



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
NÍVEL MESTRADO

FERNANDO PETRY

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA SOBRE A INFILTRAÇÃO
SUPERFICIAL E RECARGA POTENCIAL SUBTERRÂNEA NO MUNICÍPIO DE SÃO
LEOPOLDO, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL - BRASIL**

SÃO LEOPOLDO

2014

FERNANDO PETRY

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA SOBRE A INFILTRAÇÃO
SUPERFICIAL E RECARGA POTENCIAL SUBTERRÂNEA NO MUNICÍPIO DE SÃO
LEOPOLDO, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL - BRASIL**

Dissertação como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geologia, pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Área de concentração em Geologia Sedimentar.
Linha de pesquisa: Sensoriamento Remoto e Modelagem Geológica.

Orientador: Dr. Osmar Gustavo Wöhl Coelho
Coorientador: Dr. Ubiratan Ferruccio Faccini

SÃO LEOPOLDO

2014

P498a Petry, Fernando

Avaliação do impacto da expansão urbana sobre a infiltração superficial e recarga potencial subterrânea no município de São Leopoldo, Estado do Rio Grande do Sul - Brasil / por Fernando Petry. -- São Leopoldo, 2014.

vii, 77 f. : il. color. ; 30 cm.

Com: artigos “Análise comparativa de técnicas quantitativas e não quantitativas para avaliação da infiltração superficial e recarga potencial subterrânea em São Leopoldo, Estado do Rio Grande do Sul - Brasil”.

“Avaliação do impacto da expansão urbana sobre a recarga potencial dos sistemas aquíferos em São Leopoldo – RS”

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Geologia, São Leopoldo, RS, 2014.

Área de concentração: Geologia sedimentar.

Linha de pesquisa: Sensoriamento remoto e modelagem geológica.

Orientação: Prof. Dr. Osmar Gustavo Wöhl Coelho, Escola Politécnica;
Coorientação: Prof. Dr. Ubiratan Ferrucio Faccini, Escola Politécnica.

1.Hidrogeologia. 2.Solos – Percolação. 3.Águas subterrâneas. 4.Crescimento urbano – São Leopoldo (RS). 5.Infiltração – São Leopoldo (RS). I.Coelho, Osmar Gustavo Wöhl. II.Faccini, Ubiratan Ferrucio. III.Título.

CDU 556.3

624.131.6(816.5)

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

A dissertação de Mestrado

**“AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA SOBRE A INFILTRAÇÃO
SUPERFICIAL E RECARGA POTENCIAL SUBTERRÂNEA NO MUNICÍPIO DE SÃO
LEOPOLDO, RS”**

apresentada por **FERNANDO PETRY**

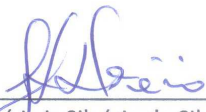
foi aceita e aprovada como atendimento parcial aos requisitos para a obtenção do grau de

MESTRE EM GEOLOGIA

pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Osmar Gustavo Wohl Coelho
Presidente da Banca Examinadora
Universidade do Vale do Rio dos Sinos



Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva
Universidade Federal de Santa Maria



Prof.ª Dr.ª Viviane Todt
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

São Leopoldo, 12 de dezembro de 2014.

RESUMO

A avaliação dos impactos da urbanização sobre a recarga potencial subterrânea em São Leopoldo Estado do Rio Grande do Sul - Brasil, relativa ao período 1950 – 2012, foi realizada através de dados multitemporais e análise multicritério. Durante este período a população cresceu 860% – de 25.794 para 214.210 habitantes – enquanto a área urbana passou de 20 km² para 71 km², correspondendo a um aumento de 252%. Devido a esta expansão urbana, uma redução da infiltração superficial era esperada. De fato, utilizando a análise multicritério em vários estágios de expansão urbana, detectou-se uma redução em torno de 75% das áreas com alto potencial de infiltração. A recarga potencial subterrânea do município foi avaliada através de critérios quantificáveis e não quantificáveis. A comparação dos resultados apresentou uma taxa de 73,5% de coincidência, excluindo a área urbana, para a qual, considerou-se valores extremamente baixos. Quanto aos desvios de estimativa, da ordem de 26,5%, a técnica CN (*runoff Curve Number*) apresentou predominantemente resultados mais elevados. A tendência de desvio ocorre no sentido da técnica CN devido ao fato de critérios geológicos não serem utilizados, os quais são entretanto considerados na técnica Multicritério.

ABSTRACT

The assessment of urbanization impact on potential groundwater recharge variation in São Leopoldo, Rio Grande do Sul State - Brazil, concerning the 1950-2012 period, was carried out by multicriteria analysis. During this period, the population had a 860% growth, ranging from 25.794 to 214.210 inhabitants. At the same time, urban area changed from 20 km² to 71 km² , what means an increasing rate of 252%. Due to this urban expansion, a reducing of surficial infiltration was expected. In fact, by multicriteria analysis of several steps of urban expansion, it was detected a reduction around 75% of high potential infiltration areas.

