

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ELISA DE MELLO KICH

PROPOSTA ALTERNATIVA DE OBTENÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO  
PARA ESTIMAR O PARÂMETRO CN MÉDIO A PARTIR DE IMAGENS DE  
SATÉLITE

Porto Alegre

2014

ELISA DE MELLO KICH

PROPOSTA ALTERNATIVA DE OBTENÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO  
PARA ESTIMAR O PARÂMETRO CN MÉDIO A PARTIR DE IMAGENS DE  
SATÉLITE

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Tatiana Silva da Silva

Co-orientador: MSc. Doutorando Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre

2014

Agradeço à Rosicléia e ao Alberto que me deram as bases para tudo isso. Aos meus orientadores que tiveram muita paciência e dedicação. Ao Maurício e Felipe por sua contribuição e carinho.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVOS.....	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
3.1. Sensoriamento Remoto.....	9
3.1.1. Aplicações do Sensoriamento Remoto.....	11
3.2. O NDVI.....	11
3.2.1. Aplicações do NDVI.....	12
3.3. O NDWI.....	13
3.3.1. Aplicações do NDWI.....	14
3.4. As Imagens noturnas.....	14
3.5. O CN.....	14
3.6. Obtenção do CN.....	16
3.6.1. O Mapa de Uso do Solo.....	17
3.6.2. O Mapa de tipos hidrológicos de solos.....	18
3.7. Justificativas.....	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1. Área de estudo.....	20
4.2. Estrutura de Dados.....	20
4.3. Procedimentos Analíticos.....	21
4.3.1. Índice de Vegetação NDVI e NDWI.....	21
4.3.2. Extração de informações de imagens noturnas.....	22
4.3.3. Classificação das Imagens para obtenção de mapa de uso do solo.....	23
4.3.4. Obtenção do CN médio.....	24
4.4. IPHS1.....	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26

5.1.	NDVI e NDWI.....	26
5.2.	Mapa de cobertura e uso do solo obtido pelo método tradicional .....	27
5.3.	Mapa de uso do solo obtido a partir da nova metodologia .....	29
5.3.1.	Campos, Florestas e Solos Expostos a partir do NDVI.....	30
5.3.2.	Ambiente Urbano a partir das imagens noturnas.....	31
5.3.3.	Ambientes aquáticos ou inundados a partir do NDWI.....	31
5.3.4.	Modeler/ IDRISI.....	33
5.4.	Mapa de tipos Hidrológicos de Solos .....	33
5.5.	Mapa de CN .....	35
5.6.	Obtenção dos valores médios de CN .....	38
5.7.	Chuva transformada em vazão nas diferentes bacias hidrográficas.....	39
5.7.1.	Bacia 1 .....	41
5.7.2.	Bacia 2 .....	43
5.7.3.	Bacia 3 .....	45
5.7.4.	Bacia 4 .....	47
5.7.5.	Bacia 5 .....	49
5.8.	Resumo dos Resultados .....	51
6.	CONCLUSÕES .....	52
7.	RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	54
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## RESUMO

Estudar a geração de escoamento superficial é relevante para diversos tipos de pesquisa, entre elas a possibilidade de ocorrência de cheias, que são muitas vezes desastrosas em função da ocupação urbana em áreas de risco. Modelos hidrológicos que simulam a transformação de chuva em vazão utilizam o parâmetro curva número (CN médio) para os cálculos. Entretanto, a obtenção desse parâmetro não costuma ser muito precisa por causa da dificuldade de gerá-lo. Portanto, esse trabalho se propôs a encontrar uma maneira simplificada para a obtenção desse parâmetro através de algoritmos em SIG, utilizando a combinação de imagens NDVI, NDWI e noturnas na geração do mapa de uso do solo necessário para a confecção do mapa de CN. Para avaliar os resultados, foi utilizado o método tradicional de cálculo do CN médio para fins de comparação com o método novo. A comparação foi feita entre os valores de CN e também entre os valores de vazão de pico resultantes da simulação hidrológica usando os valores de CN obtidos por cada um dos dois métodos. Os resultados mostraram que o novo método pode ser usado como uma alternativa ao método tradicional. Além disso, por ser um método que exige menor interferência humana, pode ser acoplado como um delimitador automático de CN em modelos hidrológicos.

## ABSTRACT

The study of the runoff is important for many types of research like the occurrence of floods, which can be disastrous because of the urban occupancy in risk areas. Hydrological models that simulate the transformation of rain in runoff use the average curve number (CN) parameter for the calculation. However, the obtainment of this parameter is not precisely because of the difficulty to generate it. Therefore, this work proposes to find a simplified way to obtain it through algorithms in GIS using the combination of NDVI, NDWI and night images to generate the land use map necessary to the confection of the CN map. To evaluate the results, the traditional way to obtain the CN was used in order to compare with the new method. The comparison was between the average CN and also between the peak flows obtained through both methods. The results show that the new method can be used as an alternative to the traditional method. Besides, because it requires less human interference, it can be linked as a CN automatic delimiter in hydrological models.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente as questões relativas ao meio ambiente são tema presente em várias esferas de conhecimento. Sabe-se da importância de viver em harmonia com o ambiente, entretanto, tornar ações práticas nem sempre é simples e pode exigir recursos financeiros não disponíveis. Portanto, criar novas tecnologias para facilitar a execução de estudos ambientais é importante para o planejamento e a tomada de decisão.

Particularmente nos estudos de grandes enchentes e inundações existem muitos fatores a serem analisados para melhor avaliar o porquê das ocorrências e consequentemente como evitá-las. O estudo da geração de escoamento superficial é de grande relevância, pois através do cálculo da lâmina escoada é possível prever a ocorrência de cheias, sendo assim uma ferramenta importante para evitar desastres em função da ocupação urbana em áreas de risco como leitos de inundação de rios.

Para avaliar a quantidade de água precipitada que pode vir a se transformar em cheia, é preciso analisar o percurso da água a partir de quando ela toca o solo. Com o uso de modelos matemáticos que descrevem de forma aproximada diferentes elementos do ciclo hidrológico pode-se chegar a valores próximos da vazão gerada pela chuva.

A geração do escoamento é um dos temas mais complexos da hidrologia porque a variabilidade das características da bacia é muito grande, e porque a água pode tomar vários caminhos desde o momento em que atinge a superfície, na forma de chuva, até o momento em que chega ao curso d'água (COLLISCHON e DORNELLES, 2013).

Para estimar os volumes de água escoados nos diferentes locais que compõem uma região de interesse, calcula-se a lâmina escoada durante a chuva. Para isso, pode-se usar o método do SCS (desenvolvido pelo *National Resources Conservation Center* dos EUA, antigo *Soil Conservation Service* – SCS), que é baseado em um parâmetro adimensional CN (Curva Número). Esse coeficiente leva em consideração a capacidade de infiltração do solo e o tipo de uso do solo, ou seja, se a região estudada é uma floresta, uma cidade, uma plantação, etc.

Para definir o parâmetro CN de uma determinada área são necessários dados sobre o grupo hidrológico de solo e a cobertura e uso do solo. O primeiro pode ser considerado constante se for levada em conta a escala temporal das atividades humanas.

O segundo, entretanto, pode sofrer grande variação em curtos períodos de tempo, dependendo da região. Mapear esse processo demanda tempo e recursos humanos especializados o que pode elevar os custos de forma a inviabilizar os estudos. Sendo assim, desenvolver maneiras automáticas para definição do CN pode representar uma economia significativa de tempo e de recursos, tornando o projeto mais ágil, bem como compatível com a velocidade das mudanças na cobertura e uso do solo e com a demanda por modelos hidrológicos aplicados ao gerenciamento de desastres.

Assim, este trabalho avalia o potencial de uso de imagens Landsat, através da construção de algoritmos baseados em SIG (Sistemas de Informação Geográfica), na geração de valores de CN a partir de índices de vegetação, de água e imagens noturnas. Esse CN posteriormente é utilizado em um modelo hidrológico para avaliar picos de vazão nas diferentes bacias hidrográficas da região de estudo para analisar e mostrar a aplicabilidade dos resultados.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo estudar a possibilidade de encontrar uma alternativa ao método tradicional de obtenção de mapas CN para cálculo de CN médio de grandes áreas. Para isso, utilizam-se imagens de NDVI, NDWI e imagens noturnas (“*citylights*”) para compor o mapa de uso do solo, que vai dar origem ao mapa de CN, e o compara com um mapa de uso do solo construído por métodos tradicionais. Adicionalmente, mostra-se a utilização do CN obtido para realização de análises hidrológicas em diferentes bacias hidrográficas situadas na região de estudo.

Assim, este trabalho aborda os seguintes questionamentos:

- Como estimar o CN médio de grandes áreas utilizando mapas NDVI, NDWI e imagens noturnas para compor o mapa de uso do solo?
- Existe semelhança entre valores de CN médios encontrados pelo método tradicional e àqueles encontrados pelo método proposto no trabalho? Que semelhança é essa?
- Como se dá a resposta de diferentes bacias hidrográficas a um mesmo evento de chuva em termos de hidrograma unitário para as duas formas de obtenção CN? O que representa, em termos de vazão escoada, a diferença entre os dois valores encontrados? Esta diferença pode ser considerada significativa em comparação com outras incertezas?
- Quais tipos de erros estão envolvidos nos dois métodos?

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1.Sensoriamento Remoto**

Sensoriamento remoto é a arte e a ciência de obter informações sobre um objeto sem estar em contato físico direto com o objeto (JENSEN, 2011), é uma ciência nova, surgiu por volta dos anos 1960 e é hoje uma ótima ferramenta de coleta automática de dados para o monitoramento de recursos terrestres. O rápido desenvolvimento de satélites permitiu que a Terra pudesse ser toda imageada em curto espaço de tempo e sistematicamente, permitindo que pudéssemos monitorar a superfície e a atmosfera, podendo assim prever o tempo e obter análises ambientais de grande escala.

O primeiro satélite de sensoriamento remoto a ser lançado ao espaço foi o ERTS-1, posteriormente chamado de Landsat1, cujo sensor imageador multiespectral possibilitava a obtenção simultânea de quatro imagens em diferentes faixas do espectro eletromagnético, o que não era possível de se obter com filmes fotográficos. A este se seguiram dezenas de programas espaciais de diversas nacionalidades, lançando à órbita da Terra sensores hiperspectrais capazes de captar centenas de bandas espectrais e também sensores de alta resolução que conseguem detectar objetos na superfície da Terra. Hoje, o programa Landsat está na versão 8.

Por definição, Sensoriamento Remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (MENESESe ALMEIDA, 2012). Ou seja, o objeto que se quer imagear é iluminado pela luz solar que, ao ser refletida de volta para o espaço, é captada pelo sensor e então processada.

Para que se possa entender bem os princípios do sensoriamento remoto, é preciso conhecer um pouco sobre radiação eletromagnética (REM). A REM possui o que se chama de dualidade de comportamento, isso porque a REM que se propaga no espaço, como a luz do sol, é tanto uma forma de onda quanto uma forma de partícula.

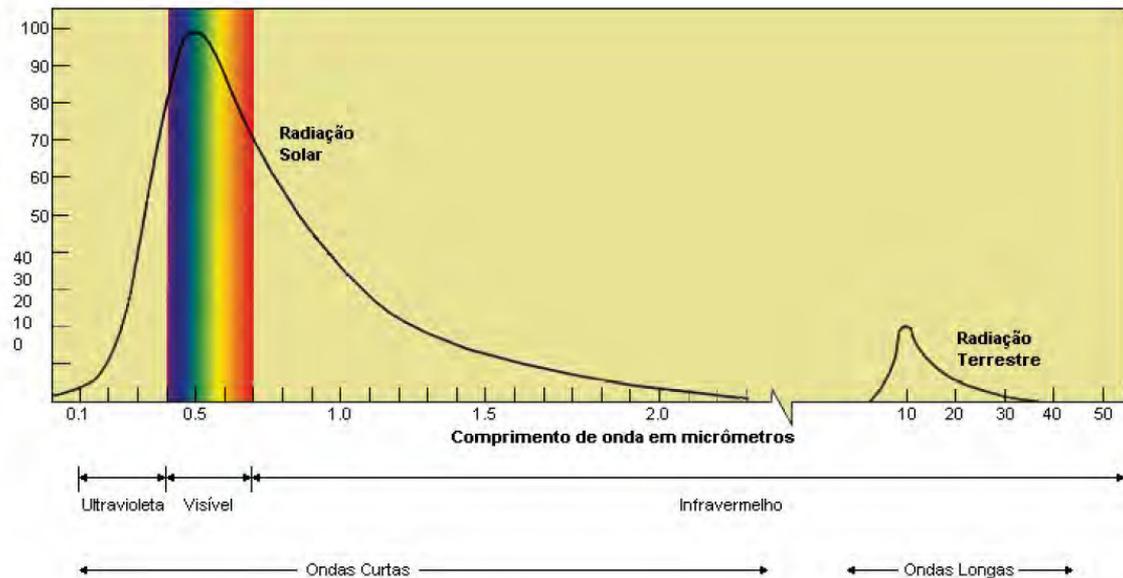
O modelo Ondulatório, que descreve o comportamento na forma de onda da REM, observa tanto a o comprimento da onda ( $\lambda$ ), que depende de quanto a partícula foi acelerada, quanto a sua frequência ( $\nu$ ), que representa o número de picos de onda que

passa por um ponto fixo no espaço. Desta forma, em sensoriamento remoto, a interação das características das imagens, que levam em conta a relação entre o tamanho da onda e o tamanho do objeto, é denominada interação macroscópica.

O modelo Corpuscular, que descreve o comportamento da energia que interage com a matéria, leva em consideração a interação microscópica, pois ocorre em nível de átomos, isto é, depende da constituição química do material. Materiais de diferentes composições têm absorções e refletâncias diferentes resultando em imagens em diferentes tons de cinza.

Sendo assim, por causa da dualidade da natureza da radiação eletromagnética, o modelo ondulatório se relaciona com a textura dos objetos, e o modelo corpuscular à composição de cada material.

A principal fonte de radiação eletromagnética utilizada em sensoriamento remoto vem do sol, o intervalo espectral útil nesse caso está entre  $0,45\mu\text{m}$  e  $2,5\mu\text{m}$ . A Terra embora tenha intensidade de fluxo de energia muito inferior ao do sol, emite energia útil ao sensoriamento remoto entre  $8\mu\text{m}$  e  $14\mu\text{m}$ . A Figura 1 ilustra esse fato.



**Figura 1- Distribuição da intensidade de energia emitida pelas fontes naturais de radiação eletromagnética (Fonte: MENESES e ALMEIDA, 2012).**

A REM deve ser vista como um espectro contínuo, porém o espectro eletromagnético foi arbitrariamente dividido pelo homem em intervalos de comprimento de onda. Em sensoriamento remoto, esses intervalos são denominados bandas, e as

imagens são definidas com abrangência nesses intervalos de acordo com o que cada sensor for capaz de detectar.

O Quadro 1 mostra os intervalos do espectro a partir dos quais se pode obter imagens através de sensores em aeronaves ou satélites.

**Quadro 1 - Intervalos espectrais possíveis de serem usados pelos sensores remotos (Fonte: MENESES e ALMEIDA, 2012).**

0,45 – 0,76µm <i>visível</i>	0,76 – 1,2µm <i>infravermelho próximo</i>	1,2 – 3,0µm <i>infravermelho de ondas curtas</i>	3,0 – 5,0µm <i>infravermelho médio</i>	5,0 µm – 1 mm <i>infravermelho termal</i>	1mm– 100 cm <i>micro-ondas</i>
toda faixa	0,76 – 0,91 1,00 – 1,12	1,19 – 1,34 1,55 – 1,75 2,05 – 2,40	3,5 – 4,2 4,5 – 5,0	8,0 – 9,2 10,2 – 12,5	3,0 – 100

### 3.1.1. Aplicações do Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto tem muitas aplicações, como a avaliação não destrutiva de produtos numa linha de montagem, na medicina quando se avalia um raio x de um membro quebrado, por exemplo, e também para análise de recursos terrestres. Este último caso abrange qualquer informação concernente à vegetação, solos, minerais, rochas, água e infraestrutura urbana, bem como certas características atmosféricas. Tais informações podem ser usadas para a modelagem do ciclo global do carbono, da biologia e bioquímica dos ecossistemas, de aspectos dos ciclos globais da água e da energia, da variabilidade e previsão do clima, da química atmosférica, das características da Terra sólida, das estimativas populacionais, e do monitoramento da mudança e uso da terra e desastres naturais (JENSEN, 2011).

