
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

ARTHUR DEBIASI

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MUDANÇA DE USO DE SOLO NO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
TUBARÃO**

PORTO ALEGRE

DEZEMBRO DE 2016

ARTHUR DEBIASI

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MUDANÇA DE USO DE SOLO NO
ESCOAMENTO SUPERFICIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
TUBARÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
SUBMETIDO AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM
ENGENHARIA AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Dornelles

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Anderson Ruhoff (IPH/UFRGS)

Prof. Dr. Fernando Dornelles (IPH/UFRGS)

Msc. Franciele Zanandrea (IPH/UFRGS)

Porto Alegre

Dezembro de 2016

Resumo

O presente trabalho buscou avaliar o impacto das mudanças históricas de uso do solo ocorridas na bacia hidrográfica do rio Tubarão sobre os regimes de vazão de rios contribuintes. A análise do histórico de mudanças de uso do solo foi feita baseada em quatro imagens de satélite obtidas nos anos de 1974, 1985, 1994 e 2005. Os mapas temáticos foram obtidos para cada imagem por classificação supervisionada pelo Método da Máxima Verossimilhança. A avaliação do impacto das mudanças de uso do solo sobre o regime de vazões dos rios foi realizada com base no parâmetro do Coeficiente de Descarga. Para tanto, foram selecionados cinco postos fluviométricos dentro da bacia do Rio Tubarão com dados disponíveis para o período de análise, definido como os quatro triênios centrados no ano de aquisição das imagens. Para cada triênio, foram estimados três indicadores baseados em permanências de vazões: média, mediana e máxima. Finalmente, postos pluviométricos com dados disponíveis foram selecionados para estimar a precipitação para os períodos de análise de cada imagem. Assim, foram estimadas as variações temporais de Coeficientes de Descarga média, mediana e máxima. Os resultados obtidos por este método foram consistentes com o que preconiza a teoria hidrológica. Houve relação histórica entre as mudanças de uso do solo e de regime de vazões. Em períodos de desflorestamento houve acréscimo dos coeficientes de descarga e decréscimo em períodos de reflorestamento. De maneira geral, observa-se que ocorreu reflorestamento ao longo das quatro décadas analisadas.

Palavras-chave: uso do solo, Hidrologia, Sensoriamento Remoto.

Abstract

The present work tried to evaluate the impact of land use changes on Tubarão river's basin over its contributing river's flow regimes. The historical land use change analysis was based on four images obtained in the years of 1974, 1985, 1994 and 2005. The thematic maps were obtained for each image by supervised classification by the Maximum Likelihood Method. The evaluation of land use impact over the flow regimes of the rivers was made based on the discharge coefficient. For this, five fluviometric stations within Tubarão river basin with available data were selected in order to estimate three indicators based on three permanence flows: mean, median and maximum. Finally, pluviometric stations with available data were selected in order to estimate the rainfall for the analysis period of each image. This way, temporal variations of mean, median and maximum discharge coefficients were estimated. The obtained results by this method were consistent with what is advocated by the hydrological theory. There was a historical relationship between land use change and flow regime. There was an increase of discharge coefficient during deforestation times and a decrease during afforestation times.

Key-words: land use, Hydrology, Remote Sensing

Sumário

1	Introdução e Relevância.....	1
2	Objetivo Geral.....	2
3	Revisão Bibliográfica	2
3.1	Técnicas de Classificação de imagens	2
3.1.1	Classificação Não-supervisionada de Imagens.....	2
3.1.2	Classificação Supervisionada de Imagens.....	2
3.2	Hidrologia.....	3
3.2.1	Ciclo Hidrológico	3
3.2.2	Bacia Hidrográfica.....	4
3.2.3	Impactos da mudança de uso do solo sobre o regime hídrico	4
4	Metodologia	6
5	Aplicação Metodológica	7
5.1	Delimitação Da Área De Estudo	7
5.2	Série Histórica de Imagens de Satélite	8
5.3	Disponibilidade de Dados e Delimitação do Período de Estudo.....	12
5.4	Mapa De Uso Do Solo	13
5.5	Dados Hidrometeorológicos.....	13
5.5.1	Fluviometria	13
5.5.2	Pluviometria	14
5.5.3	Coeficientes de descarga	15
6	Resultados.....	16
6.1	Posto Armazém Capivari (84600000).....	24
6.2	Posto Rio do Pouso (84580000).....	25
6.3	Posto Rio Pequeno (84551000).....	25
6.4	Posto Divisa de Anitápolis (84520000)	26
6.5	Posto Orleans II (84250000) e Orleans Montante (84249888).....	27
6.6	Análise generalizada	27
7	Conclusões	28
8	Referência Bibliográfica.	29

Lista de figuras

Figura 1 – Sub-bacias do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar.....	7
Figura 2 – Composição colorida de imagens do satélite Landsat 2 MSS na bacia hidrográfica do rio Tubarão em 1974.....	9
Figura 3 – Composição colorida de imagens do satélite Landsat 5 TM na Bacia hidrográfica do rio Tubarão em 1985.....	10
Figura 4 – Composição colorida de imagens do satélite Landsat 5 TM na bacia hidrográfica do rio Tubarão em 1994.....	11
Figura 5 – Composição colorida de imagens do satélite Landsat 5 TM na bacia hidrográfica do rio Tubarão em 2005.....	12
Figura 6 – Postos fluviométricos selecionados e suas respectivas áreas de drenagem.....	16
Figura 7 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas de drenagem no ano de 1974.....	17
Figura 8 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas de drenagem no ano de 1985.....	17
Figura 9 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas de drenagem no ano de 1994.....	18
Figura 10 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas de drenagem no ano de 2005.....	18
Figura 11 – Polígonos de Thiessen para os postos selecionados para o ano de 1974.....	20
Figura 12 – Polígonos de Thiessen para os postos selecionados para o ano de 1985.....	20
Figura 13 – Polígonos de Thiessen para os postos selecionados para o ano de 1994.....	21
Figura 14 – Polígonos de Thiessen para os postos selecionados para o ano de 2005.....	21
Figura 15 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para o posto Armazém Capivari (84600000).....	24
Figura 16 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para o posto Rio do Pouso (84580000).....	25
Figura 17 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para o posto Rio Pequeno (84551000).....	25
Figura 18 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para o posto Divisa de Anitápolis (84520000).....	26

Figura 19 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para os postos Orleans II (84250000) e Orleans Montante (84249888).27

Lista de tabelas e quadros

Quadro 1 – Imagens Multiespectrais de Satélite.....	8
Quadro 2 – Disponibilidade dos Postos Pluviométricos para os triênios de análise.....	14
Tabela 1 – Resultado da análise temporal da mudança de uso de solo dentro das áreas de drenagem dos postos fluviométricos.....	19
Tabela 2 – Resultados dos cálculos das vazões medianas, médias e máximas.....	22
Tabela 3 – Resultado dos Cálculos dos Coeficientes de descarga para as diferentes permanências de vazão.....	23

Lista de Siglas e Acrônimos

ANA	Agência Nacional De Águas
IAF	Índice de Área Foliar
MDT	Modelo Digital de Terreno
PBRTECL	Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

1 Introdução e Relevância

O desenvolvimento econômico e o crescimento populacional geram demandas cada vez maiores por novas fontes de recursos naturais e também pela expansão dos territórios ocupados pelo homem. Os recursos naturais vêm se tornando cada vez mais escassos, portanto, a preocupação da sociedade com a sustentabilidade das atividades humanas pode ser considerada uma das temáticas mais importantes ultimamente.

Mesmo que indiquem o progresso de uma sociedade, a expansão das fronteiras rurais e urbanas sobre os ambientes naturais é causa de diversos processos de degradação ambiental que podem afetar a qualidade dos ambientes antrópicos. Os processos de alteração de uso e de superfície do solo provocam alterações físicas e na paisagem que impactam os sistemas climático e hidrológico de uma região. A remoção da cobertura de florestas é preocupante pois a vegetação natural é conhecidamente responsável por manter o equilíbrio dos sistemas climático e hidrológico. Florestas são responsáveis por manter taxas elevadas de reciclagem da precipitação de volta para atmosfera, por meio da evapotranspiração (Aragão, 2012). Vários estudos mostram que o desmatamento é responsável pelo aumento na produção de água de uma bacia hidrográfica (Bosch e Hewlett, 1982).

Assim, se justifica a importância que os municípios brasileiros necessitam dar ao zoneamento e ao planejamento de suas bacias rurais e urbanas, visto que a expansão desregrada da ocupação humana tem potencial causador de impactos ambientais negativos e desastres ambientais. O regramento da ocupação aumenta o controle que se tem sobre os processos de degradação ambiental inerentes às mudanças de uso do solo. Portanto, tem potencial de reduzir os efeitos de eventos desastrosos como inundações e movimentos de terra e, conseqüentemente, as perdas materiais e humanas.

Neste contexto, o estudo dos históricos do uso do solo e do regime hidrológico são interessantes na avaliação dos impactos causados pela expansão da fronteira antrópica sobre os ambientes naturais. Entender como esse processo afeta o regime hidrológico das bacias rurais e urbanas é uma maneira de se demonstrar a necessidade do regramento urbano e rural.

2 Objetivo Geral

Avaliar o impacto da mudança de uso do solo sobre o regime hidrológico de rios da bacia hidrográfica do rio Tubarão.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Técnicas de Classificação de imagens

A classificação de imagens multiespectrais de Sensoriamento Remoto consiste em categorizar cada pixel da imagem em determinados grupos, ou classes, para que se identifiquem feições reais da imagem, de modo que assim se constitua um mapa temático da imagem.

Existem duas abordagens distintas de classificação de imagens multiespectrais. A classificação supervisionada utiliza amostras de treinamento definidas pelo operador para definir os parâmetros do algoritmo de classificação. Já na classificação não-supervisionada, o algoritmo promove o agrupamento dos pixels por similaridade espectral, cabendo ao operador endereçar estes grupos às suas respectivas classes.

3.1.1 Classificação Não-supervisionada de Imagens

A classificação não-supervisionada de imagens não requer que o operador defina amostras para o treinamento do algoritmo classificador. Em vez disso, cabe ao operador apenas definir em quantas classes quer que o algoritmo agrupe os pixels. E, segundo Richards (1986), ao minimizar uma função de erro previamente definida, o algoritmo constrói os agrupamentos automaticamente baseado na similaridade espectral entre os pixels. Teoricamente, não há necessidade alguma de participação do operador no procedimento. Já na prática, é mais frequente que seja o caso de os resultados serem aceitados ou rejeitados se eles atendem ou não as expectativas do operador (Tso, 2001).

3.1.2 Classificação Supervisionada de Imagens

Segundo Richards (1986), a classificação supervisionada de imagens consiste em utilizar algoritmos adequados para endereçar os pixels de uma imagem como representativos de determinados tipos de cobertura do solo, ou classes. Independentemente do algoritmo utilizado, é necessário seguir um certo procedimento durante a classificação supervisionada.