The potential groundwater recharge in São Leopoldo was assessed through quantifiable and non-quantifiable criteria. A comparison of the results showed a rate of coincidence of 73.5% excluding the urban area, for which, it was considered extremely low values. As for deviations estimation of the order of 26.5%, the CN (Runoff Curve Number) technique presented predominantly higher results. The trend of deviation occurs towards the CN technique because of Geological criteria not be used in this method, which was however considered in the Multicriteria technique.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Localização geográfica da área de estudo. | 3 |
| Figura 2: Carta de Classes de Declividade..... | 4 |
| Figura 3: Carta Pedológica..... | 6 |
| Figura 4: Carta Geológica | 8 |
| Figura 5: Carta de uso e ocupação do solo..... | 10 |
| Figura 6- Água no solo insaturado | 13 |
| Figura 7- Distribuição vertical da água no solo e subsolo | 14 |
| Figura 8: processo de infiltração | 15 |
| Figura 9: Formações estruturais do solo | 15 |
| Figura 10: Curvas de infiltração típicas de solos | 16 |
| Figura 11: Infiltração em solos com e sem vegetação. | 17 |
| Figura 12: Taxa de infiltração para diferentes densidades de cobertura vegetal..... | 18 |
| Figura 13: Taxa de infiltração e escoamento superficial de precipitação. | 19 |
| Figura 14: Carta potenciométrica de São Leopoldo - RS | 19 |
| Figura 15: Síntese do processo de análise multicritério..... | 22 |
| Figura 16: Concepção da abordagem metodológica. | 25 |
| Figura 17: Operação de sobreposição e fusão de mapas pela técnica de análise multicritério para a geração e simulação de cenários pela alteração dos fatores influentes realizados pelo software ILWIS (mapas Uso e Ocupação, Solos e Geologia), tendo como produto final a recarga potencial subterrânea. | 31 |
| Figura 18: Funcionamento ensaio de duplo anel | 36 |
| Figura 19: Ensaio de infiltração com infiltrômetro de duplo anel | 37 |
| Figura 20: Detalhe dos tubos de Mariotte..... | 38 |
| Figura 21: Carta de classes de solos com os pontos onde foram realizados ensaios de infiltração... | 39 |
| Figura 22: Carta de expansão urbana de São Leopoldo (1:25.000)..... | 40 |
| Figura 23: Gráficos de Expansão Urbana, Habitantes, Densidade Demográfica e Consumo de Água..... | 42 |
| Figura 24: Carta de Declividade ponderada..... | 43 |
| Figura 25: Carta de Solos ponderada..... | 44 |
| Figura 26: Carta de Geologia ponderada..... | 44 |
| Figura 27: Carta de Uso do Solo e Vegetação ponderada..... | 45 |
| Figura 28: Carta de recarga potencial subterrânea de infiltração 1:25.000 do Município de São Leopoldo para o ano 2012 com as cartas-base geologia, declividade, solos, uso e ocupação (2012)..... | 45 |
| Figura 29: Histograma de classes de recarga potencial subterrânea em 2012..... | 47 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1: Classes de declividade..... | 3 |
| Quadro 2: Área ocupada pelas classes de Declividade. | 4 |
| Quadro 3: Área ocupada pelas classes de solos | 6 |
| Quadro 4: Área ocupada pelas classes de geologia..... | 9 |
| Quadro 5: Área ocupada pelas classes de vegetação, uso do solo. | 11 |
| Quadro 6: Influência de cobertura do solo na infiltração..... | 17 |
| Quadro 7: Exemplo de matriz de importância relativa e pontuação dos fatores considerados..... | 23 |
| Quadro 8: Peso dos fatores considerados, calculados a partir da pontuação de cada fator, obtida pela matriz de importância relativa, dividido pelo somatório de todos os fatores considerados. | 24 |
| Quadro 9: Etapas Metodológicas | 26 |
| Quadro 10: Cartas multitemporais de São Leopoldo e suas respectivas escalas | 27 |
| Quadro 11: Cartas-base e suas respectivas escalas..... | 28 |
| Quadro 12: Ponderação das classes de declividade. | 28 |
| Quadro 13:Ponderação das classes de solos. | 29 |
| Quadro 14:Ponderação das classes de geologia. | 29 |
| Quadro 15: Ponderação das classes de vegetação, uso e ocupação. | 30 |
| Quadro 16: Matriz de importância relativa e pontuação dos fatores considerados. | 32 |
| Quadro 17: Peso dos fatores considerados, calculados a partir da pontuação de cada fator, obtida pela matriz de importância relativa (quadro 13), dividido pelo somatório de todos os fatores considerados. | 32 |
| Quadro 18: Comparação da importância relativa de fatores de infiltração e recarga..... | 33 |
| Quadro 19: Classificação dos solos CSC – USDA..... | 34 |
| Quadro 20: Expansão urbana de 1950 - 2012 do município de São Leopoldo..... | 41 |
| Quadro 21: Expansão urbana no período 1950 - 2012 do município de São Leopoldo..... | 41 |
| Quadro 22: Variação na demanda hídrica no período de 1950-2010 do município de São Leopoldo | 42 |
| Quadro 23: Variação populacional e de consumo de água no período 1950 a 2010 do município de São Leopoldo..... | 43 |
| Quadro 24: Intervalos de classe estabelecidos para a análise multicritério..... | 46 |
| Quadro 25: Porcentagem da área ocupada por cada classe de recarga potencial em 2012..... | 46 |

