93
Áreas residenciais				
65% de área impermeável	77	85	90	92
30% de área impermeável	61	75	83	87
Áreas impermeáveis	98	98	98	98
Pavimento com pedrisco	76	85	89	91
Pavimento com drenagem	98	98	98	98

CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE SOLO: GRUPO A - SOLOS ARENOSOS PROFUNDOS COM BAIXO DE ARGILA; GRUPO B - SOLOS ARENOSOS RASOS COM BAIXO TEOR DE ARGILA; GRUPO C - SOLOS BARRENTOS COM TEOR DE ARGILA ENTRE 20 E 30%; GRUPO D - SOLOS ARGILOSOS

FONTE: Adaptado de RIGHETTO et al. (2009).

3.3 DESVANTAGENS E CONTRIBUIÇÕES AO MÉTODO NRCS-CN

3.3.1 DESVANTAGENS DO MÉTODO

Atualmente, nenhum método proposto como alternativa ao NRCS-CN possui tantas vantagens e simplificações quanto o próprio. Entretanto, diversas pesquisas realizadas em todo o mundo obtiveram resultados que indicam desvantagens em sua utilização. Vários autores concluíram que o método precisa de melhorias, revisões ou que precisa ser substituído. (PONCE E HAWKINS 1996; HUSSEIN 1996; MISHRA E SINGH 2002a,b citados por SURESH BABU, 2012).

Embora o método tenha sido criado para o cálculo da precipitação efetiva devido a um evento de chuva, esse vem sendo utilizado em várias outras situações. Como exemplo pode-se citar a simulação hidrológica a longo prazo, previsão de infiltração e taxas de excesso de precipitação, simulação de hidrogramas, modelagem da produção de sedimentos, particionamento de metais pesados e determinação de fluxo subterrâneo. (MISHRA e SINGH 2003; YUAN et al., 2001 citados por SURESH BABU, 2012).

Segundo Ponce et al. (1996), as desvantagens do método são as seguintes:

- O método foi desenvolvido usando dados regionais principalmente da região Centro-Oeste dos Estados Unidos da América. Porém, sua aplicação foi estendida para todo os Estados Unidos e também outros países. Portanto, deve-se usar esse método com prudência em outras regiões geográficas e climáticas, sendo adequado o emprego de estudos locais.
- Em algumas circunstâncias, como por exemplo baixos valores de precipitação e CN, o método pode apresentar-se de forma muito sensível a variáveis como condição de umidade antecedente e determinação do CN adequado, o que representa a variabilidade natural do meio. Contudo, o método não expõe de maneira clara a forma como a condição de umidade antecedente deve ser variada.
- O método funciona melhor em áreas agrícolas, local que a princípio esse foi designado. Mas sua aplicação também é feita em áreas urbanas e áreas de floresta, onde não funciona adequadamente. As implicações encontradas nesse caso são as de que o SCS-CN é mais adequado para a estimativa de precipitação excedente em cursos d'água com escoamento de base desprezível, isto é, a razão entre escoamento

direto e escoamento total é próxima de um. Esse é o caso de cursos d'água de primeira e segunda ordens em regiões úmidas e de cursos d'água efêmeros em regiões áridas e semiáridas.

- O método não considera os efeitos espaciais. Estudos mostram que o CN tende a diminuir com o aumento da área da bacia hidrográfica. Na falta de diretrizes, o SCS-CN deve ser aplicado em bacias hidrográficas pequenas ou médias. Sua aplicação para grandes bacias (maiores que 250 km²) deve ser feita com cuidado.

- O método fixa o valor da taxa de abstração inicial em $\lambda = 0,2$. Em partes, isso pode ser considerado com uma vantagem, visto que há uma redução significativa do número de parâmetros envolvidos no método. Em contrapartida, o λ pode ser interpretado como um parâmetro regional, devendo o seu valor ser variado de acordo com as configurações climáticas e geológicas de cada local.

De acordo com Ebrahimian et al. (2012), o NRCS-CN não leva em consideração o efeito da declividade de um terreno sobre a geração de escoamento superficial. Isso deve-se ao fato de que nos Estados Unidos, em áreas agrícolas, a declividade é normalmente menor que 5%. Nessa faixa a declividade não influencia o valor do CN consideravelmente. No entanto, declividades maiores tendem a influenciar bastante no movimento da água, fazendo com que parâmetros relacionados ao escoamento superficial sofram um acréscimo no seu valor.

3.3.2 CONTRIBUIÇÕES AO MÉTODO

O aumento da precipitação efetiva em terrenos mais íngremes pode ser explicado pela redução na taxa de infiltração, diminuição das abstrações iniciais e do tempo de recessão da bacia. Um estudo conduzido na China por Huang et al. (2006), desenvolveu uma equação incorporando o fator da declividade ao NRCS-CN (EQUAÇÃO 6). Tal estudo teve como suporte um conjunto de dados de 11 anos das medidas de precipitação total e precipitação efetiva de duas áreas experimentais com declividade variando de 14 a 140%.

$$CN_{2\alpha} = CN_2 \frac{322,79 + 15,63(\alpha)}{\alpha + 323,52} \quad (6)$$

Sendo CN_2 o valor de CN encontrado nas tabelas do SCS, $CN_{2\alpha}$ o valor de CN ajustado para dada declividade α (mm^{-1}).

Os resultados do estudo demonstraram que o método do SCS-CN subestimou grandes eventos de escoamento e superestimou os pequenos. Já a equação ajustada demonstrou ser mais apropriada para a previsão de escoamento em áreas íngremes do Loess Plateau da China, no entanto, ela precisa ser validada em outros locais. (HUANG et al., 2006)

Segundo Hawkins et al. (2002, citado por Suresh Babu, 2012), outras limitações são que o método não leva em conta o efeito da intensidade e duração da chuva, que juntas possuem grande influência na geração de escoamento superficial. Há uma falta de orientação sobre como variar a condição de umidade antecedente e a relação entre o CN e a umidade do solo não é realista. Além disso, embora a abstração inicial dependa da condição de umidade antecedente, o modelo não demonstra essa relação de maneira explícita.

Mishra e Singh (2003, citado por Jain et al., 2006) propuseram um modelo modificado do SCS-CN visando incorporar um termo que considerasse a condição de umidade antecedente do solo, EQUAÇÕES 7, 8 e 9.

$$Q = \frac{(P - I_a)(P - I_a + M)}{P - I_a + M + S} \quad (7)$$

Sendo $P > I_a$, senão $Q = 0$.

$$M = \frac{(P_5 - 0,2S_I)S_I}{P_5 + 0,8S_I} \quad (8)$$

A EQUAÇÃO 7 é simplificada como:

$$M = \gamma P_5 \quad (9)$$

Onde: M é a umidade antecedente; P_5 = valor antecedente da precipitação dos últimos 5 dias; S_I corresponde a condição de umidade antecedente I; γ é um coeficiente de proporcionalidade que pode ser determinado por meio de uma análise de regressão.

Baseado no modelo de Mishra-Singh, Jain et al. (2006) propuseram uma nova formulação com o objetivo de melhorá-lo, incorporando fatores como a duração da chuva e uma relação não linear modificada entre I_a -S. Tal formulação é demonstrada nas EQUAÇÕES 10, 11, 12 e 13.

$$Q = \frac{(P_c - I_{ad})(P_c - I_{ad} + M)}{P_c - I_{ad} + M + S} \quad (10)$$

Onde $P_c > I_{ad}$, caso contrário $Q = 0$. Além disso:

$$I_{ad} = \lambda S \left(\frac{P_c}{P_c + S} \right)^\alpha \quad (11)$$

$$P_c = P_o \left(\frac{t_p}{\bar{t}_p} \right)^\beta \quad (12)$$

$$M = \gamma P_5 \quad (13)$$

Sendo: P_o = precipitação observada; P_c = chuva ajustada; I_{ad} = abstração inicial ajustada; $\bar{t}_p$ duração média da tempestade; t_p = duração da tempestade; α , β , γ = coeficientes; e P_5 = valor antecedente da precipitação dos últimos 5 dias.

Já Suresh Babu et al. (2012) identificaram que o modelo proposto por Jain et al. (2006) necessitava de melhorias relacionadas ao parâmetro S e à condição de umidade antecedente, tendo em vista que tal modelo considera apenas um valor S (ou CN) por bacia hidrográfica. A retenção (S) foi definida no trabalho de Suresh Babu et al. (2012) como uma medida da capacidade de um determinado solo para abstrair e reter a precipitação, desde que o nível de umidade antecedente fosse levado em consideração na análise.

Nesse sentido, a retenção e a correspondente CN destinam-se a refletir não só a capacidade de um determinado solo para abstrair e reter a precipitação pluviométrica, mas também (1) a chuva dos últimos dias ou sua falta, que pode fazer com que a umidade do solo parta de um nível médio; (2) variações sazonais nas propriedades de escoamento superficial; e (3) condições de chuva incomuns.

Portanto, a retenção é uma quantidade que varia de um evento de precipitação a outro e por sua vez, a umidade do solo também. (SURESH BABU et al., 2012)

Desse modo, Suresh Babu et al. (2012) propuseram um novo modelo, identificado em seu trabalho como M3. Tal modelo incorpora o parâmetro “ S_{abs} ”, chamado de retenção potencial máxima, ao modelo de Jain et al. (2006). O parâmetro S_{abs} foi considerado como sendo a soma da retenção potencial (S) e umidade antecedente (M) (EQUAÇÃO 14).

$$S_{abs} = S + M \quad (14)$$

Além disso, para tornar o modelo mais racional, M é representado como uma função de P_5 e S_{abs} (EQUAÇÃO 15).

$$M = \gamma \sqrt{P_5 S_{abs}} \quad (15)$$

Ambos os modelos de Jain et al. (2006) e Suresh Babu et al. (2012) consideram a relação complexa não-linear de I_a - S (EQUAÇÃO 11). Porém Suresh Babu et al. (2012) ainda propôs outro modelo em seu estudo, denominado como M4, usando outra relação I_a - S , onde o I_a também depende da AMC, bem como do S ; portanto, I_a é uma quantidade que varia de evento para evento, como demonstrada a seguir (EQUAÇÃO 16).

$$I_a = \lambda S = \lambda (S_{abs} - M) \quad (16)$$

Para testar o desempenho dos modelos sugeridos e disponíveis foram utilizados dados de 82 pequenas bacias hidrográficas dos Estados Unidos da América. Tal estudo demonstrou que o modelo M3 possui a melhor performance, enquanto o modelo convencional do SCS-CN apresenta o pior desempenho de todos os modelos estudados. O modelo de Jain et al. (2006) teve um desempenho ligeiramente inferior ao modelo M3, mas superior ao modelo M4.

Segundo Baltas et al. (2007) o coeficiente de abstração inicial (λ) possui um importante papel na previsão do escoamento superficial, do pico do hidrograma e da distribuição de tempo do escoamento. Além disso, vários estudos demonstraram que

assumir o λ como 0,2 é equivocado e que valores entre 0,01 e 0,05 são mais realistas. (AJMAL et al. 2014).

Shi et al. (2009) determinaram e compararam o desempenho do λ em uma bacia hidrográfica experimental na área das Três Gargantas da China, ao analisar os eventos de precipitação-escoamento medidos. O conjunto de dados consistiu em seis anos de precipitação e medições de escoamento da bacia hidrográfica experimental. Os resultados indicaram que os valores λ variaram de 0,010 a 0,1554, com uma mediana de 0,048.

Ajmal et al. (2014) sugerem que, ao invés de usar os valores de CN de uma tabela, tais valores devem ser estimados com base em dados de chuva-vazão. Em seu estudo foram examinados: a aplicabilidade do modelo SCS-CN original e dos modelos modificados inspirados por ele usando diferentes métodos de determinação do CN; o efeito de λ na determinação dos valores de CN usando dados de chuva-vazão medidos; e foram propostos três novos modelos para estimativa da precipitação efetiva.

Entre os modelos analisados por Ajmal et al. (2014) encontram-se os de Cazier e Hawkins 1984; Woodward et al. 2003 e Jain et al. 2006a. O modelo de Woodward et al. (2003) utilizou o procedimento dos mínimos quadrados para desenvolver seu método. Foi identificado que $\lambda = 0,05$ é o melhor valor de ajuste para 252 das 307 bacias hidrográficas estudadas. Dessa forma, a equação original do SCS-CN (EQUAÇÃO 3) torna-se a EQUAÇÃO 17:

$$Q = \frac{(P - 0,05S)^2}{P + 0,95S} \quad (17)$$

Onde $P > 0,05S$, caso contrário $Q = 0$.

Jain et al. (2006a) concluiu que a estimativa de λ é crucial para a determinação precisa do escoamento direto usando o método SCS-CN. A relação $I_a - S$ proposta foi a seguinte (EQUAÇÃO 18):

$$I_a = \lambda S \left(\frac{P}{P + S} \right)^\alpha = 0,3S \left(\frac{P}{P + S} \right)^{1,5} \quad (18)$$

Eles descobriram que usar $\lambda = 0,3$ e $\alpha = 1,5$ resultava em um melhor desempenho do que usar $\lambda = 0,2S$, e portanto recomendam o uso desses valores para aplicações de campo.

O modelo de Cazier e Hawkins (1984, citado por Ajmal et al., 2014), encontrou que $\lambda = 0$ teve o melhor ajuste para os dados por eles estudados. Essa proposição levou a uma nova forma da EQUAÇÃO 3, gerando a EQUAÇÃO 19:

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (19)$$

Após analisar os modelos descritos acima, Ajmal et al. (2014) sugeriram três novos métodos, que foram elaborados por meio de tentativa e erro. Tais modelos são apresentados nas EQUAÇÕES 20, 21 e 22.

$$Q = P \left(\frac{P}{P + S} - \frac{1}{S} \right) \quad (20)$$

$$Q = \left(\frac{P^2}{P + S} - \frac{P + P_5}{S^2} \right) \quad (21)$$

$$Q = \left(\frac{P^2}{P + S} - \frac{P_5}{S} \right) \quad (22)$$

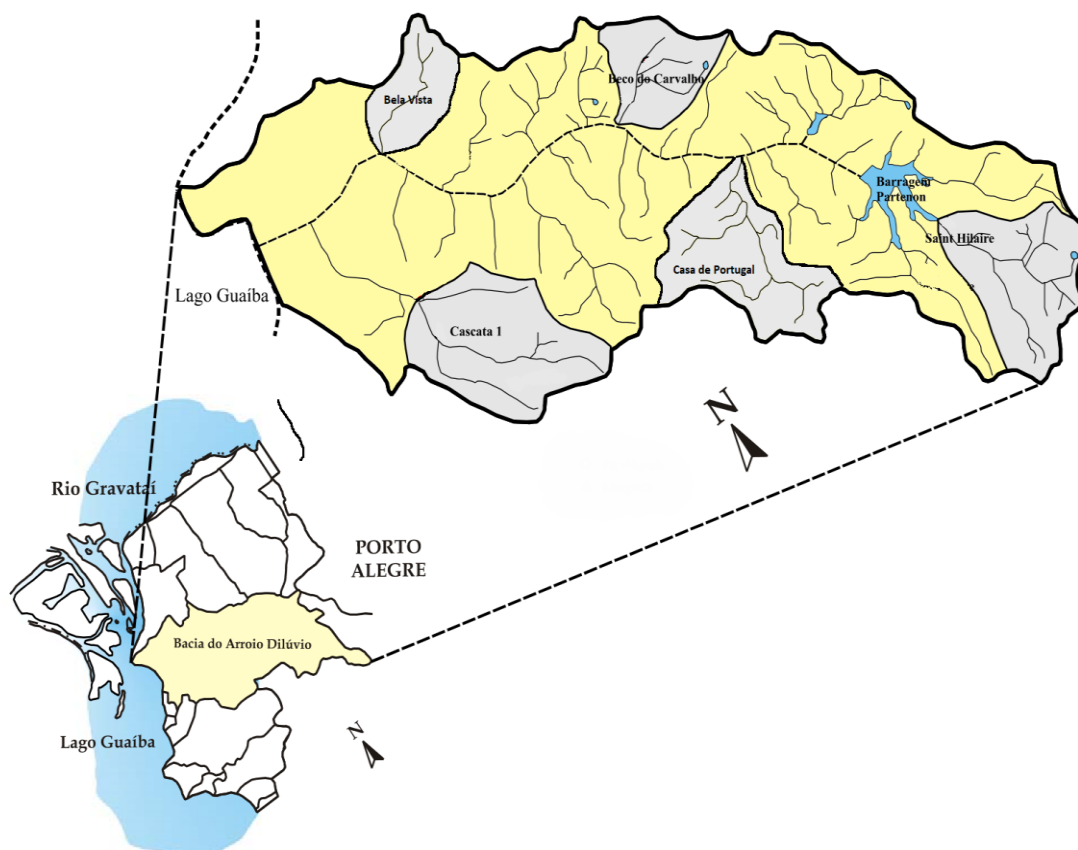
Com isso, Ajmal et al. (2014) concluiu que o modelo original do SCS-CN era inconsistente na área de estudo. Porém fixar o λ como 0,2 parece ser uma vantagem pois reduz os parâmetros do modelo para um. Os modelos de Cazier e Hawkins (1984) e de Woodward et al. (2003) possuem uma melhor performance do que o método original do SCS-CN. Já os modelos propostos, EQUAÇÕES 20, 21 e 22, demonstraram ser bastante consistentes para a estimativa do escoamento.