### 3.2.O NDVI

Quando se quer determinar a existência de vegetação em uma determinada área através de imagens de satélite, é preciso observar os comprimentos de onda da luz visível e do infravermelho absorvidos e refletidos pelas plantas.

O pigmento nas folhas das plantas, a clorofila, absorve fortemente a luz visível (de 0,4 a 0,7 µm) para o uso na fotossíntese e na estrutura das células das folhas, por outro lado, reflete fortemente o infravermelho próximo (de 0,7 a 1,1µm). Por isso, se em

um determinado *pixel* da imagem, há muito mais radiação refletida no infravermelho próximo do que em ondas de luz visível então existe uma probabilidade de ali a vegetação ser densa e de existir algum tipo de floresta. Se existe uma diferença muito pequena na intensidade do visível e do infravermelho, então a vegetação é provavelmente esparsa ou desértica.

Dessa análise foi desenvolvido o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), um índice que possibilita analisar a cobertura vegetal numa região. Sua geração se dá pela diferença entre a refletância do infravermelho próximo e a refletância do vermelho, dividida, respectivamente, pela soma das duas refletâncias como mostra a Equação (1) (JENSEN 2011).

$$NDVI = \frac{(IVP-V)}{(IVP+V)} \quad (1)$$

Em que, *IVP* é a refletância do infravermelho próximo e *V* é a refletância do vermelho.

O resultado dessa equação é um índice com valores que variam de -1 a 1. Sendo que, os valores mais próximos de 1 representam vegetação, os valores próximos de 0 representam solo exposto e os valores próximos de -1 podem representar água.

Sendo assim, para a obtenção desse índice, são necessárias apenas as imagens que cobrem a área que se quer estudar. Essas imagens são disponibilizadas gratuitamente por diversos satélites entre eles os satélites Landsat. Uma vez obtidas as imagens, basta realizar o procedimento no software de geoprocessamento, que solicita como subsídio apenas as bandas espectrais vermelha e infravermelha. Em qualquer computador razoável, esse procedimento não demora mais do que um minuto para ficar pronto.

### **3.2.1. Aplicações do NDVI**

O NDVI é usado mundialmente quando se quer estimar a densidade vegetal de uma determinada área. Embora seja esse seu principal uso, Narashiman (2005) conseguiu obter uma boa correlação entre NDVI e umidade do terreno através da análise de imagens de um período de 16 anos. E, indica o uso do NDVI como uma boa ferramenta substituta à ida a campo para estimar a umidade do solo.

O NDVI também é usado para compor mapas de uso do solo. Melessee Shih (2002) usaram este índice para melhorar uma imagem classificada de forma não supervisionada, e seguiu o trabalho de obtenção do CN de maneira descrita no ponto 3.6 deste trabalho.

### 3.3.O NDWI

Com base na curva de refletância da água, é possível criar um índice de diferença normalizada da água (NDWI) para obter informações sobre ambientes úmidos e aquáticos. Esse índice foi proposto pela primeira vez por GAO 1996 que sugeriu a Equação 2 como fórmula para gerar esse índice.

$$NDWI = \frac{\rho(0,86\mu m) - \rho(1,24\mu m)}{\rho(0,86\mu m) + \rho(1,24\mu m)} \quad (2)$$

em que  $\rho$  é a radiância em unidades de refletância. No sensor ETM+ do Landsat7 essa equação representa a interação entre as bandas espectrais 4 (Infravermelho) e 5 (Infravermelho curto) respectivamente.

Entretanto, existe uma divergência entre diversos autores que escrevem sobre esse tema sobre quais bandas devem compor a Equação 2, e que representarão melhor as feições de ambientes aquáticos. Jensen(2011) concorda com Gao(1996) e afirma que o NDWI é representado pela mesma equação usando como entrada as bandas 4 e 5, respectivamente.

Em uma análise mais aprofundada sobre o tema, Zahn e Huang(2009), recomendam que o NDWI para mapeamento de água seja feito com as bandas 2 (verde) e 5 (infravermelho curto). Já o SEOS (Science Education Through Earth Observation For High Schools) afirma que o NDWI é obtido a partir das bandas 3 (vermelho) e 5 (infravermelho curto). Sendo as bandas referentes aos satélites Landsat7 e 5.

Para o presente trabalho, todas as opções foram testadas a fim de obter o resultado mais satisfatório, isto é, que gerasse feições aquáticas mais parecidas com as do mapa de uso do solo de referência.

### **3.3.1. Aplicações do NDWI**

O NDWI é usado para diversos fins que envolvam a necessidade de mapear feições aquosas ou ambientes úmidos. Leivas *et al.* (2013), por exemplo, usam NDWI e o NDVI para desenvolver uma metodologia de monitoramento da seca que assola o Brasil nesse mesmo ano, principalmente nos estados do centro e nordeste do país. A metodologia utiliza imagens de satélite de 1998 até 2012 e analisa a variabilidade do NDVI e do NDWI em relação ao déficit de chuvas durante o período. Lee *et al.* (2009) usam a mesma metodologia para avaliar o problema de falta de chuvas, mas na China, que vem sofrendo fortes processos de desertificação.

O NDWI também tem sido utilizado para quantificar componentes do ciclo hidrológico como a evapotranspiração, elemento chave do balanço hídrico. Jovanovic (2014) compara o NDWI com medições em campo para testar a confiabilidade dessa ferramenta e obtêm coeficiente de correlação entre 0,85 e 0,91.

### **3.4. As Imagens noturnas**

O DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) é um programa do Departamento de Defesa dos Estados Unidos. O DMSP projeta, constrói, lança e mantém satélites que monitoram parâmetros meteorológicos, oceânicos, físicos e terrestres. O sensor visível e infravermelho OLS (Operational Linescan System) coleta imagens numa faixa de 3000km, fornecendo cobertura global duas vezes por dia (NOAA, 2014).

Esse conjunto satélite-sensor DMSP-OLS tem a capacidade única de coletar imagens com pouca informação luminosa da terra. Por isso fornece imagens noturnas que evidenciam os aglomerados urbanos do planeta e, portanto são muito usadas em pesquisas sobre distribuição da densidade populacional, emissões de carbono e atividade econômica.

### **3.5. O CN**

O parâmetro curva número SCS é um método simples e usado no mundo inteiro para estimar a lâmina de água escoada em um determinado evento de chuva. Foi publicado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (United States Department of Agriculture – USDA) e é descrito detalhadamente no capítulo 12 do

Manual Nacional de Engenharia (National Engineering Handbook – NEH). Este método foi desenvolvido por Mokus em 1956 e reeditado em uma versão menor em 1971, e é constantemente atualizado. A última versão é de 2000 e foi publicada por Donald E. Woodward.

O objetivo do método é relacionar a chuva e o escoamento a partir das propriedades da bacia hidrográfica, de onde se desenvolveu a Equação 3 que descreve o escoamento a partir de um determinado evento de chuva. Entretanto, essa equação só é válida quando a chuva excede o valor do parâmetro  $Ia$  (absorção inicial) de maneira que haja de fato escoamento, portanto a relação se dá da seguinte maneira.

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

$$Q = 0 \quad P \leq Ia$$

Em que  $Q$  é o escoamento em mm,  $P$  é a precipitação em mm,  $Ia$  é a absorção inicial em mm e  $S$  é o máximo potencial de infiltração em mm.

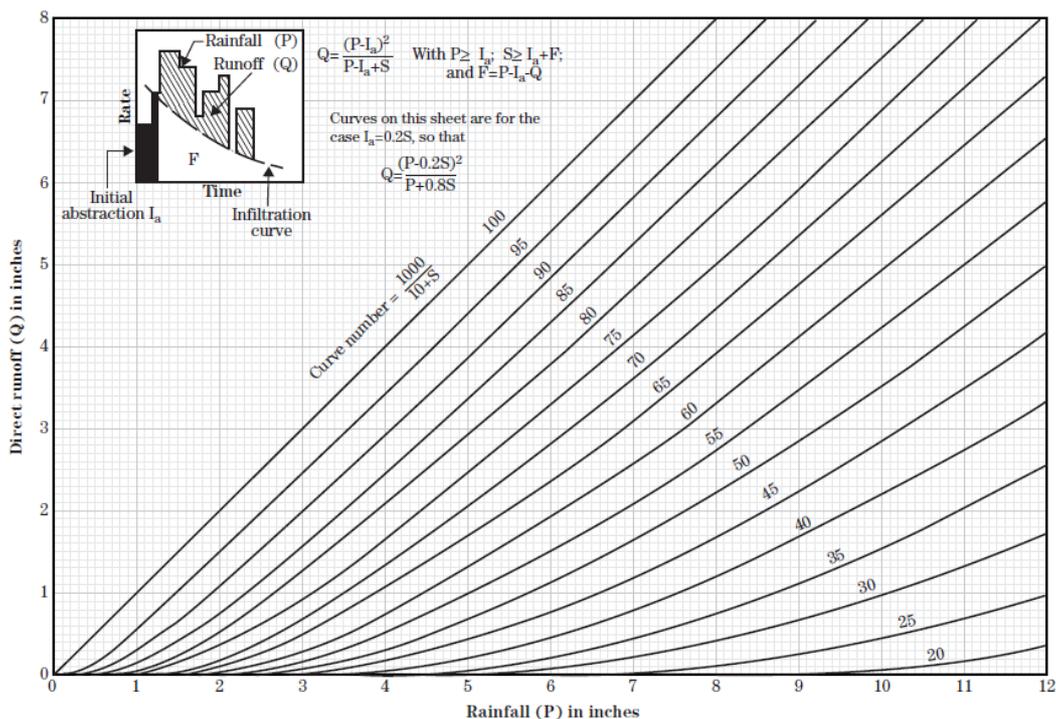
O  $Ia$  é uma função do máximo potencial de retenção do solo. A função empírica da relação entre  $Ia$  e  $S$  é definida pela Equação 4.

$$Ia = 0,2S \quad (4)$$

Em que  $Ia$  é a absorção inicial em mm e  $S$  é o máximo potencial de infiltração em mm.

Sendo assim, o cálculo do escoamento depende apenas do parâmetro de máximo potencial de infiltração  $S$ , que é descrito empiricamente como uma função do parâmetro CN (curva número) que varia de acordo com o gráfico exibido na Figura 2. Esse gráfico foi retirado do Manual Nacional de Engenharia onde as unidades utilizadas não são baseadas no Sistema Internacional (SI) e sim em polegadas, por isso a relação entre  $S$  e CN aparece diferente na figura. Porém, no SI, essa relação é descrita como na Equação 5. É importante salientar que o gráfico da Figura 2 é utilizado apenas para casos em que a relação da Equação 4 é válida, em outros casos é preciso refazer o gráfico de curvas número.

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



**Figura 2 - Gráfico da relação entre curva número (CN) e escoamento (Q).**

Sendo assim, fica clara a necessidade da obtenção do valor de CN para a realização do cálculo da lâmina escoada a partir de um evento de chuva.

### 3.6.Obtenção do CN

Os principais fatores a serem levados em conta quando se estima o valor do CN são o tipo hidrológico do solo, o uso do solo e as condições iniciais de umidade (AntecedentRunoffCondition – ARC). São esses fatores que atuam na variabilidade dos valores de CN. O capítulo 9 do NEH traz cinco tabelas com os valores de CN para os diferentes tipos de uso do solo relacionados aos grupos hidrológicos de solos.

Existem diversas maneiras de determinar o CN, como por análise visual de mapas temáticos, reconhecimento de campo ou mesmo métodos de correlação com densidade urbana. Técnicas de geoprocessamento têm sido crescentemente utilizadas na determinação do CN (PICKBRENNER *et al*, 2005), essas técnicas realizam o cruzamento dos mapas de uso do solo e tipos hidrológicos de solo, mas desconsideram as condições iniciais de umidade do solo.

Ao realizar o cruzamento, é atribuído a cada combinação de tipo de solo e de tipo de uso do solo um valor de CN de acordo com a Tabela I. Por exemplo, se uma determinada região do cruzamento das imagens tiver a combinação Floresta e Tipo

Hidrológico B. O valor de CN atribuído a essa região será 63. Essa tabela é um resumo dos valores da tabela original disponibilizada pelo NEH.

**Tabela I - Tabela resumida de valores CN.**

Tipo de uso do solo	Tipo Hidrológico			
	A	B	C	D
Amb.Aquáticos	98	98	98	98
Áreas Urbanas	81	88	91	93
Campos	65	75	83	85
Matas	41	63	74	80
Dunas	35	35	35	35

Os modelos hidrológicos, que estimam o escoamento superficial de uma bacia hidrográfica resultante de um evento de chuva, levam em consideração apenas um valor de CN e não valores em separado para cada sub-região da bacia, por isso, o último passo para a obtenção do CN de uma determinada bacia hidrográfica é calcular a média ponderada do CN pela área abrangida por cada valor de CN.

### 3.6.1. O Mapa de Uso do Solo

Mapas de uso do solo são produtos eventualmente disponibilizados por instituições especializadas, assim como outros tipos de mapas que não são confeccionados de maneira trivial como mapas geológicos, geomorfológicos, climáticos, etc. A grande diferença entre esses tipos de mapas é que o uso do solo sofre uma variação temporal que pode ser bastante significativa dependendo da região e de seu mosaico ambiental. Portanto obter mapas de uso do solo atualizados é raro.

Além disso, quando é escolhida a imagem de satélite para gerar a imagem de uso do solo, não se conhece os dados antecedentes de chuva, ou seja, uma imagem que tenha sido coletada numa época de chuvas, terá inúmeros locais com banhado no qual o CN resultante será o muito alto, mas se a imagem tiver sido coletada na mesma região em um período seco, regiões que anteriormente apareciam como banhado podem então aparecer como solo exposto ou vegetação baixa, diminuindo enormemente o valor do CN.

### 3.6.2. O Mapa de tipos hidrológicos de solos

O mapa de tipos hidrológicos de solos é elaborado a partir de um mapa de tipos de solo geralmente disponibilizado pelos governos locais. A partir das características de cada solo, estima-se o tipo hidrológico de acordo com a definição estipulada pelo NEH, a Tabela IItrás um resumo das particularidades de cada tipo hidrológico de solos.

**Tabela II – Tabela resumo das características de cada tipo hidrológico de solos.**

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Potencial de escoamento	baixo	moderado	moderadamente alto	alto
Drenagem	alta	moderadamente alta	moderada	ruim
Composição de argila	menos de 10%	entre 10 e 20%	entre 20 e 40%	mais de 40%
Composição de areia	mais de 90%	entre 50 a 90%	menos de 50%	menos de 50%

Na maioria das vezes as informações de porcentagem de areia e argila, necessárias para enquadrar cada tipo de solo em um determinado tipo hidrológico de solo, não estão disponíveis no mapa de Solos e nem a bibliografia especifica a relação entre o tipo do solo com a infiltração ou a drenagem. Tornando essa classificação muitas vezes imprecisa.

### 3.7. Justificativas

A partir das considerações feitas até aqui, percebe-se que a aquisição de um mapa com valores de CN é um processo custoso, mesmo para quem conhece ferramentas de sensoriamento remoto, e também, requer como subsídio, um mapa de uso do solo que costuma ser de difícil obtenção além de raramente estar atualizado e um mapa de tipos de solo que nem sempre está disponível ou nem sempre tem as informações necessárias para transformá-lo num mapa de tipos hidrológicos de solo.