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| Resumo..... | III |
| Abstract..... | IV |
| Lista de Figuras..... | V |
| Lista de Quadros..... | VI |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Formulação do problema..... | 1 |
| 1.2 Hipótese e Objetivo..... | 2 |
| 1.3 Abordagem da Pesquisa..... | 2 |
| 2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 3 |
| 2.1 Relevo e clima..... | 3 |
| 2.2 Solos..... | 4 |
| 2.3 Geologia e hidrogeologia..... | 7 |
| 2.4 Uso do solo e vegetação..... | 9 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ABORDAGEM DA PESQUISA..... | 12 |
| 3.1 Infiltração e recarga subterrânea..... | 12 |
| 3.2 Precipitação e infiltração..... | 18 |
| 3.3 Análise multicritério..... | 20 |
| 4 MÉTODO E TÉCNICAS..... | 25 |
| 4.1 Coleta e Entrada de dados..... | 27 |
| 4.2 Análise da expansão urbana..... | 27 |
| 4.3 Concepção e implantação do modelo de análise espacial Multicritério..... | 27 |
| 4.4 Comparação dos resultados da Análise Multicritério com a Técnica CN..... | 33 |
| 4.5 Avaliação da taxa de infiltração em solos..... | 36 |
| 4.6 Avaliação do impacto da expansão urbana sobre a recarga potencial subterrânea..... | 39 |
| 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 40 |
| 5.1 Expansão urbana..... | 40 |
| 5.2 Análise espacial Multicritério da recarga potencial subterrânea em 2012..... | 43 |
| 5.3 Comparação de resultados da análise multicritério com técnicas numéricas..... | 48 |
| 5.4 Avaliação do impacto da expansão urbana sobre a recarga potencial subterrânea..... | 64 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 73 |
| 7 REFERÊNCIAS..... | 74 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do problema e motivação

A água subterrânea é um dos recursos naturais mais importantes. Muitas vezes, os recursos hídricos superficiais encontraram-se limitados e as águas subterrâneas são consideradas como alternativa para cobrir uma série de necessidades como irrigação, abastecimento industrial e principalmente o abastecimento humano. No entanto, a extração excessiva facilmente conduz a uma redução substancial no nível de água subterrânea (JANG et al. 2013).

Com o grande aumento populacional do Município de São Leopoldo no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1950 a 2012, a ocupação e a expansão urbana ocorreram de forma desordenada, implicando diretamente na redução dos recursos naturais, principalmente das reservas hídricas subterrâneas. Nos últimos 60 anos, a população municipal aumentou de 25.700 (em 1950) para 214.200 habitantes (em 2010), ao que seguiram-se a expansão urbana e o aumento do consumo hídrico e, conseqüentemente, a impermeabilização da área municipal.

Os impactos da urbanização sobre os sistemas hídricos, principalmente o meio subterrâneo não são conhecidos. Para esta avaliação é útil a análise espacial da informação hidrogeológica (GONÇALVES et al. 2007), atendendo necessidades específicas dos gestores desses recursos. O presente trabalho utilizando técnicas de Análise Multicritério insere-se nesta perspectiva.

A recarga potencial subterrânea pode ser avaliada através de critérios quantificáveis e não-quantificáveis, sendo estes últimos fundamentais para analisar a influência de parâmetros subjetivos não contemplados pelos métodos numéricos. A técnica de análise multicritério, ao considerar quaisquer tipos de parâmetros, torna-se mais abrangente, enquanto os métodos numéricos, embora limitados, fornecem resultados quantitativos com uso direto no planejamento de uso dos recursos hídricos. Este é justamente o foco da questão, presumindo-se que a técnica multicritério seja mais realista, devido a sua abordagem ampla e a inclusão de critérios não contemplados nos métodos numéricos.

A avaliação comparativa dos resultados pode indicar diferenças, limitações e necessidades de adequações de ambas as técnicas. Sendo a recarga subterrânea diretamente ligada à infiltração superficial, uma avaliação das diferenças entre as técnicas multicritério e numérica pode ser feita comparando-se os resultados da primeira com os resultados da técnica CN (Soil Conservation Service – United States Department of Agriculture, 1986). A avaliação espacial comparativa permite localizar as coincidências e diferenças resultantes, assim como identificar o efeito da inserção de novos critérios na técnica multicritério. Com este objetivo, o presente estudo compara os resultados de ambas as técnicas aplicadas ao município de São Leopoldo – RS.

1.2 Hipótese e Objetivo

Hipótese

Estima-se que o município de São Leopoldo apresentou uma redução da recarga potencial subterrânea devido à expansão urbana no período de 1950 a 2012, o que pode ser avaliado por análise espacial através de técnicas não quantitativas como a análise multicritério.

Objetivo

Avaliar o efeito da expansão urbana sobre recarga potencial subterrânea no município de São Leopoldo – RS.

1.3 Abordagem da pesquisa

A partir da hipótese acima, este trabalho aborda os conceitos infiltração, precipitação e recarga subterrânea bem como a conceituação de análise multicritério e técnica CN, as quais são aqui aplicadas para a avaliação da recarga potencial subterrânea e avaliação do impacto da expansão urbana sobre a mesma.

2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São Leopoldo, com uma área de 102 km², está localizado na Região Metropolitana de Porto Alegre, fazendo divisa com os Municípios de Estância Velha, Novo Hamburgo, Sapucaia do Sul e Portão (Fig. 1). Situa-se entre as coordenadas UTM 479572 E, 493364 E e 6717304 N, 6702331 N, correspondendo à porção inferior da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, onde ocorre uma extensa planície constituída por banhados e áreas inundáveis.