4 METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio está localizada na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, entre as longitudes 51°04' e 51°15' oeste e latitudes 31°01' e 30°08' sul. A bacia possui uma área de drenagem de 80 km² e seu rio principal, o Arroio Dilúvio, possui uma extensão de 12 km (SILVEIRA, 1999). No presente estudo foram abordadas algumas sub-bacias da bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio, sendo elas: Cascata 1, Bela Vista, Beco do Carvalho, Casa de Portugal e Saint Hilaire (FIGURA 1).

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DE ESTUDO



FONTE: Adaptado de TASSI et al. (2006).

Essa bacia hidrográfica é uma das mais urbanizadas de Porto Alegre, possuindo 6.417 hab/km². O desenvolvimento urbano nessa área ocorreu da jusante, próximo ao Lago Guaíba, para a montante, rumo as cabeceiras do Arroio Dilúvio. Dessa forma, as nascentes representam a parte mais limpa de todo o curso d'água e a foz a parte mais deteriorada do Arroio. (MOREIRA, 2010).

No que se refere aos solos, na região de Porto Alegre, são encontrados os seguintes tipos: Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelos, associação de Argissolos Vermelhos ou Argissolos Vermelho-Amarelos com Cambissolos Háplicos, associação de Cambissolos Háplicos com Neossolos Litólicos ou Neossolos Regolíticos, associação de Planossolos Hidromórficos, Gleissolos Háplicos e Plintossolos Argilúvicos ou Neossolos Flúvicos, associação de Gleissolos Háplicos e Planossolos Hidromórficos, associação de Gleissolos e Neossolos Flúvicos, associação de Gleissolos, Planossolos e Tipos de Terreno, associação de Neossolos Quartzarênicos e Gleissolos, Neossolos Flúvicos, Tipos de Terreno e associação de Neossolos Flúvicos e Tipos de Terreno. (HASENACK, 2008).

Em relação à classificação dos grupos hidrológicos do solo dada pelo NRCS, Porto Alegre apresenta solos agrupados nos grupos B, C e D. Sendo assim, nenhum solo nessa região foi classificado como possuindo alta taxa de infiltração, que corresponde ao grupo A. (HASENACK, 2008).

A distribuição percentual dos solos por grupo hidrológico (TABELA 4), indica que, em sua maioria, os solos de Porto Alegre estão enquadrados no grupo D, possuindo portanto grande capacidade para geração de escoamento superficial. (HASENACK, 2008).

TABELA 4 – DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE SOLO EM PORTO ALEGRE

Grupo hidrológico de solos	Área (Km ²)	Frequência
A	0,00	0,00%
B	81,41	17,10%
C	121,03	25,43%
D	273,56	57,47%
Total	476,00	100,00%

FONTE: HASENACK (2008).

Em relação ao parâmetro CN, a TABELA 5 relaciona a área superficial e seu respectivo proporcional ocupado por diferentes faixas de CN. Foi constatado que 83% do município tem valores de CN maiores que 75, indicando que tal bacia hidrográfica possui uma capacidade de média a alta na geração de escoamento superficial. Isso, em parte, explica-se pelo fato da bacia possuir solos com baixa capacidade de

infiltração e ter percentuais elevados de áreas impermeabilizadas devido à urbanização. (HASENACK, 2008).

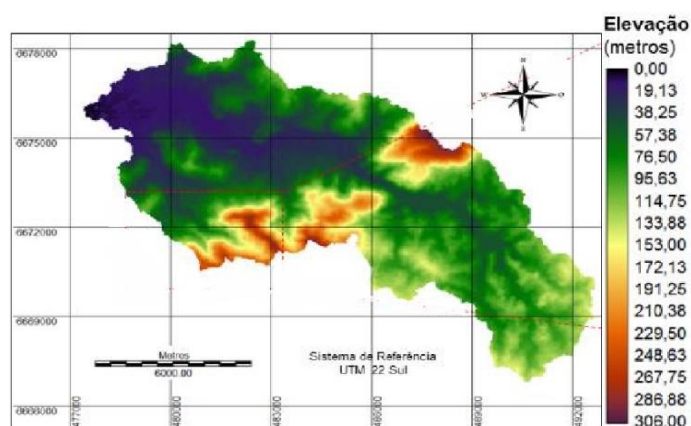
TABELA 5 – DISTRIBUIÇÃO DO PARÂMETRO CN EM PORTO ALEGRE

Parâmetro CN	Área (Km2)	Frequência
50 - 55	9,14	1,92%
55 - 60	1,8	0,38%
60 - 65	3,51	0,74%
65 - 70	57,72	12,13%
70 - 75	9,10	1,91%
75 - 80	10,25	22,53%
80 - 85	115,66	24,30%
85 - 90	39,99	8,40%
90 - 95	93,57	19,66%
95 - 100	35,26	8,04%
Total	476,00	100%

FONTE: HASENACK (2008).

A topografia da bacia foi obtida através do trabalho de Costa (2017), que classificou a bacia do Arroio Dilúvio com o auxílio do Modelo Digital de Elevação (MDE), oriundo de dados do Serviço de Geologia dos Estados Unidos (USGS-SRTM). Esses dados foram adquiridos através do endereço eletrônico: < <http://earthexplorer.usgs.gov/> >, com resolução espacial de 30m (FIGURA 2).

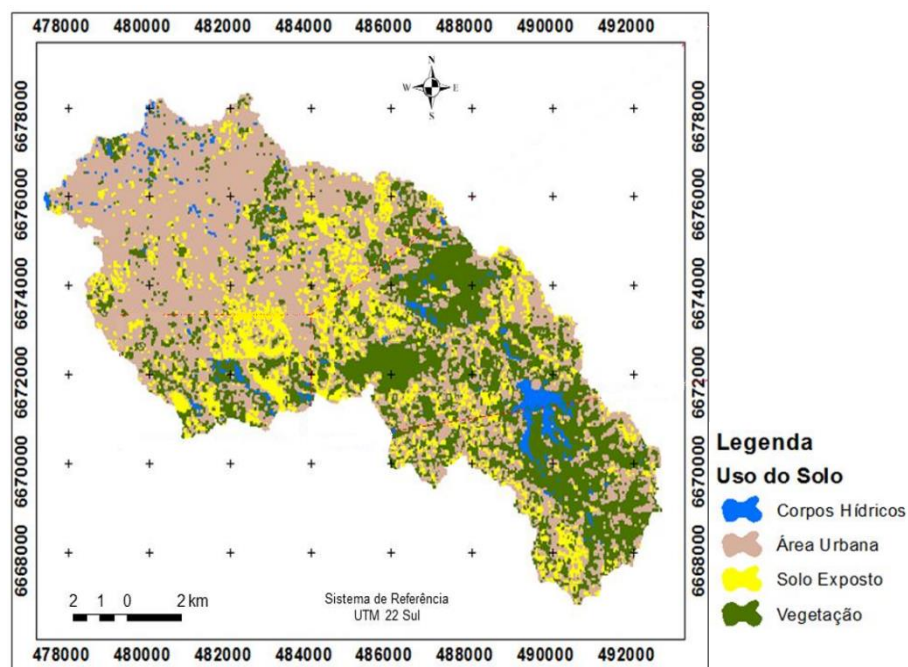
FIGURA 2 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DILÚVIO



FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

O mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica (FIGURA 3) também foi obtido através de Costa (2017). Foram consideradas imagens de satélite provenientes do sensor/satélite TM/Landsat-5 (bandas espectrais: 3, 4 e 5), com passagem no dia 23 de agosto de 1987. Para análise das imagens, foi utilizada a classificação por Máxima Verossimilhança, método que considera cada pixel como pertencente a apenas uma classe. As classes utilizadas no estudo foram: corpos hídricos, vegetação, área urbana e solo exposto.

FIGURA 3 – MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO DILÚVIO



FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

4.2 DADOS DISPONÍVEIS E ANÁLISE PRELIMINAR

4.2.1 DADOS DE CHUVA-VAZÃO

A bacia do Arroio Dilúvio foi escolhida para esse estudo por possuir dados hidrológicos, tendo sido monitorada por 11 linígrafos e 14 pluviógrafos no período de 1978 a 1982, no âmbito do denominado Projeto Dilúvio. Nessa época a urbanização na bacia era de 50%. Os aparelhos possuíam autonomia semanal e coletavam

informações a cada 30 minutos. Em razão de panes e contratempos diversos existem algumas lacunas nas séries, porém a maioria delas foi preenchida com técnicas simples. (SILVEIRA, 2000).

Os dados das características dos eventos analisados foram obtidos a partir do estudo de Costa (2017). A quantidade de eventos escolhidos por sub-bacia são exibidos na TABELA 6. Tais eventos foram escolhidos por apresentarem formato simples, com características em comum visualmente com um hidrograma de forma triangular.

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS DADOS POR SUB-BACIA E NÚMERO DE EVENTOS SELECIONADOS

Bacias hidrográficas	Área (km ²)	Δt (minutos)	Número de eventos
Cascata I	4,93	30	27
Saint-Hilaire	5,94	30	18
Casa de Portugal	6,20	30	9
Beco Carvalho	3,32	30	8
Bela Vista	2,99	30	10

FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

Nas TABELAS 7, 8, 9, 10 e 11 são apresentados alguns aspectos de cada evento selecionado para cada sub-bacia, como por exemplo: a identificação dos eventos; suas datas de ocorrência; precipitação total; duração da precipitação; tempo de concentração; intensidade média da precipitação (determinada pelo quociente entre a precipitação total e a duração total da precipitação); intensidade máxima da precipitação (representada pela razão entre a precipitação máxima dentre uma sequência de registros e o intervalo de tempo de um registro); precipitação efetiva; vazão de pico superficial; vazão de pico total; tempo de pico; coeficiente de escoamento superficial (razão entre a precipitação efetiva e a precipitação total), coeficiente de escoamento global (dado pela razão entre o volume de água que escoou superficialmente e o volume de água que infiltra).

TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA CASCATA I.

ID do Evento	Data	Precipitação						Escoamento				
		P _{total} (mm)	D _{prec.} (horas)	T _c (horas)	I _{méd} (mm/h)	I _{máx} (mm/h)	P _{ef} (mm)	Q _{p_sup} (m³/s)	Q _{p_total} (m³/s)	T _p (horas)	C _{superficial}	C _{global}
PA070279	07/02/1979	18.66	3.00	2.50	6.22	21.44	4.95	3.15	3.34	3.50	0.27	0.33
PA120279	12/02/1979	14.16	4.50	3.00	3.15	19.44	1.00	0.87	1.07	6.00	0.07	0.16
PA050479	05/04/1979	7.02	2.00	3.00	3.51	8.00	1.17	0.72	0.89	3.50	0.17	0.30
PA170479	17/04/1979	7.02	3.50	2.50	2.01	6.00	0.49	0.27	0.37	3.50	0.07	0.18
PA290479	29/04/1979	26.75	5.00	2.50	5.35	21.92	1.82	1.66	1.79	7.00	0.07	0.09
PA250879	25/08/1979	12.20	1.50	3.00	8.13	18.80	1.66	1.28	1.42	2.50	0.14	0.20
PA240979	24/09/1979	12.60	1.00	3.00	12.60	22.00	1.11	0.96	0.99	2.00	0.09	0.10
PA250979	25/09/1979	39.60	4.00	2.00	9.90	24.80	5.32	3.54	3.65	3.50	0.13	0.16
PA171179	17/11/1979	28.53	5.00	3.00	5.71	18.28	4.20	2.46	2.56	5.00	0.15	0.18
PA061279	06/12/1979	7.54	2.00	4.50	3.77	8.28	0.54	0.45	0.49	5.00	0.07	0.10
P3061279	06/12/1979	14.02	3.00	2.00	4.67	17.20	1.57	1.68	1.71	3.50	0.11	0.12
PA081279	08/12/1979	14.40	1.50	4.50	9.60	27.24	2.13	1.46	1.49	4.00	0.15	0.16
PA121279	12/12/1979	52.84	2.50	1.50	21.14	88.28	7.74	7.28	7.48	2.50	0.15	0.19
PA090180	09/01/1980	13.03	2.50	1.50	5.21	24.00	3.24	2.97	3.13	4.00	0.25	0.34
PA050280	05/02/1980	11.50	1.00	3.00	11.50	21.00	2.38	2.71	2.88	2.50	0.21	0.29
PA160280	16/02/1980	21.51	4.00	0.50	5.38	27.00	5.44	5.15	5.31	2.50	0.25	0.34
PA240280	24/02/1980	13.01	3.50	1.50	3.72	18.00	2.60	2.48	2.54	2.50	0.20	0.26
PA110380	11/03/1980	12.61	2.00	2.00	6.31	21.60	1.85	1.87	1.97	2.50	0.15	0.20
PA250380	25/03/1980	17.25	1.50	2.00	11.50	34.16	2.80	2.50	2.70	2.50	0.16	0.23
PA280580	28/05/1980	8.37	5.00	3.00	1.67	6.08	0.53	0.27	0.46	5.50	0.06	0.24
PA310580	31/05/1980	27.34	1.50	2.50	18.23	47.68	4.10	3.84	4.00	2.00	0.15	0.20
PA300680	30/06/1980	11.40	2.50	1.50	4.56	11.20	0.80	0.58	0.61	2.00	0.07	0.10
PA080780	08/07/1980	20.81	7.00	2.00	2.97	7.20	0.87	0.38	0.40	4.50	0.04	0.06
PA170880	17/08/1980	28.02	3.00	3.50	9.34	21.52	7.57	3.67	3.75	3.50	0.27	0.32
PA310880	31/08/1980	17.62	4.00	1.50	4.41	10.60	2.35	1.82	1.92	3.50	0.13	0.19
PA221180	22/11/1980	8.09	3.00	3.00	2.70	7.84	0.81	0.47	0.84	3.50	0.10	0.38
PA021280	02/12/1980	22.96	6.00	1.00	3.83	18.72	3.33	2.51	3.35	4.50	0.15	0.51

Legenda: ID do evento = Identificação do evento; P_{total} = Precipitação total; D_{prec.} = Duração da precipitação; T_c = Tempo de concentração; I_{méd} = Intensidade média; I_{máx} = Intensidade máxima; P_{ef} = Precipitação efetiva; Q_{p_sup} = Vazão de pico superficial; Q_{p_total} = Vazão de pico total; T_p = Tempo de pico; C_{superficial} = Coeficiente de escoamento superficial, e C_{global} = Coeficiente de escoamento global.

FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA SAINT-HILAIRE

ID do Evento	Data	Precipitação						Escoamento				
		P _{total} (mm)	D _{prec} (horas)	T _c (horas)	I _{méd} (mm/h)	I _{máx} (mm/h)	P _{ef} (mm)	Q _{p_sup} (m³/s)	Q _{p_total} (m³/s)	T _p (horas)	C _{superficial}	C _{global}
PA180579	18/05/1979	32.82	9.50	5.00	3.45	9.60	0.57	0.19	0.32	10.00	0.02	0.05
PA200779	20/07/1979	36.00	9.50	7.50	3.79	10.80	0.86	0.25	0.40	11.00	0.02	0.06
PA030879	03/08/1979	28.44	6.50	7.50	4.38	13.60	0.99	0.26	0.41	8.50	0.03	0.08
PA050280	05/02/1980	23.40	1.00	7.50	23.40	45.60	0.41	0.18	0.22	4.50	0.02	0.03
PA160280	16/02/1980	20.80	4.00	7.00	5.20	24.00	0.52	0.15	0.17	4.50	0.02	0.04
PA030380	03/03/1980	10.81	5.00	8.00	2.16	6.40	1.13	0.34	0.40	6.50	0.10	0.17
PA310580	31/05/1980	18.71	1.50	8.00	12.47	35.00	0.32	0.18	0.30	5.50	0.02	0.05
PA080780	08/07/1980	16.80	7.00	14.50	2.40	5.60	0.41	0.08	0.10	10.00	0.02	0.04
PA310880	31/08/1980	16.91	4.00	9.00	4.23	12.20	0.37	0.13	0.19	6.50	0.02	0.05
PA081180	08/11/1980	29.31	13.00	8.50	2.25	4.40	0.50	0.13	0.21	16.00	0.02	0.04
PA301180	30/11/1980	18.82	5.00	5.50	3.76	8.00	0.47	0.17	0.24	6.50	0.02	0.06
PA141280	14/12/1980	11.00	1.00	8.00	11.00	20.40	0.22	0.09	0.17	6.00	0.02	0.06
PA181280	18/12/1980	15.80	4.00	7.00	3.95	10.40	0.21	0.07	0.14	8.50	0.01	0.04
PA110781	11/07/1981	22.20	5.50	8.00	4.04	17.20	0.47	0.14	0.27	8.00	0.02	0.08
PA260881	26/08/1981	30.83	9.00	8.00	3.43	12.80	0.72	0.21	0.27	10.50	0.02	0.04
PA200981	20/09/1981	33.00	9.00	9.50	3.67	10.60	1.11	0.22	0.43	11.50	0.03	0.11
PA051281	05/12/1981	27.80	3.00	5.50	9.27	43.00	0.60	0.22	0.30	6.00	0.02	0.04
PA030282	03/02/1982	48.51	9.50	7.50	5.11	38.80	0.61	0.21	0.28	12.50	0.01	0.02

Legenda: ID do evento = Identificação do evento; P_{total} = Precipitação total; D_{prec.} = Duração da precipitação; T_c = Tempo de concentração; I_{méd} = Intensidade média; I_{máx} = Intensidade máxima; P_{ef} = Precipitação efetiva; Q_{p_sup} = Vazão de pico superficial; Q_{p_total} = Vazão de pico total; T_p = Tempo de pico; C_{superficial} = Coeficiente de escoamento superficial, e C_{global} = Coeficiente de escoamento global.

FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA CASA DE PORTUGAL

ID do Evento	Data	Precipitação						Escoamento				
		P _{total} (mm)	D _{prec} (horas)	T _c (horas)	I _{méd} (mm/h)	I _{máx} (mm/h)	P _{ef} (mm)	Q _{p_sup} (m³/s)	Q _{p_total} (m³/s)	T _p (horas)	C _{superficial}	C _{global}
PA180579	18/05/1979	35.02	9.50	3.50	3.69	10.00	4.30	1.40	2.31	7.50	0.12	0.37
PA110679	11/06/1979	14.00	4.00	6.50	3.50	8.00	1.48	0.51	1.15	6.00	0.11	0.39
PA240679	24/06/1979	41.52	11.00	4.50	3.77	10.00	6.60	1.77	2.56	8.50	0.16	0.38
PA060879	06/08/1979	11.52	4.50	5.00	2.56	5.00	1.23	0.56	1.42	6.00	0.11	0.59
PA250879	25/08/1979	15.80	1.50	6.00	10.53	25.60	1.20	0.67	1.30	4.00	0.08	0.26
PA310879	31/08/1979	14.56	6.00	4.50	2.43	10.00	0.89	0.53	1.42	8.50	0.06	0.40
PA250979	25/09/1979	34.53	4.00	4.50	8.63	24.00	6.58	2.66	3.88	4.00	0.19	0.38
PA221079	22/10/1979	28.54	6.50	3.50	4.39	14.00	0.96	0.37	0.50	6.00	0.03	0.07
PA171179	17/11/1979	35.50	5.00	0.50	7.10	23.00	3.01	1.55	1.92	3.00	0.08	0.15

Legenda: ID do evento = Identificação do evento; P_{total} = Precipitação total; D_{prec.} = Duração da precipitação; T_c = Tempo de concentração; I_{méd} = Intensidade média; I_{máx} = Intensidade máxima; P_{ef} = Precipitação efetiva; Q_{p_sup} = Vazão de pico superficial; Q_{p_total} = Vazão de pico total; T_p = Tempo de pico; C_{superficial} = Coeficiente de escoamento superficial, e C_{global} = Coeficiente de escoamento global.

FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA BECO CARVALHO

ID do Evento	Data	Precipitação					Escoamento					
		P _{total} (mm)	D _{prec} (horas)	T _c (horas)	I _{méd} (mm/h)	I _{máx} (mm/h)	P _{ef} (mm)	Q _{p_sup} (m³/s)	Q _{p_total} (m³/s)	T _p (horas)	C _{superficial}	C _{global}
PA120279	12/02/1979	7.53	4.50	4.00	1.67	7.00	0.38	0.25	0.26	7.00	0.05	0.06
PA090579	09/05/1979	41.51	9.00	2.00	4.61	13.00	3.07	1.08	1.15	7.50	0.07	0.09
PA180579	18/05/1979	33.51	9.50	5.00	3.53	8.00	1.8	0.32	0.37	6.50	0.05	0.08
PA200779	20/07/1979	54.52	9.50	3.00	5.74	12.00	3.72	1.88	2.42	10.00	0.07	0.16
PA250779	25/07/1979	9.03	5.00	3.50	1.81	4.00	0.2	0.08	0.08	5.00	0.02	0.03
PA060879	06/08/1979	10.51	4.50	3.00	2.34	6.00	0.17	0.05	0.06	5.00	0.02	0.03
PA240979	24/09/1979	25.00	1.00	3.00	25.00	44.00	2.93	1.55	1.55	2.00	0.12	0.12
PA221079	22/10/1979	26.56	6.50	1.50	4.09	12.00	0.38	0.12	0.12	4.00	0.01	0.02

Legenda: ID do evento = Identificação do evento; P_{total} = Precipitação total; D_{prec.} = Duração da precipitação; T_c = Tempo de concentração; I_{méd} = Intensidade média; I_{máx} = Intensidade máxima; P_{ef} = Precipitação efetiva; Q_{p_sup} = Vazão de pico superficial; Q_{p_total} = Vazão de pico total; T_p = Tempo de pico; C_{superficial} = Coeficiente de escoamento superficial, e C_{global} = Coeficiente de escoamento global.

FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS SELECIONADOS DA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA BELA VISTA

ID do Evento	Data	Precipitação					Escoamento					
		P _{total} (mm)	D _{prec} (horas)	T _c (horas)	I _{méd} (mm/h)	I _{máx} (mm/h)	P _{ef} (mm)	Q _{p_sup} (m³/s)	Q _{p_total} (m³/s)	T _p (horas)	C _{superficial}	C _{global}
PA280279	28/02/1979	7.00	1.00	1.50	7.00	12.00	4.31	2.82	2.86	3.50	0.62	0.68
PA050479	05/04/1979	9.00	2.00	1.00	4.50	7.00	1.70	1.28	1.36	2.50	0.19	0.27
PA260780	26/07/1979	9.52	2.50	2.50	3.81	8.00	0.73	0.50	0.53	4.00	0.08	0.13
PA250879	25/08/1979	13.80	1.50	1.50	9.20	21.00	12.12	7.84	7.90	2.00	0.88	0.92
PA080180	08/01/1980	12.01	2.50	2.00	4.80	14.00	0.83	0.56	0.59	2.00	0.07	0.11
PA180580	18/05/1980	12.01	2.00	1.00	6.01	18.00	4.14	2.64	2.70	3.50	0.34	0.41
PA300680	30/06/1980	7.51	2.50	0.50	3.00	6.00	0.25	0.16	0.19	2.00	0.03	0.09
PA310880	31/08/1980	21.01	4.00	1.50	5.25	10.00	2.77	1.16	1.20	3.50	0.13	0.17
PA181080	18/10/1980	17.50	2.50	1.00	7.00	21.00	5.26	3.56	3.62	2.50	0.30	0.34
PA141280	14/12/1980	12.01	1.00	2.00	12.01	24.00	3.75	2.25	2.32	2.00	0.31	0.36

Legenda: ID do evento = Identificação do evento; P_{total} = Precipitação total; D_{prec.} = Duração da precipitação; T_c = Tempo de concentração; I_{méd} = Intensidade média; I_{máx} = Intensidade máxima; P_{ef} = Precipitação efetiva; Q_{p_sup} = Vazão de pico superficial; Q_{p_total} = Vazão de pico total; T_p = Tempo de pico; C_{superficial} = Coeficiente de escoamento superficial, e C_{global} = Coeficiente de escoamento global.

FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

4.2.2 DETERMINAÇÃO DO CN

Os valores de CN para as ARCs I,II e II para a sub-bacia Cascata I (TABELA 12), foram obtidos a partir de Costa (2017). Já os valores para a sub-bacia Saint-Hilaire, foram obtidos da pesquisa de Veeck (2018) (TABELA 13). Ambos foram calculados com base na classificação de tipos de solo do município de Porto Alegre, elaborada por Hasenack et al. (2008), e no mapa de tipos de solo do Brasil, elaborado pela EMBRAPA.

TABELA 12 – VALORES DO CN MÉDIO PARA A SUB-BACIA CASCATA I UTILIZADOS NESSE TRABALHO

Uso do solo	Grupo hidrológico do solo	Área (km²)	ARC		
			I	II	III
Vegetação	B	0,34	35	55	74
	D	1,08	60	77	89
Área urbana	B	2,30	52	71	85
	D	1,21	71	85	93
CN médio			57,24	74,65	87,08

FONTE: Adaptado de COSTA (2017).

TABELA 13 – VALORES DO CN MÉDIO PARA A SUB-BACIA SAINT-HILAIRE UTILIZADOS NESSE TRABALHO

Uso do solo	Grupo hidrológico do solo	Área (km²)	ARC		
			I	II	III
Vegetação	B	4,23	40	60	79
Área Urbana	B	0,69	53,4	72	88,6
Solo exposto	B	0,90	49,8	69	86,2
CN médio			43,10	62,81	81,25

FONTE: Adaptado de VEECK (2018).

Os valores de CN usados para as sub-bacias Casa de Portugal, Beco Carvalho e Bela Vista, foram obtidos do estudo de Tassi et al. (2006) (TABELA 14). Para as sub-bacias Casa de Portugal e Bela Vista, não foi encontrado estudo específico que determinasse os seus respectivos valores de CN. Nesse caso, foi adotado o valor de CN encontrado para a bacia do Arroio Dilúvio, coluna 10, como indicado na TABELA 14. Para a sub-bacia Beco Carvalho foi utilizado o valor de CN presente na coluna 10, tendo sido escolhido o valor 63, por ser a média dos valores apresentados. Para transformar os valores de CN para outras condições de umidade, foi utilizada a TABELA 2 deste trabalho, por meio de interpolação.

TABELA 14 – TABELA DE ONDE FORAM RETIRADOS OS VALORES DE CN PARA AS SUB-BACIAS CASA DE PORTUGAL, BECO CARVALHO E BELA VISTA

	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10
Bacia Hidrográfica	Nº De Eventos	CN (média)	CN (mediana)	CN (moda)	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	AMC II	AMC III	CN Tabela
Dilúvio	39	90,11	90,80	92,00	4,15	79,50	96,90	96,20	99,20	79
Beco do Carvalho	5	70,80	70,60	-	5,34	65,00	79,40	85,50	97,10	61-65
Cascata 1	34	82,49	85,60	87,50	6,68	66,10	90,80	92,50	98,50	81
Saint Hilaire	8	68,98	69,75	-	8,03	52,80	76,90	84,20	96,60	38-40
Totais	86	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FONTE: Adaptado de TASSI et al. (2006).

4.3 CÁLCULOS

4.3.1 CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO EFETIVA USANDO O MODELO DO NRCS-CN COM DIFERENTES VALORES DE λ E OUTRAS FORMULAÇÕES ALTERNATIVAS

Todos os cálculos realizados nesse trabalho foram feitos por sub-bacia analisada considerando-se as ARCs I,II e III. Para analisar o desempenho do método do NRCS-CN, calculado com diferentes valores de λ , e de outras formulações por ele inspiradas, foram utilizados os dados de precipitação total, apresentados nas TABELAS 7, 8, 9, 10 e 11 para cada sub-bacia, respectivamente, e os valores de CN apresentados nas TABELAS 12, 13 e 14.

No cálculo da precipitação efetiva foi utilizada a equação do NRCS-CN, EQUAÇÃO 3, variando-se o S para cada ARC por meio da EQUAÇÃO 5, através da mudança no valor de CN. A variação no valor de λ foi feita por meio da EQUAÇÃO 4, obtendo-se a partir daí o valor de I_a .

Os valores de λ escolhidos para serem variados foram: 0; 0,01; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55 e 0,6. Tais valores foram escolhidos por representarem um espectro amplo de valores maiores e menores do que o valor fixado pelo método do NRCS-CN.

Já os modelos inspirados pelo NRCS-CN analisados foram os de: Ajmal et al. (2014), EQUAÇÃO 20, denominado de M2; Jain et al. (2006a), EQUAÇÃO 18, denominado M3, o modelo de Cazier e Hawkins (1984), EQUAÇÃO 19, que

representa $\lambda = 0$; e o modelo de Woodward et al. (2003), EQUAÇÃO 17, que equivale ao $\lambda = 0,05$ (TABELA 15).

TABELA 15 – MODELOS ANALISADOS

Modelos					
	Cazier e Hawkins (1984)	Woodward et al. (2003)	Modelo original NRCS-CN	Ajmal et al. (2014)	Jain et al. (2006a)
λ	0	0,05	0,2	-	-
Identificação	Identificados pelo valor de λ			M2	M3

FONTE: A autora (2017).

Esses modelos foram escolhidos por ser possível a realização de seus cálculos, tendo em vista as informações acessíveis para as sub-bacias estudadas, pois, os outros modelos revisados requeriam parâmetros, a exemplo da quantidade de precipitação dos últimos 5 dias, que não estavam disponíveis nos dados utilizados, impossibilitando o seu uso.

Após a realização dos cálculos, foram gerados gráficos de dispersão, para cada sub-bacia, comparando a precipitação efetiva observada (mm) com a precipitação efetiva calculada (mm), apresentados no apêndice 1. Cada gráfico representa uma formulação diferente utilizada, e cada ponto presente nos gráficos é um evento. A reta diagonal presente em todos os gráficos corresponde a reta (1:1), representando a linha de ajuste perfeito. Os gráficos deixaram de ser gerados a partir do momento em que todos os valores da precipitação efetiva calculada igualam-se a zero. Os resultados apresentados estão divididos por sub-bacia e por ARC.

O desempenho dos modelos analisados foi avaliado por meio do cálculo da raiz do erro quadrático médio (RMSE), a fim de se comparar a diferença entre os valores encontrados para a precipitação efetiva calculada e os da precipitação efetiva observada (EQUAÇÃO 23).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_o - Q_c)_i^2} \quad (23)$$

Onde RMSE é um índice de variância entre valores de precipitação efetiva calculados e observados, Q_o é a precipitação efetiva observada, Q_c é a precipitação efetiva calculada, N é o número total de eventos e i é um número inteiro que varia de 1 a N . (JAIN et al. 2006a).

Esse método estatístico foi selecionado por já ter sido usado para avaliar a performance de modelos em vários estudos prévios, como os de Ajmal et al. (2014) e Jain et al. (2006a).

4.3.2 DETERMINAÇÃO DO λ ÓTIMO PARA CADA SUB-BACIA NAS TRÊS ARCS

Na determinação do coeficiente de abstração inicial que melhor representou cada evento foi utilizada a ferramenta “Atingir Meta” do Excel. Fazendo com que a precipitação efetiva calculada se igualasse à observada por meio da mudança no valor de λ .

Para uma melhor análise de tais resultados foi feito o cálculo da média e do coeficiente de variação (CV) (EQUAÇÃO 24), sendo essa uma medida de dispersão empregada para estimar a precisão dos resultados. (EVERITT et al., 2010).

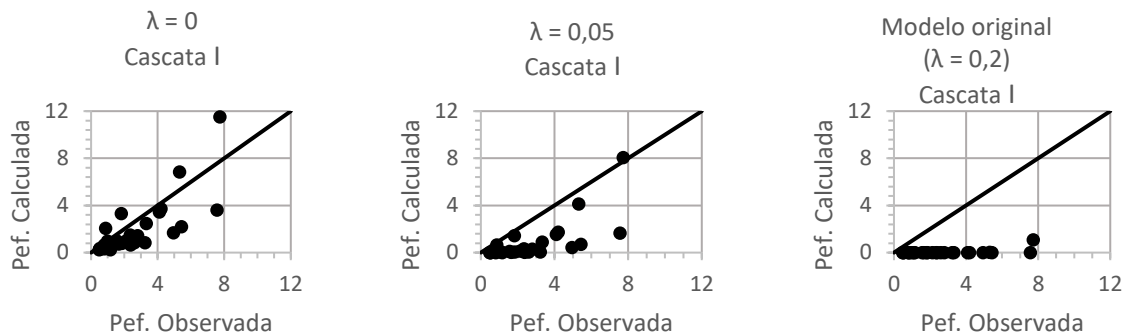
$$CV = \frac{\text{Desvio padrão}}{\text{Média}} * 100 \quad (24)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DISCUSSÃO DOS GRÁFICOS DO APÊNDICE 1

Observando-se o comportamento geral dos gráficos é possível constatar que os valores da precipitação efetiva calculada tendem a zero quanto maior é o valor de λ testado. Como exemplo são apresentados alguns gráficos da sub-bacia Cascata I, na ARC I (FIGURA 4).

FIGURA 4 – GRÁFICOS DA SUB-BACIA CASCATA I PARA DIFERENTES VALORES DE λ

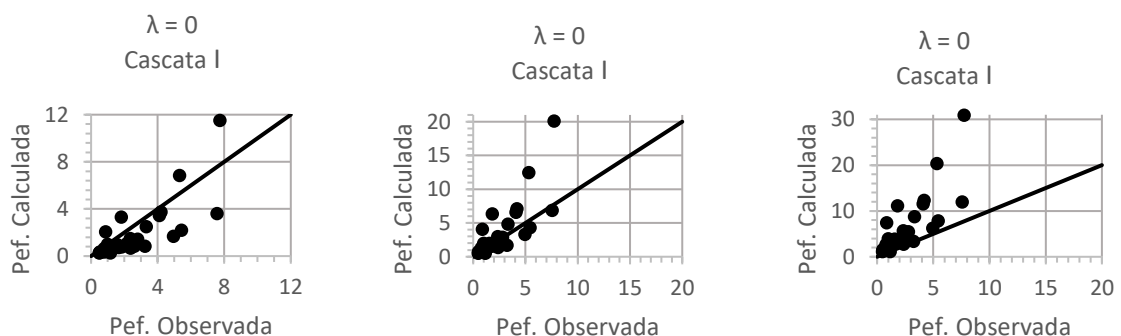


FONTE: A autora, (2017).

Isso explica-se pelo fato de que quanto maior o valor de λ , maior será o valor das perdas iniciais (I_a) (EQUAÇÃO 4), gerando menos escoamento. A partir do momento em que as perdas iniciais tem seu valor igualado ao da precipitação total, o valor da precipitação efetiva torna-se zero.

Outro comportamento predominante entre todas as sub-bacias é o aumento, no geral, dos valores calculados da precipitação efetiva ao se variar o CN da ARC I para as ARCs II ou III. Para exemplificar, os gráficos da sub-bacia Cascata I, com valor de $\lambda = 0$ são apresentados nas ARCs I, II e III, respectivamente (FIGURA 5).

FIGURA 5 – GRÁFICOS DA SUB-BACIA CASCATA I PARA DIFERENTES ARCs



FONTE: A autora, (2017).

Isso acontece pois a mudança do valor de CN, para condições médias ou de alta umidade, faz com que haja uma maior geração de escoamento superficial, tendo

em vista que o solo, por estar mais úmido, tem sua capacidade de infiltração e armazenamento reduzida.