Por outro lado, a obtenção de imagens NDVI, NDWI e noturnas, requerem apenas o download das imagens de satélite e um tratamento simples de álgebra com mapas em SIG para que possam ser usadas. Em virtude disso, esse trabalho se propõe a encontrar uma maneira diferente de obter o CN, e desenvolver um modelo em SIG que facilite a obtenção de mapas de uso do solo atualizados, fazendo com que os valores de CN encontrados sejam correspondentes ao tempo atual e não sejam limitados àqueles em

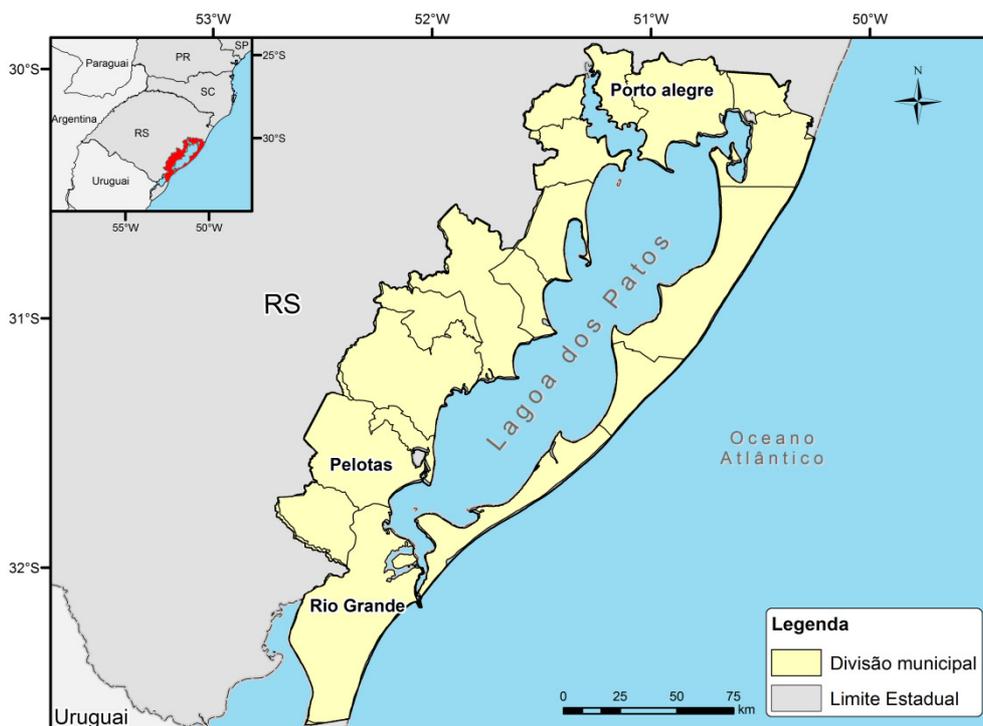
que foram desenvolvidos os mapas de uso do solo fornecidos por instituições especializadas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Área de estudo

O local escolhido para realização deste estudo é o litoral médio da zona costeira do estado do Rio Grande do Sul. Essa região possui um histórico recente de eventos de enchente, alagamento ou inundação, a defesa civil chegou a ser acionada dez vezes no período de abril de 2005 a janeiro de 2010 na área (MÜLLER, 2014).

A Figura 3 mostra o polígono utilizado e a sua localização no Brasil.



**Figura 3 – Região de estudo com divisão municipal.**

Essa região faz parte da bacia litorânea do Rio Grande do Sul, e abrange os municípios que envolvem a Lagoa dos Patos. São eles: Rio Grande, Pelotas, Arroio do Padre, Turuçu, São Lourenço do Sul, Cristal, Arambaré, Tapes, Barra do Ribeiro, Guaíba, Porto Alegre, Viamão, Capivari do Sul, Palmares do Sul, Mostardas, Tavares e São José do Norte. Esses são denominados municípios costeiros, pois fazem parte da zona costeira do Brasil.

### 4.2. Estrutura de Dados

O trabalho realizado contou com a utilização dos seguintes itens;

(1) Imagens de sensoriamento remoto – Para geração de mapas de uso do solo foram necessárias quatro diferentes cenas do satélite Landsat7 para que fosse possível cobrir a totalidade da área de estudo (220\_081, 221\_081, 221\_082 e 221\_083). Fornecidas gratuitamente pelo *Global Land Cover Facility* ([www.landcover.org](http://www.landcover.org)) as imagens Landsat são de fácil obtenção e tem a qualidade necessária para esse trabalho em termos radiométricos e geométricos.

(2) Tabelas de valores CN – A tabela com os valores de curva número (CN) utilizada, foi obtida de Collischonn e Dornelles (2013).

(3) Imagens Classificadas de cobertura e uso do solo – Para obtenção das imagens classificadas de cobertura e uso do solo utilizou-se a metodologia de Anderson *et al* (1976) adaptada.

(4) Google Earth – Utilizado como “verdade de campo” e para a verificação da precisão obtida pelas imagens classificadas de uso de solo.

(5) Mapa de solos do RS – Obtido no site da CPRM desenvolvido pelo IBGE, traz as informações necessárias para a montagem do mapa de grupos hidrológicos.

(6) Imagens Noturnas – Imagens obtidas do satélite DMSP e seu sensor OLS, fazem parte da composição do mapa de uso do solo, nas áreas urbanas.

(7) Curva IDF – A escolha das chuvas para simulação foi feita com a curva IDF de Porto Alegre. Essa curva é elaborada com dados históricos de chuvas máximas.

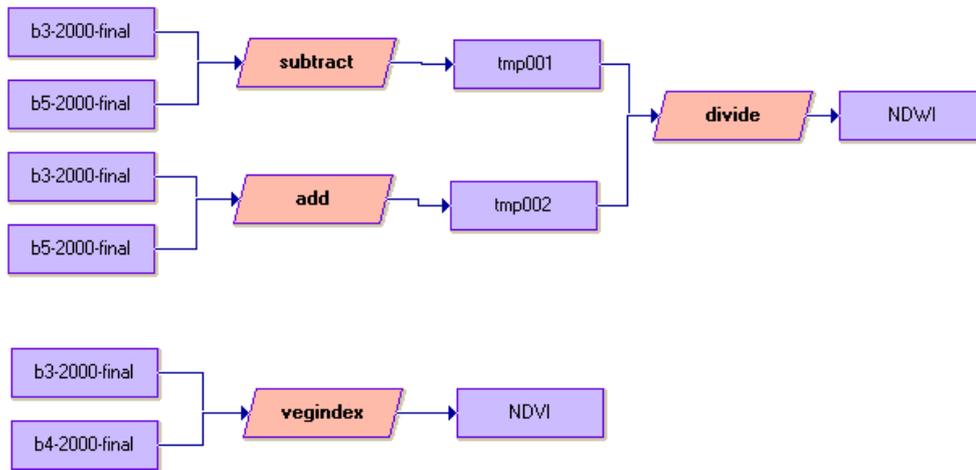
(8) Otto Bacias – A delimitação das subáreas escolhidas para a simulação hidrológica foi feita com as Otto Bacias nível 5 e 6 da ANA-Agência Nacional de Águas.

### **4.3. Procedimentos Analíticos**

#### **4.3.1. Índice de Vegetação NDVI e NDWI**

O método utilizado para obter o índice de vegetação foi aquele usado pelo *software* de processamento de imagens IDRISI desenvolvido por Rouse *et al.* (1974). Este dispõe da ferramenta VEGINDEX que processa a banda vermelha e a infravermelha da imagem que se quer trabalhar, gerando como resultado a imagem

NDVI. A imagem NDWI foi obtida através do cálculo com as bandas do verde e do infravermelho próximo conforme a equação descrita no Item 3. A Figura 4 exemplifica de forma gráfica o procedimento utilizado.



**Figura 4 – Procedimento analítico par a obtenção das imagens NDVI e NDWI**

#### **4.3.2. Extração de informações de imagens noturnas**

Nas imagens noturnas existe certo espalhamento da luz, que não confere precisão às manchas urbanas que estão sendo fotografadas, por isso foram trabalhadas com uma redução de 50% desse espalhamento (SILVEIRA, 2014). Posteriormente, foi multiplicada pelos valores específicos de NDVI para ambientes urbanos, a fim de anular o restante do espalhamento que classificaria como urbanos locais que não o são. A Figura 5 apresenta uma imagem noturna sem processamento.

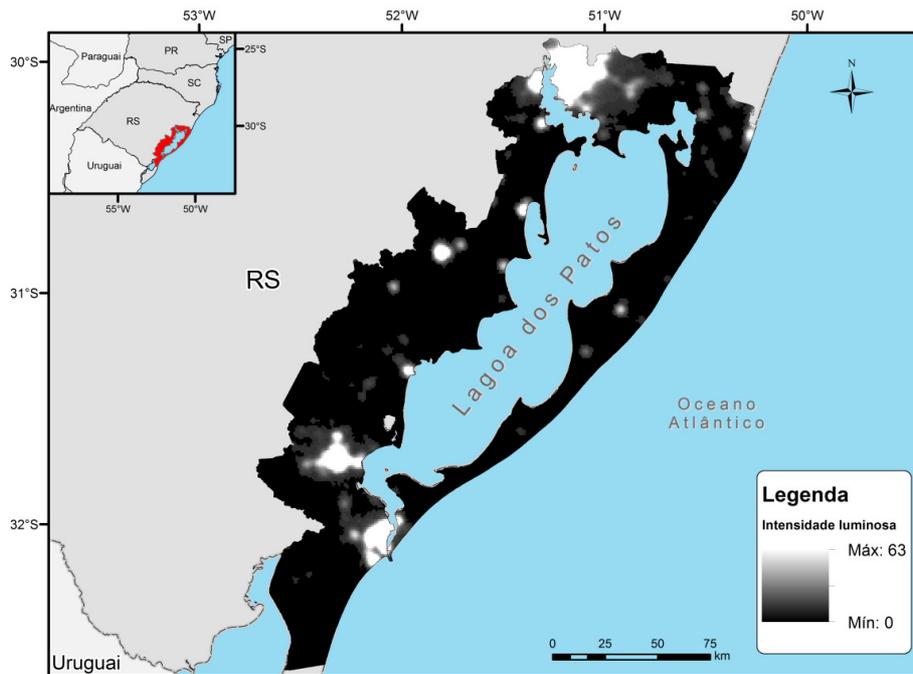


Figura 5 – Imagens noturnas sem tratamento prévio.

#### 4.3.3. Classificação das Imagens para obtenção de mapa de uso do solo

Para classificar as imagens foi utilizado o método *Clustering*(RICHARDS, 1986), não supervisionado, e o KNN, supervisionado, caracterizando o procedimento geral como classificação híbrida. O classificador Cluster não depende que o autor do trabalho informe o *software* sobre as características espectrais de cada classe, ele próprio procede a definição das classes a partir da análise da imagem e gera grupos espectrais. Neste trabalho, as imagens CLUSTER foram utilizadas como auxiliares na definição das assinaturas espectrais utilizadas na classificação supervisionada.

O classificador KNN é uma ferramenta de classificação supervisionada que usa o vizinho mais próximo de um subconjunto de todos os grupos amostrais para determinar a classe de um *pixel* ou o grau de adesão a uma classe. Portanto, esse classificador necessita maior interferência do autor, ele requer a definição de assinaturas espectrais, ou seja, a classificação é baseada em amostras de cada classe de uso do solo, o programa então extrapola as definições amostradas para o resto da imagem. Isso, portanto, requer um trabalho minucioso e detalhado na definição de cada classe que será trabalhada, assim como a escolha das amostras na imagem para a definição das assinaturas espectrais. A minúcia nessa etapa do trabalho é determinante para o bom resultado final da imagem classificada.

Esse classificador gera duas imagens de cobertura e uso do solo: uma do tipo “*hard classification*”, onde todos os *pixels* são atribuídos a uma única classe, e outra do tipo “*soft classification*”, onde os *pixels* apresentam um valor da probabilidade de pertencerem a uma ou outra classe.

As imagens “*soft*” auxiliam a corrigir a imagem “*hard*” gerada, pois esta última pode vir com significativos erros, atribuindo determinadas classes a locais onde haviam outros usos do solo que não o calculado pelo classificador. Para realizar essa correção, a imagem “*soft*” da classe que se quer corrigir é utilizada.

A imagem “*soft*” é dotada de *pixels* com diferentes valores de probabilidade de pertencerem à determinada classe, essa imagem é analisada junto ao *Google Earth* para saber a partir de qual valor probabilístico os *pixels* eram de fato referentes a regiões daquela classe. A partir daí a imagem é reclassificada para valores de um para os valores que se tinha certeza que eram de áreas daquela classe e de zero para valores que se tinha certeza que não eram de áreas daquela classe e o produto dessa reclassificação é “encaixado” na imagem “*hard*” a partir de uma operação OVERLAY gerando o resultado final do mapa de uso do solo.

#### 4.3.4. Obtenção do CN médio

Para obter o valor de CN médio para a área de estudo, assim como para as subáreas avaliadas, foi feita uma média ponderada pela área. Para isso, através do número de *pixels* correspondentes, calculou-se a área de abrangência de cada valor de CN, utilizando-se a Equação 6.

$$CN_{m\u00e9dio} = \frac{\sum CN_i * A_i}{\sum A_i} \quad (6)$$

Em que  $CN_i$  é o CN para cada área e  $A_i$  representa a área de cada grupo de CN.

#### 4.4. IPHS1

Para comparar os resultados finais deste estudo, além da média do CN, também foi utilizado o modelo hidrológico IPHS1. Esta comparação é realizada para investigar também quais são os impactos da utilização do método desenvolvido em termos de geração de hidrogramas em algumas bacias que compõem a região costeira, não apenas

em termos estatísticos (dados pela média do CN para toda a área de estudo). E analisar quais são os impactos e incertezas em termos hidrológicos da metodologia proposta.

O IPHS1 é um programa computacional modulado, que permite a construção de um modelo que simula a transformação de chuva em vazão na superfície de uma bacia hidrográfica e gera um Hidrograma de Projeto. O programa foi desenvolvido por TUCCI *et al.* (1989); mais recentemente foi lançada a versão para *Windows* que utiliza como base a Metodologia de Modelagem Orientada a Objetos aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos, apresentada por Viegas (2000).

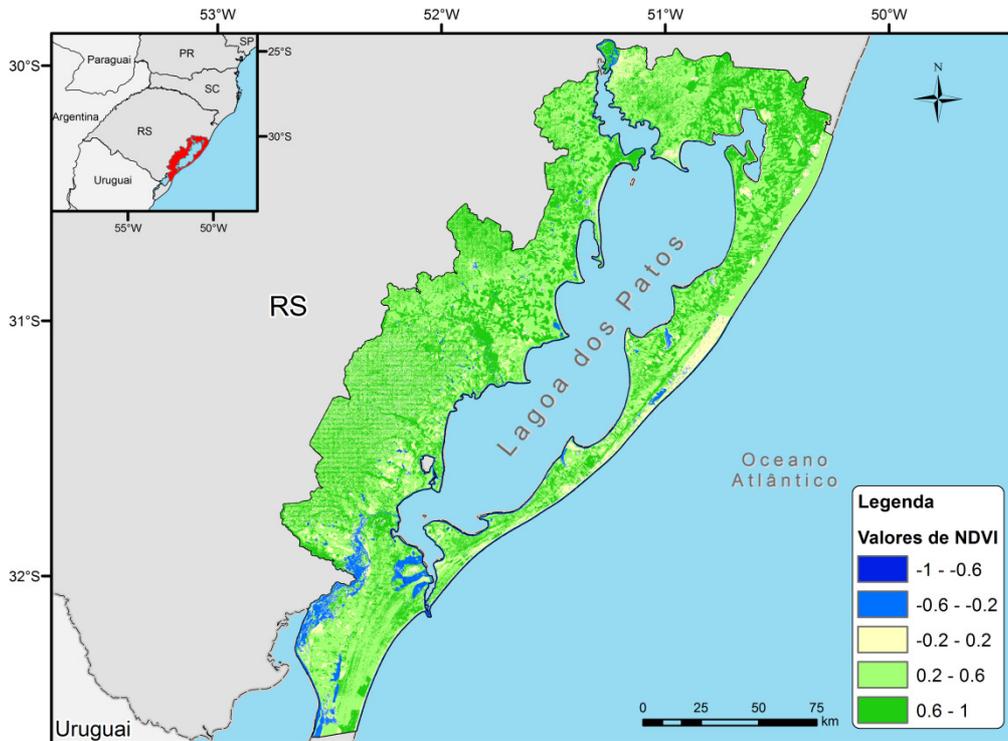
O IPHS1 estima a lâmina de água escoada em um determinado evento de chuva utilizando o método SCS descrito na revisão bibliográfica item 3.5. Para gerar o hidrograma, uma das variáveis de entrada é o CN, que produz forte influência no resultado final.