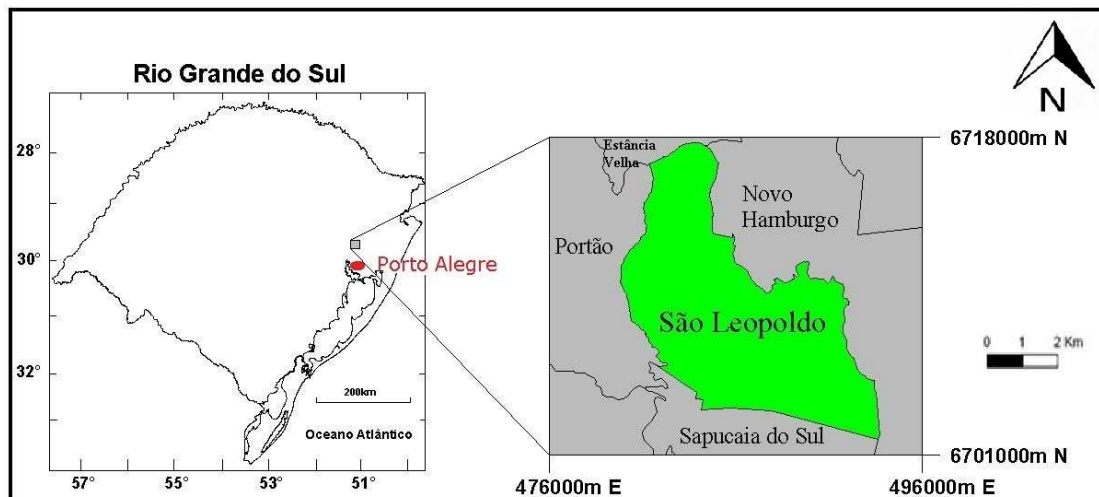


Figura 1: Localização geográfica da área de estudo. Adaptado de SEMA (2013)

2.1 RELEVO E CLIMA

A área situa-se na depressão periférica do estado do Rio Grande do Sul apresentando altitudes entre 20 m a 300 m (Fig. 2), com predominância de declividades de 0 a 8%, com relevo plano a suavemente ondulado (Quadro1 e 2), sendo as menores e maiores altitudes encontradas respectivamente próximas ao rio e nas elevações ao sul do município. O clima de São Leopoldo é subtropical úmido (Köppen), com temperaturas anuais entre - 1 °C a 40 °C e uma precipitação média anual de 1500 mm/ano.

Quadro1: Classes de declividade. Adaptado de EMBRAPA (1999)

| RELEVO | DECLIVIDADE % |
|-----------------------------|---------------|
| Plano a suavemente ondulado | 0 - 8 |
| Ondulado | 8 - 20 |
| Forte ondulado | 20 - 45 |
| Montanhoso | 45 - 75 |
| Escarpado | >75 |

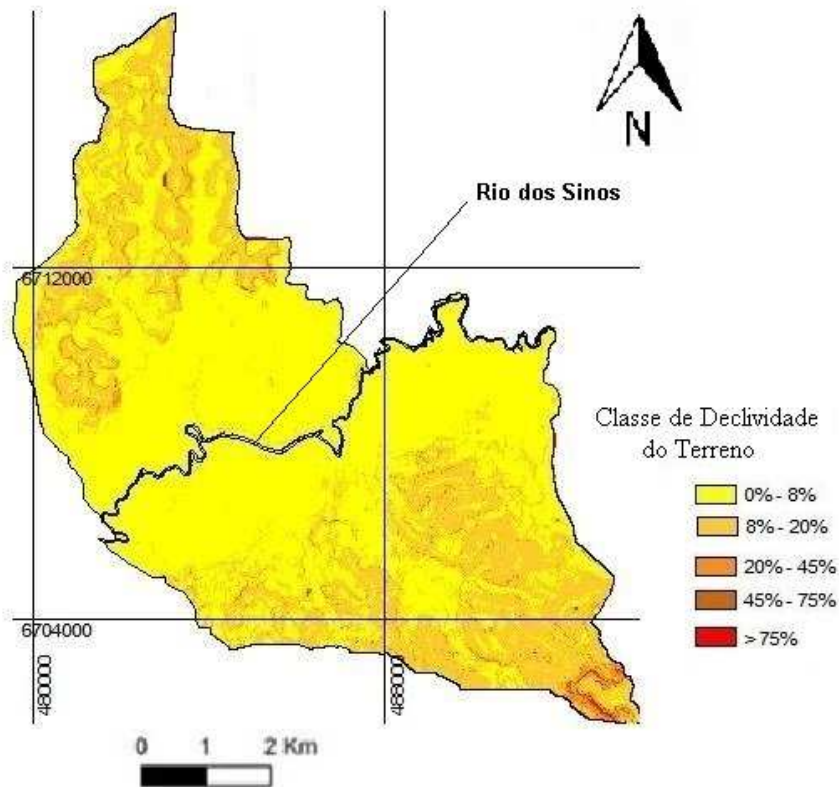


Figura 2: Carta de Classes de Declividade do Município de São Leopoldo. Adaptado de ENGEFOTO (1990) e EMPRAPA (1999).