Deve-se definir o conjunto de tipos de cobertura em que se pretende segmentar a imagem, determinando o pertencimento das feições da imagem a essas classes. Então, amostras de treinamento são delimitadas na imagem para representar cada uma das classes. As amostras

de treinamento podem ser estabelecidas com base em informações obtidas em visitas de campo, voos aéreos ou por fotointerpretação da imagem. Estas amostras de treinamento servem para definir os parâmetros a serem utilizados pelo algoritmo. Este conjunto de parâmetros é conhecido como assinatura de classe. Com base nas assinaturas das classes, o algoritmo está “treinado” para definir o pertencimento dos pixels aos tipos de cobertura desejados.

3.2 Hidrologia

3.2.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é o sistema global de processos de transferência de água entre atmosfera e superfície terrestre. A energia que impulsiona este ciclo vem basicamente da energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre.

Segundo Tucci (1993), o intercâmbio entre as circulações da superfície da terra e da atmosfera, fechando o ciclo hidrológico, ocorre em dois sentidos: a) no sentido superfície-atmosfera, onde o fluxo de água ocorre fundamentalmente na forma de vapor, como decorrência dos fenômenos de evaporação e transpiração; b) no sentido atmosfera-superfície, onde as transferências de água ocorrem em qualquer estado físico, sendo mais significativas, em termos globais, as precipitações de chuva e neve.

Eventualmente, o vapor contido na atmosfera é capaz de se condensar, sob determinadas condições meteorológicas, formando micro gotículas de água que se mantêm suspensas no ar. Ao agrupamento visível destas micro gotículas é que chamados de nuvens.

A precipitação ocorre quando o complexo processo de aglutinação de crescimento das micro gotículas atinge um estágio no qual existe uma quantidade de gotas com tamanho e massa suficientes para que a força da gravidade supere as forças que sustentam as gotas no ar.

Antes de atingir o solo, a água da precipitação ainda pode ser interceptada no meio do caminho. Segundo Maidment (1992), a interceptação é definida como a série de processos que resultam no armazenamento temporário da precipitação, seja pela cobertura vegetal ou artificial, sendo que a precipitação interceptada é evaporada de volta para a atmosfera (perdas de interceptação) ou, finalmente, transmitida para a superfície do solo. A parcela da água da precipitação interceptada que é transmitida para o solo fica disponível tanto para infiltração, quanto para o escoamento superficial.

Infiltração é o processo de entrada da água proveniente da chuva para dentro do solo. A quantidade de água disponível para infiltração é controlada pelas condições da cobertura do

solo (Maidment, 1992). Ou seja, depende se há cobertura de árvores, gramíneas, mancha urbana, ou cobertura alguma do solo. Já a capacidade de movimento da água dentro do solo determina a taxa de infiltração da água no solo. Sendo que este processo é regido pelas características físicas do solo, como condutividade hidráulica e retenção de água do solo. A água que infiltra no solo, geralmente serve para a recarga de aquíferos e rios (escoamento basal).

O escoamento superficial é regido pela força da gravidade, que direciona a água dos pontos mais altos para os mais baixos vencendo o atrito contra a superfície do solo ao longo de seu caminho. Esta água vai percorrendo os caminhos preferenciais do solo até que se atinjam os canais principais de escoamento, como arroios, riachos e rios. E assim vai seguindo seu percurso de montante a jusante, até que estas águas se encontrem, geralmente com as águas dos oceanos.

Segundo Tucci (1993), a evaporação da água ocorre a todo instante, em todas etapas do ciclo da água. A energia calorífica do sol, somente é aproveitada devido ao efeito estufa, que impede que se perca totalmente o calor emitido pela terra originado pela radiação solar recebida. Ou seja, graças ao efeito estufa que há energia disponível para a evaporação da água e, portanto, para o ciclo hidrológico.

3.2.2 Bacia Hidrográfica

Segundo Tucci(1993), bacias hidrográficas são áreas de captação natural da água da precipitação que fazem o escoamento convergir para um único ponto de saída, seu exutório. O divisor de águas é a linha topográfica que separa duas bacias hidrográficas. É muito interessante conhecer seus limites pois ela é o elemento fundamental de análise da fase terrestre do ciclo hidrológico. Isto pode ser feito por meio de cartas topográficas ou, atualmente, pelo processamento de Modelos Digitais de Terreno (MDT).

3.2.3 Impactos da mudança de uso do solo sobre o regime hídrico

As mudanças na cobertura da superfície do solo tem potencial de influenciar vários processos que compõem o balanço hídrico, principalmente as mudanças de cobertura vegetal, que podem alterar as condições de precipitação, interceptação, evaporação e transpiração (Bayer, 2014).

O impacto das alterações do uso de solo sobre a precipitação sempre foi considerado controverso e de difícil detecção. Porém, há estudos recentes que demonstram que há uma clara relação entre a precipitação e o Índice de Área Foliar (IAF) (Spracklen et al., 2012). Estes estudos mostram que a precipitação gerada depende fortemente do IAF acumulado das áreas

por onde a massa de ar úmido tenha passado (Aragão, 2012). Ou seja, o desmatamento finda resultando em aumento das precipitações e o desflorestamento na redução das precipitações, mas isto não é algo que ocorre exatamente na região afetada, e sim as massas de ar que circulam por estas áreas são influenciadas pelo tipo de cobertura presente.

O impacto das mudanças de uso de solo sobre as vazões médias pode ser considerado o de conhecimento mais consolidado. Há consenso de que (a) remover cobertura de florestas promove um aumento na quantidade de água produzida em uma bacia, (b) proceder com a substituição de vegetações escassas por cobertura de florestas resulta em diminuição da quantidade de água produzida em uma bacia e (c) as respostas às alterações, ou tratamento, promovidas são altamente variáveis e, na maioria dos casos, imprevisíveis (Hibbert, 1967).

A avaliação do impacto das mudanças de uso do solo sobre as vazões máximas é um caso considerado mais complexo do que o das vazões médias. Porém, geralmente, estudos apontam que a cobertura vegetal tem potencial de reduzir os picos de vazão produzidos na bacia. Porém, nem sempre este efeito é observado em estudos experimentais, geralmente por causa do fato de a capacidade de interceptação ser limitada (Robinson et al., 1991), assim como a energia disponível para a evapotranspiração e a capacidade de infiltração do solo. Ou seja, a cobertura vegetal é mais eficiente na tarefa de reduzir os picos de vazão para eventos de menor tempo de retorno do que para eventos de maior tempo de retorno.

As vazões mínimas sofrem impactos referentes às mudanças de uso do solo semelhantes aos das vazões médias: ocorre aumento das vazões mínimas após o desflorestamento e diminuição após o reflorestamento. Além disso, é possível afirmar que aumentam o número de dias em que a vazão é baixa ou nula (Zhang et al., 2007).

4 Metodologia

A metodologia utilizada foi desenvolvida para demonstrar a influência das alterações de uso do solo dentro de uma bacia hidrográfica em seu regime hidrológico, mais especificamente no regime de vazões em seu exutório. Para tanto, optou-se por realizar uma análise multi-temporal conjunta entre as variações de uso do solo e as variações no coeficiente de descarga dos rios.

O histórico de uso do solo é obtido pela classificação automática supervisionada de um conjunto de imagens de satélite da bacia hidrográfica. É importante que estas sejam selecionadas criteriosamente, a fim de evitar utilizar imagens que prejudiquem a qualidade do produto da classificação. Alguns aspectos a serem observados durante a seleção das imagens são a cobertura de nuvens e a data de aquisição. As nuvens não só ocultam regiões da área de interesse, mas também alteram a tonalidade e a cor das feições cobertas por suas sombras. Ao lidar com séries históricas de imagens de satélite, várias modificações de paisagem ocorrem sazonalmente. Por isso, também é importante que se colem imagens da mesma época do ano.

A escolha por trabalhar com o coeficiente de descarga se deve a necessidade de considerar tanto o regime fluvial como o pluvial durante a análise do impacto das mudanças de uso do solo sobre o regime de vazões. O volume de vazão obtido a partir das vazões de permanência estimadas com base nas séries de dados fluviométricos é dividido pelo volume das chuvas obtidas pela aplicação do Método dos Polígonos de Thiessen sobre os postos pluviométricos.

Tanto a análise do regime fluvial quanto a do pluvial é feita para cada década em cada área de drenagem. Para representar uma década, são utilizados dados de três anos consecutivos: o ano de aquisição da imagem, o ano anterior e o ano posterior. Esta é uma precaução para que se tenha mais de um ano hidrológico completo na análise.

A estimativa de chuvas acumuladas dos postos é feita pelo somatório de todas as precipitações ocorridas durante os triênios de análise. O domínio espacial das chuvas acumuladas dos postos é definido pela aplicação do método dos Polígonos de Thiessen. Finalmente, é possível estimar o volume de chuvas através do somatório das médias ponderadas entre a precipitação do posto e sua área de domínio dentro da área de drenagem.

A variação dos coeficiente de descarga para cada permanência e a variação de uso do solo são, finalmente, analisadas graficamente para cada posto fluviométrico.

5 Aplicação Metodológica

5.1 Delimitação Da Área De Estudo

A área de estudo é previamente delimitada pelos limites das bacias hidrográficas do rio Tubarão - SC, conforme dados obtidos no *site* da Agência Nacional de Águas (ANA). A Figura 1 contém as cinco sub-bacias que fazem parte do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar (PBRTECL). São elas: Formadores do Rio Tubarão, Rio Braço do Norte, Rio Capivari, Rio D'Una e Complexo Lagunar, Baixo Tubarão.