5.1.2 QUALIDADE DE AJUSTE

Na TABELA 16 estão demonstrados os resultados obtidos ao se utilizar o método estatístico do cálculo da raiz do erro quadrático médio (RMSE). Já na TABELA 17 são apresentados os desempenhos de todos os métodos testados, do maior para o menor, baseado no RMSE.

TABELA 16 – COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS BASEADA NO CÁLCULO DA RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (RSME).

		Raiz do erro quadrático médio (RSME)															
Sub-bacia		$\lambda = 0$	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0.05$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$	M 2	M 3
Sub-bacia	ARC I	1.70	1.80	2.34	2.85	3.12	3.27	3.34	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	1.72	1.70
	ARC II	3.11	2.96	2.53	2.37	2.45	2.60	2.77	2.91	3.01	3.12	3.21	3.28	3.33	3.36	2.95	2.29
	ARC III	6.41	6.26	5.70	5.08	4.55	4.11	3.76	3.49	3.28	3.12	3.02	2.96	2.92	2.90	5.92	5.05
Cascata I	ARC I	1.85	1.48	0.65	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	1.78	1.49
	ARC II	4.14	3.78	2.55	1.46	0.89	0.69	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	3.97	3.29
	ARC III	8.66	8.39	7.37	6.19	5.14	4.21	3.40	2.72	2.16	1.72	1.38	1.12	0.92	0.76	8.23	7.02
Saint-Hilaire	ARC I	1.96	1.94	1.29	2.10	2.97	3.51	3.66	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	1.82	1.36
	ARC II	5.95	5.65	4.54	3.29	2.25	1.51	1.35	1.75	2.33	2.85	3.25	3.51	3.62	3.67	5.55	1.37
	ARC III	12.43	12.26	11.59	10.77	9.97	9.20	8.45	7.72	7.02	6.33	5.67	5.03	4.41	3.81	11.33	10.32
Casa de Portugal	ARC I	1.69	1.34	1.15	1.83	2.09	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	1.61	1.20
	ARC II	4.83	4.45	3.10	1.86	1.34	1.45	1.76	1.98	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	4.64	3.59
	ARC III	10.06	9.78	8.70	7.44	6.28	5.22	4.28	3.46	2.77	2.22	1.81	1.60	1.54	1.61	9.60	8.00
Beco Carvalho	ARC I	4.12	4.26	4.67	4.85	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.17	4.22
	ARC II	3.57	3.65	4.00	4.39	4.66	4.80	4.85	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	3.65	3.72
	ARC III	3.54	3.52	3.46	3.48	3.59	3.76	3.95	4.13	4.31	4.47	4.60	4.69	4.74	4.79	3.43	3.36
Bela Vista	ARC I	4.12	4.26	4.67	4.85	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.17	4.22
	ARC II	3.57	3.65	4.00	4.39	4.66	4.80	4.85	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	3.65	3.72
	ARC III	3.54	3.52	3.46	3.48	3.59	3.76	3.95	4.13	4.31	4.47	4.60	4.69	4.74	4.79	3.43	3.36

FONTE: A autora (2017).

TABELA 17 – DESEMPENHO DOS MODELOS EM ORDEM DECRESCENTE

Sub-bacias		Desempenho dos modelos em ordem decrescente															
Cascata I	ARC I	M 3	$\lambda = 0$	M 2	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0.05$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$
	ARC II	M 3	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.05$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	M 2	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$
	ARC III	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.15$	M 3	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.05$	M 2	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0$
Saint-Hilaire	ARC I	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.05$	$\lambda = 0.01$	M 3	M 2	$\lambda = 0$
	ARC II	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.05$	M 3	$\lambda = 0.01$	M 2	$\lambda = 0$
	ARC III	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.1$	M 3	$\lambda = 0.05$	M 2	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0$
Casa de Portugal	ARC I	$\lambda = 0.05$	M 3	M 2	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$
	ARC II	$\lambda = 0.25$	M 3	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.05$	M 2	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0$
	ARC III	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.15$	M 3	$\lambda = 0.1$	M 2	$\lambda = 0.05$	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0$
Beco Carvalho	ARC I	$\lambda = 0.05$	M 3	$\lambda = 0.01$	M 2	$\lambda = 0$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$
	ARC II	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.05$	M 3	$\lambda = 0.01$	M 2	$\lambda = 0$
	ARC III	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.1$	M 3	$\lambda = 0.05$	M 2	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0$
Bela Vista	ARC I	$\lambda = 0$	M 2	M 3	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0.05$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$
	ARC II	$\lambda = 0$	M 2	$\lambda = 0.01$	M 3	$\lambda = 0.05$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$
	ARC III	M 3	M 2	$\lambda = 0.05$	$\lambda = 0.1$	$\lambda = 0.01$	$\lambda = 0$	$\lambda = 0.15$	$\lambda = 0.2$	$\lambda = 0.25$	$\lambda = 0.3$	$\lambda = 0.35$	$\lambda = 0.4$	$\lambda = 0.45$	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 0.55$	$\lambda = 0.6$

FONTE: A autora (2017).

Ao analisar os resultados obtidos a partir do cálculo do RMSE é possível observar alguns comportamentos comuns entre as sub-bacias. Para a ARC I, por exemplo, todas as sub-bacias apresentam um menor erro, e consequente melhor desempenho, para valores menores de λ .

Isso pode ser explicado considerando-se o fato de que para a ARC I, os valores de CN adotados, são menores do que os das ARCs II e III. Tais valores levam a uma maior capacidade de infiltração e armazenamento do solo, causando assim valores menores de precipitação efetiva. Dessa maneira, dependendo do evento analisado, seriam necessários valores menores de λ para que houvesse produção de precipitação efetiva, tendo em vista que tais valores levariam a menores perdas iniciais, gerando assim mais escoamento superficial.

Esse comportamento também pode ser observado nos gráficos do apêndice 1, pois quanto maior o valor de λ , menor é a geração de precipitação efetiva. Assim, valores menores de λ demonstraram ser melhores para representar o comportamento das sub-bacias estudadas na ARC I, sendo eles: $\lambda = 0$ para Cascata I; $\lambda = 0,1$ para Saint-Hilaire; $\lambda = 0,05$ para Casa de Portugal; $\lambda = 0,05$ para Beco Carvalho; e $\lambda = 0$ para Bela Vista. Dessa forma, os modelos de Cazier e Hawkins (1984) e Woodward et al. (2003) demonstraram ter um melhor desempenho na maioria das sub-bacias estudadas para a ARC I.

Na ARC II, os valores de λ que possuem um menor erro encontram-se mais distribuídos entre os valores médios testados. Isso aponta para um equilíbrio entre a mudança do valor de CN adotado e o valor de λ mais apropriado para as sub-bacias analisadas. A única exceção foi a sub-bacia de Bela Vista, cujo λ que possui o menor erro tem o mesmo valor nas ARCs I e II. Os melhores valores para essa condição são os seguintes: $\lambda = 0,1$ para Cascata I; $\lambda = 0,25$ para Saint-Hilaire e Casa de Portugal; $\lambda = 0,15$ para Beco Carvalho e $\lambda = 0$ para Bela Vista.

Para a ARC III, todas as sub-bacias também apresentam comportamentos semelhantes, pois os valores de λ que possuem um menor erro no cálculo da precipitação efetiva foram, no geral, valores mais altos. Isso deve-se ao fato de que na ARC III, o solo, por já estar bastante úmido, tende a gerar muito mais escoamento superficial, logo, para equilibrar esse fato, valores de λ mais elevados indicam perdas iniciais maiores, fazendo com que os valores da precipitação efetiva calculada aproximem-se dos observados e os erros sejam menores. Os melhores desempenhos

para essa condição são: $\lambda = 0,6$ para Cascata I, Saint Hilaire e Casa de Portugal; $\lambda = 0,55$ Beco Carvalho; e $\lambda = 0,05$ para Bela Vista.

Dentre os modelos M2 e M3, representantes dos modelos de Ajmal et al. (2014) e de Jain et al. (2006a), respectivamente, o M3 foi o que teve o melhor desempenho para quase todas as sub-bacias nas ARCs I, II e III, com exceção da sub-bacia Bela Vista nas ARCs I e II.

O modelo original do NRCS-CN não teve a melhor performance em nenhuma das sub-bacias. Isso reforça que $\lambda = 0,2$ não é um valor apropriado para condições de baixa a alta umidade, como pontuado por Springer et al. (1980, citado por Jain et al., 2006a). Portanto, conclui-se que, para uma melhor estimativa da precipitação efetiva, os valores de λ e de CN devem ser calibrados a partir de dados de chuva-vazão disponíveis para a bacia hidrográfica estudada, como afirmado por Ajmal et al. (2014).

Os modelos de Cazier e Hawkins (1984), Woodward et al. (2003), Ajmal et al. (2014), e Jain et al. (2006a) demonstraram ser consistentes na estimativa da precipitação efetiva. Porém, também devem ser escolhidos com cautela, tendo em vista que cada um teve uma melhor performance para condições específicas, como discutido acima.

A mudança na ARC foi um dos motivos que mais causou erros nas estimativas de tais modelos. Usando o exemplo de Cascata 1, a variação da ARC I, onde $\lambda = 0$ possuía a melhor performance dentre os valores testados, para a ARC III, fez com que esse método tivesse a pior performance de todos os modelos.

5.2 COEFICIENTE DE ABSTRAÇÃO INICIAL (λ) ÓTIMO PARA CADA EVENTO

Nas Tabelas 18, 19, 20, 21 e 22 são encontrados os valores ótimos de λ que melhor representaram a precipitação efetiva observada para cada evento e também uma análise estatística desses valores. Os eventos que apresentaram valores sem significado físico (valores negativos de λ) foram descartados. No cálculo da média e do coeficiente de variação foram levados em consideração apenas os valores que estão apresentados nas tabelas.

TABELA 18 – VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA CASCATA I

Cascata I									
ID do Evento	Data	Precipitação		ARC I		ARC II		ARC III	
		Ptotal (mm)	Pef (mm)	λ	la	λ	la	λ	la
PA070279	07/02/1979	18.66	4.95	-	-	-	-	0.061	2.304
PA120279	12/02/1979	14.16	1.00	-	-	0.051	4.358	0.199	7.501
PA050479	05/04/1979	7.02	1.17	-	-	-	-	-	-
PA170479	17/04/1979	7.02	0.49	-	-	0.003	0.269	0.066	2.470
PA290479	29/04/1979	26.75	1.82	0.038	7.234	0.154	13.276	0.465	17.508
PA250879	25/08/1979	12.20	1.66	-	-	-	-	0.091	3.417
PA240979	24/09/1979	12.60	1.11	-	-	0.026	2.244	0.147	5.553
PA250979	25/09/1979	39.60	5.32	0.027	5.057	0.178	15.354	0.598	22.533
PA171179	17/11/1979	28.53	4.20	-	-	0.084	7.281	0.363	13.675
PA061279	06/12/1979	7.54	0.54	-	-	0.005	0.440	0.073	2.749
P3061279	06/12/1979	14.02	1.57	-	-	0.018	1.571	0.146	5.503
PA081279	08/12/1979	14.40	2.13	-	-	-	-	0.114	4.312
PA121279	12/12/1979	52.84	7.74	0.055	10.452	0.265	22.844	0.835	31.458
PA090180	09/01/1980	13.03	3.24	-	-	-	-	0.006	0.241
PA050280	05/02/1980	11.50	2.38	-	-	-	-	0.020	0.765
PA160280	16/02/1980	21.51	5.44	-	-	-	-	0.112	4.216
PA240280	24/02/1980	13.01	2.60	-	-	-	-	0.046	1.726
PA110380	11/03/1980	12.61	1.85	-	-	-	-	0.087	3.284
PA250380	25/03/1980	17.25	2.80	-	-	0.003	0.246	0.146	5.483
PA280580	28/05/1980	8.37	0.53	-	-	0.016	1.338	0.096	3.628
PA310580	31/05/1980	27.34	4.10	-	-	0.074	6.373	0.337	12.692
PA300680	30/06/1980	11.40	0.80	-	-	0.031	2.683	0.146	5.494
PA080780	08/07/1980	20.81	0.87	0.040	7.515	0.136	11.699	0.388	14.633
PA170880	17/08/1980	28.02	7.57	-	-	-	-	0.184	6.926
PA310880	31/08/1980	17.62	2.35	-	-	0.025	2.157	0.185	6.961
PA221180	22/11/1980	8.09	0.81	-	-	-	-	0.057	2.145
PA021280	02/12/1980	22.96	3.33	-	-	0.050	4.266	0.265	9.968
Análise estatística		Média		0.04	-	0.07	-	0.201	-
		CV (%)		29.30	-	108.60	-	96.69	-

FONTE: A autora (2017).

TABELA 19 – VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA SAINT-HILAIRE

Saint-Hilaire									
ID do Evento	Data	Precipitação		ARC I		ARC II		ARC III	
		Ptotal (mm)	Pef (mm)	λ	la	λ	la	λ	la
PA180579	18/05/1979	32.82	0.57	0.056	18.701	0.155	23.270	0.456	26.747
PA200779	20/07/1979	36.00	0.86	0.055	18.581	0.161	24.187	0.485	28.457
PA030879	03/08/1979	28.44	0.99	0.029	9.715	0.105	15.730	0.347	20.311
PA050280	05/02/1980	23.40	0.41	0.034	11.467	0.102	15.338	0.312	18.288
PA160280	16/02/1980	20.80	0.52	0.022	7.331	0.078	11.690	0.256	15.013
PA030380	03/03/1980	10.81	1.13	-	-	-	-	0.036	2.087
PA310580	31/05/1980	18.71	0.32	0.024	8.181	0.077	11.609	0.243	14.216
PA080780	08/07/1980	16.80	0.41	0.015	4.855	0.058	8.737	0.199	11.688
PA310880	31/08/1980	16.91	0.37	0.017	5.584	0.062	9.260	0.206	12.064
PA081180	08/11/1980	29.31	0.50	0.048	16.106	0.136	20.383	0.403	23.640
PA301180	30/11/1980	18.82	0.47	0.018	6.028	0.068	10.171	0.227	13.331
PA141280	14/12/1980	11.00	0.22	0.007	2.293	0.034	5.127	0.124	7.290
PA181280	18/12/1980	15.80	0.21	0.022	7.294	0.067	10.072	0.208	12.185
PA110781	11/07/1981	22.20	0.47	0.028	9.399	0.090	13.552	0.285	16.711
PA260881	26/08/1981	30.83	0.72	0.045	14.927	0.133	20.056	0.409	23.963
PA200981	20/09/1981	33.00	1.11	0.039	13.144	0.130	19.510	0.416	24.359
PA051281	05/12/1981	27.80	0.60	0.040	13.312	0.120	17.994	0.368	21.562
PA030282	03/02/1982	48.51	0.61	0.101	33.895	0.257	38.622	0.720	42.216
Análise estatística		Média		0.035	-	0.11	-	0.32	-
		CV (%)		63.08	-	49.13	-	49.17	-

FONTE: A autora (2017).

TABELA 20 - VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA CASA DE PORTUGAL

Casa de Portugal									
ID do Evento	Data	Precipitação		ARC I		ARC II		ARC III	
		Ptotal (mm)	Pef (mm)	λ	la	λ	la	λ	la
PA180579	18/05/1979	35.02	4.30	0.044	6.908	0.233	15.696	0.886	22.256
PA110679	11/06/1979	14.00	1.48	-	-	0.048	3.235	0.283	7.118
PA240679	24/06/1979	41.52	6.60	0.039	5.996	0.250	16.852	0.992	24.927
PA060879	06/08/1979	11.52	1.23	-	-	0.026	1.768	0.211	5.311
PA250879	25/08/1979	15.80	1.20	0.010	1.521	0.092	6.179	0.385	9.676
PA310879	31/08/1979	14.56	0.89	0.015	2.334	0.094	6.350	0.373	9.365
PA250979	25/09/1979	34.53	6.58	-	-	0.147	9.907	0.715	17.968
PA221079	22/10/1979	28.54	0.96	0.102	15.822	0.296	19.995	0.921	23.125
PA171179	17/11/1979	35.50	3.01	0.079	12.296	0.291	19.660	1.002	25.170
Análise estatística		Média		0.048	-	0.164	-	0.641	-
		CV (%)		74.99	-	64.17	-	50.77	-

FONTE: A autora (2017).

TABELA 21 - VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA BECO CARVALHO

Beco Carvalho									
ID do Evento	Data	Precipitação		ARC I		ARC II		ARC III	
		Ptotal (mm)	Pef (mm)	λ	Ia	λ	Ia	λ	Ia
PA120279	12/02/1979	7.53	0.38	-	-	-	-	0.038	2.418
PA090579	09/05/1979	41.51	3.07	0.023	7.790	0.124	18.522	0.408	25.929
PA180579	18/05/1979	33.51	1.80	0.024	7.976	0.109	16.199	0.345	21.881
PA200779	20/07/1979	54.52	3.72	0.051	17.222	0.195	29.030	0.585	37.178
PA250779	25/07/1979	9.03	0.20	0.002	0.724	0.023	3.468	0.084	5.360
PA060879	06/08/1979	10.51	0.17	0.008	2.860	0.036	5.394	0.112	7.138
PA240979	24/09/1979	25.00	2.93	-	-	0.017	2.578	0.155	9.816
PA221079	22/10/1979	26.56	0.38	0.045	15.068	0.126	18.837	0.338	21.454
Análise estatística		Média		0.026	-	0.090	-	0.258	-
		CV (%)		75.69	-	73.68	-	73.79	-

FONTE: A autora (2017).