Quadro 2: Área ocupada pela classes de Declividade. Adaptado de ENGEFOTO (1990) e EMPRAPA (1999).

| Declividade (%) | Área % |
|------------------------|---------------|
| 0 – 8 | 58 |
| 8 – 20 | 14 |
| 20 – 45 | 12 |
| 45 – 75 | 11 |
| > 75 | 5 |

2.2 SOLOS

Os solos constituintes da área de estudo são Gleissolos e Planossolos na planície inundaçãõ e Argissolos Amarelos Eutróficos e Argissolos Vermelhos Distróficos na encosta e zonas mais elevadas (Fig. 3). Ocorrem em menor proporçãõ os Nitossolos Vermelhos Distróficos (Quadro 3).

Argissolos Amarelos Eutróficos

São solos com mudança textural abrupta e a ocorrência de contato lítico entre 50cm e 100cm de profundidade. Este tipo de solo apresenta uma alta capacidade de infiltração (EMBRAPA, 1999).

Argissolos Vermelhos Distróficos (Abrúpticos ou Típicos)

São solos de textura argilosa e com mudança textural abrupta, a qual influencia a capacidade de infiltração e a condutividade hidráulica. Normalmente apresentam baixa capacidade de infiltração (NASCIMENTO, 2001).

Gleissolos e Planossolos Hápticos

Os Gleissolos Hápticos são solos hidromórficos, normalmente localizados em baixadas e próximos às drenagens, com nível d'água subterrâneo elevado e com riscos de inundação. Esses solos apresentam baixa capacidade de infiltração (EMBRAPA, 1999).

Nitossolos Vermelhos Distróficos Argissólicos

São caracterizados por baixa saturação de bases e teores de Fe_2O_3 (pelo H_2SO_4) de 15% a < 36%, na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA), com transição textural abrupta com relação textural B/A maior ou igual a 1,4. Estes solos apresentam alto teor de argila e baixa infiltração (NASCIMENTO 2001).

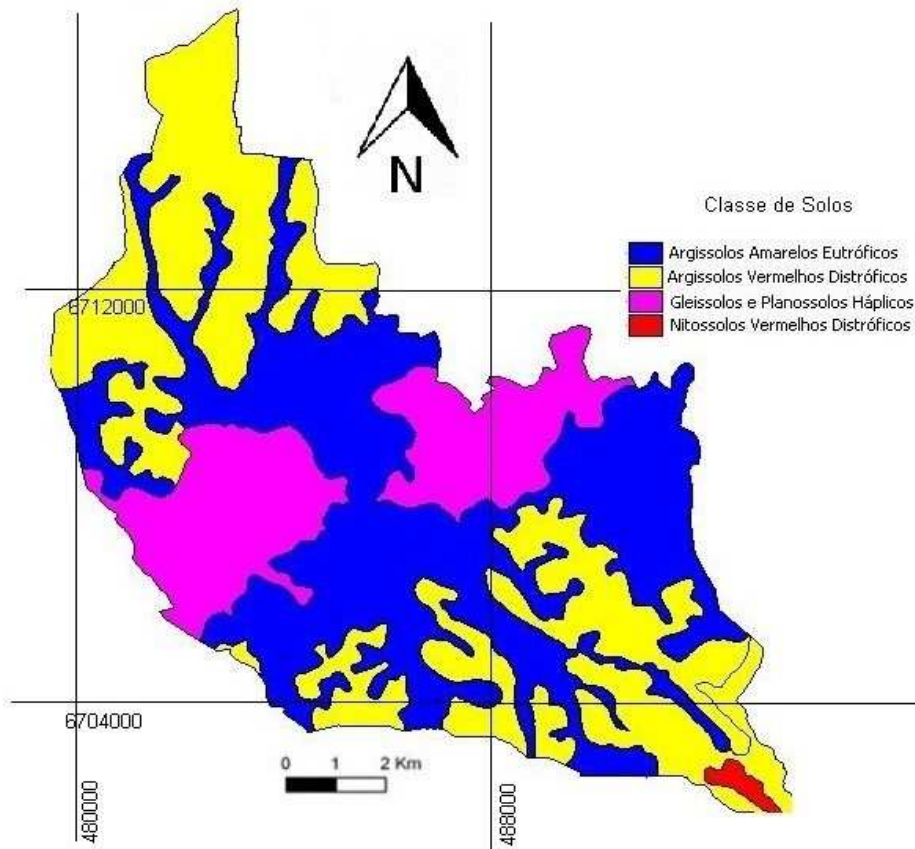


Figura 3: Carta Pedológica. Adaptado de (NASCIMENTO, 2001)

Quadro 3: Área ocupada pelas classes de solos

| SOLOS | ÁREA % |
|--------------------------|--------|
| Argissolos Amarelos | 43 |
| Argissolos Vermelhos | 36 |
| Gleissolos e Planossolos | 16 |
| Nitossolos Vermelhos | 5 |

2.3 GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

A área de estudo encontra-se na Depressão Central ou Periférica na borda da Bacia Sedimentar do Paraná, composta basicamente pela formação Piramboia, sendo que nas áreas próximas ao rio dos Sinos encontram-se Depósitos Quaternários inconsolidados (Fig.4). Nesta área também é possível encontrar as formações Botucatu e Rio do Rasto, as quais ocupam uma pequena porcentagem da área de estudo (Quadro 4).