Neste trabalho, o IPHS1 foi utilizado para comparar os diferentes picos de vazão resultantes de um mesmo evento de chuva, mas com diferentes valores de CN, o primeiro obtido pela metodologia tradicional e o segundo obtido pela nova metodologia aqui proposta.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

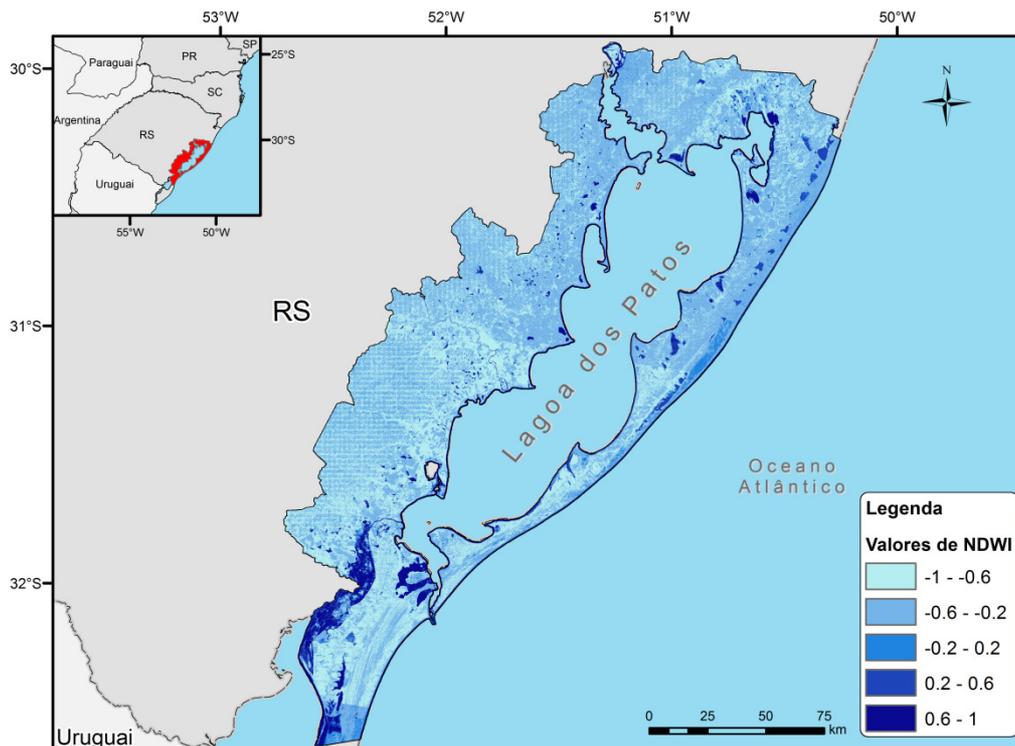
### 5.1. NDVI e NDWI

Os mapas de NDVI e NDWI obtidos através dos cálculos descritos no item 4 podem se vistos nas Figura 7 e Figura 8 respectivamente.



**Figura 7 – Imagem NDVI.**

Essa imagem é uma boa representação da quantidade de vegetação existente na área, os valores mais próximos de um exibem maior probabilidade de serem áreas vegetadas, pois nesse caso os valores refletidos na banda do infravermelho são muito altos. No caso de áreas úmidas, pelo fato de a água absorver fortemente os comprimentos de onda na banda do infravermelho, os valores para essas áreas tende a ser negativo e mais próximo de -1. As áreas com refletância parecida nas bandas do vermelho e infravermelho ficam com valores próximos ao zero e tendem a ser de solo exposto ou não vegetadas.



**Figura 8 – Imagem NDWI.**

Como o mapa NDWI representa a existência de água e a umidade no solo, ele foi aqui apresentado em tons de azul, onde o azul mais forte representa mais umidade.

Na Imagem 8 é possível notar uma leve diferença nos tons de azul entre a divisa de duas imagens Landsat. Isso ocorre porque as imagens são de datas próximas, mas não do mesmo dia, e possivelmente ocorreram chuvas na imagem da metade norte. A diferença entre os tons de azul é sutil, mas perceptível, de forma que o leitor, mesmo sem conhecer a feição exata de cada imagem Landsat, note o limite entre as duas. Por isso, quando se utiliza a imagem NDWI para extrair feições de água, é preciso escolher um valor de *pixel* a partir do qual serão definidos os corpos d'água, de forma que esses não se confundam com ambientes úmidos por causa de eventos de chuva recente.

Portanto, para este trabalho, o fato de as duas imagens Landsat terem essa diferença, contribuiu para que o valor escolhido fosse médio.

## **5.2. Mapa de cobertura e uso do solo obtido pelo método tradicional**

O mapa de cobertura e uso do solo foi obtido através da metodologia descrita no item 4.3.3, ou seja, através da classificação supervisionada das mesmas cenas Landsat usadas para gerar o NDVI e o NDWI. Esse mapa passou por um teste de acuracidade e

apresentou 83% de acertos. Portanto ele não representa uma amostra perfeita da realidade, entretanto, foi utilizado como verdade para fins de comparação no presente trabalho.

As classes usadas inicialmente para obter a imagem de uso do solo estão na Tabela III. Posteriormente foi feita uma reclassificação para que os usos do solo ficassem restritos às classes da tabela de CN usada para esse trabalho como anteriormente mostrado na Tabela I.

**Tabela III– Descrição das classes utilizadas na classificação do uso do solo.**

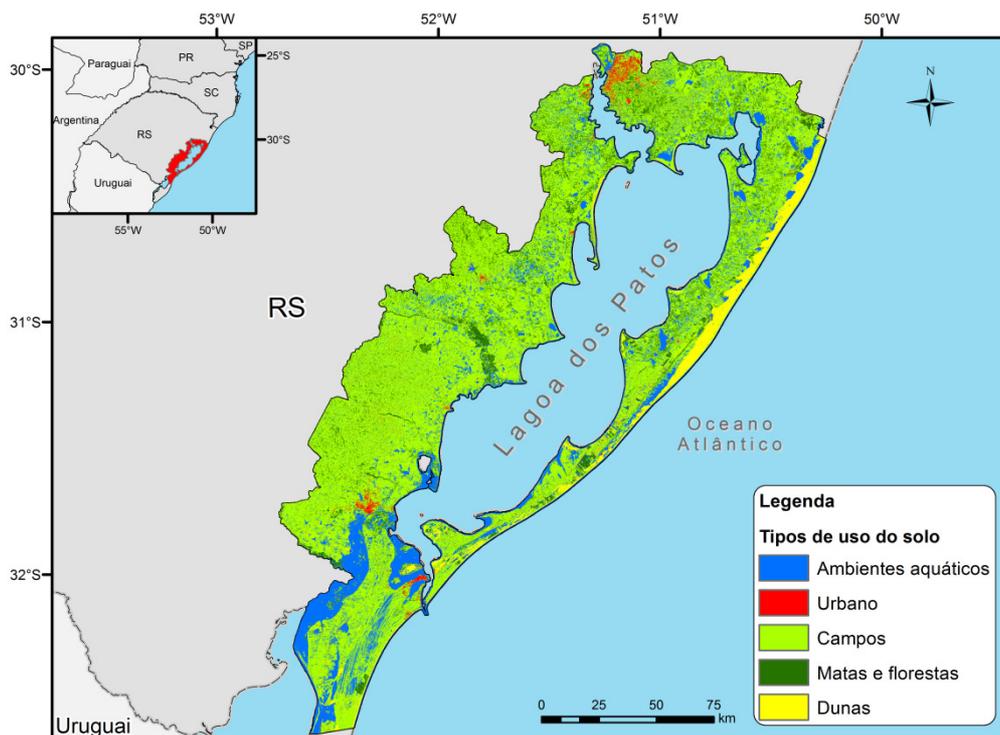
Classe	Descrição
Agricultura	Campos cultivados, áreas utilizadas na pecuária e campos nus.
Aquático	Ambientes aquáticos permanentes, lagos, reservatórios e rios.
Banhados	Ambientes úmidos com vegetação herbácea.
Urbano	Áreas construídas residenciais, industriais ou de transporte.
Matas	Matas ciliares, florestas e matas de restinga.
Dunas e praias	Dunas vivas, praias lagunares e oceânicas.
Florestamentos	Formações arbustivas implantadas.

Nesse processo, as Matas e Florestamentos viraram a classe Florestas. E os ambientes aquáticos e os banhados viraram a classe Água. Isto foi feito porque em termos de CN essas classes tendem a se comportar de maneira semelhante. Dessa forma, os usos do solo foram reduzidos às cinco classes da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Tabela IV– Usos do solo de acordo com a reclassificação.**

Classe	Descrição
Agricultura	Campos cultivados, áreas utilizadas na pecuária e campos nus.
Água	Ambientes aquáticos permanentes, lagos, reservatórios e rios, úmidos com vegetação herbácea.
Urbano	Áreas construídas residenciais, industriais ou de transporte
Florestas	Matas ciliares, florestas e matas de restinga, formações arbustivas implantadas.
Dunas e solos expostos	Dunas vivas, praias lagunares e oceânicas, e solos expostos sem vegetação.

Dessa forma a imagem de uso do solo final utilizada nesse trabalho pode ser vista na Figura 9.



**Figura 9 – Mapa de uso do solo obtido através do método tradicional.**

A imagem de uso do solo na Figura 9 mostra uma área coberta principalmente por campos, representando 66% da área total. A Tabela V mostra as porcentagens de abrangência de cada tipo de uso do solo.

**Tabela V– Porcentagem da área coberta por cada tipo de uso do solo.**

Tipo de uso do solo	%
Amb. Aquáticos	18%
Áreas Urbanas	2%
Campos	66%
Matas	10%
Dunas	4%

Os ambientes aquáticos também contribuem com uma parcela representativa somando 18% do total e os outros tipos, podem ser notados por causa do destaque das cores, mas em relação ao total representam juntos, apenas 16% de toda a área.

### **5.3. Mapa de uso do solo obtido a partir da nova metodologia**

Através da análise das imagens NDVI e NDWI, percebeu-se uma possibilidade de separar as diferentes classes de uso do solo a partir de uma reclassificação dessas imagens, uma vez sabido que elas trazem consigo informação numérica de densidade de

vegetação e umidade. Por isso, essas imagens foram reclassificadas e sobrepostas formando um mosaico que se tornou um mapa de uso do solo. Para complementar, foisomado a elas as imagens noturnas que trouxeram certeza sobre a existência de ambientes urbanos. A ordem de sobreposição foi escolhida de forma conservadora, dessa maneira os campos, florestas e solos expostos foram somados uns aos outros, e em seguida foram sobrepostos a eles o ambiente urbano e os ambientes aquáticos.

Os itens a seguir mostram com detalhes a execução desse procedimento.

### 5.3.1. Campos, Florestas e Solos Expostos a partir do NDVI

A partirdo NDVI pode se extrair informações sobre locais vegetados e não vegetados. Por isso avaliou-se dentro dessa imagem, a faixa de valores que abrange cada um dos tipos de ambiente que se quer classificar. ATabela VIapresenta um resumo da faixa de valores do NDVI utilizada para reclassificar cada tipo de uso do solo e sua nova identidade numérica.

**Tabela VI– Valores utilizados na reclassificação da imagem NDVI e sua nova identidade.**

Tipo de uso do solo	Intervalos de NDVI		Nova ID
	Mínimo	Máximo	
Dunas e solo exposto	-0,27	0,15	5
Campos	0,15	0,77	3
Matas e florestas	0,77	1	4
Urbano	-0,22	0,1	2

Na tabela fica evidente que as classes urbano e dunas se sobrepõem, isso acontece, pois ambientes urbanos tem refletância muito semelhante a solos expostos. Por esse motivo, a classe urbano passou pelo mesmo processo dereclassificaçãoque outros três e ainda por um processo com imagens noturnas para que se diferenciasse definitivamente das dunas.

As outras três classes dunas, campos e matas foram reclassificadas diretamente do NDVI, gerando três novas imagens cada uma com o valor correspondente à nova identidade e zero. Como os intervalos escolhidos para cada uma não se sobrepunha aos outros, essas três novas imagens foram somadas.

Portanto, a partir do NDVI, foi gerada uma imagem com apenas três classes e zero. A água não foi considerada nessa classificação, pois ambientes aquáticos com

sólidos suspensos apareciam com valores de NDVI semelhantes às dunas. Isso causaria uma grande confusão, pois em termos de CN, dunas são os ambientes com maior capacidade de infiltração, ou seja, valores CN muito baixos, enquanto que, ambientes aquáticos representam os valores máximos de CN.

### 5.3.2. Ambiente Urbano a partir das imagens noturnas

Para obter classes de ambientes urbanos com maior precisão foram usados os valores de NDVI para ambientes urbanos como mostra a Tabela VI e multiplicados pelas imagens noturnas. Isso foi feito, pois as imagens noturnas mesmo com tratamento, continuam tendo espalhamento além das áreas realmente urbanizadas. E esse procedimento acaba excluindo áreas afetadas pelo espalhamento que na verdade não são urbanizadas.

Então, para unir os ambientes urbanos às outras classes foi feita uma imagem booleana (imagem com valores de apenas 1 e 0 para os *pixels*), onde os *pixels* com valor da classe urbano ficaram zerados e os outros com valor de 1. Essa imagem foi multiplicada pela soma das outras três classes e por fim, a imagem inicial de ambiente urbano com seu respectivo valor,<sup>2</sup> nesse caso, foi somada àquela imagem resultante da multiplicação com a booleana. Isso foi feito porque, como os valores de NDVI para classes urbanas se sobrepunham com os de dunas, se a imagem de ambientes urbanos fosse simplesmente somada às outras, o resultado dessa soma seria uma nova classe que não existe.

### 5.3.3. Ambientes aquáticos ou inundados a partir do NDWI

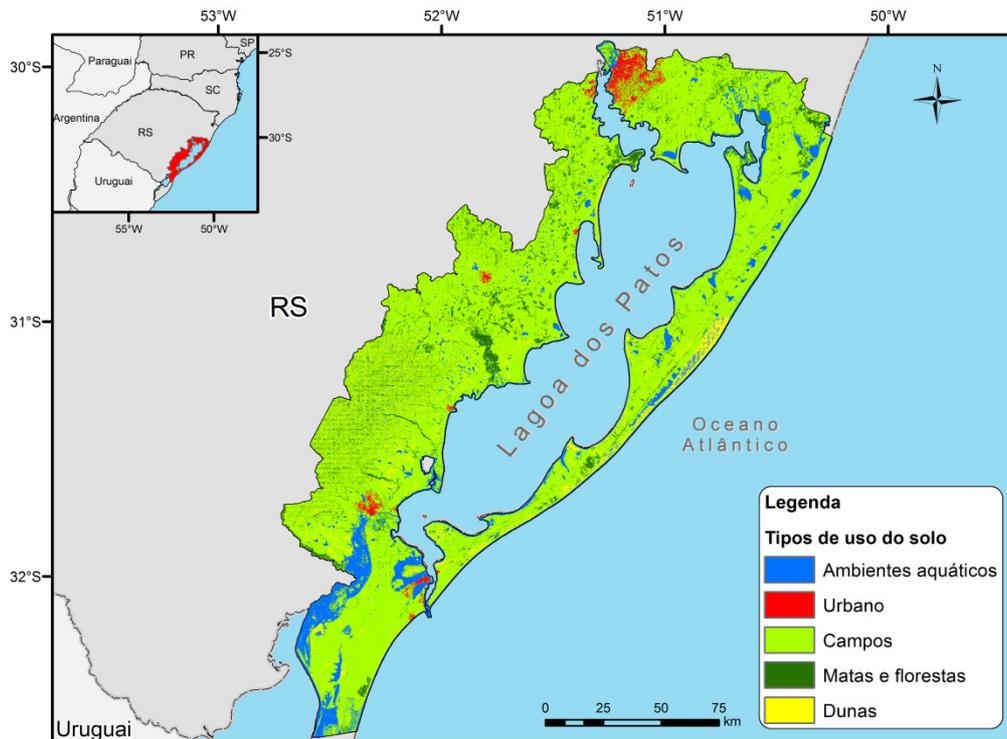
A definição dos meios aquáticos foi feita a partir de imagens NDWI que retratam bem esse tipo de ambiente. A avaliação foi feita da mesma maneira que para o NDVI, a faixa de valores definida como água está representada na Tabela VII.