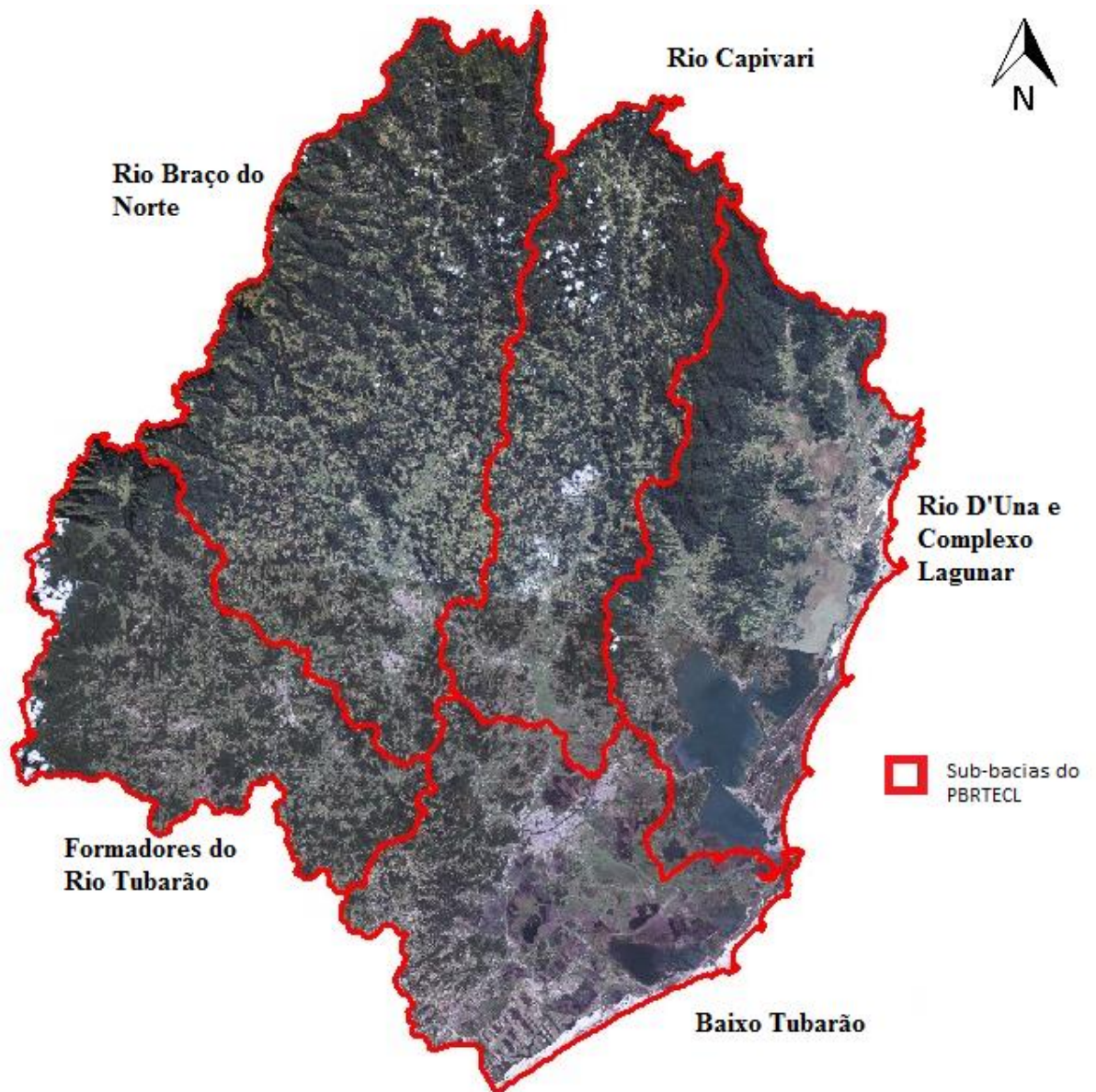


Figura 1 – Sub-bacias do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar.

5.2 Série Histórica de Imagens de Satélite

Procede-se com a seleção de um conjunto de imagens considerado adequado para melhor representar as mudanças de uso do solo perante as séries históricas de chuva e vazão. Assim, foram escolhidas quatro imagens, uma para cada década do período de dados disponíveis de chuvas e vazões, entre os anos de 1974 e 2005.

A imagem de 1974 foi obtida pelo satélite *Landsat 2 Multispectral Scanner System* (MSS) Já as demais imagens foram obtidas pelo satélite *Landsat 5 Thematic Mapper* (TM), que entrou em operação apenas na década de 80. Todas imagens são do sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) e baseadas no *datum World Geodetic System* (WGS84) e foram adquiridas na plataforma *LandsatLook Viewer* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). As imagens Landsat 2, cujos pixels tem 90 metros, possuem menor resolução espacial que Landsat 5, cujos pixels possuem 30 metros. Mesmo que imagens de menor resolução impliquem em maiores margens de erro na classificação, optou-se por trabalhar com esse satélite. Como uma das maiores cheias históricas do rio Tubarão ocorreu no ano de 1974, é muito importante para este trabalho que se obtenha uma estimativa, mesmo que grosseira, da mudança de uso do solo que vêm ocorrendo na bacia do rio Tubarão desde então.

Foram selecionadas imagens com menos de 10% de cobertura de nuvens. Sempre que possível, optou-se por imagens obtidas em épocas semelhantes do ano para que variações sazonais de uso do solo (cultivos temporários ou alternados) e de clima tivessem uma menor interferência na análise da classificação. O Quadro 1 contém o satélite, o código, a data de aquisição das imagens utilizadas. Já as Figuras de 2 a 5 mostram a composição colorida das imagens selecionadas.

Satélite	Identificador de Cena	Data
Landsat 2	LM12360791974153GMD03	15/05/1974
MSS	LM12360801974153GMD03	15/05/1974
	LT52200791985286CUB00	13/10/1985
	LT52200801985318CUB00	14/11/1985
Landsat 5 TM	LT52200791994359CUB00	25/12/1994
	LT52200801994359CUB00	25/12/1994
	LT52200792005325CUB00	21/11/2005
	LT52200802005325CUB00	21/11/2005

Quadro 1 – Imagens multiespectrais de satélite.

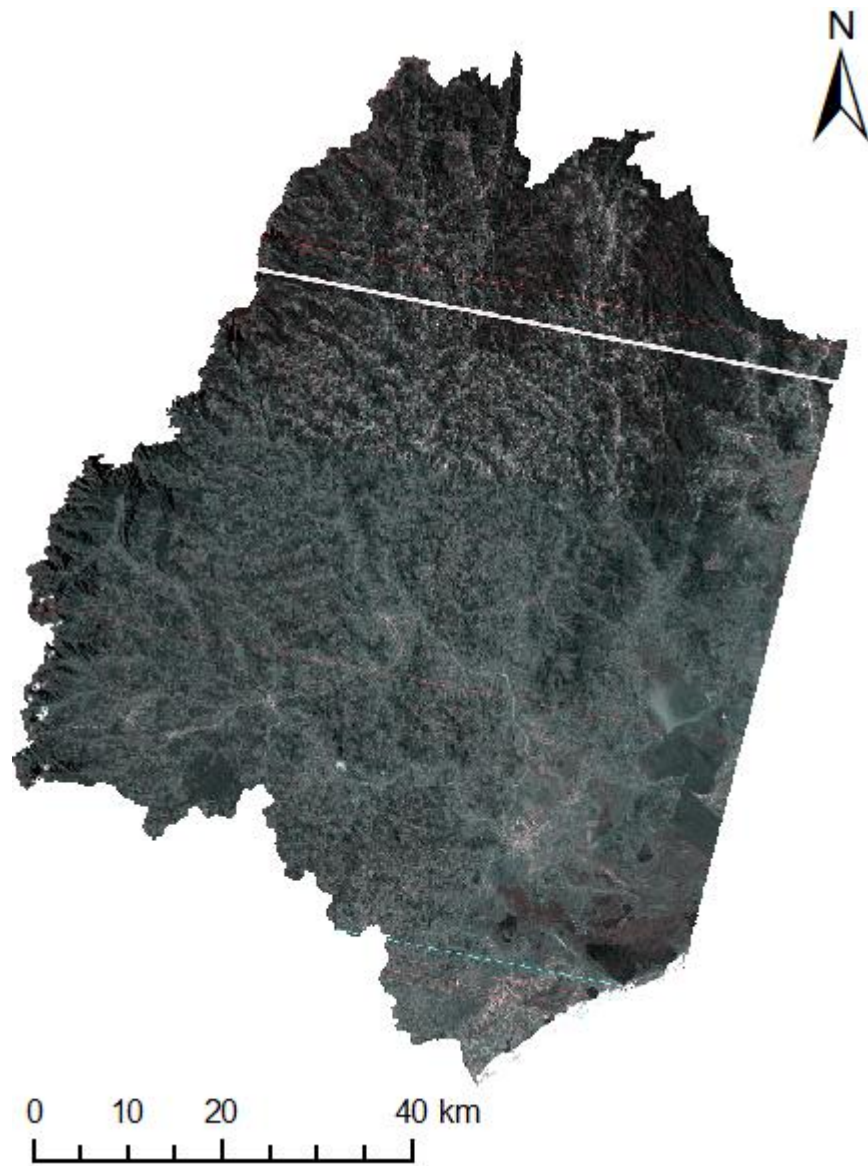


Figura 2 – Composição colorida de imagens do satélite Landsat 2 MSS na bacia hidrográfica do rio Tubarão em 1974.



Figura 3 – Composição colorida de imagens do satélite Landsat 5 TM na bacia hidrográfica do rio Tubarão em 1985.



Figura 4 – Composição colorida de imagens do satélite Landsat 5 TM na bacia hidrográfica do rio Tubarão em 1994.

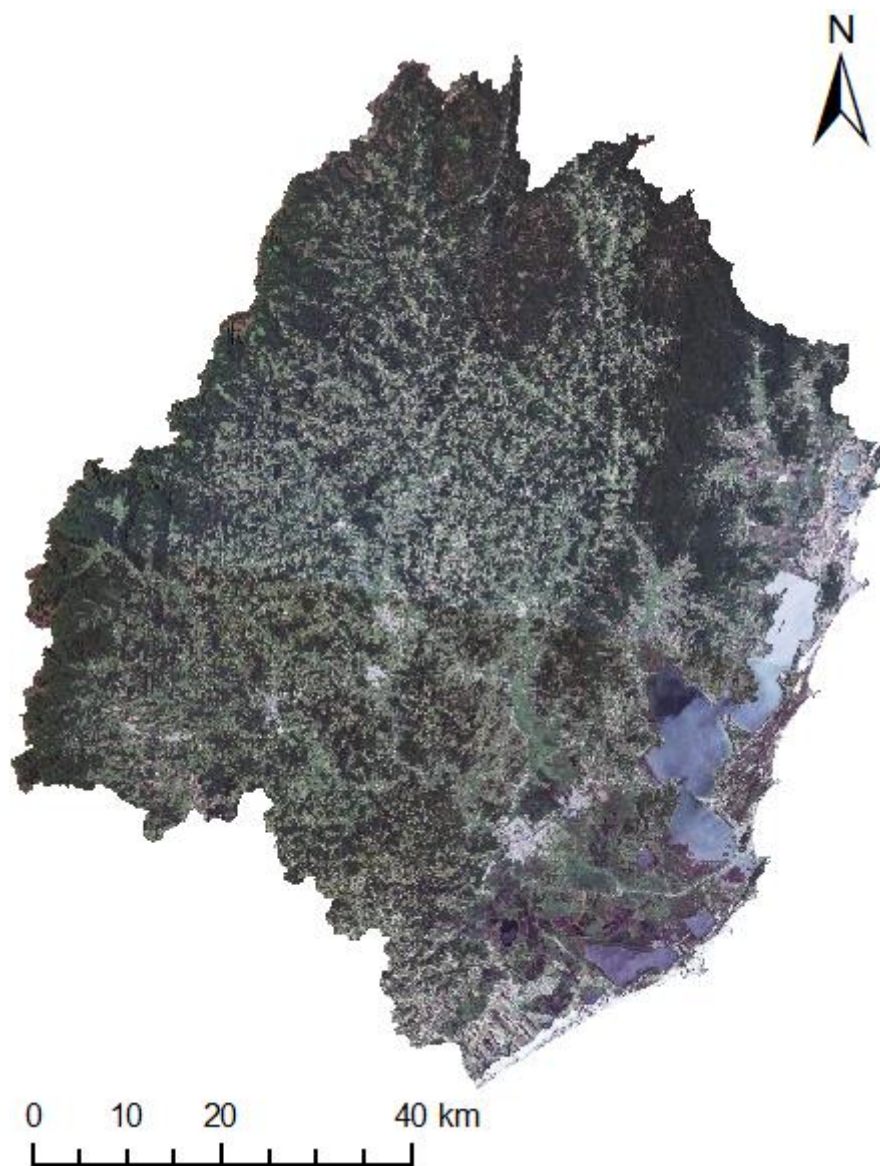


Figura 5 – Composição colorida de imagens do satélite Landsat 5 TM na bacia hidrográfica do rio Tubarão em 2005.