O Município de São Leopoldo corresponde a uma área de exposição do Sistema Aquífero Guarani, o qual é constituído nesta região pelas formações Pirambóia e Botucatu, sendo limitado na base pela formação Rio do Rasto. Esta última aflora somente ao sul da área de estudo, no município de Sapucaia do Sul (MACHADO, 2005).

Formação do Rio do Rasto (Permiano)

A formação do Rio do Rasto é formada por sedimentos lacustres e flúvio-deltaicos. Essa formação ocupa uma área de 5,4 km² do território, apresentando pelitos, siltitos e arenitos finos, o que a torna muito pouco permeável, constituindo um aquíclode que delimita a base do SAG em toda a Bacia do Paraná.

Formação Piramboia (Permiano)

A Formação Piramboia é constituída por extensas faixas de sedimentos de origem eólica e secundariamente lacustre e fluvial. As dunas eólicas predominam amplamente na faixa de afloramentos dessa formação, sendo que a faciologia predominante é quase que exclusivamente constituída por arenitos com estratificações cruzadas acanaladas ou tangenciais, e mais raramente planares (FACCINI et al., 2003).

Esta formação constitui o Aquífero Pirambóia, unidade hidroestratigráfica de maior representatividade do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na área de estudo, ocupando 51,5 km² do município, sendo sua permeabilidade moderada.

Formação Botucatu (Cretáceo Inferior)

Possui espessuras desde poucos metros até cerca de 150 metros. Assim, a Formação Botucatu consiste basicamente em depósitos de dunas eólicas, constituídas de arenitos finos a médios, quartzosos com permeabilidade alta (CPRM, 2013), fazendo parte do Aquífero Botucatu. Na área de estudo, o SAG tem ocorrência restrita às cotas mais elevadas da área de estudo, com cerca de 5,2 km².

Depósitos Aluvionares e Coluvionares (Quaternário)

Os depósitos aluvionares e coluvionares quaternários na área de estudo ocorrem predominantemente em terrenos planos a suavemente ondulados, de baixas altitudes, junto às margens das drenagens, especialmente do rio dos Sinos, ocupando 40,2 km² da área do município. Os sedimentos que constituem estes depósitos são mal selecionados, apresentando porosidade e permeabilidade variável (GATTO, 1999).

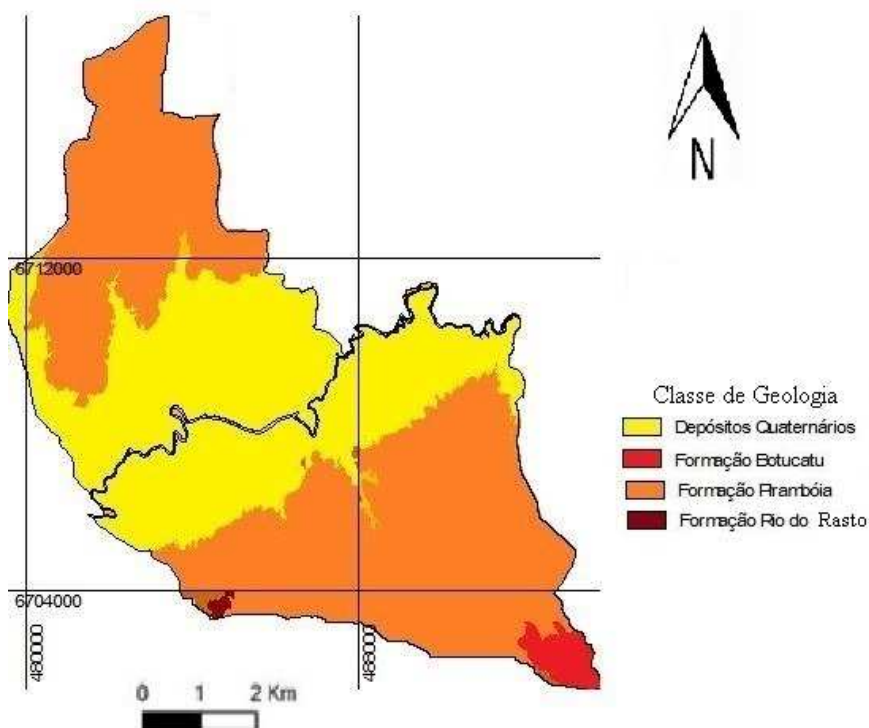


Figura 4: Carta Geológica. Adaptado de (ZARDO, 2007)

Quadro 4: Área ocupada pelas classes de geologia

| GEOLOGIA | ÁREA % |
|------------------------|---------------|
| Formação Botucatu | 6 |
| Depósitos Quaternários | 42 |
| Formação Rio do Rastro | 3 |
| Formação Pirambóia | 49 |

2.4 USO DO SOLO E VEGETAÇÃO

A área de estudo encontra-se densamente ocupada pela atividade antrópica, com as mais diversas formas de ocupação (Fig. 5), o que interfere na dinâmica do solo e da vegetação, bem como do regime hídrico subterrâneo (Quadro 5).

Área de Sucessão Vegetal

A área de sucessão vegetal corresponde a áreas de atividade antrópicas abandonadas, nas quais a vegetação voltou a ocupá-la, melhorando significativamente a capacidade de infiltração, porém com pouca profundidade (GRAVENA, 1993).