**Tabela VII- Valores utilizados na reclassificação da imagem NDWI e sua nova identidade.**

Tipo de uso do solo	Intervalos de NDWI		Nova ID
	Mínimo	Máximo	
Ambientes aquáticos	-0,15	1	1

Com intuito de unir a classe de ambientes aquáticos com as demais, foi realizado o mesmo procedimento feito com a classe urbano.

Por fim, a imagem de uso do solo obtida a partir da metodologia descrita pode ser vista na Figura 10.



**Figura 10 – Mapa de uso do solo obtido a partir do novo método.**

O esperado é que a Figura 10 fosse o mais parecido possível com a Figura 9, e que fosse gerada a partir de um método simplificado, que necessitasse apenas inserir no modelo dois dados de entrada, as imagens Landsat e as imagens noturnas.

Se compararmos as imagens, visualmente fica claro que a Figura 9 apresenta mais áreas azuis, ou seja, mais ambientes aquáticos. Outra diferença evidente é que a Figura 10 tem áreas urbanas mais densas e também parece ter menos dunas.

### 5.3.4. Modeler/ IDRISI

O procedimento acima descrito foi realizado a partir de um modelo criado no programa IDRISI, de forma que, no momento que se queira repeti-lo, será necessário dar entrada ao processo apenas as imagens noturnas, NDVI e NDWI.

### 5.4. Mapa de tipos Hidrológicos de Solos

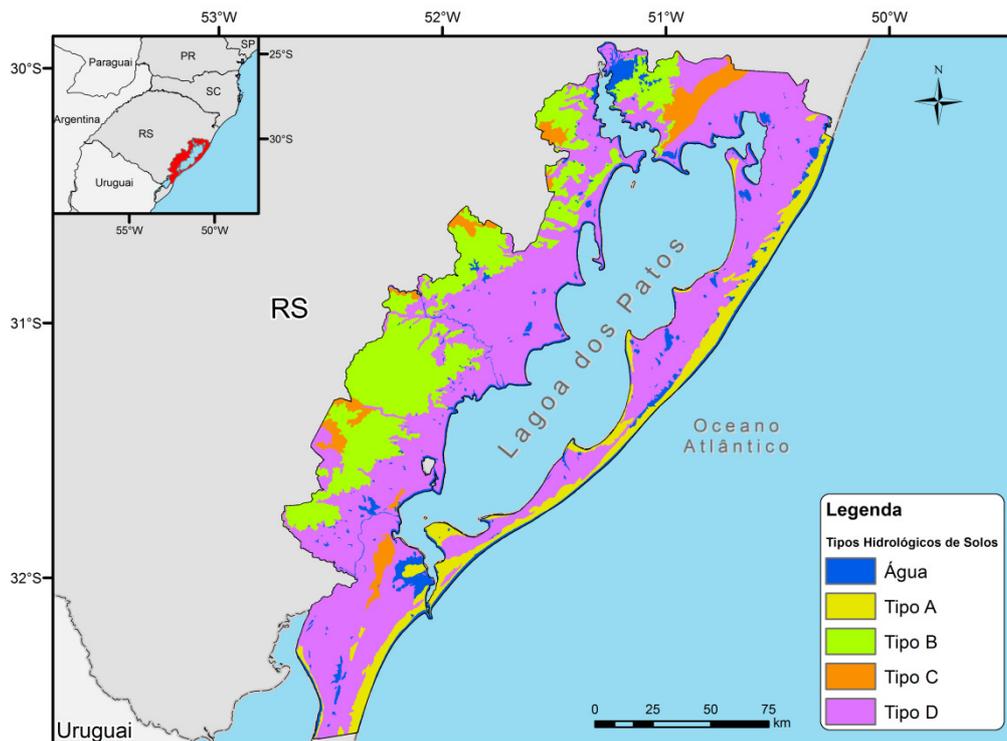
O mapa de tipos hidrológicos de solos foi obtido a partir do mapa de tipos de solos do Rio Grande do Sul, disponibilizado pela CPRM. Esse mapa é muito completo, e traz consigo informações sobre a drenagem de cada solo. Isso possibilita fazer uma reclassificação desse mapa em termos dos tipos hidrológicos A, B, C e D.

Como o mapa original traz 10 classes de drenagem (acentuada, excessiva, bem, bem/moderada, moderada, moderada/imperfeita, imperfeita, mal, muito mal), não tem como dividir exatamente em quatro tipos hidrológicos. Além disso, por falta de mais informações, a escolha das atribuições feitas de cada classe para cada tipo hidrológico é subjetiva e fica a critério do projetista. Para esse trabalho, as classes foram divididas de acordo com a Tabela VIII.

**Tabela VIII– Classificação dos tipos hidrológicos de acordo com a drenagem do solo.**

Tipo Hidrológico	Drenagem
A	Acentuada Excessiva
B	Bem Bem/Moderada
C	Moderada/Bem Moderada Moderada/Imperfeita
D	Imperfeita Mal Mal/Muito mal

O mapa resultante de tipos hidrológicos de solo pode ser visto na Figura 11.



**Figura 11 – Diferentes tipos hidrológicos de solo obtidos para a área de estudo.**

A Figura 11 deixa evidente que o tipo de solos com a maior capacidade de infiltração (tipo A) está justamente no litoral, onde há muita areia e que a frequência é baixa. O tipo B aparece concentrado mais na região sudoeste da área e o tipo C não tem grande destaque. O tipo D abrange a maior parte a área e, portanto, espera-se que o CN médio dessa área seja alto, pelo fato de o tipo D ser o mais impermeável.

Percebe-se também que a região norte de Porto Alegre aparece inundada, isso porque esse local não teve seu tipo de solo classificado, portanto ficou com valor zerado e a esse pedaço atribuiu-se a existência de água. Como os dois mapas de CN utilizarão o mesmo mapa de tipos hidrológicos de solo e o objetivo desse trabalho é a comparação entre dois métodos, essa falta de informação naquela região não afetará as análises a serem feitas aqui. De qualquer forma, vale destacar, que para um estudo cujo fim é a obtenção de um valor de CN único para ser utilizado em modelos hidrológicos, para aquela região, deve-se buscar um mapa mais detalhado da região metropolitana e com informações completas.

## 5.5. Mapa de CN

Conforme visto, o CN é obtido a partir do cruzamento entre tipos e solo e tipos hidrológicos de solo, portanto, para obter um mapa inteiro com esses valores, são cruzados os mapas de uso do solo e tipos hidrológicos de solo e, para cada combinação é atribuído um valor.

Para esse trabalho, o cruzamento foi feito tanto com o mapa de uso do solo de referência quanto para o mapa de uso do solo obtido pela nova proposta metodológica. Os dois mapas podem ser vistos nas Figura 12 e Figura 13, respectivamente.

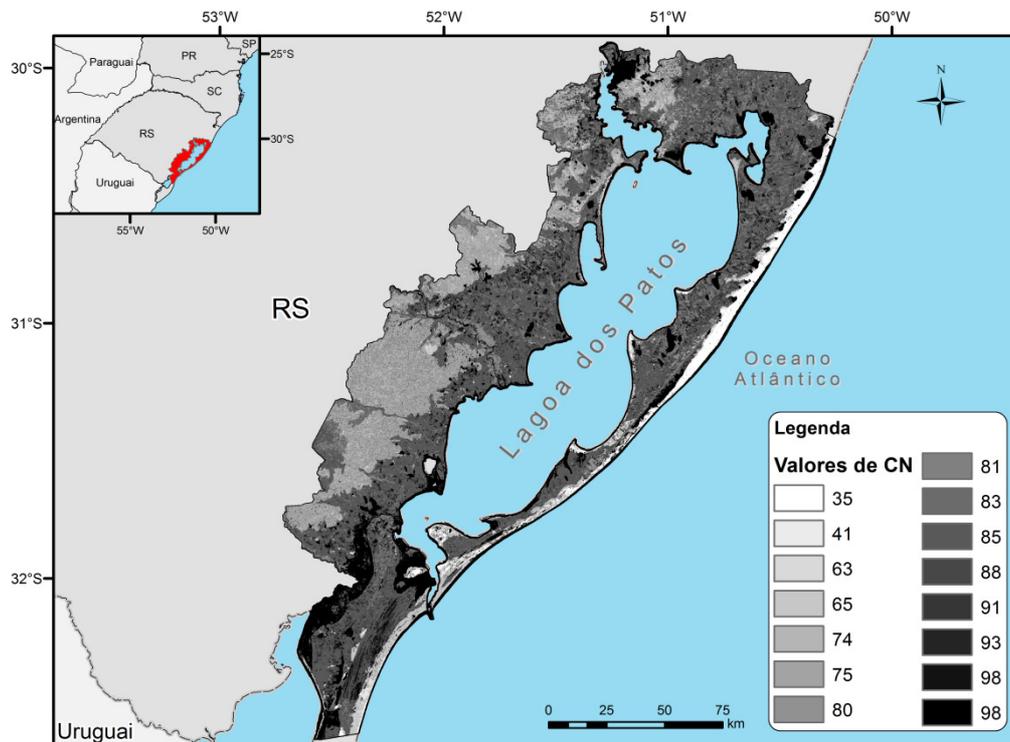


Figura 12 – Mapa de CN obtido pelo método tradicional.

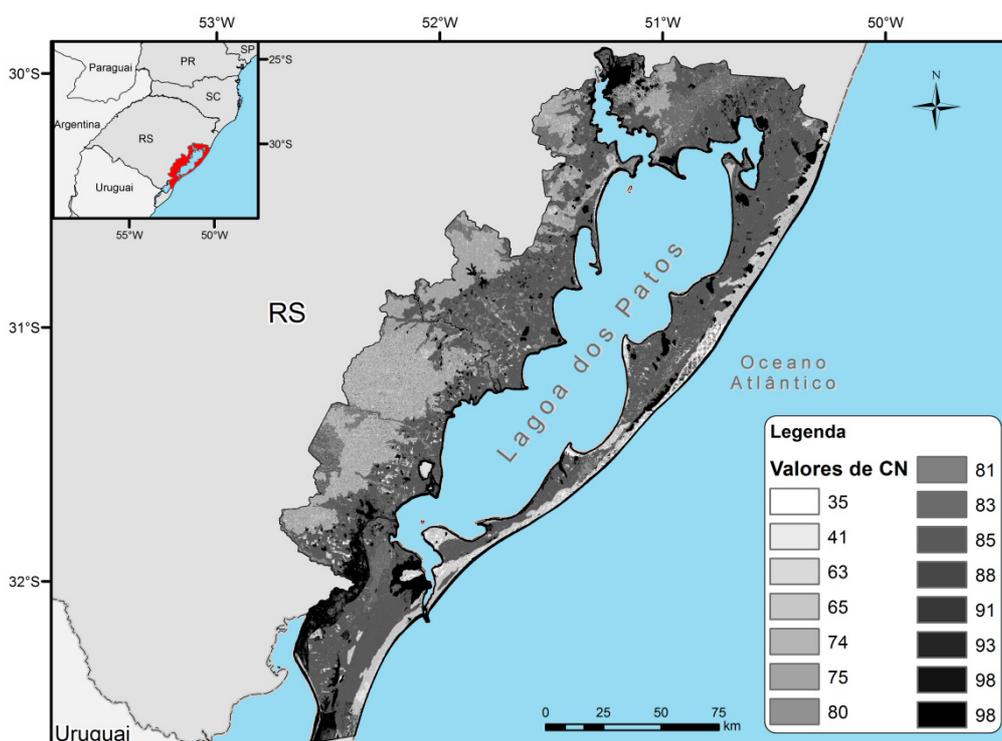
A Figura 12 mostra os diversos valores de CN com uma grande variabilidade para toda a área. Isso se dá por causa das diversas combinações entre cinco tipos de uso do solo e quatro tipos hidrológicos de solo. A variação de cores do preto ao branco auxilia a destacar os locais onde o CN é mais alto.

Sendo assim, fica claro que as regiões bem escuras são ambientes com água, onde o CN é máximo, como no extremo sul da imagem. Se compararmos a Figura 12 com a Figura 11, podemos perceber a influência do tipo de solo no resultado final, pois existe uma divisão bastante perceptível no centro oeste da imagem entre dois tons de

cinza que pode ser claramente identificada com a variação dos tipos hidrológicos de solo representados pelas cores verde (tipo B) e roxo (tipo D) na Figura 11.

Na região litorânea se destacam as cores mais claras, isso por causa do tipo de uso do solo “duna” que tem CN muito baixo e também pelo tipo de solo A que é o que tem a maior capacidade de drenagem o que ajuda a reduzir mais ainda o valor do CN.

Na região norte de Porto Alegre, o CN aparece com seu valor máximo por causa da falta de informações do mapa de tipos hidrológicos, já descrita no item 5.4.



**Figura 13 – Mapa de CN obtido pela nova proposta metodológica.**

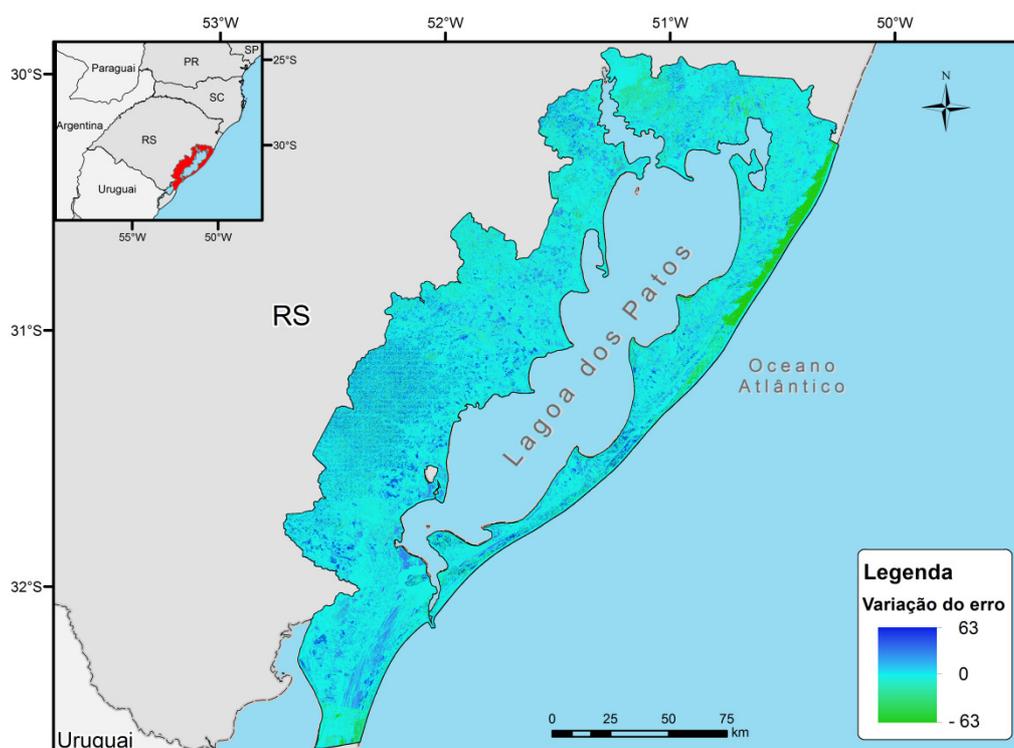
A Figura 13, quando comparada com a Figura 12, revela algumas diferenças. Com destaque às regiões mais claras, onde o CN é muito baixo na Figura 13 e não é tão baixo na Figura 12.

A fim de ilustrar melhor a diferença entre as duas imagens de CN, foi feita a subtração dessas duas. Dessa forma, podem-se ver com maior clareza os pontos onde houve compatibilidade, onde houve incompatibilidade e também é possível enxergar o tamanho da diferença através da variação das cores.