5.3 Disponibilidade de Dados e Delimitação do Período de Estudo

O período de estudo abrange aproximadamente quatro décadas, desde o ano de 1974 até o ano de 2005, devido a disponibilidade das séries históricas de imagens de satélite, de dados fluviométricos e de dados pluviométricos.

Mais especificamente, o período de estudo consiste em quatro triênios composto pelos anos em que as imagens de satélite escolhidas foram adquiridas, juntamente com os anos que as antecedem e as sucedem. Ou seja, para cada década, trabalhou-se com um triênio de dados hidrológicos centrado no ano em que se classificou o uso do solo. Essa abordagem considera razoável que se utilize um período de três anos de dados hidrológicos diários para representar uma década.

5.4 Mapa De Uso Do Solo

Devido às limitações de resolução espacial das imagens históricas, optou-se por trabalhar com apenas três classes: Vegetação Arbórea, Campo e Lavoura e Solo Exposto.

A classe Vegetação Arbórea inclui todas regiões identificadas visualmente como de floresta. Matas nativas, áreas de reflorestamento e até áreas de silvicultura se reúnem nesta classe. Já a classe Campo e Lavoura contém todas áreas nas quais se identificou visualmente a cobertura de vegetação rasteira. Áreas de cultivos temporários, de cultivos permanentes e áreas de campos e várzeas fazem parte desta classe. Já a classe de solo exposto contém as feições cujo formato ou tonalidade da cor permitem identificar visualmente áreas de solo exposto.

Este critério de classificação, apesar de simples, pode ser considerado satisfatório para atingir o objetivo do trabalho, uma vez que a influência destas coberturas de solo sobre o balanço hídrico são bem distintas. Além disso, uma maior quantidade de classes não seria necessária para atingir os objetivos do trabalho.

A classificação supervisionada das imagens foi feita pelo método da máxima verossimilhança. Para tanto, foram utilizadas as ferramentas da extensão *Image Classification* do *software* ArcGIS 10.1. Alguns cuidados foram tomados durante o processo de escolha e delimitação das amostras, com o intuito de minimizar a confusão entre as classes e otimizar os resultados da classificação. As amostras compreendiam regiões homogêneas da imagem onde se localizavam os objetos que melhor representassem visualmente suas classes, sendo distribuídas espacialmente de maneira a cobrir toda a imagem.

5.5 Dados Hidrometeorológicos

5.5.1 Fluviometria

Séries históricas de postos fluviométricos localizados na área de estudo foram analisadas de acordo com a disponibilidade de dados. Basta 6 dados faltantes em apenas um mês para que o ano em questão seja desconsiderado da análise. Foram selecionados os postos cujos dados estivessem disponíveis, por esse critério, em cada um dos anos de todos triênios de análise.

A partir dos postos selecionados, foram estimadas as vazões estatísticas para cada posto, para cada triênio de análise. São três permanências das vazões estatísticas: vazão média, vazão mediana e vazão máxima (permanência de 10% do tempo). Por fim, as vazões obtidas foram utilizadas para obter os volumes de vazão utilizados no cálculo dos coeficientes de descarga dos rios nos postos analisados.

5.5.2 Pluviometria

As séries históricas de postos pluviométricos localizados na área de estudo foram analisadas de maneira análoga aos dados fluviométricos, bastando que houvessem 6 dados faltantes em um mês de um ano para que o posto em questão fosse desconsiderado. O Quadro 2 mostra a disponibilidade anual de dados para os postos pluviométricos localizados na área de estudo. Foram selecionados postos cujos dados sejam considerados disponíveis em todos os anos de cada triênios de análise.

Triênio			
1974	1985	1994	2005
Código dos Postos Pluviométricos Disponíveis			
2748005	2748017	2748018	2748017
2749007	2748018	2749007	2748018
2749012	2749007	2749020	2749007
2749027	2749012	2749027	2749012
2848000	2749027	2848006	2749020
2849000	2848000	2849001	2848000
2849001	2848006	2849002	2848006
2849002	2849000	2849008	2848009
2849008	2849002	2849020	2849001
2849009	2849008	2849021	2849008
2849013	2849009	2849022	2849009
	2849011	2849027	2849020
	2849018	2849028	2849022
	2849020	2849030	2849027
	2849021		2849028
			2849029
			2849030
			2849031

Quadro 2 – Disponibilidade dos postos pluviométricos para os triênios de análise.

A partir dos postos selecionados, foram definidos os domínios de cada posto na estimativa da distribuição espacial da precipitação. Para tal, utilizou-se o Método dos Polígonos de Thiessen. Mais especificamente, utilizou-se a ferramenta de Criação de Polígonos de Thiessen do *software* ArcGIS 10.1. A base de coordenadas geográficas dos postos foi disponibilizada pelo *site* da Hidroweb da ANA.

A partir de MDT do satélite *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), as áreas de drenagem foram delimitadas com exutório nos postos fluviométricos, através das ferramentas da extensão *ArcHydroTools* do *software* ArcGIS.

O domínio espacial das precipitações dos postos pluviométricos foi definido por meio do Método dos Polígonos de Thiessen, também no *software* ArcGIS.

Por fim, os polígonos de Thiessen foram segmentados pelos polígonos das áreas de drenagem. Assim, os polígonos resultantes desta segmentação representam distribuição espacial das precipitações estimadas nos postos dentro de suas áreas de drenagem.

Os volumes de precipitação de cada posto são obtidos pelo somatório dos produtos entre a precipitação e a área de domínio de cada posto dentro da área de drenagem em questão. O somatório dos volumes de precipitação dos postos localizados dentro de uma determinada área de drenagem é o volume de precipitação utilizado no cálculo dos coeficientes de descarga.

5.5.3 Coeficientes de descarga

Foram estimados, para cada posto e para cada triênio três coeficientes de descarga, baseados nas vazões médias, medianas de máximas. Os coeficientes de descarga foram estimados pela razão entre o volume de água equivalente a três anos de vazão e o volume de água equivalente a três anos de precipitação.

6 Resultados

A Figura 6 apresenta os postos fluviométricos utilizados e suas respectivas áreas de drenagem.

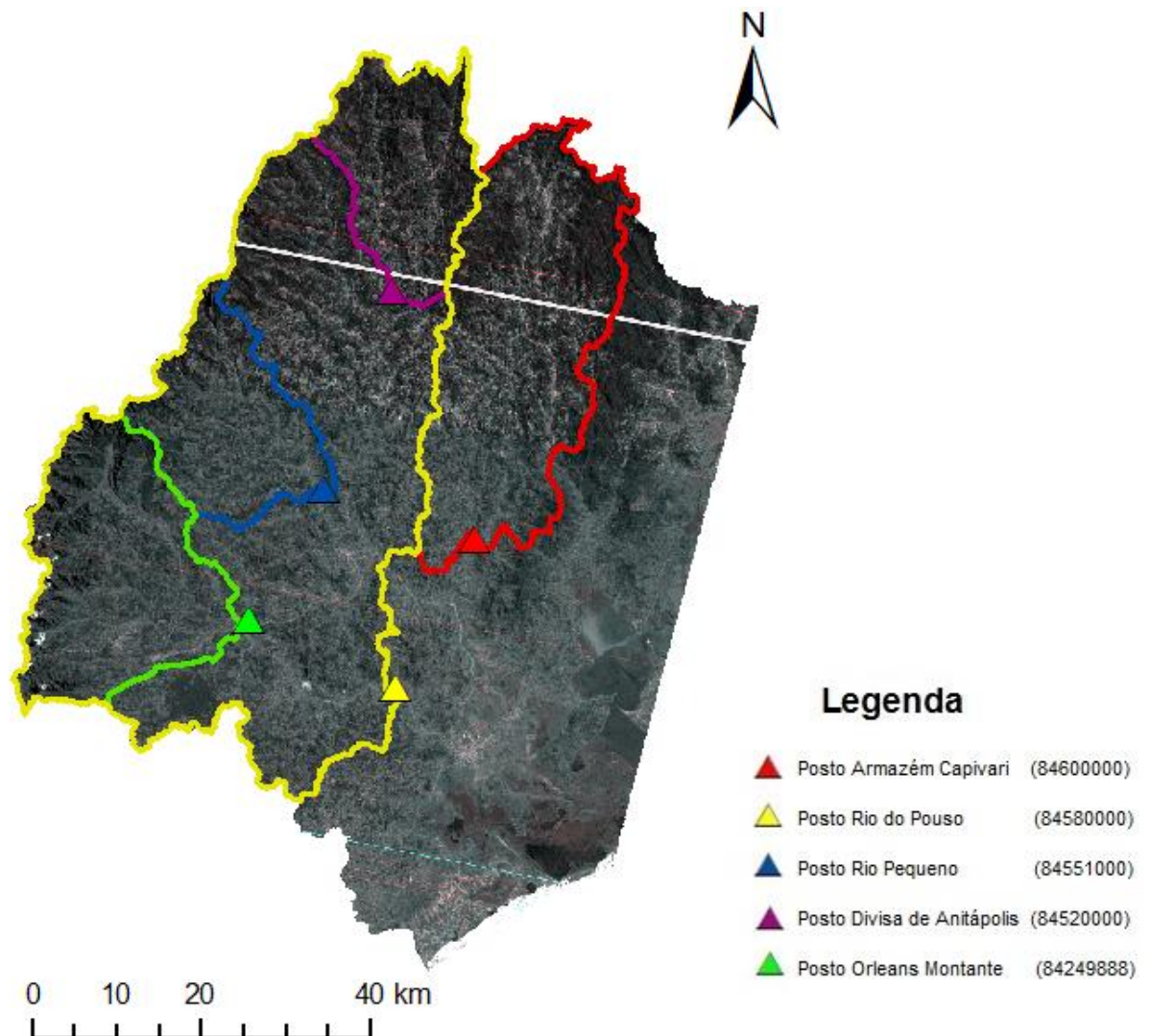


Figura 6 – Postos fluviométricos selecionados e suas respectivas áreas de drenagem.

As Figuras de 7 a 10 mostram os mapas temáticos resultantes da classificação de uso e cobertura do solo das áreas de drenagem para os anos de 1974, 1985, 1994 e 2005. Como são relativamente muito pequenos, percentuais de cobertura de solo exposto foram considerados irrelevantes e não farão parte da análise, sendo a imagem reclassificada e a representação Outros Usos sendo composta pelas classes de Campo e Lavoura e Solo Exposto.