Áreas de Banhado

As áreas de banhado são compostas por regiões planas e alagadiças, ocorrendo acumulação hídrica superficial, a qual infiltra-se lentamente. As áreas de banhado possuem alto potencial de recarga subterrânea em épocas de seca ou de baixa precipitação pluviométrica (CARVALHO; OZÓRIO, 2007).

Os banhados possuem importante participação na recarga e descarga em uma bacia hidrográfica. Este sistema apresenta em sua constituição lagoas de água doce ou salobra, campos e florestas de inundação temporária ou permanente e áreas de extravasamento de canais de água (CARVALHO; OZORIO, 2007). O município de estudo possui 14% da área ocupada por banhados (BARETTA, 2007).

Área Urbana

A área urbana é composta por edificações (telhados, asfaltamentos, calçadas, etc.) os quais não permitem a infiltração das águas da chuva no solo, estas fluindo diretamente como escoamento superficial ou pela rede de drenagem pluvial.

Mata Mista, Mata Nativa e Reflorestamento

As áreas de matas são formações mais densas, com espécies vegetais com copas bem desenvolvidas. A grande densidade da vegetação protege o solo da ação da precipitação, assim como a maior profundidade das raízes facilita a infiltração da água no solo (MONEGAT, 1991; SOARES et al., 2002; GRAVENA, 1993).

Campo Antrópico

A unidade campo antrópico é composta por campos com solos expostos ou cobertos predominantemente por gramíneas e desmatamentos. O solo é mais compactado pela exposição às intempéries, reduzindo a permeabilidade e a infiltração das águas.

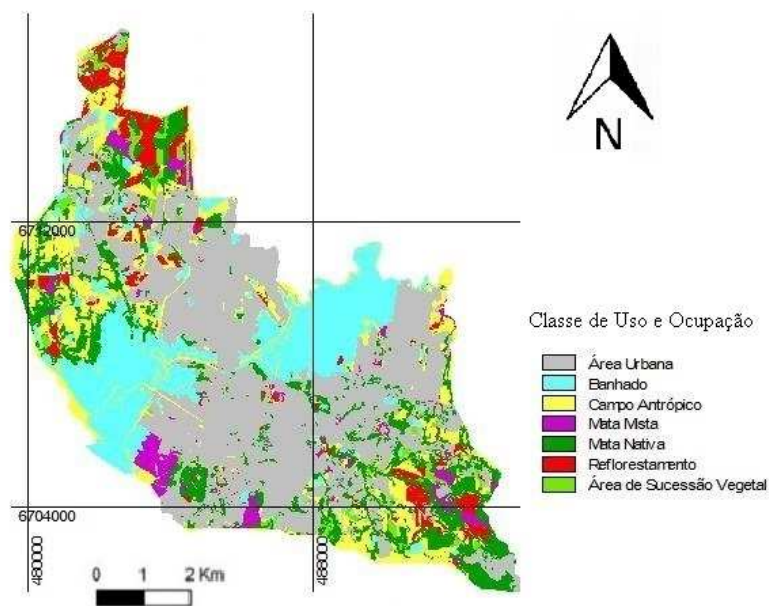


Figura 5: Carta de uso e ocupação do solo. Adaptado de (BARETTA, 2007).

Quadro 5: Área ocupada pelas classes de vegetação e uso do solo. Adaptado de (BARETTA, 2007)

| Uso e ocupação | Área % |
|--------------------------|---------------|
| Área Urbana | 48 |
| Banhado | 14 |
| Campo Antrópico | 13 |
| Mata Mista | 5 |
| Mata Nativa | 9 |
| Reflorestamento | 7 |
| Área de Sucessão Vegetal | 4 |

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ABORDAGEM DA PESQUISA

3.1 INFILTRAÇÃO E RECARGA SUBTERRÂNEA

A recarga subterrânea tem início com a infiltração superficial, que é o processo pelo qual a água penetra nas camadas superficiais do solo, percolando como água gravitacional até atingir a zona saturada ou camada impermeável (VILLELA; MATTOS, 1975).

Outros autores, como RAUDKIVI (1979), consideram que a infiltração é um processo pelo qual a água de qualquer natureza, principalmente da precipitação, desloca-se da superfície para camadas mais profundas devido à força capilar. Esta força capilar tende a expulsar o ar que está entre os poros e então a água passa a ocupar este vazio (Fig. 6).

O termo "infiltração" foi usado por HORTON (1933) para descrever o processo pelo qual a água penetra ou é absorvida pelo solo. A infiltração é o fenômeno em que a água se desloca para baixo a partir da superfície do terreno, repondo a umidade do solo e recarregando aquíferos subterrâneos. Muitas vezes, é feita uma distinção entre a infiltração e a percolação, sendo esta última o movimento da água sob a influência da gravidade até zonas saturadas.

Na realidade, parte da água de infiltração é retida como umidade do solo pelas tensões capilares, enquanto a maior parte flui como uma frente de saturação. Esta última é denominada água gravitacional, à qual atribui-se a recarga dos aquíferos. Este processo gera uma distribuição diferenciada da água no subsolo, caracterizando as zonas de aeração e de saturação.