TABELA 22 - VALORES DE λ ÓTIMOS PARA A SUB-BACIA BELA VISTA

Bela Vista									
ID do Evento	Data	Precipitação		ARC I		ARC II		ARC III	
		Ptotal (mm)	Pef (mm)	λ	Ia	λ	Ia	λ	Ia
PA280279	28/02/1979	7.00	4.31	-	-	-	-	-	-
PA050479	05/04/1979	9.00	1.70	-	-	-	-	0.062	1.560
PA260780	26/07/1979	9.52	0.73	-	-	0.031	2.124	0.193	4.856
PA250879	25/08/1979	13.80	12.12	-	-	-	-	-	-
PA080180	08/01/1980	12.01	0.83	0.001	0.220	0.061	4.094	0.279	7.010
PA180580	18/05/1980	12.01	4.14	-	-	-	-	-	-
PA300680	30/06/1980	7.51	0.25	0.007	1.138	0.048	3.268	0.194	4.879
PA310880	31/08/1980	21.01	2.77	-	-	0.087	5.877	0.445	11.168
PA181080	18/10/1980	17.50	5.26	-	-	-	-	0.123	3.078
PA141280	14/12/1980	12.01	3.75	-	-	-	-	0.010	0.250
Análise estatística		Média		0.004	-	0.057	-	0.187	-
		CV (%)		95.580	-	41.123	-	77.692	-

FONTE: A autora (2017).

A partir dos resultados obtidos nas TABELAS 18, 19, 20, 21 e 22 visualiza-se que vários eventos não apresentam um valor adequado de λ que represente a precipitação efetiva observada, principalmente nas ARCs I e II, sendo que a condição I teve uma incidência muito maior desses casos. Em grande parte dos casos, isso ocorreu em eventos que tiveram uma relação pequena entre os valores de precipitação total e precipitação efetiva, o que pode indicar que, para tal evento, a sub-bacia não encontrava-se na ARC testada, ou ainda que o CN adotado não foi o mais adequado.

Em relação a média e ao coeficiente de variação, conclui-se que a média dos valores ótimos de λ não é de fato representativa para cada sub-bacia, em cada ARC,

tendo em vista que os valores ótimos, encontrados para cada evento, diferem muito entre si, apresentando, por conseguinte, coeficientes de variação altos.

Também é possível constatar que $\lambda = 0,2$, como valor ótimo, foi encontrado poucas vezes nas sub-bacias em questão, nas três ARCs. O que reforça que tal valor não é o mais apropriado para os eventos analisados.

6 CONCLUSÃO

O método do NRCS é bastante utilizado por sua aplicabilidade e tradição. Todavia, as vantagens decorrentes de seu uso podem ser superadas por erros que podem trazer consequências como maiores custos às obras hidráulicas. O presente estudo demonstra que, nas sub-bacias analisadas do Arroio Dilúvio, o modelo necessita de aperfeiçoamento ou substituição por outras metodologias para que a precipitação efetiva seja estimada com maior precisão.

A partir da análise dos resultados conclui-se que o método do NRCS-CN é bastante sensível a variações no valor de λ , chegando a apresentar diferenças significativas nos valores estimados da precipitação efetiva. Podendo-se citar os resultados obtidos para Cascata I, na ARC I, cuja variação do valor de λ de 0,01, onde nenhum valor da precipitação efetiva calculada era zero, para 0,2, fez com que vinte e cinco dos vinte e sete eventos avaliados passassem a ser zero.

Como demonstrado pelo cálculo do RMSE, o valor 0,2 de λ , método original do NRCS-CN, não possui resultados satisfatórios para representar a precipitação efetiva observada nas sub-bacias do Arroio Dilúvio. Desse modo, fica evidente que o parâmetro λ deve ser calibrado a partir de séries de chuva-vazão para uma melhor estimativa, observando-se também as características da bacia hidrográfica estudada.

Todas as formulações analisadas demonstraram ser sensíveis quanto a mudanças nas ARCs I, II e III, ficando claro que a variação dessas condições possuem grande influência nos resultados calculados de precipitação efetiva. Portanto, um erro de julgamento da condição apropriada ou uma mudança drástica na ARC durante um curto período de tempo, pode levar a erros relevantes na estimativa do valor de CN e, por consequência, na estimativa da precipitação efetiva.

Dessa maneira, é necessário ter cautela na escolha do valor λ a ser utilizado e também da formulação empregada na estimativa da precipitação efetiva. Evitando

assim, custos desnecessários decorrentes do superdimensionamento de projetos de recursos hídricos e outros transtornos associados ao mau dimensionamento das obras.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajmal, M.; Kim, T. W. Quantifying Excess Stormwater Using SCS-CN–Based Rainfall Runoff Models and Different Curve Number Determination Methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers, 2014.
- Baltas, E. A.; Dervos, N. A.; Mimikou, M. A. Technical note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(6), 1825–1829, 2007.
- Bartlett, M. S.; Parolari, A. J.; McDonnell, J. J.; Porporato, A. Framework for event-based semidistributed modeling that unifies the SCS-CN method, VIC, PDM, and TOPMODEL. American Geophysical Union, 2016.
- Christofotelli, Antonio. Modelagem de sistemas ambientais. 1ª edição. São Paulo: Editora Blucher, 1999.
- COSTA, F. F. Abordagem distribuída para simulação chuva-vazão em pequenas bacias hidrográficas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- Cunha, S. F.; Oliveira e Silva, F. E.; Mota, T. U.; Pinheiro, M. C. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 20 no.4. Porto Alegre out./dez. 2015 p. 837 – 848.
- Durán-Barroso, P.; González, J.; Valdés, J. B. Improvement of the integration of Soil Moisture Accounting into the NRCS-CN model. *Journal of Hydrology*. 2016.
- Ebrahimian, M.; Nuruddin, A. A. B.; Soom, M. A. B. M.; Sood, A. M.; Neng, L. J. (2012). Runoff estimation in steep slope watershed with standard and slope-adjusted curve number methods. *Pol. J. Environ. Stud.*, 21(5), 1191–1202.
- Everitt, B. S.; Skrondal, A. The Cambridge Dictionary of Statistics. Quarta edição. New York: Cambridge University Press, 2010. 468 p.
- HASENACK, H. et al. Diagnóstico Ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação/Ocupação e Paisagem/ coordenado por Heinrich Hasenack. – Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2008. 84 p.
- Huang, M.; Gallichand, J.; Wang, Z.; Goulet, M. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Wiley InterScience, Hydrol. Process.* 20, 579–589. 2006.
- Jain, M. K., Mishra, S. K., Suresh Babu, P., Venugopal, K., Singh, V. P. (2006). Enhanced runoff curve number model incorporating storm duration and a nonlinear I-S relation. *J. Hydrol. Eng.*, 11(6), 2006.

Jain, M. K., Mishra, S. K., Suresh Babu, P., and Venugopal, K. On the Ia–S relation of the SCS-CN method. *Nordic Hydrol.*, 37(3), 261–275. 2006a.

Moreira, L. G. R. A INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM CURSOS D'ÁGUA URBANOS: O CASO DO ARROIO DILÚVIO, PORTO ALEGRE (RS), BRASIL. UFRGS, 2010.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff Curve Number: Has it Reached Maturity? *J. Hydrol. Eng.*, v. 1, n. 1, p. 11-19, Jan. 1996.

Righetto, A. M. Manejo de Águas Pluviais Urbanas. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

SANCHÉZ, L. E. Avaliação de Impacto Ambiental conceitos e métodos. 2ª Ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A.M. 2005. 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. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos. RBRH. Volume 10, n.4. 13 p.*

Shi, Z. H.; Chen, L. D.; Fang, N. F., Qin, D. F.; and Cai, C. F. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *Catena*, 77(1), 1–7. 2009.

Silveira, A. L. L.; Desbordes, M. Modelo Hidrológico com poucos parâmetros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos. RBRH. Volume 4, n. 1. Jan/Mar 1999.*

Silveira, A.L.L. Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre, In : Tucci, C.E..M.; Marques, D.M., 2000, *Avaliação e Controle da Drenagem Urbana*, Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, pp 153-163.

Suresh Babu, P; Mishra, S. K. Improved SCS-CN–Inspired Model. *JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING* © ASCE, novembro de 2012.

TASSI, R. et al. Determinação do parâmetro CN para sub-bacias urbanas do Arroio Dilúvio – Porto Alegre/RS. In: *I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*, Curitiba, 2006.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 7. 2002.*

TUCCI, C. E. M. Gestão de águas pluviais urbanas. Saneamento para todos. Programa de modernização do setor saneamento. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Ministério das Cidades. Brasília, 2005a.

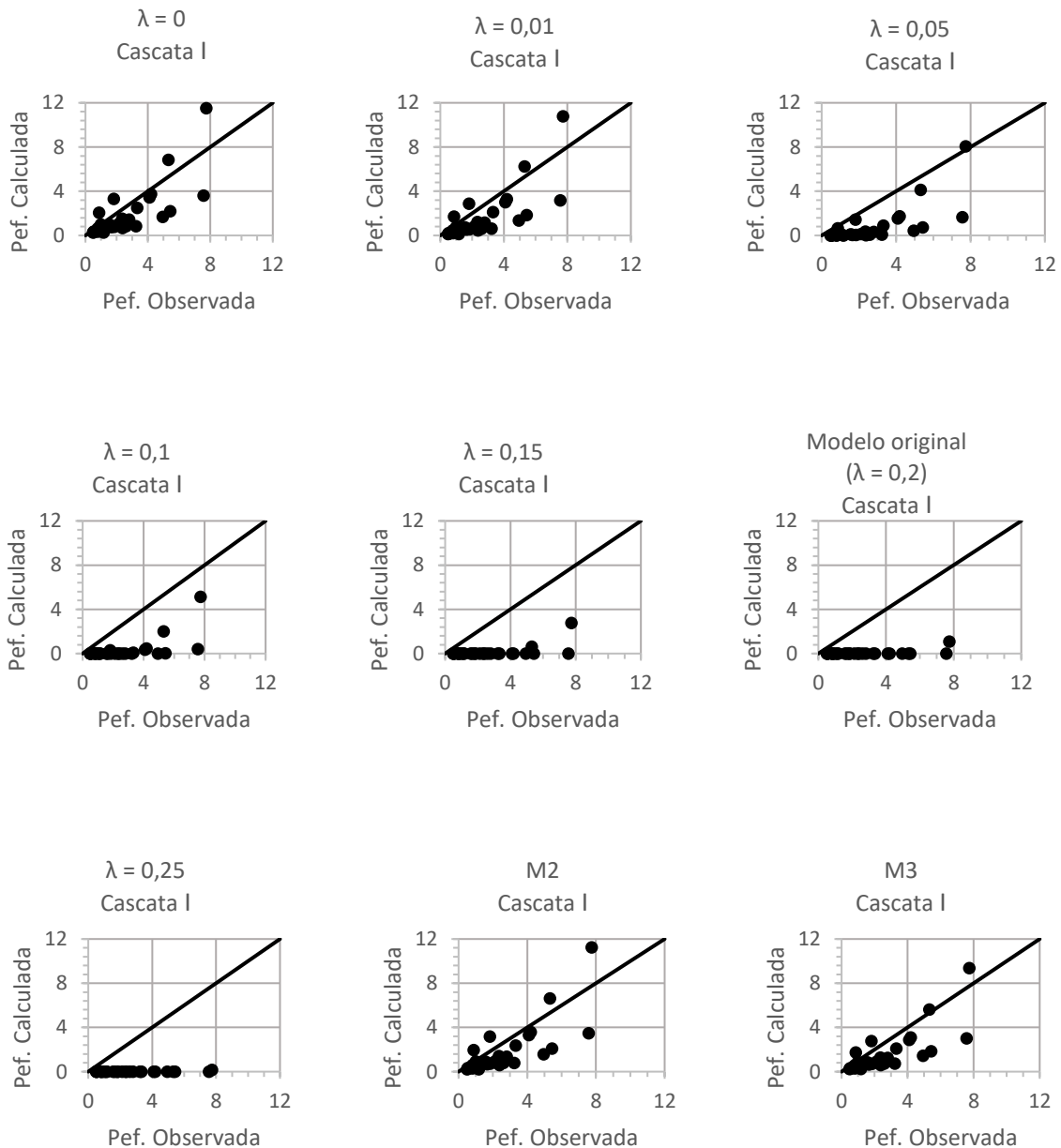
Tucci, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2ª Edição. Porto Alegre: UFRGS, 2005b. 678p.

Veeck, S. MODELAGEM HIDROLÓGICA DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS A PARTIR DE DADOS DE ELEVAÇÃO OBTIDOS POR LIDAR. Dissertação, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. No prelo 2018.

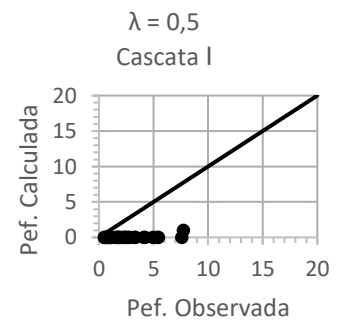
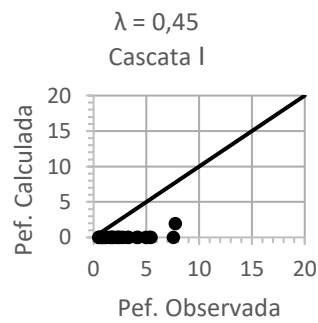
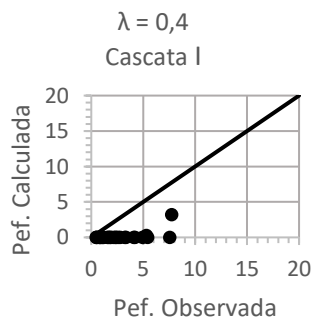
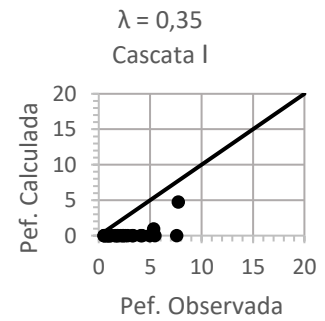
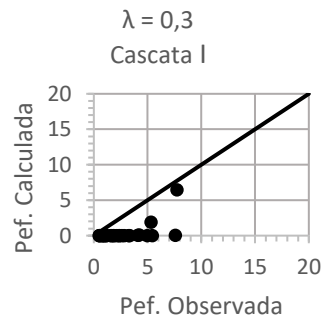
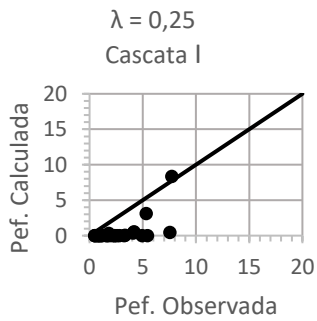
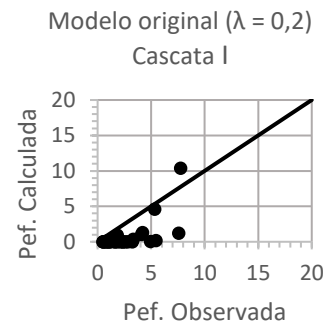
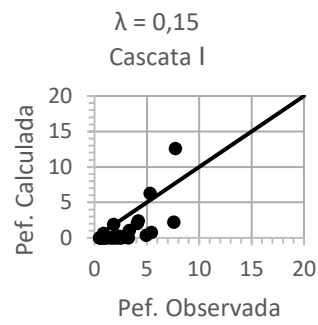
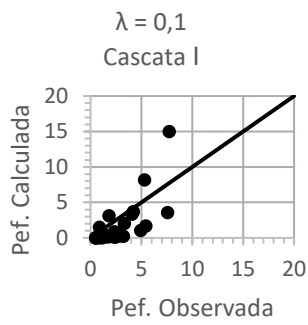
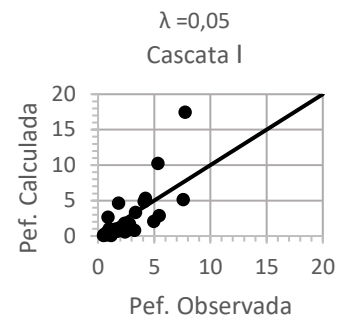
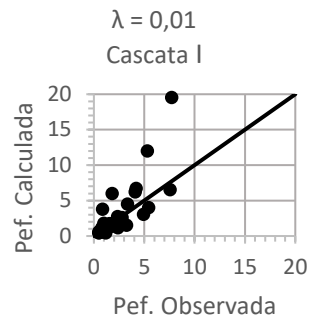
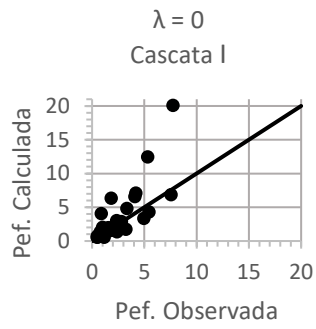
APÊNDICE 1 – GRÁFICOS DOS RESULTADOS GERADOS POR SUB-BACIA E POR ARC

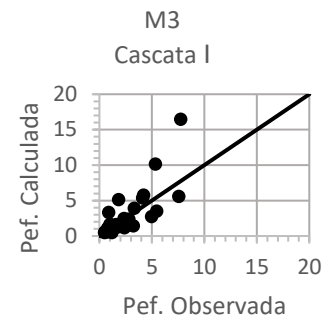
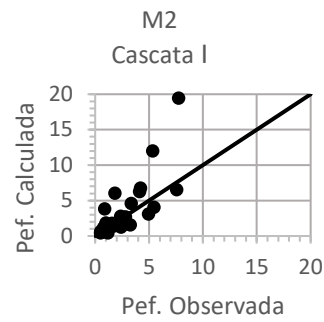
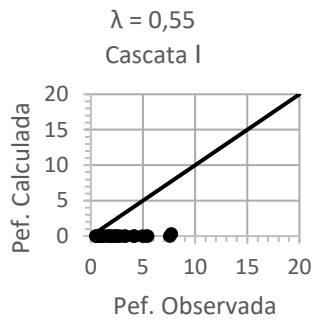
CASCATA I