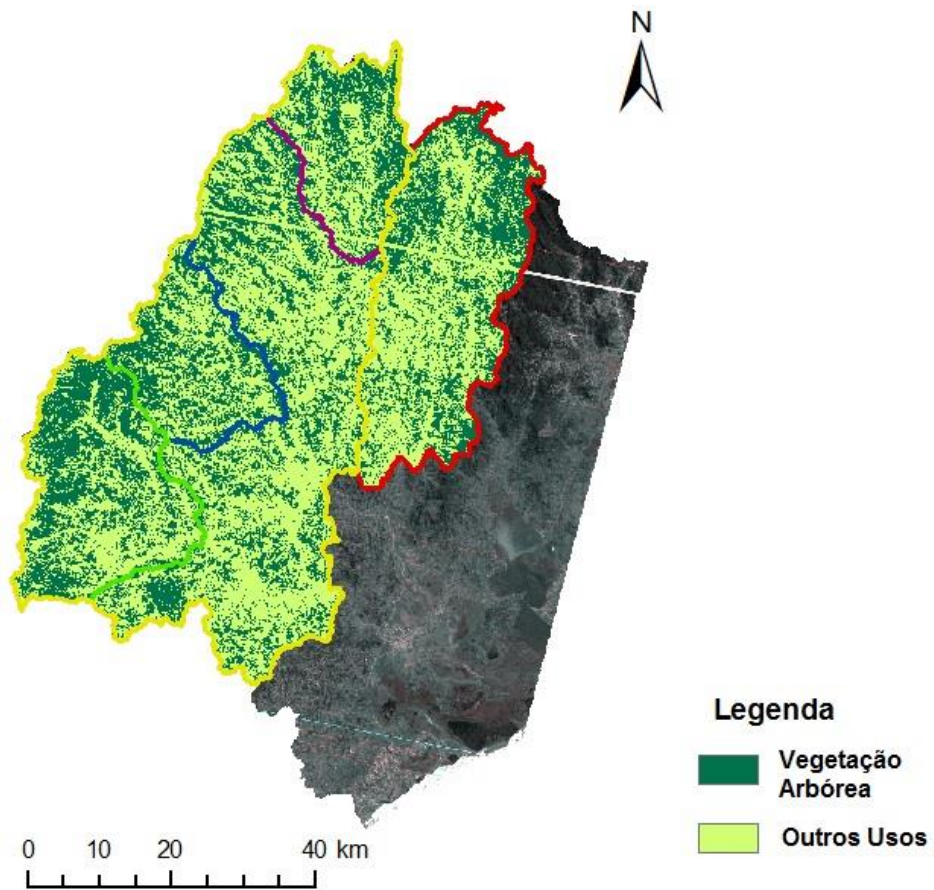


Figura 7 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas de drenagem no ano de 1974.

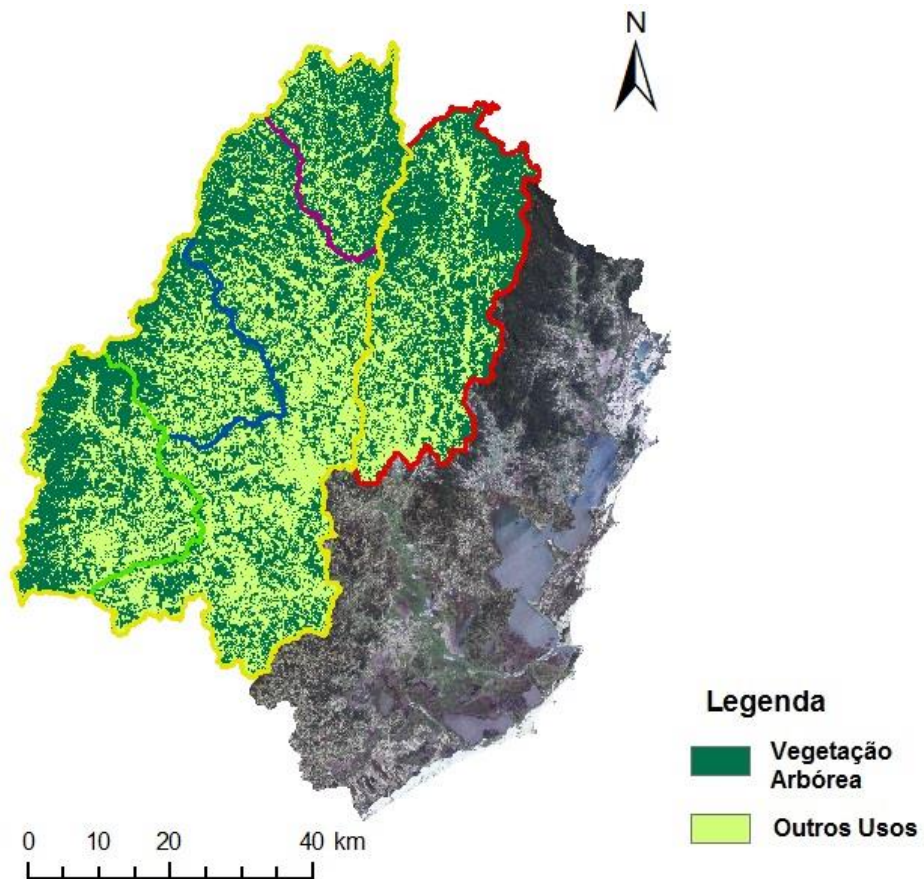


Figura 8 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas de drenagem no ano de 1985.

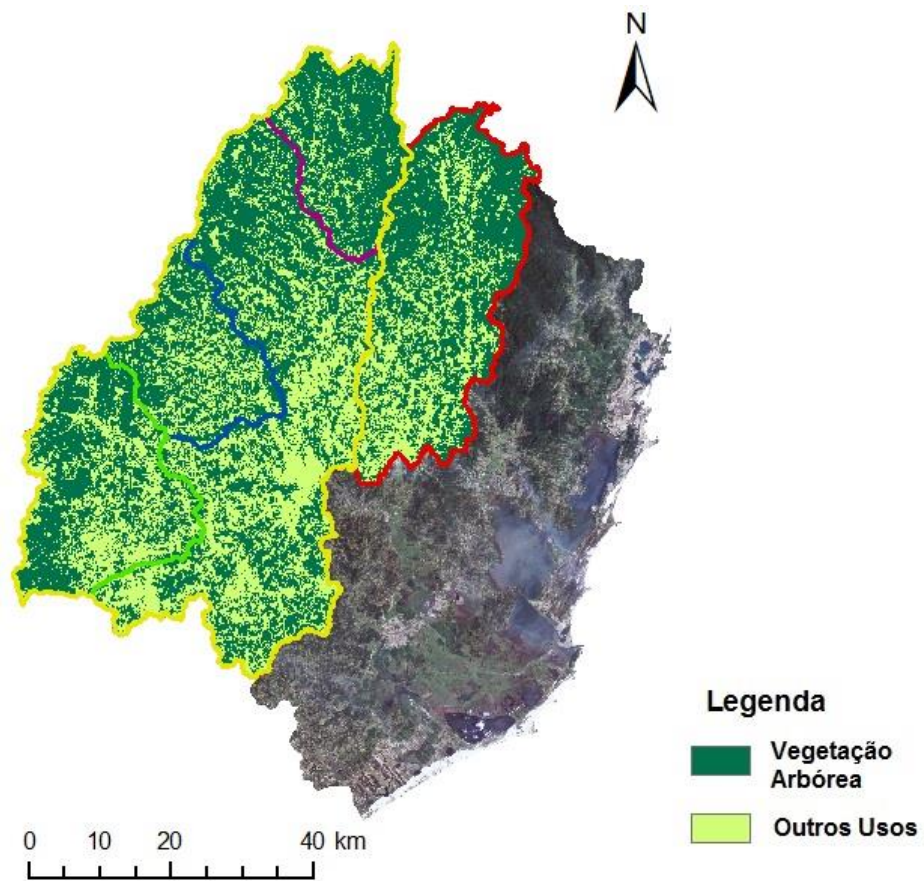


Figura 9 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas de drenagem no ano de 1994.

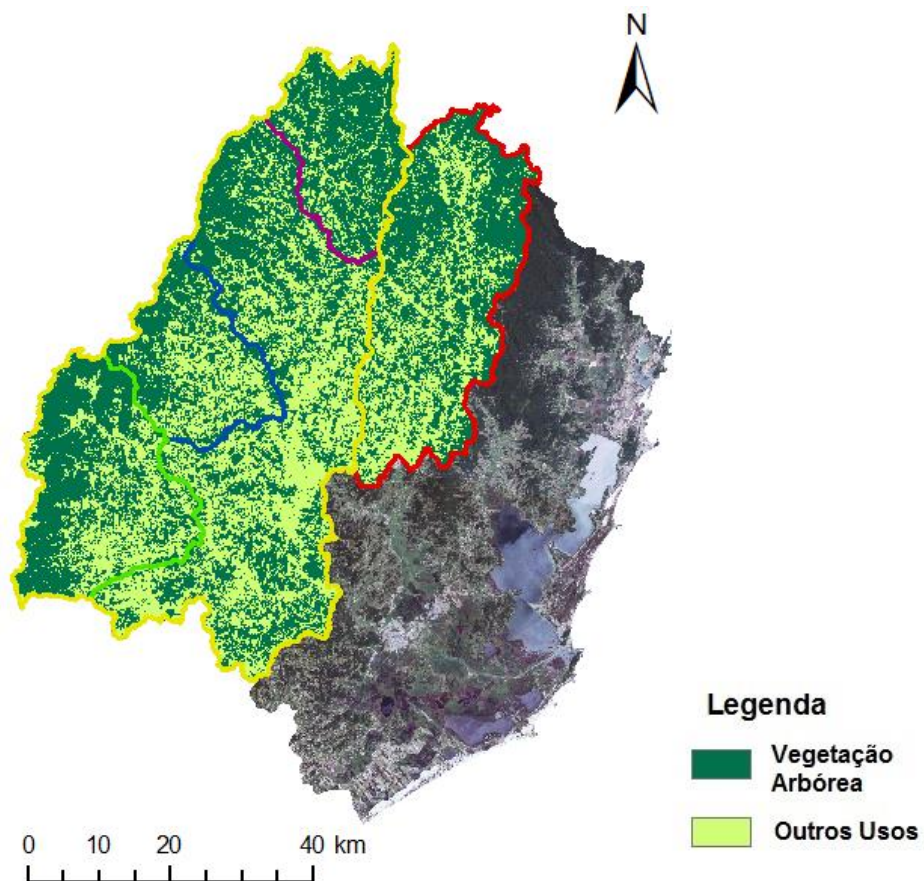


Figura 10 – Mapa de uso e ocupação do solo das áreas de drenagem no ano de 2005.

A Tabela 1 contém os percentuais de uso de solo obtidos para cada classificação dentro das áreas de drenagem dos postos pluviométricos.

Código do Posto	Ano	Vegetação Arbórea (%)	Campo e Lavoura (%)	Solo Exposto (%)
84600000	1974	56,92	33,34	9,74
	1994	64,68	31,37	3,95
	2005	60,65	33,79	5,56
84580000	1974	49,18	39,62	11,19
	1985	50,63	42,91	6,46
	1994	58,74	36,32	4,94
	2005	57,61	32,26	10,13
84551000	1974	54,59	38,36	7,04
	1985	50,01	44,00	5,99
	1994	52,80	44,21	2,99
	2005	56,58	38,59	4,83
84520000	1974	48,88	37,71	13,41
	1985	68,24	30,10	1,66
	1994	79,45	19,00	1,55
	2005	76,60	21,19	2,21
84289998 e 84250000	1974	51,12	36,82	12,07
	1985	56,30	39,44	4,26
	1994	60,17	34,25	5,58
	2005	63,99	24,26	11,56

Tabela 1 – Resultado da análise temporal da mudança de uso de solo dentro das áreas de drenagem dos postos pluviométricos.

As Figuras de 11 a 14 apresentam os resultados da aplicação do Método dos Polígonos de Thiessen para os postos pluviométricos selecionados.