Sendo assim, a Figura 14, mostra que as maiores diferenças estão em azul forte e verde forte, enquanto que o azul claro mostra os *pixels* com valores iguais nas duas imagens de CN.

Fica claro, portanto, que a região litorânea onde existem dunas, mostra uma grande variação entre os dois métodos. O mesmo acontece para alguns pontos dispersos pela imagem destacados pelo azul forte. Grande parte desses pontos são solos expostos que pelo método tradicional acabaram sendo considerados como dunas.

Na região sul de Porto Alegre houve certa diferença também porque parte da vegetação naquela região foi considerada como campo pelo método novo e como florestas pelo método tradicional.



**Figura 14 – Diferença entre imagens de CN obtidas pelo método novo e pelo método tradicional.**

Esses mapas mostram os valores de CN *pixel a pixel*. Entretanto, para fins de uso no modelo hidrológico IPHS1, o CN precisa ser um único valor médio para a área de cada bacia simulada. Portanto, a seguir é feito o cálculo do CN médio para toda a área de estudo assim como para cada bacia de dentro da área que será usada para a simulação.

## 5.6.Obtenção dos valores médios de CN

O valor médio de CN foi calculado para a área total para os dois casos. A Tabela IX e a Tabela X mostram o resultado encontrado. A média ponderada foi calculada a partir da frequência de *pixels* que, nesse caso, representam a área de abrangência de cada tipo de CN. As tabelas mostram a frequência em números absolutos e também em porcentagem. A coluna “CN x Frequência” mostra a multiplicação dessas duas colunas e cuja soma é dividida pelo número total de *pixels* da amostra resultando no CN médio.

**Tabela IX– Avaliação do CN médio obtido através da metodologia tradicional.**

CN	Frequência	CN x Frequência	%
35	854699	29914465	1,63%
41	97392	3993072	0,22%
63	587402	37006326	2,02%
65	706317	45910605	2,51%
74	145274	10750276	0,59%
75	3908118	293108850	16,00%
80	1389487	111158960	6,07%
81	28937	2343897	0,13%
83	788329	65431307	3,57%
85	8968356	762310260	41,62%
88	58970	5189360	0,28%
91	7605	692055	0,04%
93	124921	11617653	0,63%
98	4615098	452279604	24,69%
Total	22280905	1831706690	
CN médio		82.2	

**Tabela X – Avaliação do CN médio obtido através da nova proposta metodológica.**

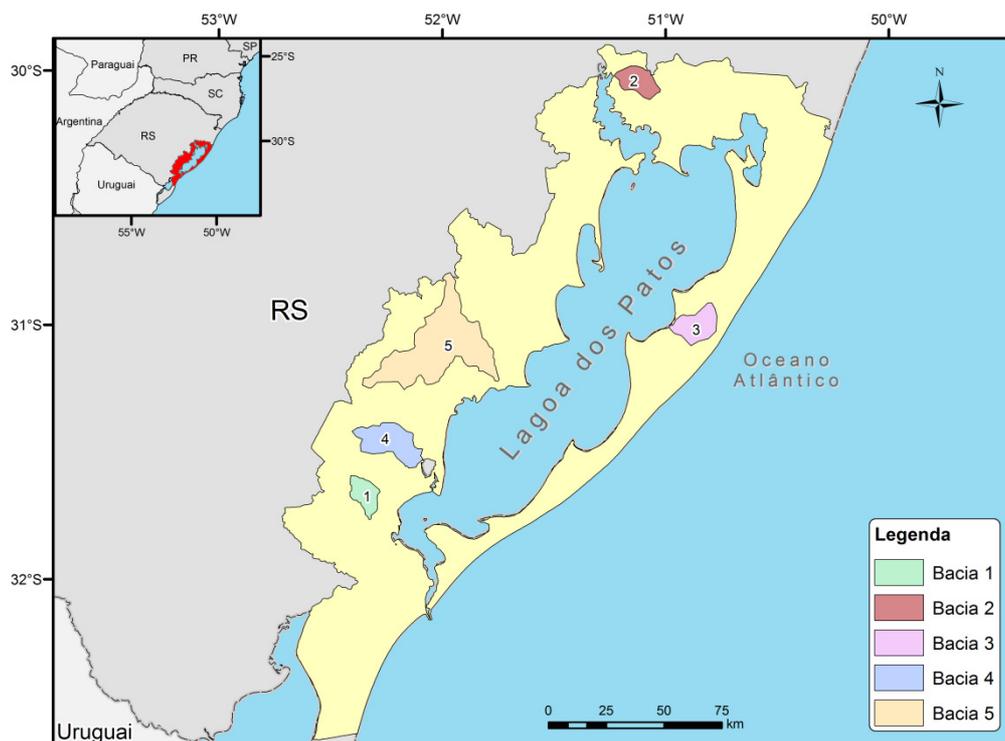
CN	Frequência	CN x Frequência	%
35	1021539	35753865	1,99%
41	65449	2683409	0,15%
63	489284	30824892	1,71%
65	1198997	77934805	4,33%
74	92834	6869716	0,38%
75	3848020	288601500	16,04%
80	963538	77083040	4,28%
81	7083	573723	0,03%
83	886841	73607803	4,09%
85	10523760	894519600	49,72%
88	91765	8075320	0,45%
91	445	40495	0,00%
93	70569	6562917	0,36%
98	3020781	296036538	16,45%
Total	22280905	1799167623	
CN médio		80.7	

Portanto, percebe-se que a diferença entre as duas metodologias é de apenas 1,5 unidades de CN para a área total, ou 1,8% do CN obtido pelo método tradicional. Essa diferença baixa pode ter acontecido porque o erro se dilui para uma área tão grande com todos os diversos tipos de CN. A Figura 14 mostra certo equilíbrio entre as cores verdes escuras (mínimos) e azuis escuras, isso revela que na média global houve uma compensação entre os valores negativos e positivos.

Sendo assim, o mesmo procedimento de cálculo das médias ponderadas foi realizado para bacias hidrográficas inseridas na região e que tivessem diferentes tipos de usos do solo entre si, para validar o método. E também para que fosse possível avaliar a variação da vazão para um determinado evento de chuva com os diferentes CN's. Esse cálculo da vazão é feito no programa IPHS1 que requer como unidade básica não uma área qualquer, mais uma bacia hidrográfica e alguns dados relativos a ela como área, comprimento do rio principal e desnível.

### **5.7. Chuva transformada em vazão nas diferentes bacias hidrográficas**

Para que fosse possível avaliar a variação nas vazões para os diferentes CN's, foram escolhidas cinco bacias hidrográficas dentro da área de estudo que tivessem valores diversos de CN entre si. A Figura 15 mostra as bacias escolhidas.



**Figura 15 - Bacias hidrográficas escolhidas para a simulação hidrológica.**

Para rodar o modelo hidrológico é necessária a utilização de um evento de precipitação. Para tanto foi utilizada a curva IDF da cidade de Porto Alegre, de onde se escolheu um tempo de retorno de dois e outro de dez anos, para que a simulação abrangesse chuvas relativamente mais frequentes (TR 2 anos) e também algumas relativamente nem tão frequentes (TR 10 anos).

É importante destacar aqui que, como o foco do trabalho é comparar os resultados obtidos com o método tradicional e com o novo método proposto em termos de vazão, a escolha da curva IDF é apenas uma referência teórica para a obtenção das chuvas, de um lugar um pouco distante de algumas das áreas de estudo, e estas intensidades talvez sejam um pouco diferentes das reais nos locais testados. Todavia, para termos de comparação de resultados entre os dois métodos, isto não é uma limitação.

Os resultados de resposta de vazão para os diferentes CN's e para os diferentes tempos de retorno serão mostrados aqui pontualmente para cada bacia.

### 5.7.1. Bacia 1

A bacia 1 apresentou, em termos de CN médio uma diferença muito pequena, apenas 0,85 unidades, o que representa cerca de 1% do valor encontrado para o CN pelo método tradicional. A Tabela XI mostra os valores encontrados.

**Tabela XI- Valores de CN encontrados pelos dois métodos para a bacia 1.**

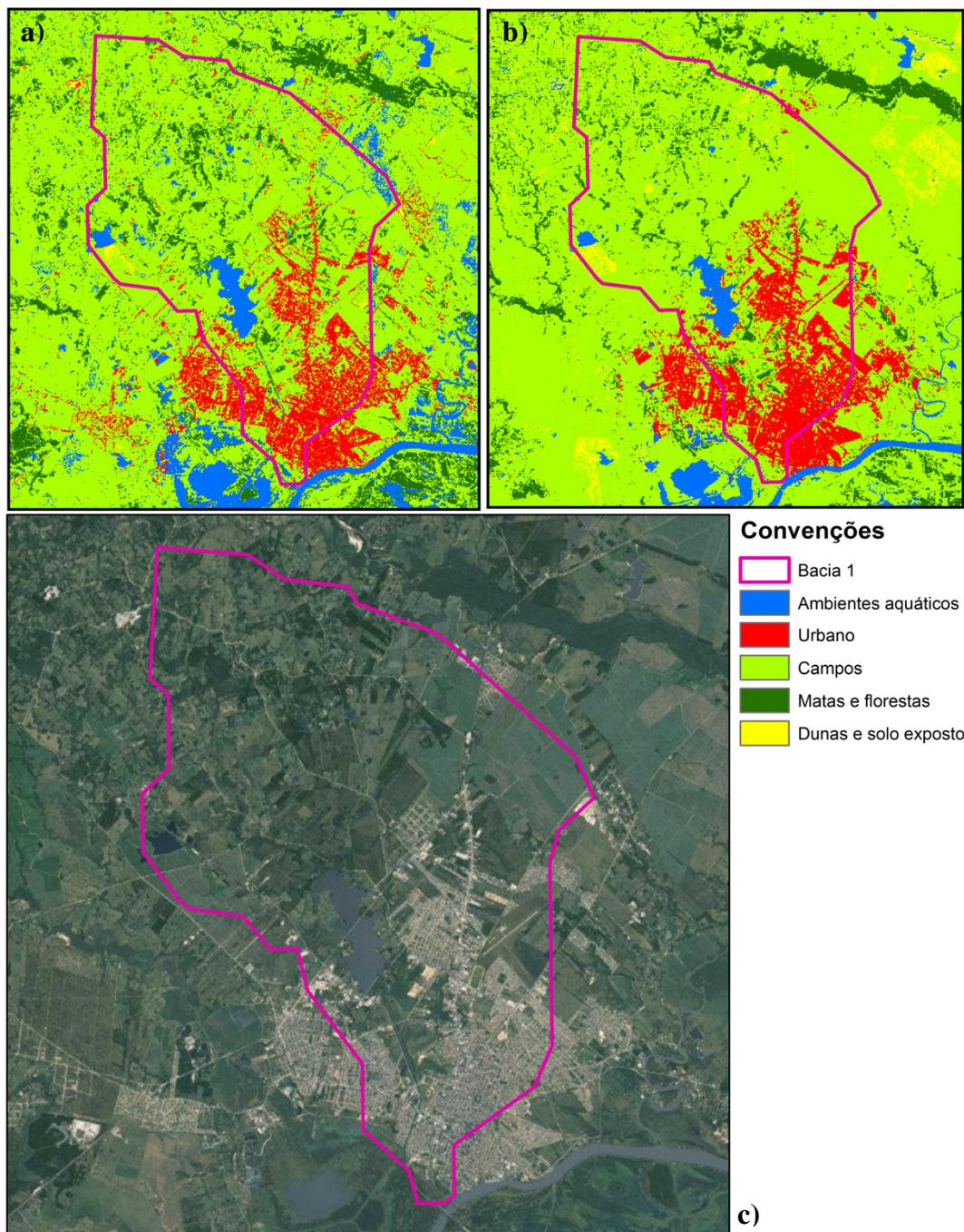
Área (km <sup>2</sup> )	CN trad.	CN novo	Diferença	%
144	84,45	83,59	0,85	1%

A Figura 16 foi inserida no texto para fins de comparação entre as imagens de uso do solo obtidas pelos dois métodos e ainda uma imagem como composição colorida de cor verdadeira, o que facilita a visualização.

Nessa comparação é perceptível que o método novo encontrou dunas em um ambiente que elas dificilmente existem, essa pode ser uma confusão causada por solos expostos que não necessariamente são areia, mas que não possuem vegetação. Portanto a classificação pelo NDVI os considerou dunas. Esse fator contribui para a redução do valor de CN.

Outra variação significativa são os ambientes aquáticos ou úmidos, que na imagem obtida pelo método tradicional aparecem com mais frequência. Isso contribui para elevar o valor do CN médio.

Já os ambientes urbanos aparecem mais densos com o método novo e mais espalhados com o método tradicional, o que equilibra a média.



**Figura 16- Comparação entre os métodos tradicional (a) e novo (b) e imagem com composição colorida (c).Bacia 1.**

A Tabela XII traz o resultado obtido da simulação hidrológica feita com o programa IPHS1 para estimar a vazão de pico para chuvas máximas com dois tempos de retorno diferentes usando os dois valores de CN médio obtidos tanto pelo método tradicional quanto pelo método novo.

Percebe-se que a diferença entre as vazões obtida em porcentagem, 4 e 3% para o tempos de retorno de 2 e 10 anos, respectivamente, é maior do que a diferença em

porcentagem entre os valores absolutos de CN que foi de apenas 1%. E também que a diferença diminui com o aumento do tempo de retorno.

**Tabela XII- Variação das vazões de pico para os diferentes valores de CN médio e diferentes tempos de retorno. Bacia 1.**

Resultados	TR 2	TR 10
Vazão trad. (m <sup>3</sup> /s)	203,52	336,42
Vazão nova (m <sup>3</sup> /s)	195,02	326,12
Diferença (m <sup>3</sup> /s)	8,5	10,3
%	4%	3%

### 5.7.2. Bacia2

O CN médio encontrado para a bacia 2 apresentou uma diferença um pouco mais significativa, 2,84 unidades de CN que representam 3% do valor médio de CN tradicional. A Tabela XIII mostra os números encontrados.