- Resultados para a ARC I:

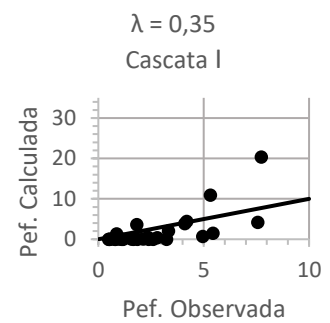
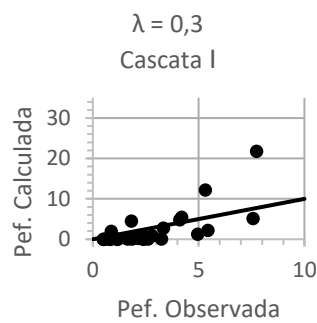
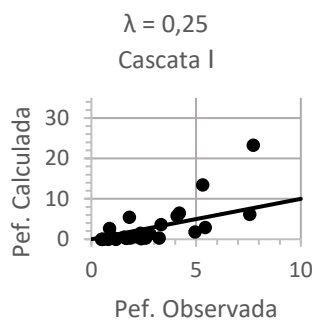
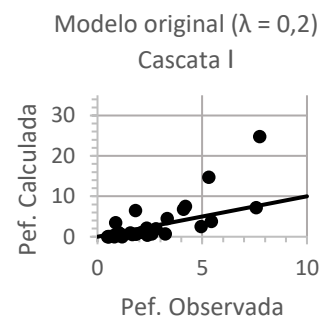
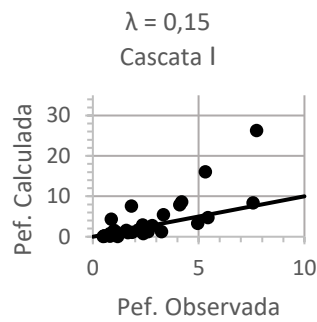
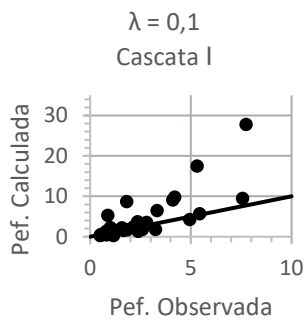
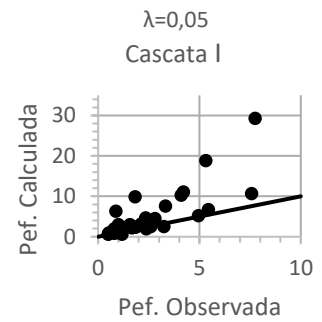
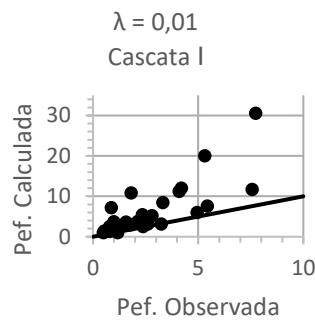
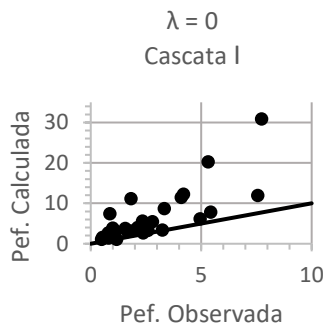


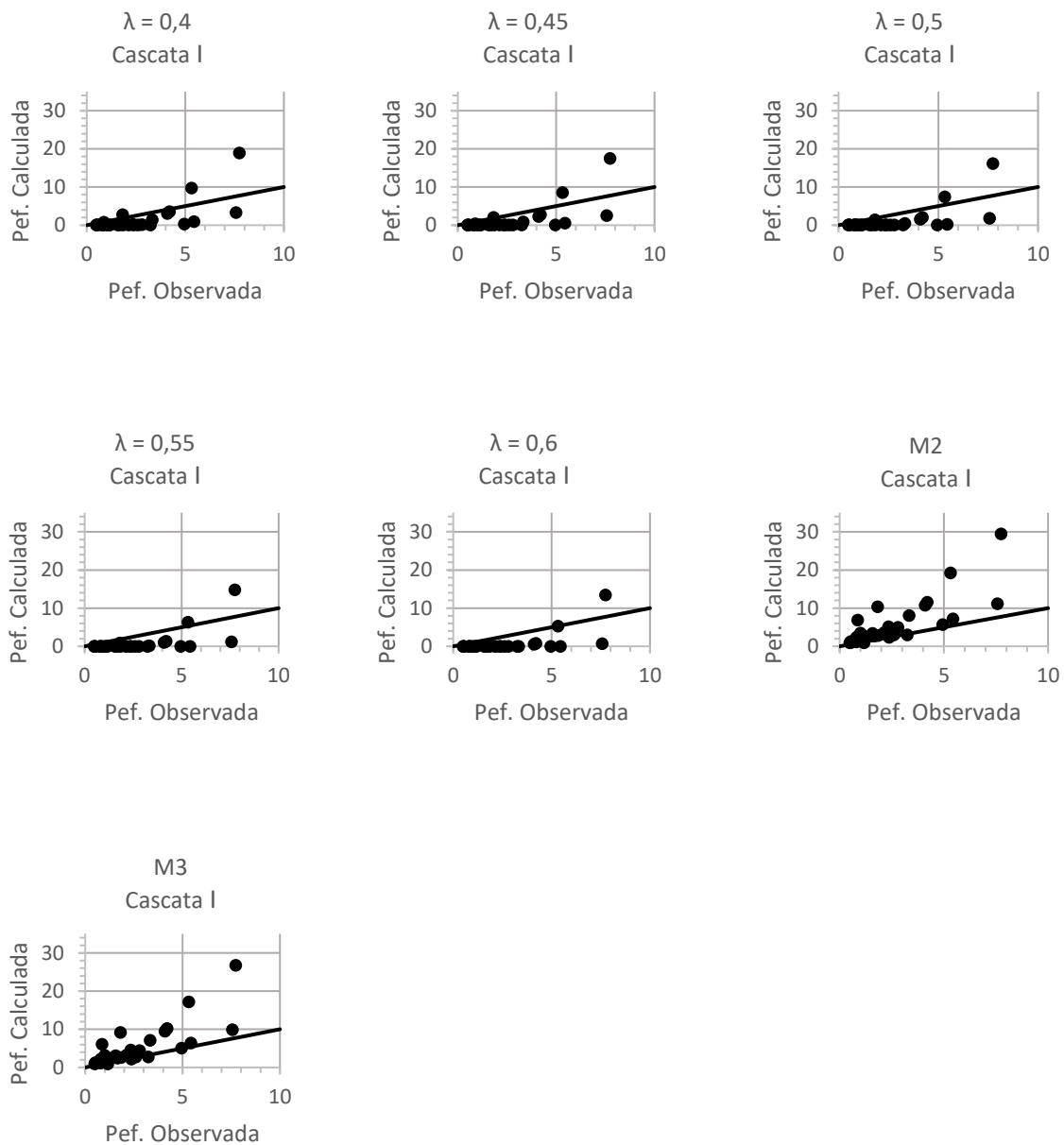
- Resultados para a ARC II:





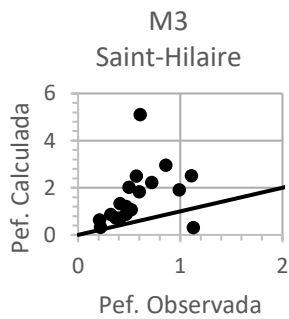
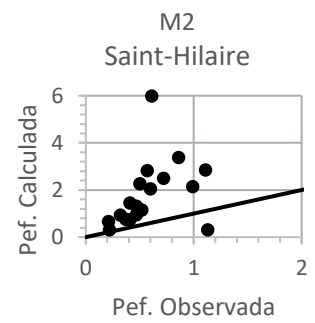
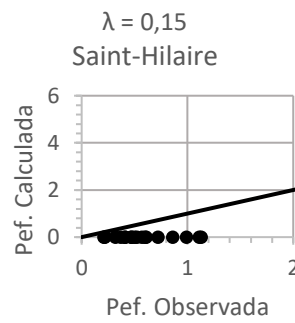
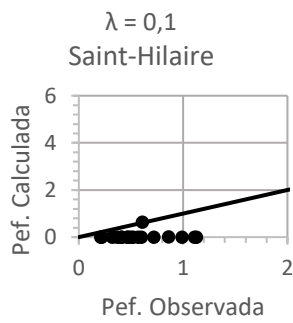
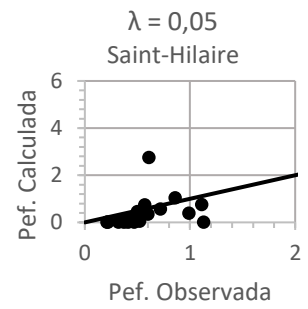
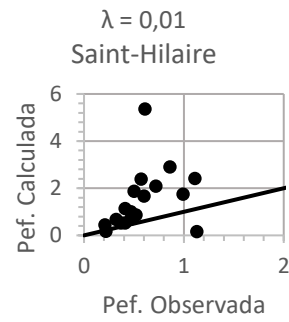
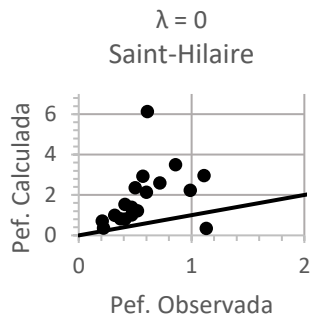
- Resultados para a ARC III:



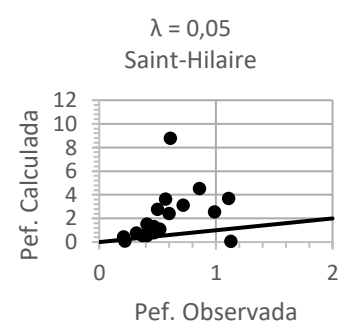
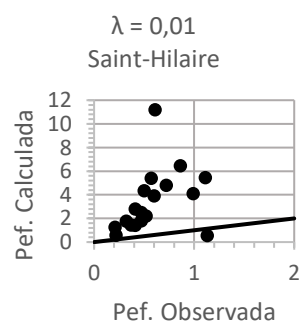
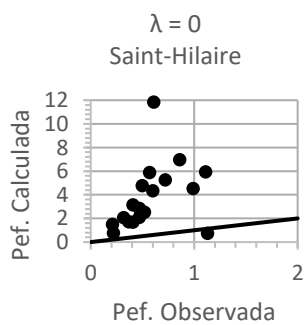


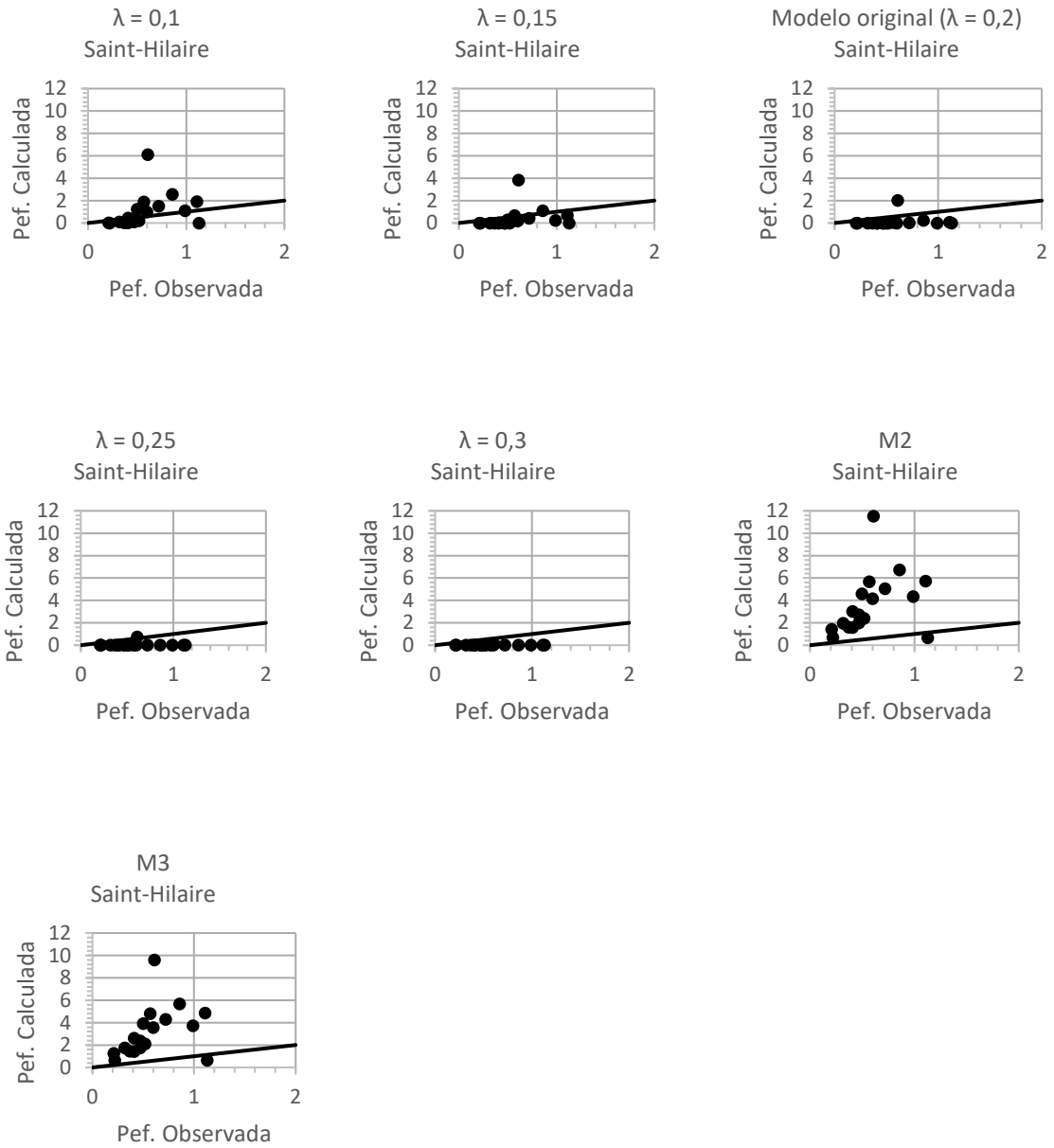
SAINT-HILAIRE

- Resultados para ARC I:

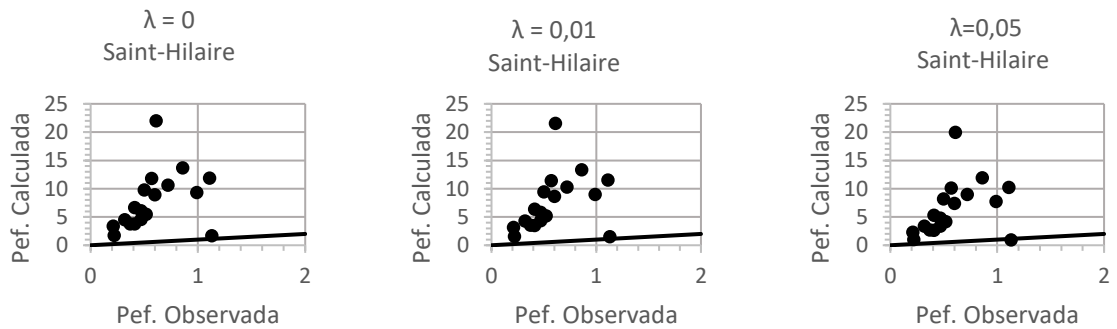


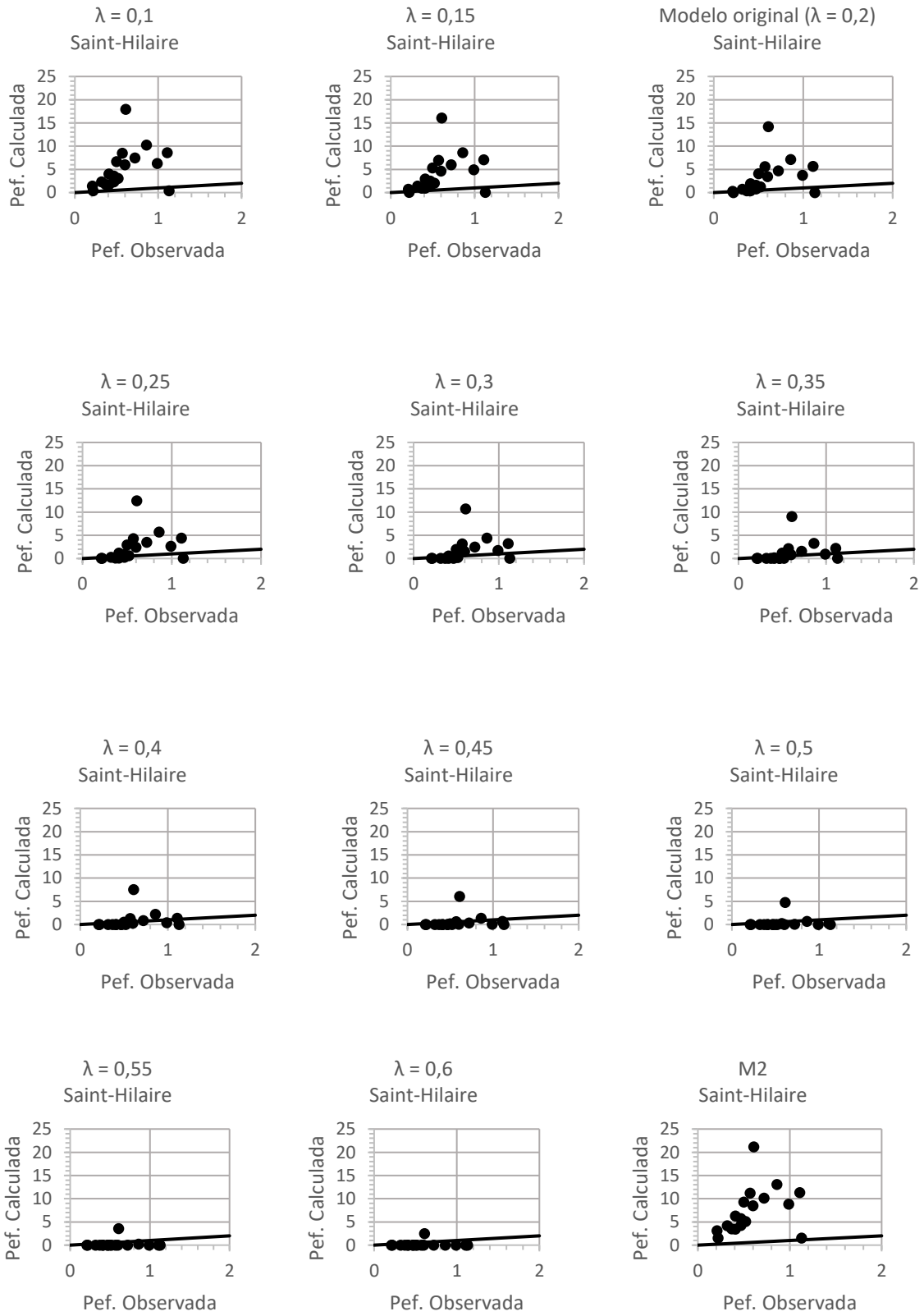
- Resultados para ARC II

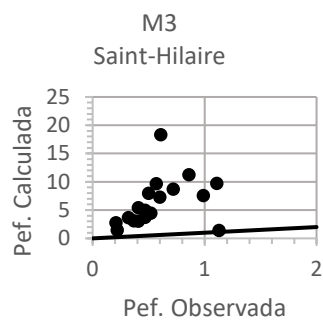




- Resultados para ARC III:

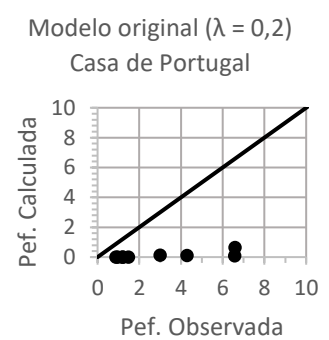
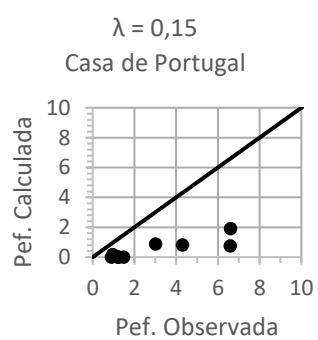
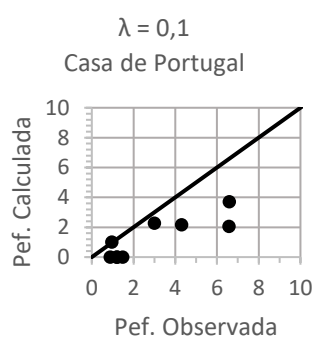
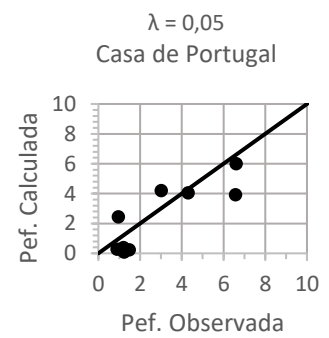
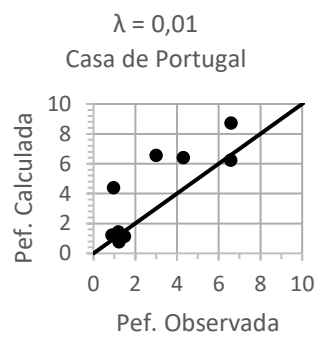
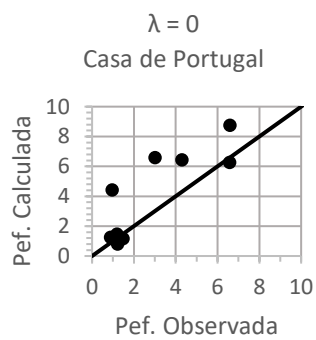


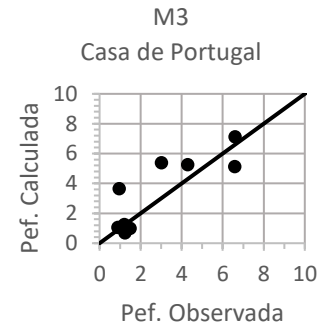
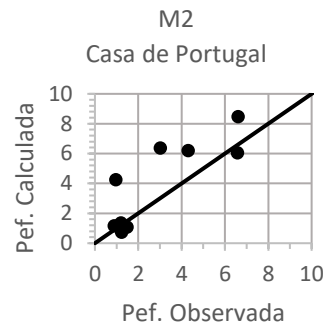
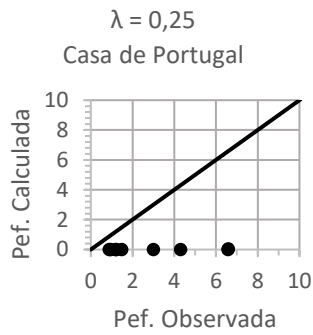




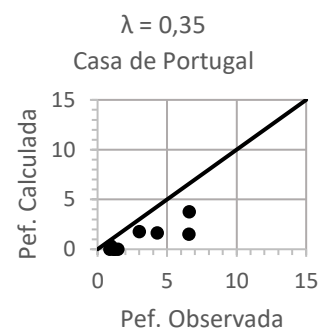
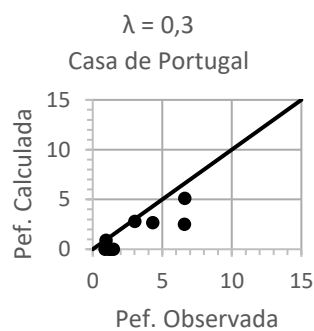
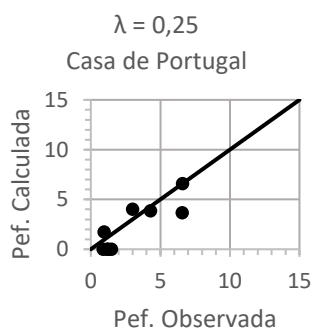
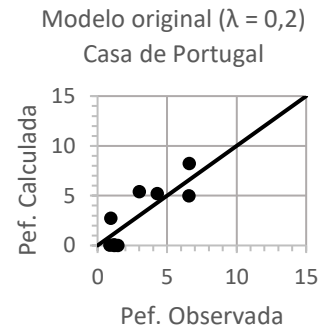
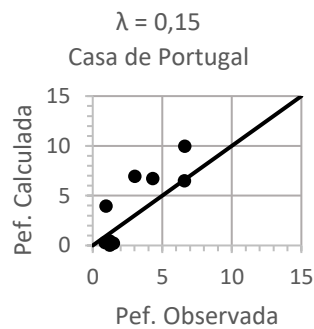
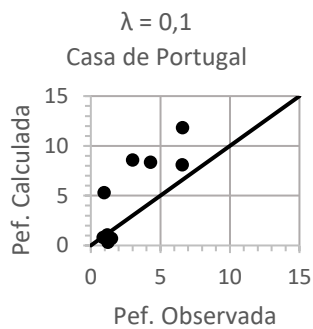
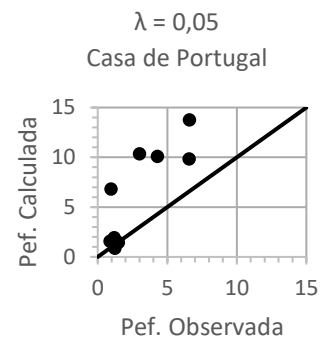
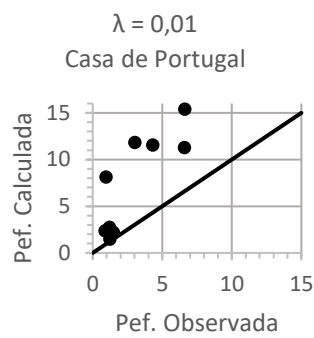
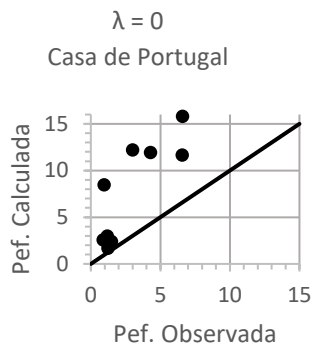
CASA DE PORTUGAL

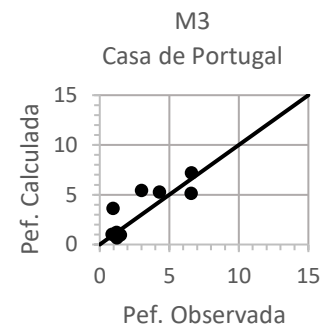
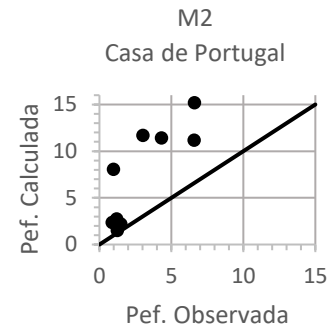
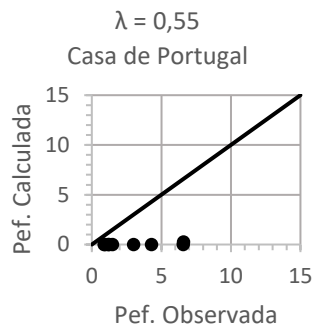
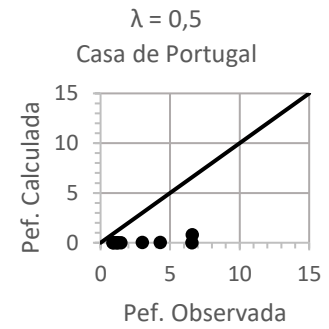
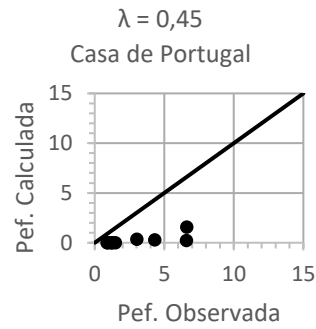
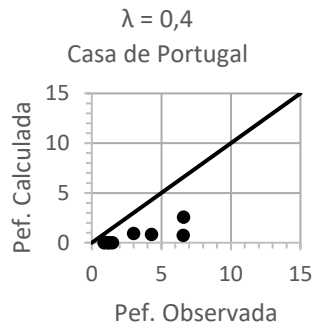
- Resultados para ARC I:



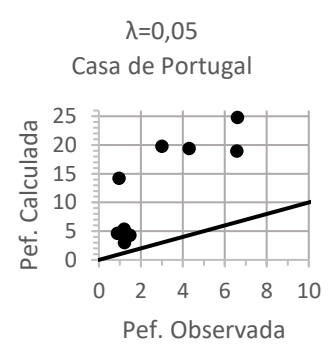
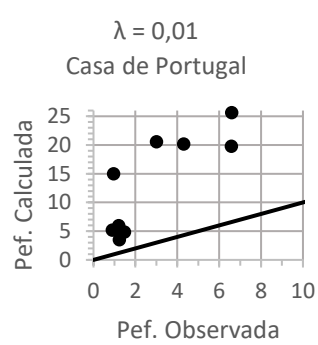
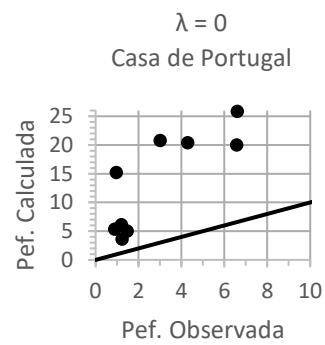


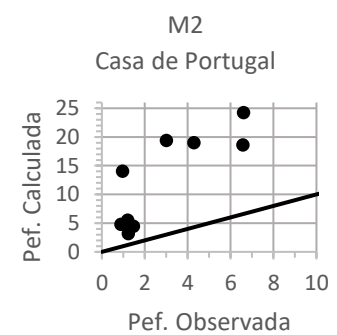
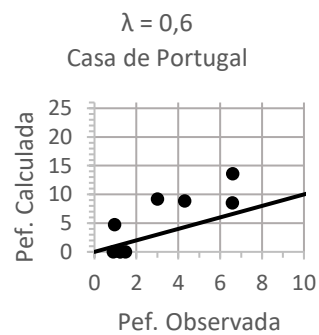
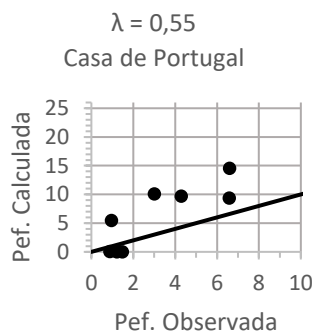
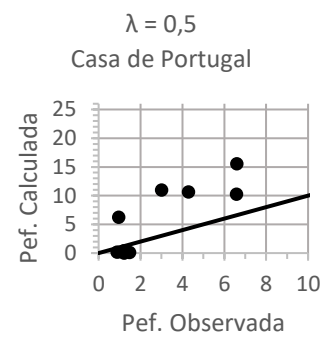
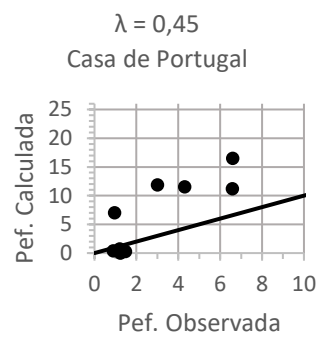
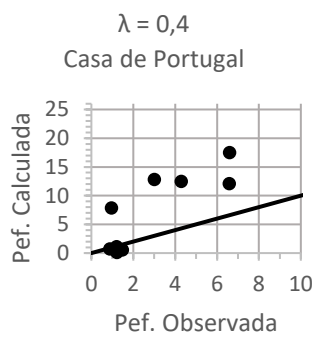
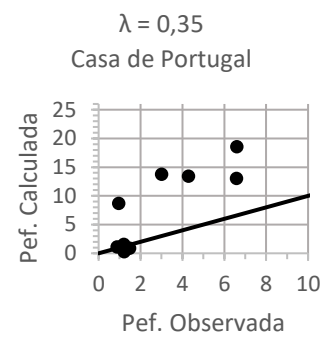
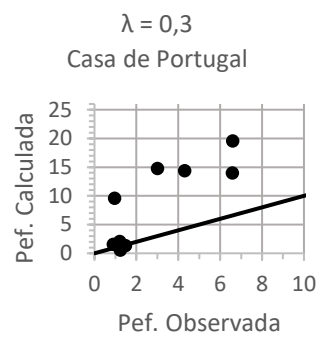
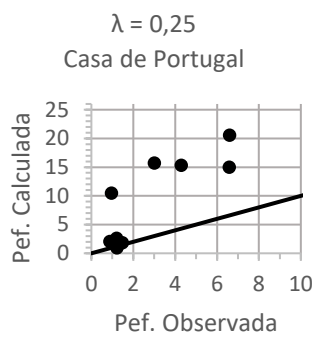
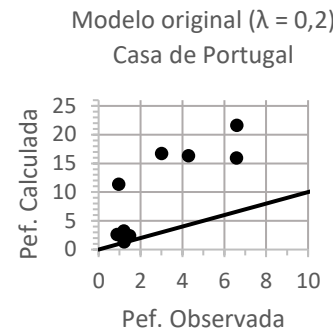
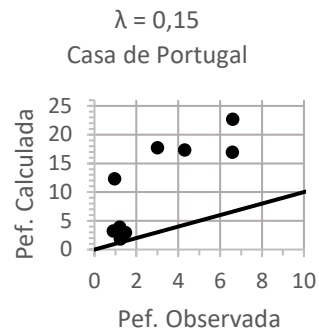
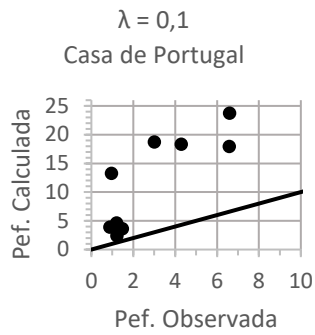
- Resultados para ARC II