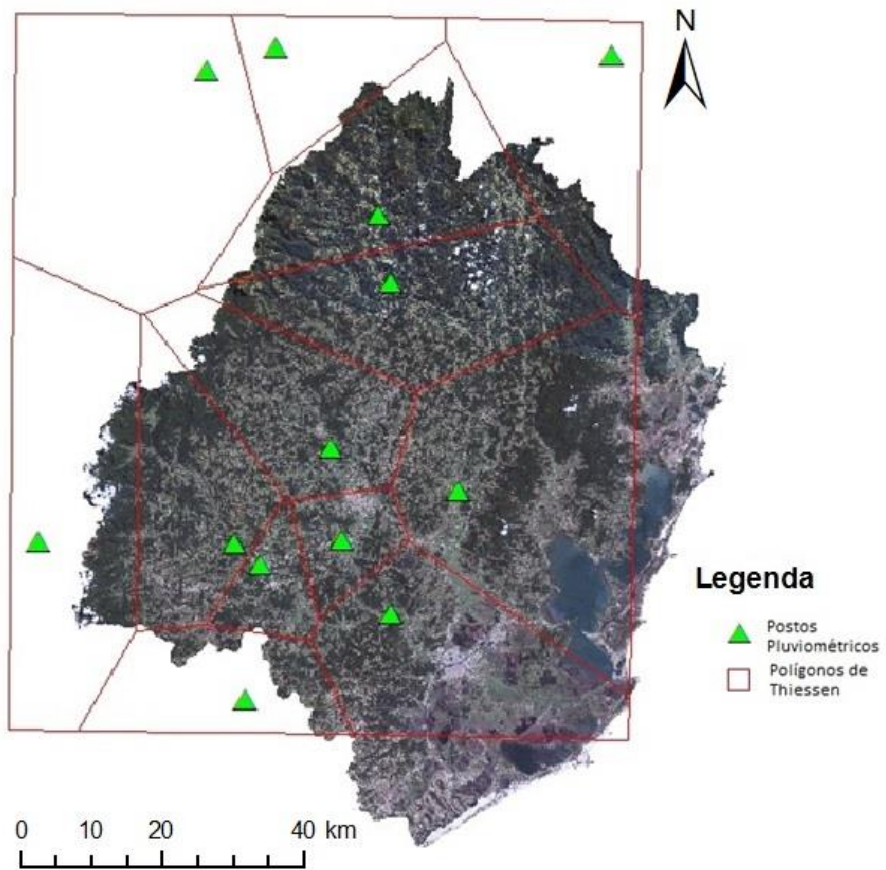


Figura 11 – Polígonos de Thiessen Para os postos selecionados para o ano de 1974.

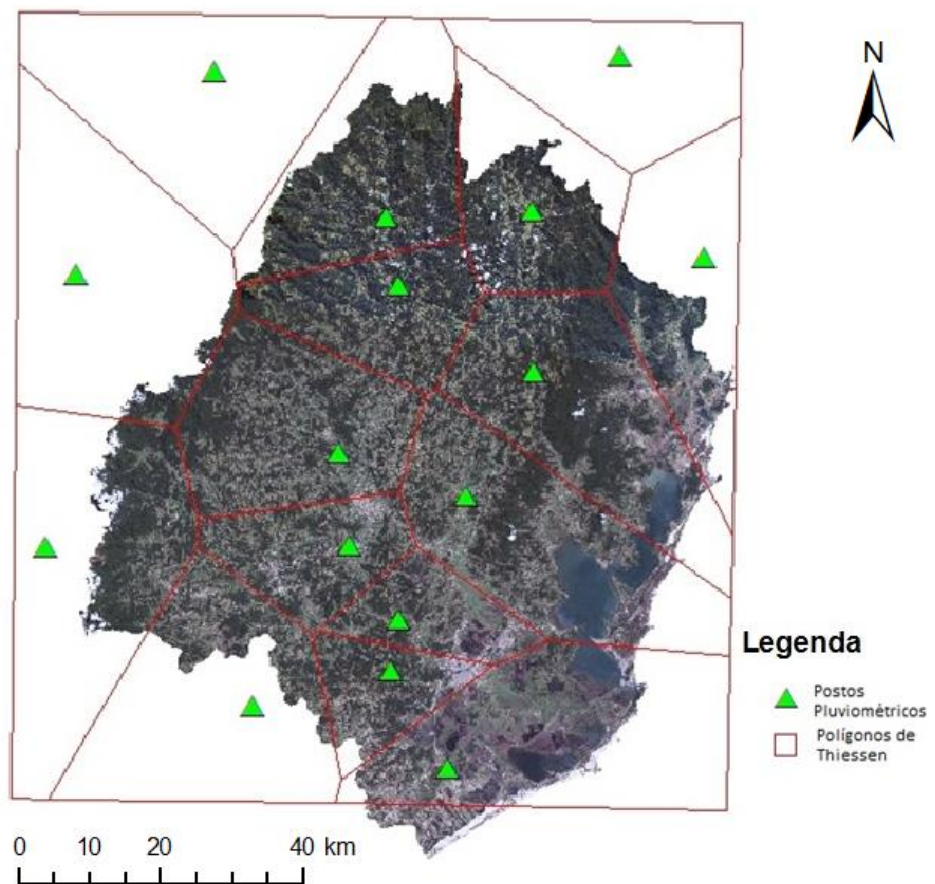


Figura 12 – Polígonos de Thiessen para os postos selecionados para o ano de 1985.

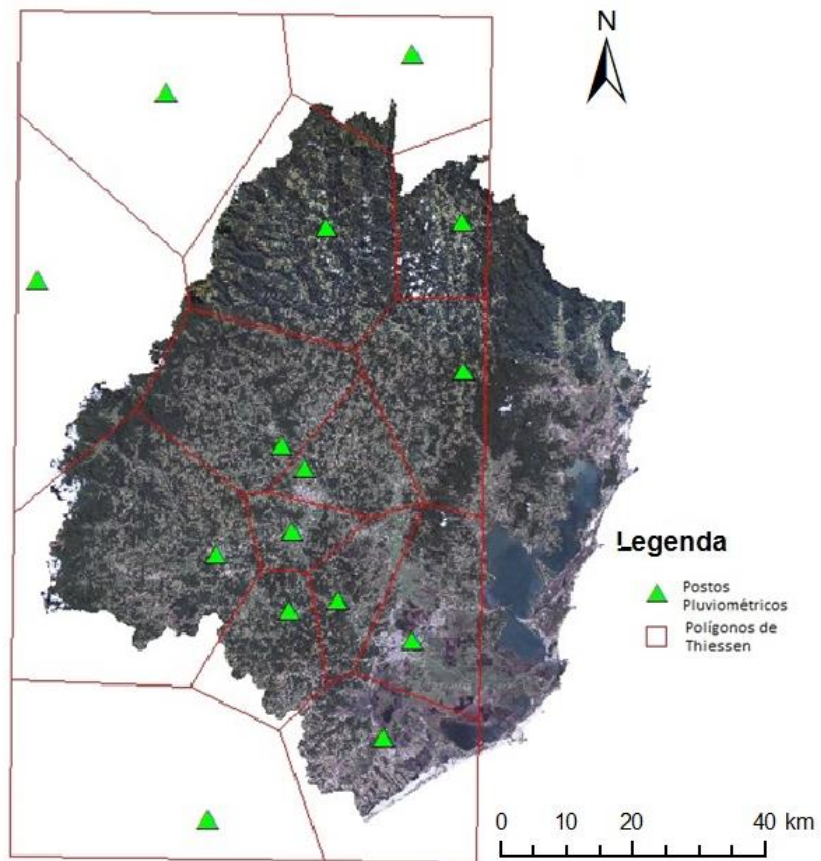


Figura 13 – Polígonos de Thiessen para os postos selecionados para o ano de 1994.

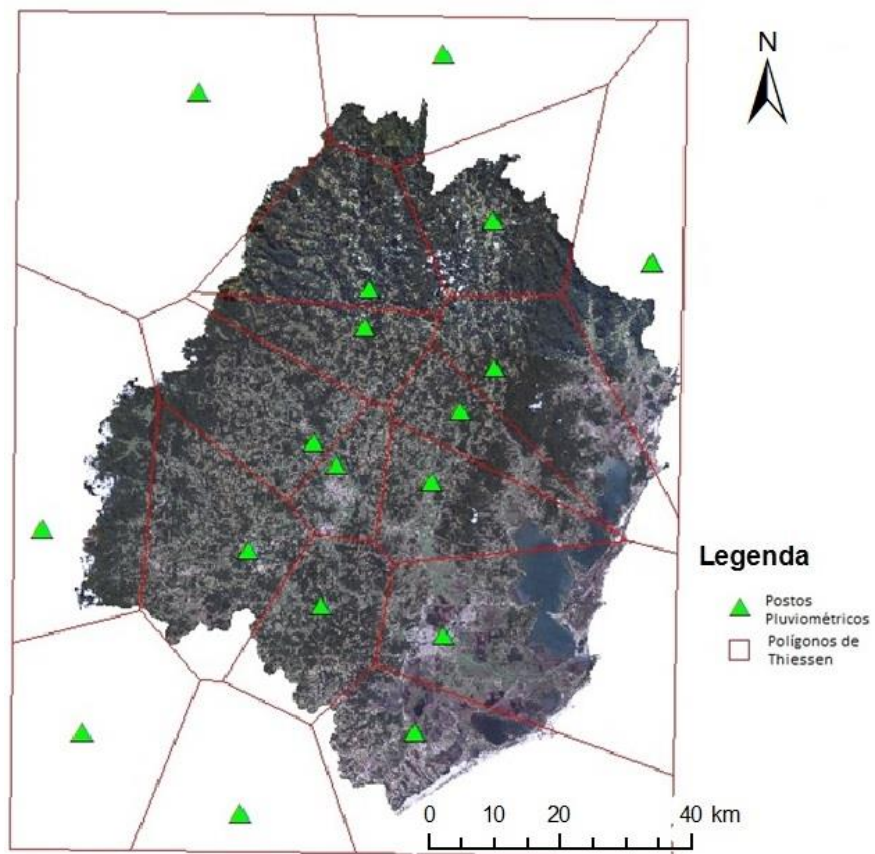


Figura 14 – Polígonos de Thiessen para os postos selecionados para o ano de 2005.

Os resultados do cálculo das vazões de permanência consta na Tabela 2. Os resultados das estimativas dos coeficientes de descarga, calculados com base nas vazões de permanência e nas precipitações, consta na Tabela 3.

Código do Posto	Ano	Vazão Média (m ³ /s)	Vazão Mediana (m ³ /s)	Vazão Máxima (m ³ /s)
84600000	1973	21,87	19,46	31,70
	1994	20,52	17,01	31,45
	2006	11,76	11,10	18,91
84580000	1973	78,11	60,83	116,31
	1985	83,78	69,91	125,65
	1994	70,18	54,56	132,43
	2005	57,69	53,09	116,62
84551000	1973	12,62	10,88	20,39
	1985	17,23	15,38	25,89
	1994	13,87	9,65	27,69
	2005	8,62	7,78	15,09
84520000	1973	11,96	10,81	16,64
	1985	10,33	10,51	13,79
	1994	12,57	10,63	20,97
	2005	12,41	11,52	13,95
84250000	1973	21,28	14,70	37,05
	1985	16,12	16,59	28,00
	1994	17,12	11,27	29,80
	2005	8,69	8,94	19,32

Tabela 2 – Resultados dos cálculos das vazões medianas, médias e máximas.