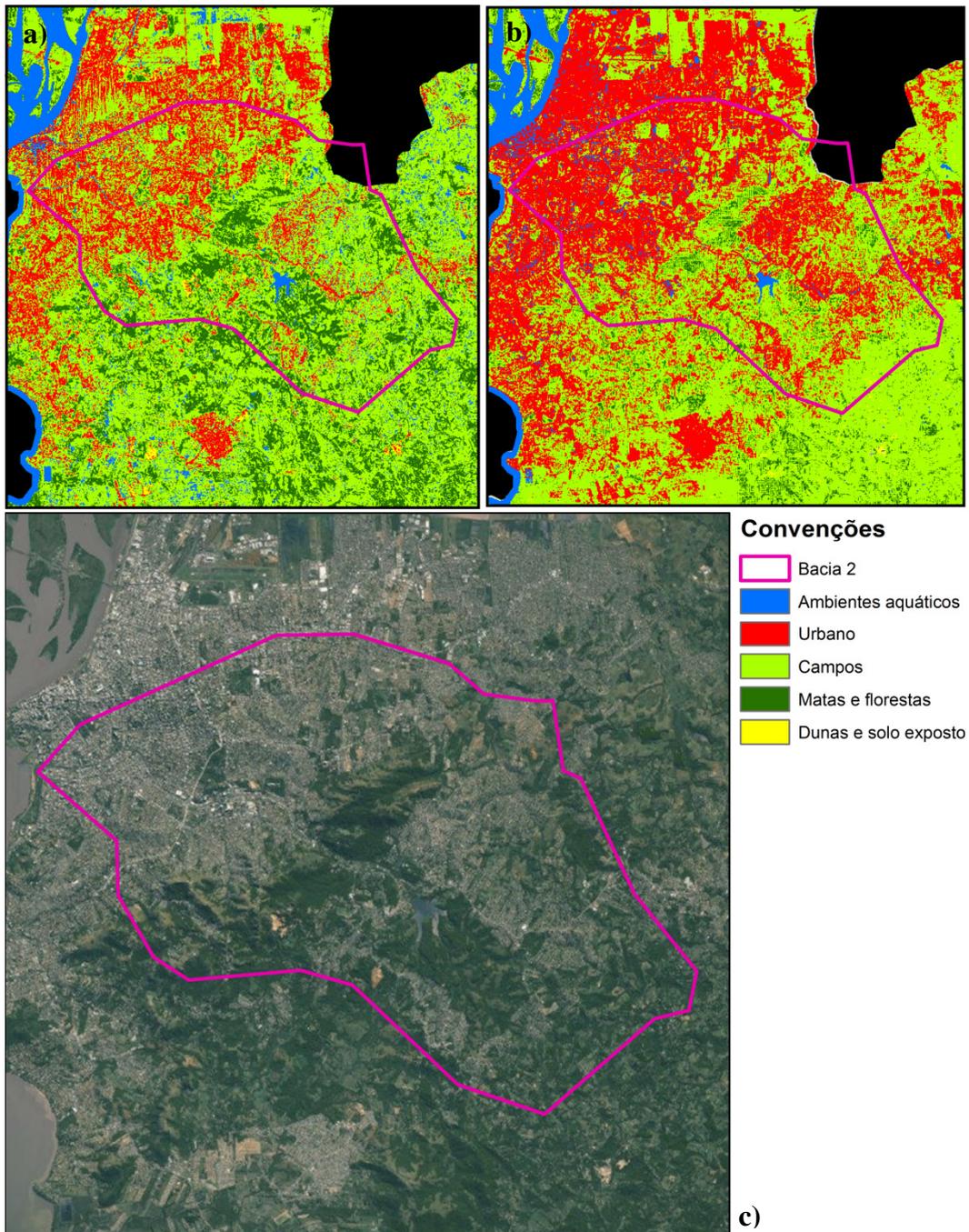
**Tabela XIII - Valores de CN encontrados pelos dois métodos para a bacia 2.**

Área (km <sup>2</sup> )	CN trad.	CN novo	Diferença	%
170	82,87	85,71	2,84	3%

Ao observar a Figura 17, percebe-se que a bacia 2 é a bacia do Arroio dilúvio que corta a capital gaúcha Porto Alegre, portanto essa bacia é extremamente urbanizada. Em função da diferença entre os métodos utilizados para se obter as imagens de uso do solo, os ambientes urbanos ficaram com certa diferença. O método novo apresenta uma densidade maior enquanto que o método tradicional percebe melhor o espalhamento de áreas urbanas como grandes estradas e avenidas. O fato de ocorrer esse adensamento urbano no método novo, acaba elevando o CN médio, por considerar maior impermeabilização do solo.

Outra diferença perceptível na bacia 2 são as áreas mais florestadas. Claramente o método tradicional consegue identificar com mais precisão essas regiões que no método novo aparecem com pouca frequência. Isso também contribui para uma elevação no CN médio da bacia 2 obtido pelo método novo.

E quando comparadas as imagens de uso do solo com a imagem de composição colorida, parece que o método novo representou melhor as áreas urbanas enquanto que o método tradicional representou melhor as áreas florestadas.



**Figura 17- Comparação entre os métodos tradicional (a) e novo (b) e imagem com composição colorida (c). Bacia 2.**

Apesar de a diferença em valores médios de CN não ter sido tão grande, a variação em termos de vazão foi mais representativa entre os dois métodos de obtenção do CN médio.

Quando o cálculo foi feito para uma chuva com tempo de retorno de dois anos, a variação entre os métodos foi de 15%. Quando o tempo de retorno foi aumentado para

10 anos, a diferença ficou menor, em 11%. Os valores encontrados estão detalhados na Tabela XIV.

**Tabela XIV- Variação das vazões de pico para os diferentes valores de CN médio e diferentes tempos de retorno. Bacia 2.**

Resultados	TR 2	TR 10
Vazão trad. (m <sup>3</sup> /s)	273,21	460,54
Vazão nova (m <sup>3</sup> /s)	315,07	509,95
Diferença (m <sup>3</sup> /s)	41,86	49,41
%	15%	11%

### 5.7.3. Bacia 3

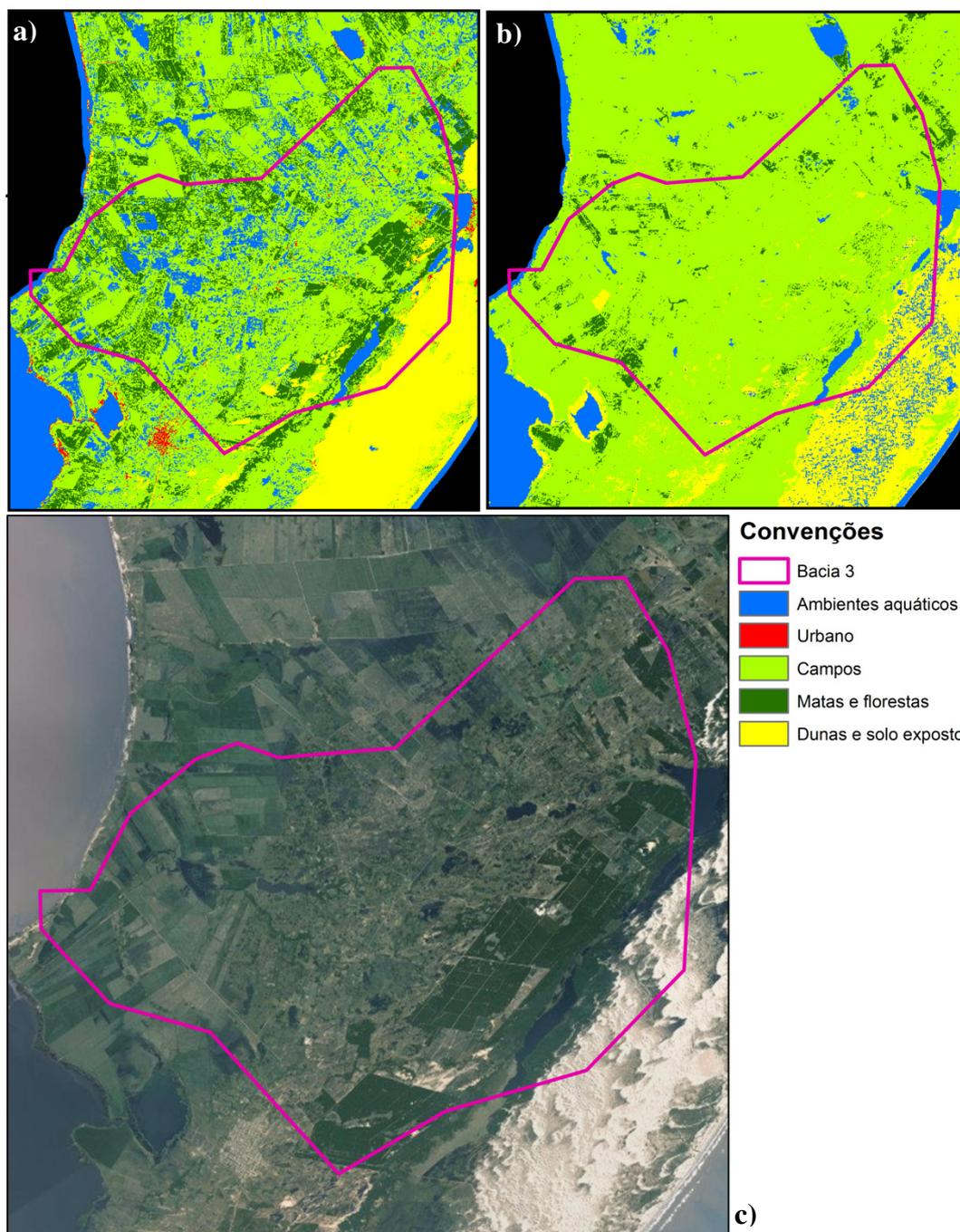
A bacia 3, assim como a bacia 1, apresentou uma diferença baixa entre os valores médios de CN encontrados, apenas 1%. A Tabela XV mostra os valores encontrados.

**Tabela XV- Valores de CN encontrados pelos dois métodos para a bacia3.**

Área (km <sup>2</sup> )	CN trad.	CN novo	Diferença	%
220	82,85	81,96	0,89	1%

Apesar de essa diferença ter sido baixa, a variação visual das duas imagens de uso do solo parece muito grande. Isso pode ser visto na Figura 18. Fica claro que o método tradicional confunde áreas de plantação com matas e florestas, enquanto que o método novo não consegue identificar as áreas de floresta mais a sudeste da bacia.

Outra diferença é a nas dunas, o método novo parece ter identificado maior umidade nessa região, enquanto que o método tradicional percebe mais água no resto da bacia, mas não nas dunas.



**Figura 18- Comparação entre os métodos tradicional (a) e novo (b), e imagem com composição colorida (c). Bacia 3.**

Mais uma vez, apesar da variação do CN ser de apenas 1%, a variação entre as vazões encontradas para os dois métodos foi maior, 5% para um tempo de retorno menor e 4% quando o tempo de retorno foi aumentado. Os detalhes podem ser vistos na Tabela XVI.

**Tabela XVI- Variação das vazões de pico para os diferentes valores de CN médio e diferentes tempos de retorno. Bacia 3.**

Resultados	TR 2	TR 10
Vazão trad. (m <sup>3</sup> /s)	144,18	241,42
Vazão nova (m <sup>3</sup> /s)	136,92	232,22
Diferença (m <sup>3</sup> /s)	7,26	9,2
%	5%	4%

#### 5.7.4. Bacia 4

Entre todas as cinco bacias estudadas, a 4 foi a que apresentou a maior diferença entre os valores de CN médio encontrados para os dois métodos. O CN novo ficou 7% menor que o CN tradicional. A Tabela XVII mostra os diferentes valores encontrados.

**Tabela XVII - Valores de CN encontrados pelos dois métodos para a Bacia4.**

Área (km <sup>2</sup> )	CN trad.	CN novo	Diferença	%
336	78,77	73,54	5,23	7%

A Figura 19 mostra a comparação entre as imagens de uso do solo obtidas pelos dois métodos. Num primeiro momento elas parecem bastante similares, mais do que outras como a bacia 3 que apesar da grande diferença visual apresentou CN's médios bem próximos. Entretanto, se ao serem observadas com mais cuidado, as duas imagem apresentam diferenças determinantes para o cálculo do CN médio.

O método tradicional tem uma quantidade de *pixels* vermelhos, ou seja, que ambientes urbanos, muito maior do que o método novo. Isso pode ter acontecido porque o método novo consegue identificar apenas locais urbanizados mais condensados, enquanto que o tradicional identifica também ambientes urbanizados dispersos como algumas estradas e pequenas propriedades rurais.

Entretanto, numa análise mais aprofundada, percebeu-se que muitos desses *pixels*, identificados como ambientes urbanos pelo método tradicional, eram na verdade ambientes não construídos, ou seja, uma falha no método. E como ambientes urbanos são impermeáveis, essa variação contribui muito para a elevação do CN médio da bacia.

Por outro lado, o método tradicional encontrou um número muito maior de *pixels* para dunas onde não existem dunas. Isso ocorre porque esse método considera

dunas como ambientes não vegetados, portanto os locais da bacia 4 onde não havia plantações nem florestas acabaram sendo considerados dunas.

Essa ocorrência pode ser identificada como uma limitação do método novo uma vez que as dunas, por terem CN baixíssimo, contribuem para diminuir de forma significativa o CN médio da bacia. Uma solução para isso seria não usar o método novo em bacias com grandes quantidades de dunas. E no processo, a classe dunas ser substituída por solos expostos e atribuir a este um CN diferente.

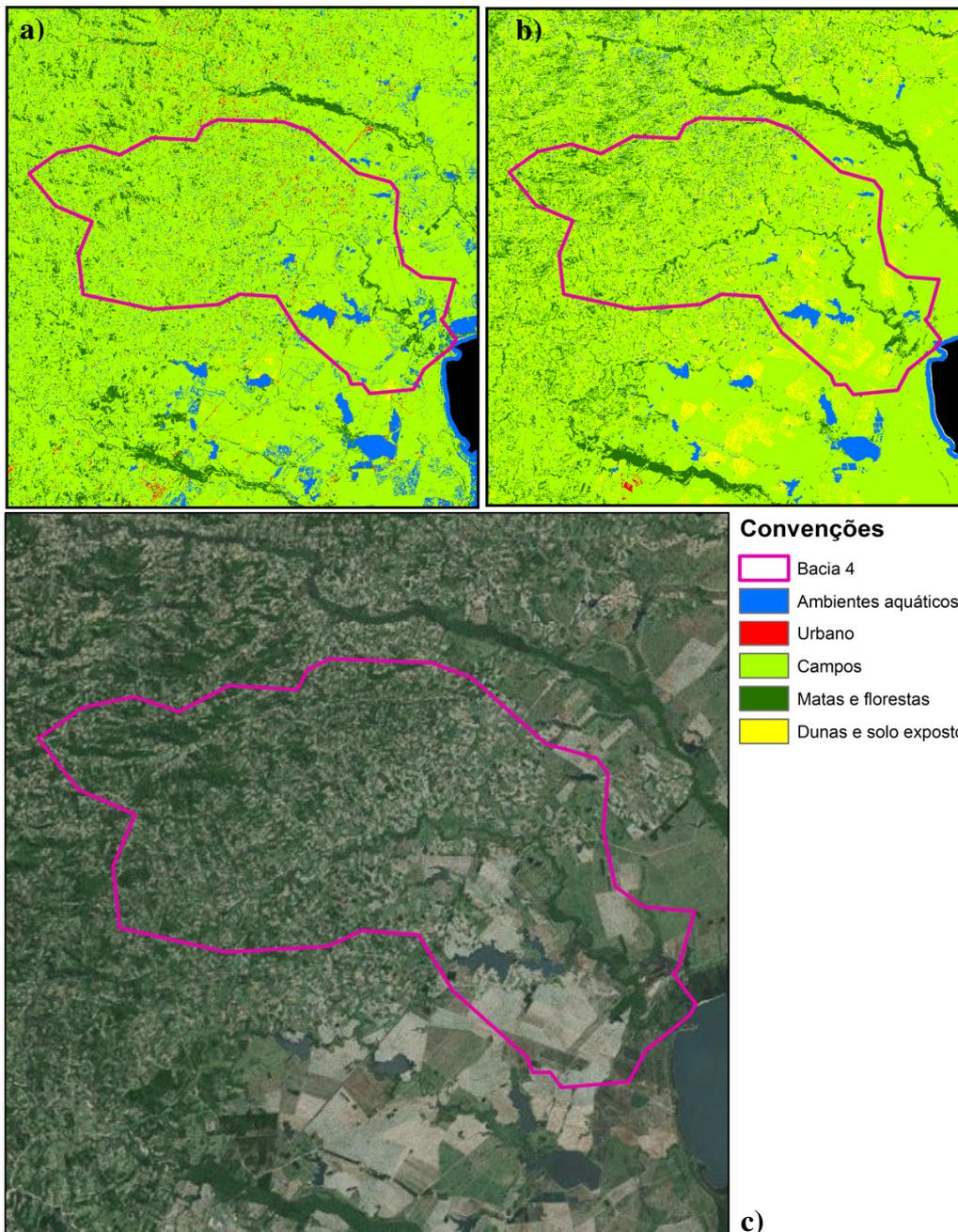


Figura 19 - Comparação entre os métodos tradicional à esquerda e novo à direita, imagem com composição colorida abaixo. Bacia 4.

Como consequência de uma variação grande no CN médio, a variação nas vazões também foi relativamente alta, 28% para um tempo de retorno de 2 anos e 22% para um tempo de retorno de dez anos.

Isso só salienta a importância de considerar a troca de dunas para solos expostos evitar o uso do método novo para ambientes litorâneos. A Tabela XVIII mostra a variação das vazões com os diferentes tempos de retorno.