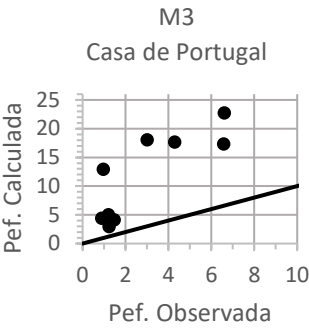




- Resultados para ARC III

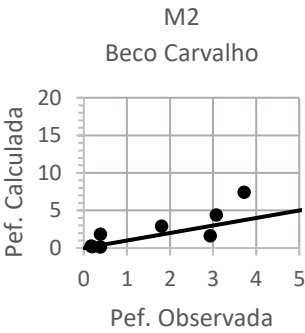
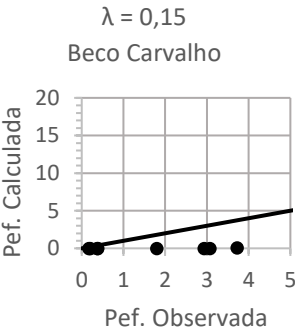
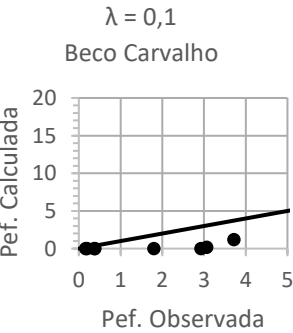
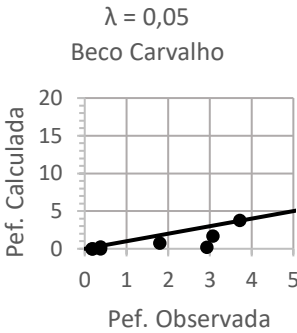
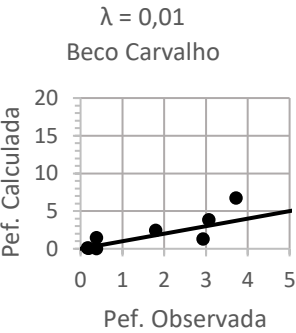
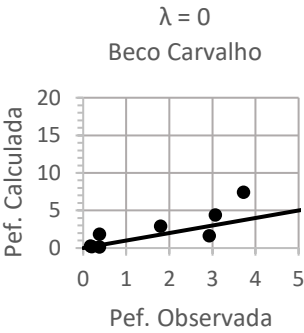


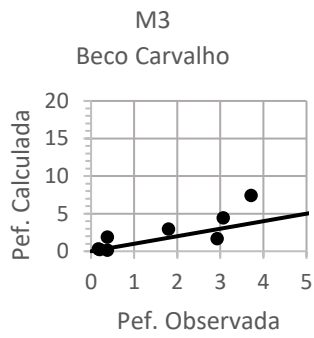




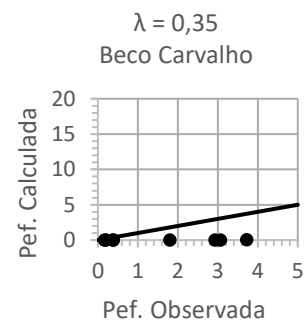
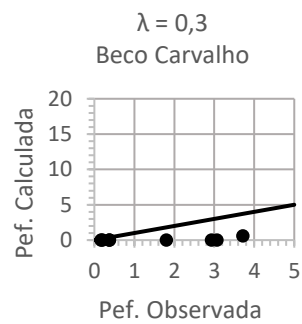
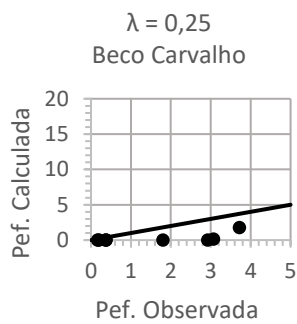
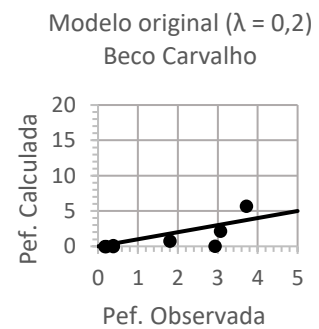
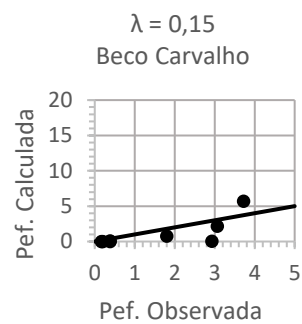
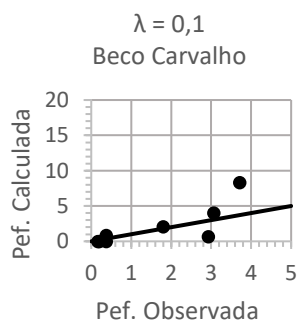
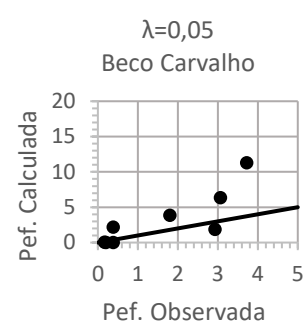
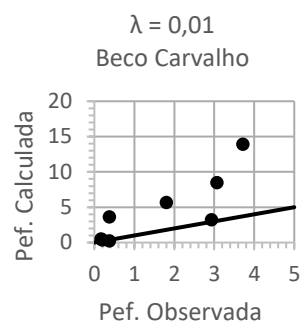
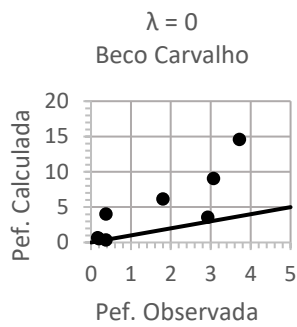
BECO CARVALHO

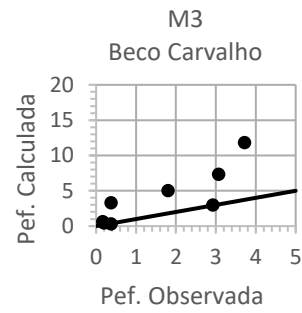
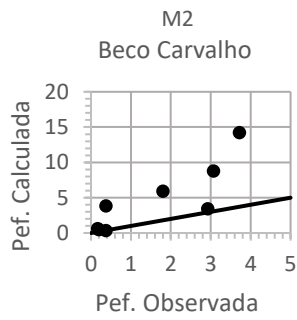
- Resultados para ARC I



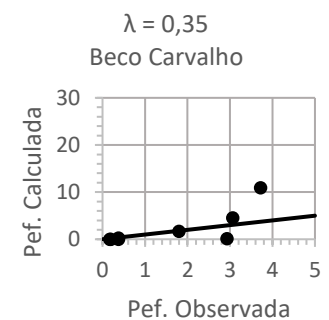
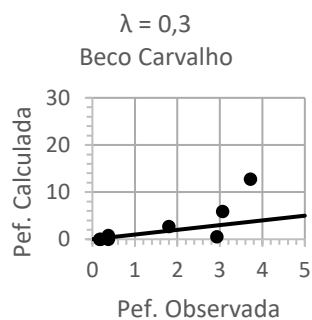
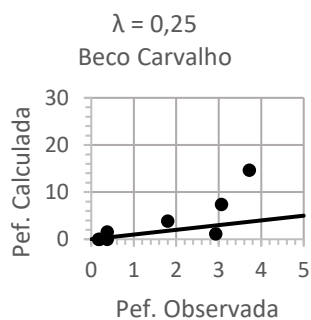
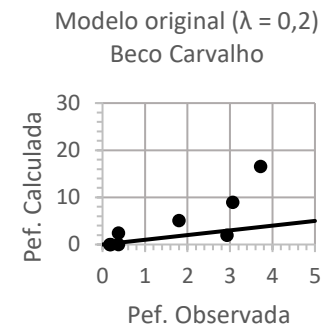
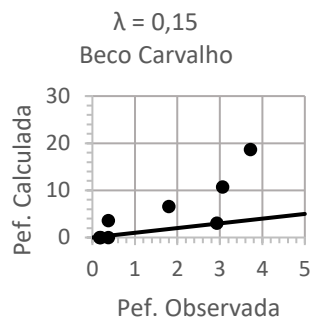
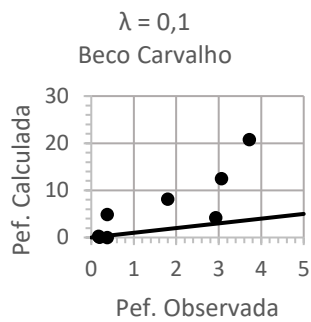
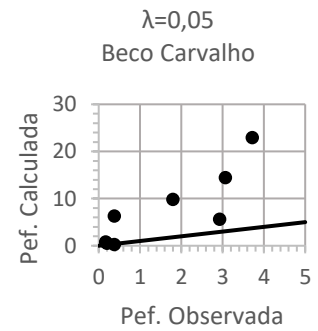
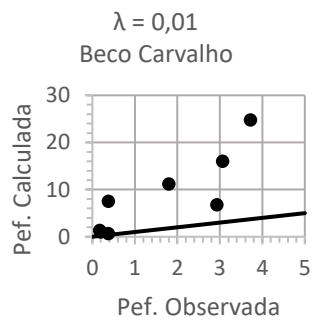
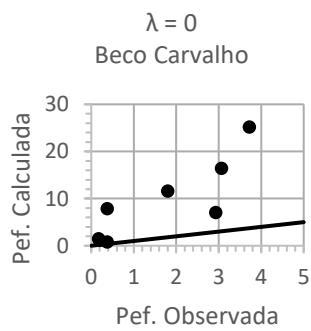


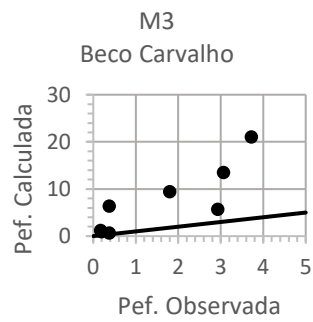
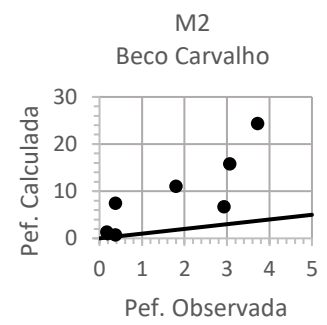
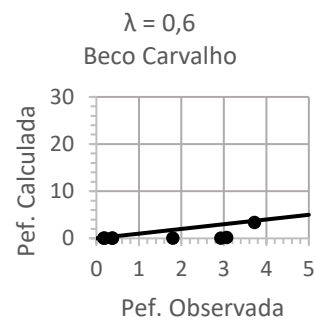
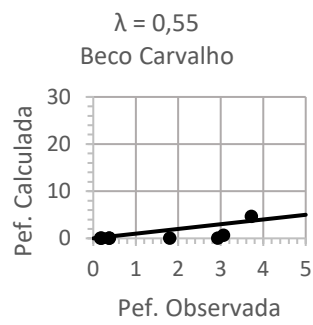
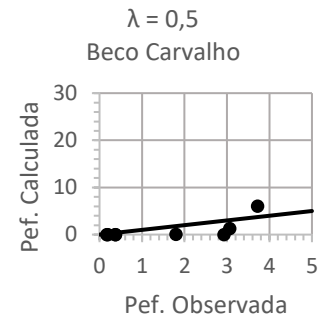
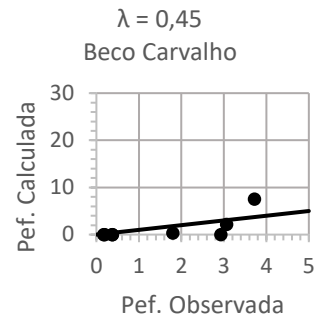
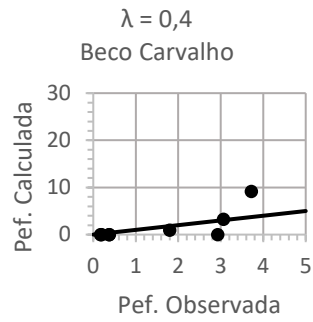
- Resultados para ARC II





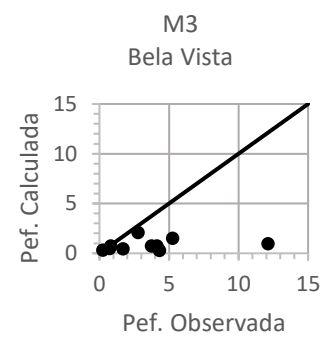
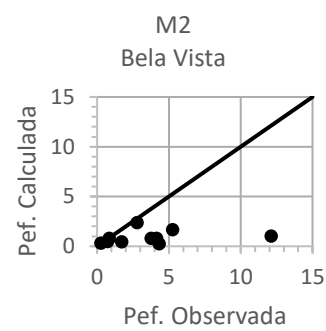
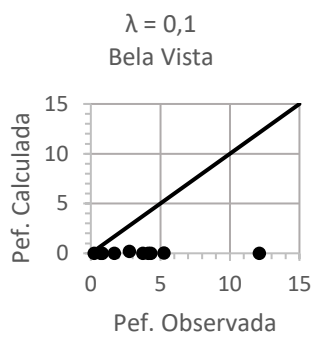
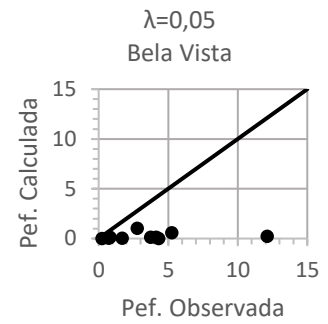
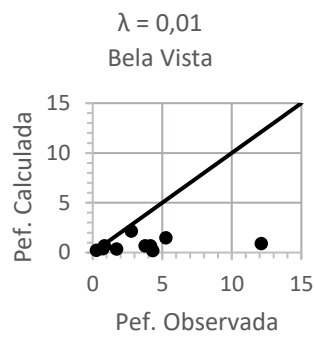
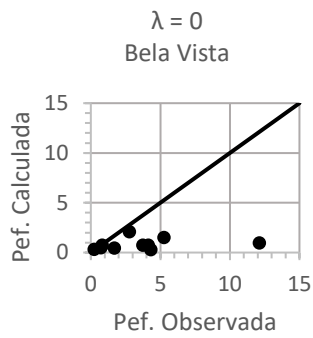
- Resultados para ARC III



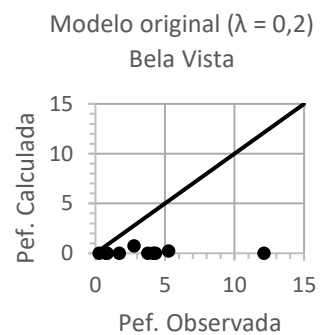
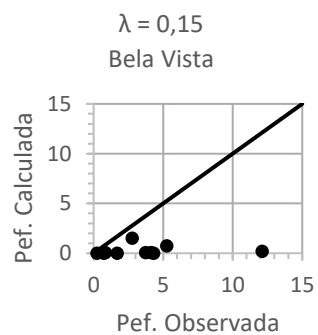
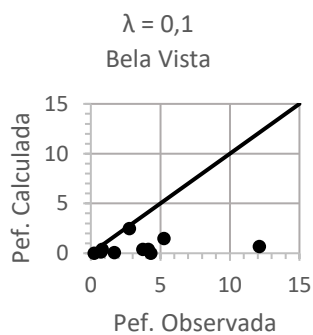
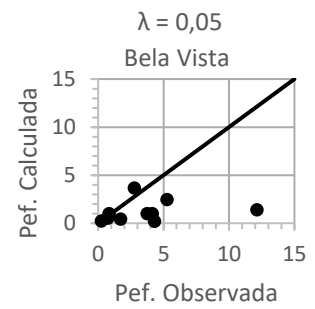
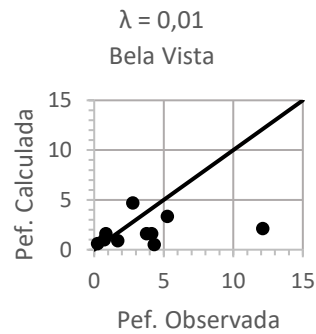
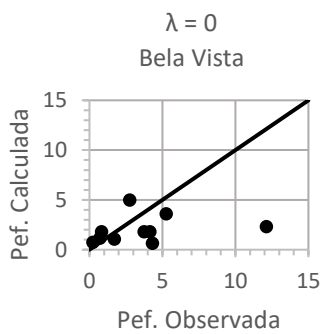


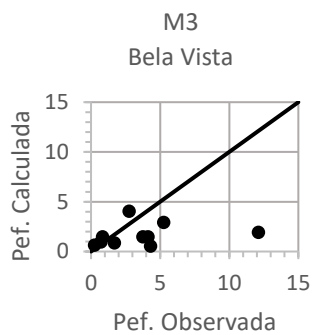
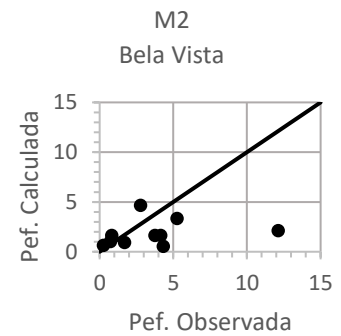
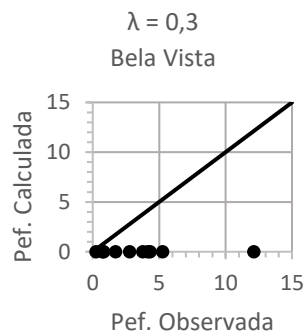
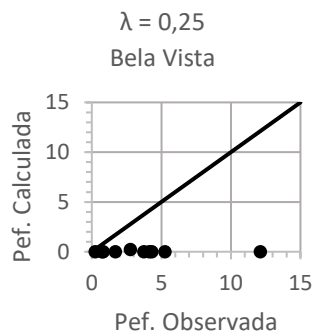
BELA VISTA

- Resultados para ARC I



- Resultados para ARC II





- Resultados para ARC III