Código do Posto	Área (km ²)	Ano	Volume de Chuva (m ³)	Vazão Mediana		Vazão Média		Vazão Máxima	
				Volume (m ³)	Cd	Volume (m ³)	Cd	Volume (m ³)	Cd
84600000	840,7	1973	4126292353	613690560	0,1487	689746720	0,1672	999822074	0,2423
		1994	4675640145	536294909	0,1147	647034433	0,1384	991652358	0,2121
		2006	3802354390	350049600	0,0921	370881117	0,0975	596386473	0,1568
84580000	2,736,0	1973	11252639100	1918457870	0,1705	2463178226	0,2189	3668027846	0,3260
		1985	12696052379	2204550255	0,1736	2642080706	0,2081	3962359011	0,3121
		1994	14729320300	1720737084	0,1168	2213324691	0,1503	4176332978	0,2835
		2005	13028008352	1674253146	0,1285	1819300839	0,1396	3677810629	0,2823
84551000	379,8	1973	1449739100	343024325	0,2366	397893879	0,2745	642881985	0,4434
		1985	1584977100	484876249	0,3059	543217130	0,3427	816613020	0,5152
		1994	1993569800	304432256	0,1527	437309752	0,2194	873119414	0,4380
		2005	1778031100	245417851	0,1380	271977829	0,1530	475815168	0,2676
84520000	374,2	1973	1989153100	341050802	0,1715	377028998	0,1895	524893068	0,2639
		1985	2133721200	331520623	0,1554	325609901	0,1526	434879863	0,2038
		1994	2448716600	335379053	0,1370	396463564	0,1619	661249371	0,2700
		2005	1999517210	363376461	0,1817	391350872	0,1957	439885295	0,2200
84250000 e 84249998	596,4	1973	1514487200	463579200	0,3061	671103600	0,4431	1168408800	0,7715
		1985	2502594000	523203369	0,2091	508451579	0,2032	883008000	0,3528
		1994	2801841300	355506274	0,1269	539909110	0,1927	939772800	0,3354
		2005	2628522200	281821149	0,1072	274151268	0,1043	609323628	0,2318

Tabela 3 – Resultado dos cálculos dos coeficientes de descarga para as diferentes permanências de vazão.

Os gráficos de cada posto serão analisados separadamente, para que então se proceda para a análise geral dos postos. Há um consenso de que o desflorestamento de bacias hidrográficas promovem vários efeitos que afetam as parcelas do balanço hídrico, de modo que se espera que ocorram maiores vazões após o desflorestamento, e menores vazões após o reflorestamento. Por isso, é de se esperar que os resultados da presente análise tenham certa coerência neste sentido, havendo crescimento dos coeficientes de descarga durante períodos de desflorestamento e diminuição durante períodos de reflorestamento. As Figuras de 15 a 19 apresentam os resultados da análise das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de uso de solo para cada as áreas de drenagem dos postos fluviométricos. Seguem as análises isoladas de cada posto.

6.1 Posto Armazém Capivari (84600000)

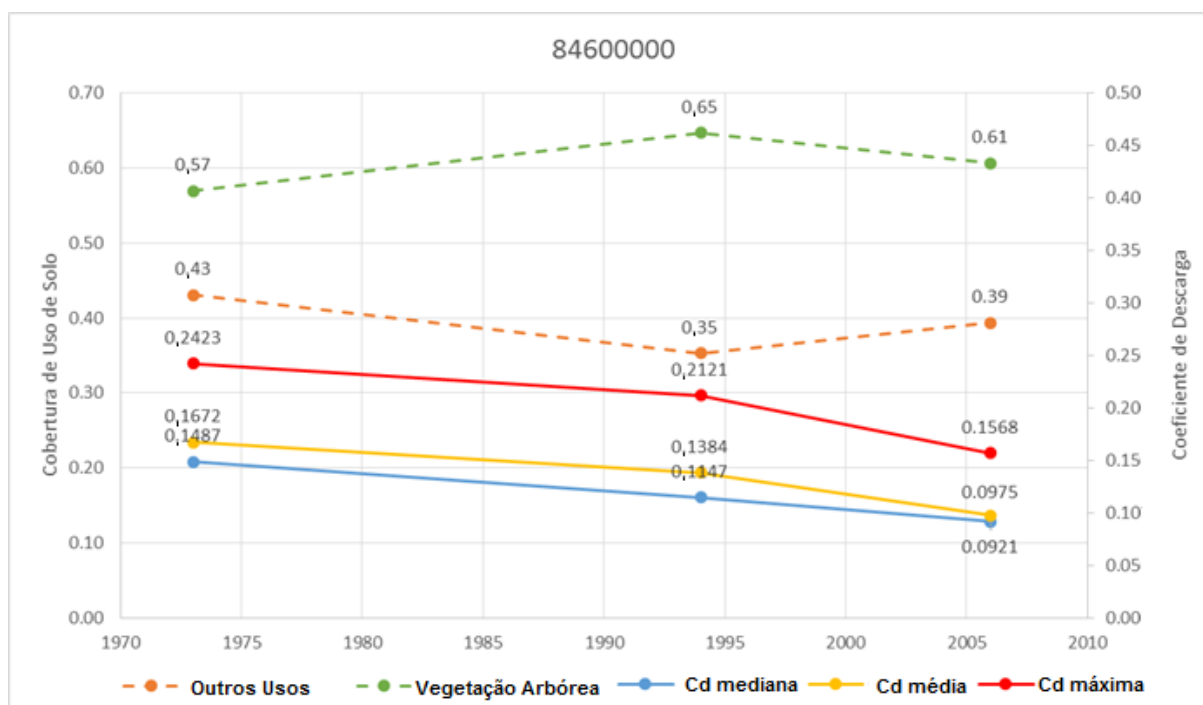


Figura 15 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para o posto Armazém Capivari (84600000).

Os coeficientes de descarga deste posto sofreram reduções sensíveis nas três décadas analisadas para as três vazões. Ocorreu um reflorestamento na área de drenagem deste posto nas duas primeiras décadas, seguido de um leve desflorestamento ocorrido na última década. Assim, os resultados da última década estão incoerentes, já que se espera a ocorrência de um aumento dos coeficientes de descarga devido ao desflorestamento.

6.2 Posto Rio do Pouso (84580000)

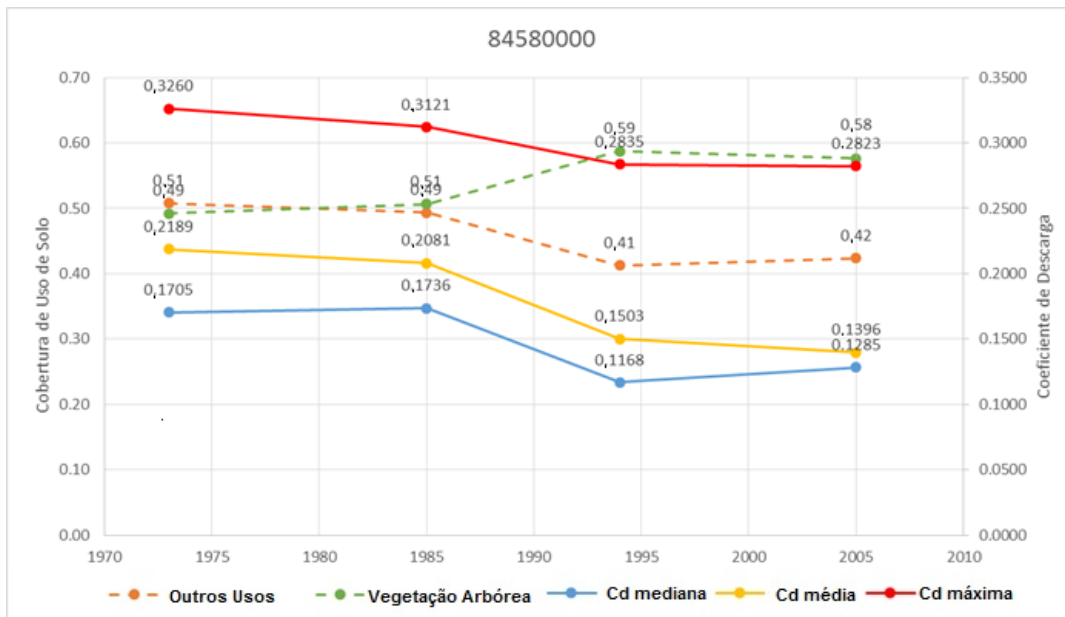


Figura 16 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para o posto Rio do Pouso (84580000).

A área de drenagem deste posto é reflorestada durante as duas primeiras décadas de análise, seguindo de uma mudança percentual irrelevante na última década. Durante a época de reflorestamento, todos os coeficientes de descarga foram reduzidos, a não ser pela ocorrência de um pequeno acréscimo no coeficiente de descarga mediano durante a primeira década.

6.3 Posto Rio Pequeno (84551000)

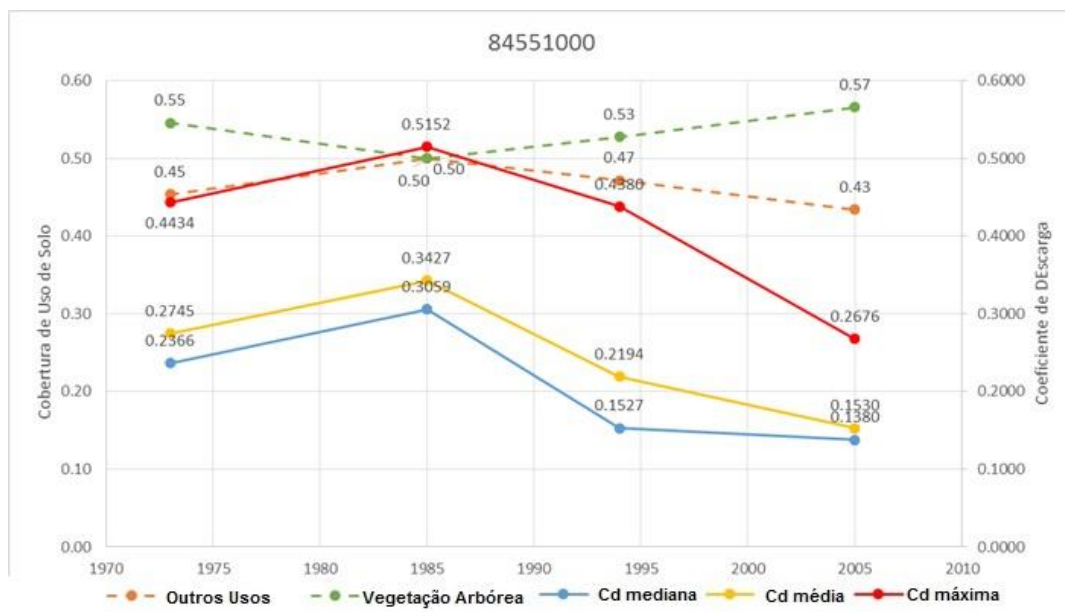


Figura 17 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para o posto Rio Pequeno (84551000).