**Tabela XVIII- Variação das vazões de pico para os diferentes valores de CN médio e diferentes tempos de retorno. Bacia 4.**

Resultados	TR 2	TR 10
Vazão trad. (m <sup>3</sup> /s)	252,9	452,77
Vazão nova (m <sup>3</sup> /s)	182,44	355,25
Diferença (m <sup>3</sup> /s)	70,46	97,52
%	28%	22%

#### 5.7.5. Bacia 5

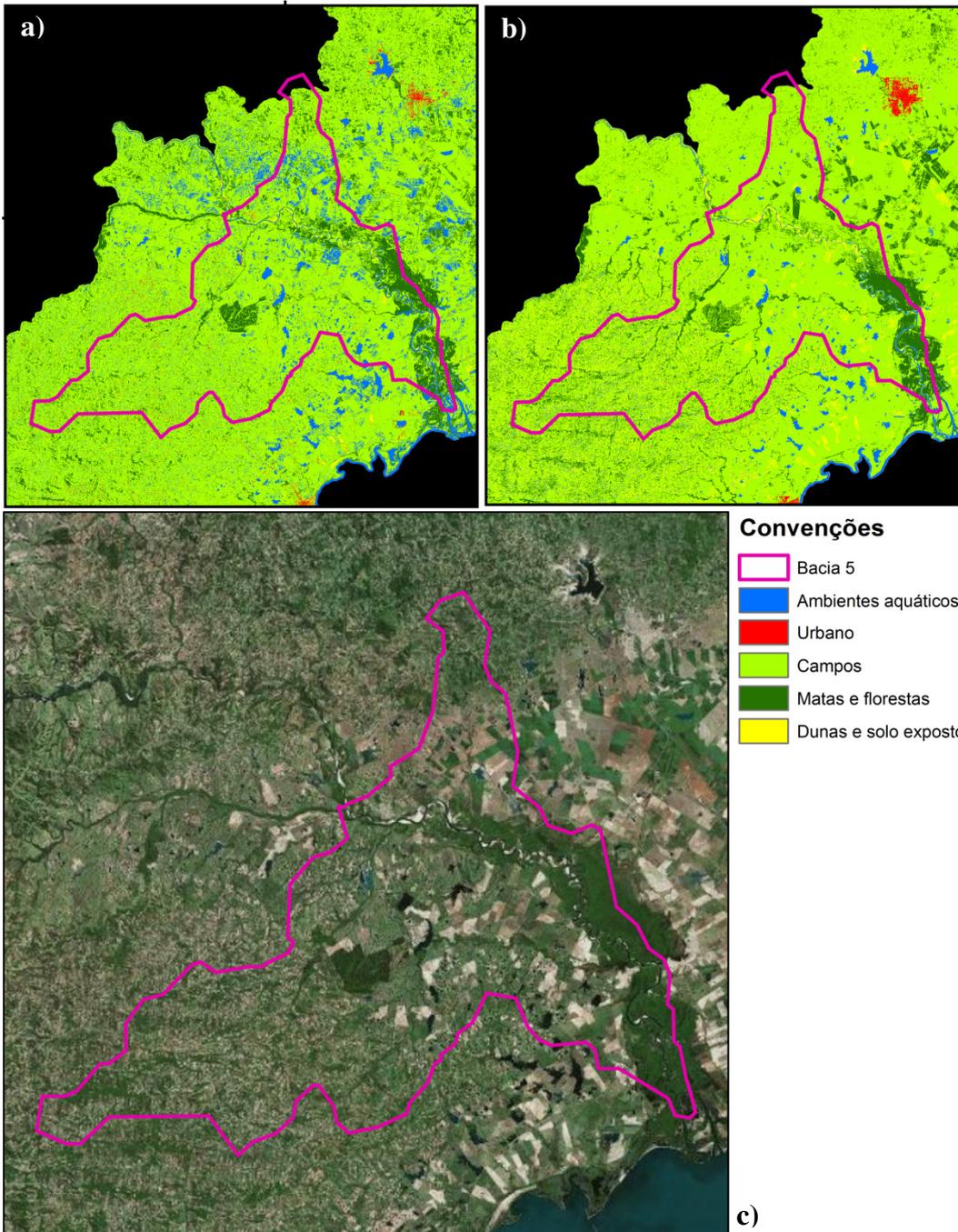
A bacia 5, a maior de todas, assim como a bacia 2 apresentou uma variação intermediária entre os CN's médios obtidos pelos dois métodos, de 4%. A Tabela XIX mostra os valores encontrados.

**Tabela XIX- Valores de CN encontrados pelos dois métodos para a bacia5.**

Área (km <sup>2</sup> )	CN trad.	CN novo	Diferença	%
1095	79,86	76,29	3,56	4%

Ao observarmos a Figura 20 chama à atenção a quantidade de água na imagem obtida pelo método tradicional. Isso acarreta um aumento significativo do CN médio.

Além disso, na imagem obtida pelo método novo pode ser observado um maior número de *pixels* amarelos, ou seja, dunas, embora nessa região não existam dunas. Isso provoca uma diminuição do CN médio da bacia. Esse problema com as dunas é o mesmo já discutido na bacia 4.



**Figura 20- Comparação entre os métodos tradicional (a) e novo (b), e imagem com composição colorida(c). Bacia 5.**

Como já observado para as bacias anteriores, um erro não tão significativo no CN médio pode provocar um erro significativo nas vazões de pico e esse erro é maior quanto menor for o tempo de retorno da chuva de projeto.

Portanto para a bacia 5 não foi diferente, resultando numa diferença entre os picos de vazão de 18% para um tempo de retorno de dois anos e 14% para um tempo de retorno de dez anos. A Tabela XX mostra os resultados.

**Tabela XX- Variação das vazões de pico para os diferentes valores de CN médio e diferentes tempos de retorno. Bacia 5.**

Resultados	TR 2	TR 10
Vazão trad. (m <sup>3</sup> /s)	390,26	674,79
Vazão nova (m <sup>3</sup> /s)	321,08	582,49
Diferença (m <sup>3</sup> /s)	69,18	92,3
%	18%	14%

### 5.8. Resumo dos Resultados

A Tabela XXI mostra o resumo dos valores obtidos para cada sub-bacia da região de estudo, permitindo assim uma comparação entre os diversos resultados.

**Tabela XXI- Resumo dos resultados obtidos para cada sub-bacia da área de estudo.**

Sub-Bacia	Tipos de uso do solo predominante	Área da bacia (km <sup>2</sup> )	Tempo de concentração (h)	CN trad.	CN novo	Diferença entre CN's	%	Chuva com TR de 2 anos e 24h de duração				Chuva com TR de 10 anos e 24h de duração			
								Vazão trad.	Vazão nova	Diferença entre vazões	%	Vazão trad.	Vazão nova	Diferença entre vazões	%
1	Urbano e campos	144	5,63	84,45	83,59	0,85	1%	203,52	195	8,5	4%	336,4	326,1	10,3	3%
2	Urbano	170	4,25	82,87	85,71	2,84	3%	273,21	315,1	41,86	15%	460,5	510	49,41	11%
3	Dunas e campos	220	14,13	82,85	81,96	0,89	1%	144,18	136,9	7,26	5%	241,4	232,2	9,2	4%
4	Floresta e campo	336	8,62	78,77	73,54	5,23	7%	252,9	182,4	70,46	28%	452,8	355,3	97,52	22%
5	Floresta e campo	1095	25,10	79,86	76,29	3,56	4%	390,26	321,1	69,18	18%	674,8	582,5	92,3	14%

Se comparados os valores de CN, na maioria dos casos o CN tradicional é maior do que o CN novo, apenas para a bacia 2 isso não ocorre. Isso pode acontecer porque o CN novo tem mais *pixels* com a classe dunas espalhado pela área de estudo, e que na verdade não seriam dunas, mas solos expostos. E como a bacia 2 é a região de Porto Alegre, onde é raro a existência de solos expostos, mais raro ainda de dunas, essa tendência não ocorre.

Além das análises mostradas até aqui, também avaliou-se a existência de alguma relação entre as diferenças dos CN's e das vazões com o tempo de concentração de cada bacia. Não foi observada nenhuma tendência entre essas variáveis, por isso não foi feita uma análise mais aprofundada sobre esse assunto.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pelo trabalho, recomenda-se utilizar o método novo como substituto do método tradicional utilizado para gerar imagens de uso do solo para a obtenção de valores médios de CN. Em situações onde as restrições em termos de prazo e recursos humanos são maiores, o método proposto traz vantagens significativas.

Para gerar essa imagem de uso do solo pelo método novo foi necessário desenvolver um algoritmo em SIG que extraiu das imagens NDVI, NDWI e noturnas as informações necessárias para desenvolver esse produto. Depois disso, seguiu-se pelo procedimento padrão de cruzamento dessa imagem com um mapa de tipos hidrológicos de solo e cálculo do CN médio.

Foi observada uma grande semelhança entre o CN médio encontrado para a área de estudo obtido pelo método novo com o método tradicional. A diferença entre os valores foi de apenas 1,8% se comparado com o CN médio obtido pelo método tradicional.

Entretanto, quando a análise foi segmentada em áreas menores dentro da área de estudo, a diferença entre os dois CN's foi maior em algumas e menor em outras, com o erro variando entre 1 e 7% para 5 áreas diferentes.

Embora a variação dos valores de CN tenha sido relativamente baixa, quando o modelo hidrológico baseado no CN médio foi rodado, percebeu-se que a diferença entre os picos de vazão obtidos com os dois CN's ficou maior do que a diferença entre os dois valores absolutos de CN. Ou seja, uma variação de 1% em termos de CN médio, resultou em uma variação de 4% na vazão de pico para uma chuva com dois anos de tempo de retorno e 3% para uma chuva com dez anos de tempo de retorno. E uma variação de 7% em termos de CN médio resultou em uma variação de 28% de pico de vazão para uma chuva de dois anos de tempo de retorno e de 22% para uma chuva com dez anos de tempo de retorno.

O valor da maior diferença encontrada, ou seja, de 28% pode ser considerado elevado se for observado isoladamente. Entretanto, esse resultado foi observado na bacia 4 onde houve o aparecimento de um grande número de *pixels* representando dunas com o método novo, o que reduz muito o valor do CN médio. Esses *pixels* se mostraram

como um erro do método, pois é sabido que naquela região não existem dunas e sim possivelmente solos não vegetados. Por isso uma das sugestões deste estudo é que o método seja adaptado para a aplicação em regiões litorâneas, onde ao invés da classe dunas, seja usada uma classe solos expostos. Essa mudança contribuiria para o aumento do CN médio, pois solos expostos não necessariamente têm uma capacidade de infiltração tão alta quanto as dunas.

Outro fato importante que deve ser analisado na bacia 4 é que o método tradicional identificou diversos *pixels* como urbanos, o que contribui para elevar o valor do CN médio. Isso porque áreas urbanas tendem a escoar a maior parte da precipitação por serem impermeabilizadas com asfalto e concreto. Esse é um erro no sentido exatamente oposto ao erro observado no método novo, o que faz com que a diferença entre os dois CN's médios seja elevada.

De qualquer maneira, vale lembrar aqui que nenhum dos dois métodos representa perfeitamente a realidade. Isso porque usamos como parâmetro de comparação uma imagem de uso do solo que tem uma confiabilidade 83% e não 100%, portanto também tem erros associados. É possível inclusive, principalmente no caso de zonas urbanas muito densas ou de alguns tipos de plantação, que o método novo possa representar melhor a realidade do que o método tradicional. E em outros casos como dunas e florestas talvez estes podem ainda ser mais bem representados pelo método tradicional. Estas possibilidades dão margem para mais pesquisas a serem desenvolvidas, conforme discutido a seguir.

## 7. RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Para próximos trabalhos envolvendo esse mesmo assunto, existe uma série de recomendações.

Uma delas já foi discutida ao longo do trabalho que seria adaptar a metodologia para áreas com dunas inserindo mais uma classe de solos expostos.

Outra sugestão que pode diminuir as incertezas do método é a utilização de um mapa de uso do solo com um nível de acuracidade maior e que seja uma representação quase ideal da realidade.

Desenvolver esse trabalho utilizando imagens do sensor mais moderno (Landsat8, que possui maior resolução radiométrica) pode trazer melhores resultados tanto na confecção da imagem de uso do solo pelo método tradicional quanto pelo método novo.

Outra maneira interessante de buscar dados reais seria utilizar dados de chuva que realmente ocorreram e sua respectiva vazão de pico medida em postos fluviométricos. Dessa maneira a comparação entre vazões seria mais confiável. Isso não foi feito nesse trabalho, pois envolve outros tipos de modelagem hidrológica mais complexa que necessitam maior número de dados e, portanto, exigiriam maior tempo de pesquisa.

Por fim, o trabalho aqui desenvolvido, depois de alguns ajustes, pode ser acoplado como um delimitador automático ao modelo IPHS1 na sua próxima versão, atualmente em desenvolvimento. O algoritmo aqui desenvolvido seria uma ferramenta do programa e no momento de informar o valor de CN, no lugar disso, o usuário entraria com as imagens Landsat e noturnas. SCHUSTER (2014) está desenvolvendo uma nova versão do programa e fazendo uma conexão deste com programas de SIG (Sistema de Informação Geográfica), o que permitirá que os projetos possam ser desenvolvidos em uma base georreferenciada e que facilitará o próximo passo de programar a entrada direta das imagens.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T., Witmer, R.E., 1976. **A Land Use and Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data.** Geological Survey Professional Paper 964. US Department of Interior, 36 pp.

COLLISCHON, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.

GAO, Boi-Cai. **NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space.** Remote Sensing Environment. Ed. 58. Pg 257-266. Elsevier Science Inc. 1996.

JENSEN, J. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres.** Tradução: José Carlos Neves Epiphânio. et al. 2.ed. São José dos Campos, SP. Prêntese, 2011. 598p.

JOVANOVIĆ, N.; GARCIA, C.L.; BUGAN, R.D.H. **Validation of remotely-sensed evapotranspiration and NDWI using ground measurements at Riverlands, South Africa.** Water SA. Vol 40.2 de abril de 2014.

LEE, L.G. HAN, K.S. **Water stress monitoring using NDWI around deserts of China and Mongolia.** Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IX. Vol. 7478. 2009.

LEIVAS, J.F.; ANDRADE, G.R.; VICENTE, E.L. **Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOT-Vegetation.** XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2013.

MELESSE, A.; SHIH, S. – Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS – ELSEVIER Computers and Electronics in Agriculture – 2002 v.37 pg.173-183.

MENSES, P.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Brasília, DF. UNB e CNPQ. Disponível em:

<<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>.

Acesso em 11 de out, 2014. 09:22.

MÜLLER, J.A. **Aspectos espaciais da infraestrutura básica na zona costeira do Rio Grande do Sul e Margens do Guaíba e sua suscetibilidade a eventos extremos.** Anais do Congresso Brasileiro de Cartografia. Gramado. RS. Agosto de 2014.

NARASIMHAN, B. **Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data.**American Society of agricultural engineersISSN.Vol.48(3). Pg. 1101-1113. 2005.

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration.<<http://ngdc.noaa.gov/eog/>> Acesso em novembro de 2014.

PICKBRENNER, K.; PEDROLLO, M.C.; RISSO, A.**Determinação do CN utilizando geoprocessamento.**Anais do XVI Simpósio da ABRH. João Pessoa. Novembro de 2005.

RICHARDS, John A. **Remote Sensing Digital ImageAnalysis: AnIntroduction.**Berlin: Springer, 1986.

RIGHETO, A. 1998 – **Hidrologia e Recursos Hídricos-** Projeto REENGE – São Carlos-SP, 840p. EESC/USP.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. e DEERING,D.W. **Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS.** Proceedings. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 3010-3017. 1974.

SCHUSTER, R. **Desenvolvimento de um Modelo Hidrológico de Transformação Chuva-Vazão e Propagação de Vazão.** *In press.* 2014.

SEOS – Science Education Through Earth Observation for high Schools. <<http://www.seos-project.eu/modules/agriculture/agriculture-c01-s03.html>>Acessoemnovembro de 2014.

SILVEIRA, V.M. **Utilização de imagens noturnas para otimização na delimitação de áreas urbanas.** XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia. Gramado, RS.2014.

TUCCI, C.E.M. ; ZAMANILLO, E.A. ; PASINATO H.D. **Sistema de Simulação Precipitação Vazão IPHS1**. IPH-UFRHS. Porto Alegre. 66p. 1989.

VIEGAS F, J.S. **O paradigma da modelagem orientada a objetos aplicada a sistemas de apoio à decisão em sistemas de recursos hídricos**. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH-UFRGS. 547p. 2000.

ZHAN, X.;HUANG, M. – ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps- **ELSEVIER**- Lawrence/ EUA mar.2004 v.19pg.875-879.