Na primeira década, esta área de drenagem passa por um desmatamento considerável, e nas demais décadas por um reflorestamento também considerável. Os coeficientes de descarga variaram sensivelmente ao longo das décadas. Sendo as variações positivas durante a época de desflorestamento e positivas durante a época de reflorestamento. Vale salientar que esta área de drenagem fica mais a montante na bacia, em uma região de altas declividades.

6.4 Posto Divisa de Anitápolis (84520000)

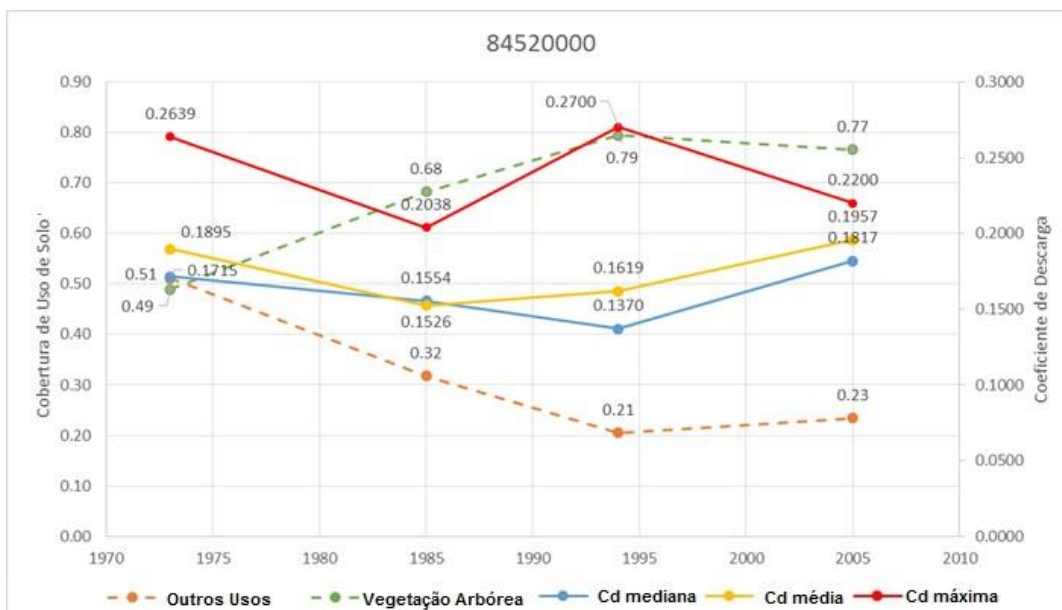


Figura 18 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para o posto Divisa de Anitápolis (84520000).

Há um grande reflorestamento na área de drenagem deste posto durante as duas primeiras décadas de análise, com um incremento de 30% da área da bacia. Já durante a terceira década, ocorre uma redução pequena na cobertura de vegetação arbórea. Todos os coeficientes de descarga diminuem durante a primeira década de reflorestamento. Já na segunda década de reflorestamento, os coeficientes de descarga médio e máximo sofrem aumento, enquanto o coeficiente de descarga mediano sofre a esperada redução. Na década de desflorestamento, todos coeficientes de descarga sofrem aumento, como se espera.

6.5 Posto Orleans II (84250000) e Orleans Montante (84249888)

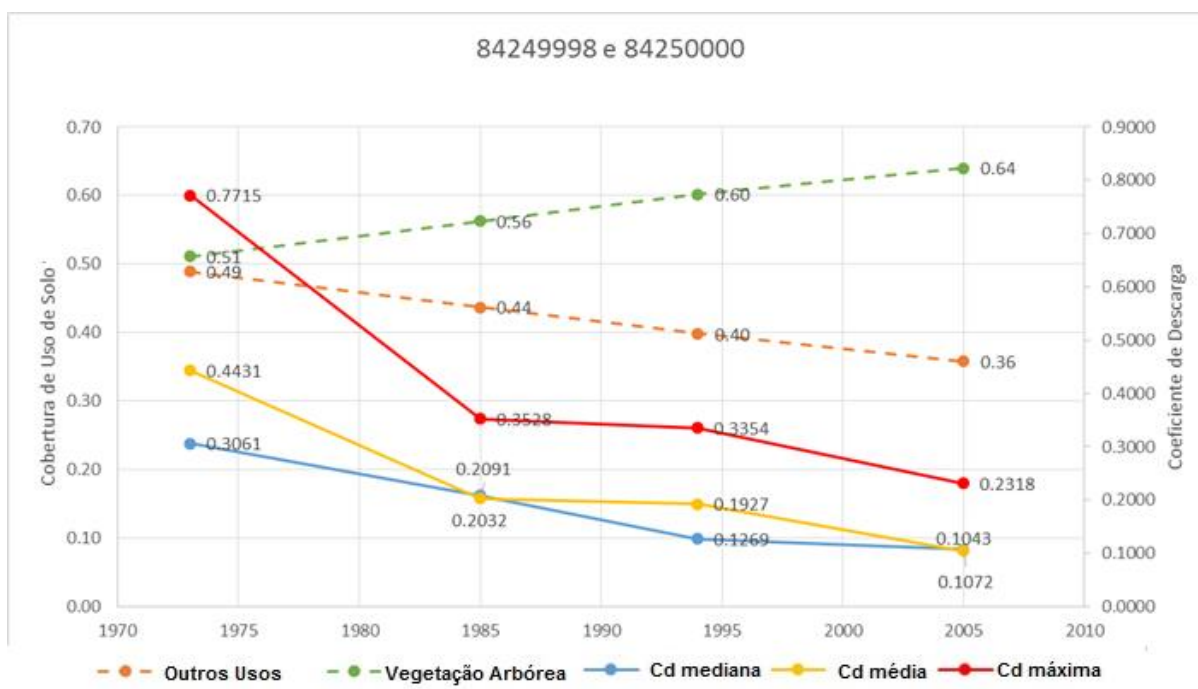


Figura 19 – Resultados da análise temporal das variações dos coeficientes de descarga frente às mudanças de solo para os postos Orleans II (84250000) e Orleans Montante (84249888).

Estes postos possuem séries com dados complementares no tempo e estão localizados muito próximos um ao outro, possuindo áreas de drenagem muito parecidas. Portanto, se considera que os dados dos dois postos fazem parte da mesma série de dados.

Um reflorestamento gradual da área de drenagem é observado durante o período de análise. As variações dos três coeficientes de descarga foram todas negativas ao longo do tempo. Não há proporcionalidade entre a magnitude das mudanças de uso com a variação dos coeficientes de descarga.

6.6 Análise generalizada

A não ser nos casos descritos anteriormente, grande parte dos resultados obtidos mostraram a tendência esperada. Para as vazões média e mediana, houve acréscimo nos coeficientes de descarga após desflorestamento e decréscimos após reflorestamento. Estes seguiram melhor esta tendência do que os coeficientes de descarga máxima. Mesmo que se observe que os coeficientes de descarga máxima do triênio 1974 sejam menores que os de 2005 para todos os postos, não fica aparente nenhuma relação com as mudanças de uso do solo ocorridas.

Considerando que os postos Armazém Capivari e Rio do Pouso estejam mais a jusante que os demais postos, é interessante observar a diferença que isso faz nos resultados obtidos.

Os postos localizados mais a montante possuem uma sensibilidade maior para as mudanças de uso de solo. Basta observar a magnitude nas variações ocorridas nos coeficientes de descarga, que são muito menores para os postos mais a jusante.

7 Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o impacto da mudança de uso do solo sobre o regime hidrológico de rios da bacia hidrográfica do rio Tubarão. Para tanto, foi desenvolvido um método que compara o coeficiente de descarga de um rio com as mudanças de uso de solo ocorridas na sua bacia. O presente método mostrou-se eficaz em demonstrar o impacto, ou efeito, que as mudanças de uso do solo ocorridas na bacia hidrográfica do Rio Tubarão tiveram sobre o regime de vazões dos rios analisados. Os coeficientes de descarga média e mediana seguiram a tendência esperada na maioria dos casos: houve acréscimo no coeficiente quando houve desmatamento e um decréscimo quando houve reflorestamento. Já os coeficientes de descarga máxima não mostraram possuir relação com as mudanças de uso do solo ocorridas, apesar de haver redução entre 1974 e 2005 para todos os postos analisados.

Ainda, foi possível perceber com base nos resultados de algumas bacias, que o regime de vazões analisadas possuem uma maior sensibilidade às mudanças de uso do solo quando comparadas com as demais, pois foram evidenciadas maiores variações nos coeficientes de descarga. Esta sensibilidade pode se dever ao fato destas bacias serem de cabeceira, onde as declividades são bastante elevadas.

Em trabalhos futuros, há algumas recomendações que podem melhorar tanto a análise do uso de solo quanto a análise dos dados hidrometeorológicos. Referente à classificação de uso do solo, uma fonte secundária de dados históricos de uso do solo seria necessária para corroborar com os mapas temáticos gerados. Esta fonte poderia ser um índice baseado em um conjunto de dados censitários socioeconômicos que demonstrem a evolução do uso do solo ao longo do tempo. Já quanto a análise dos dados hidrometeorológicos, se fazer necessária uma análise estatística dos dados mais robusta, dada a enorme quantidade de dados pluviométricos e fluviométricos disponíveis. Também pode ser interessante analisar outros parâmetros hidrológicos que influenciem na descarga de uma bacia, como parâmetros hidromorfológicos.

8 Referência Bibliográfica.

ARC-GIS. ARC-GIS: *Software*. Disponível em <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop> . Acessado em: 22/11/2016

ARAGÃO, L.E.O.C.. “**The Rainforest’s Water Pump.**” *Nature*, 489, 217-218, 2012.

BAYER, D. “**Efeito das Mudanças de Uso da Terra no Regime Hidrológico de Bacias de Grande Escala.**” Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

BOSCH J.M., HEWLETT, J.D. “**A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.**” *Journal of Hydrology*, 55, 3-23, 1992.

TSO, B; MATHER, P.M. “**Classification methods for remotely sensed data.**” London; New York: Taylor & Francis, 2001. 332 p.

HALL, M.J. **Urban Hydrology.** Elsevier Applied Science, Barking, UK, 299 pp, 1984.

HIBBERT, A.R. “**Forest Treatments Effects on Water Yield.**” p. 813. *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon, Oxford, 1967.

MAIDMENT, R.R. **Handbook of Hydrology.** New York: McGraw-Hill, 1992.

SPRACKLEN D.V., ARNOLD S.R., TAYLOR C.M. “**Observations of Increased Tropical Rainfall Preceded by Air Passage Over Forest**” *Nature*, 489, 282-390, 2012

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction.** Berlin: Springer, 1986.

ROBINSON M, GANNON B, SCHUCH M. “**A Comparison of the Hydrology of Moorland Under Natural Conditions, Agricultural Use and Forestry.**” *Hydrological Sciences Journal*, 36 (6), 565-577, 1991.

TUCCI et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 4ª Edição. Porto Alegre: UFRGS, 1993.

ZHANG L, VERTESSY R, WALKER G, GILFEDDER M, HAIRSINE P. “**Afforestation in a Catchment Context: Understanding the Impacts on Water Yield and Salinity.**” *Technical Report, Industry Report 1/07*, eWater CRC, Melbourne, Austrália, 2007.