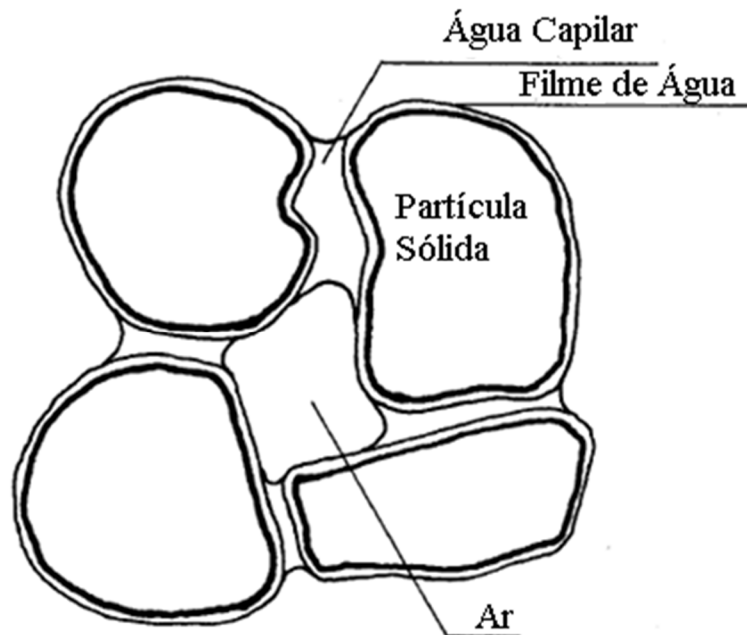


Figura 6- Água no solo insaturado. Adaptado de RAUDKIVI (1979).

A distribuição de umidade dentro do perfil do solo durante o movimento descendente da água é ilustrada na figura 7. Normalmente, os poros da camada superior do solo e do subsolo podem estar parcialmente preenchidos por água e gases. Este horizonte é chamado de zona vadosa ou zona de aeração. Abaixo desta zona, em profundidades variáveis, onde os poros estão completamente preenchidos por água, ocorre a zona de saturação (LIBARDI, 2005; COLLISCHONN; TASSI, 2011).

A zona não-saturada pode ser dividida em zona de umidade do solo e zona intermediária. A zona de umidade do solo atinge a profundidade do sistema radicular e a água presente está disponível para as plantas. O excesso de água que não pode ser retido pelo solo nesta zona movimenta-se para baixo pela força gravitacional e se move para a zona intermediária. Esta última encontra-se entre a zona de umidade do solo e a zona saturada. Em áreas úmidas, onde o lençol freático encontra-se perto da superfície, a espessura da zona intermediária pode ser nula. Em zonas áridas, com um lençol freático muito profundo, a espessura desta zona pode ser de várias centenas de metros. A água nesta zona não está disponível para as plantas e move-se até a zona saturada.

A zona saturada pode ser dividida em zona de capilaridade, onde água ascende como resultado de forças capilares, e zona saturada propriamente dita. Não há uma fronteira nítida entre as zonas de capilaridade e intermediária (ou vadosa). Alguns cientistas se referem à zona capilar como zona não-saturada (Fig. 7).

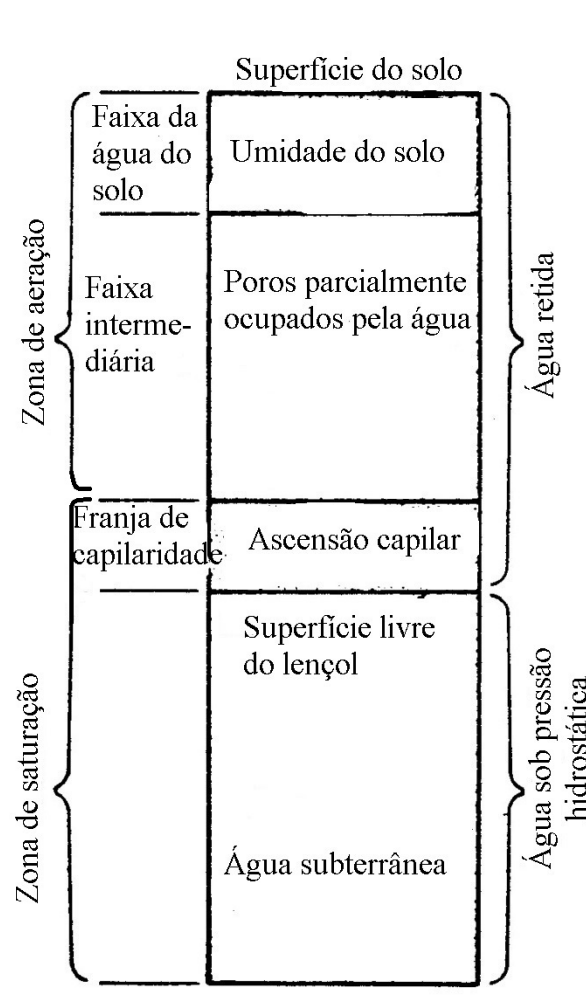


Figura 7– Distribuição vertical da água no solo e subsolo. Adaptado de CETESB (1978).

Por sua vez, a capilaridade é responsável pelas tensões matriciais do solo, as quais estão relacionadas às taxas iniciais de infiltração, até o solo atingir o estado de saturação. O processo tende a iniciar com elevadas taxas de infiltração (fig. 8), decaindo ao longo do tempo devido à saturação do solo e/ou expansão dos argilominerais.

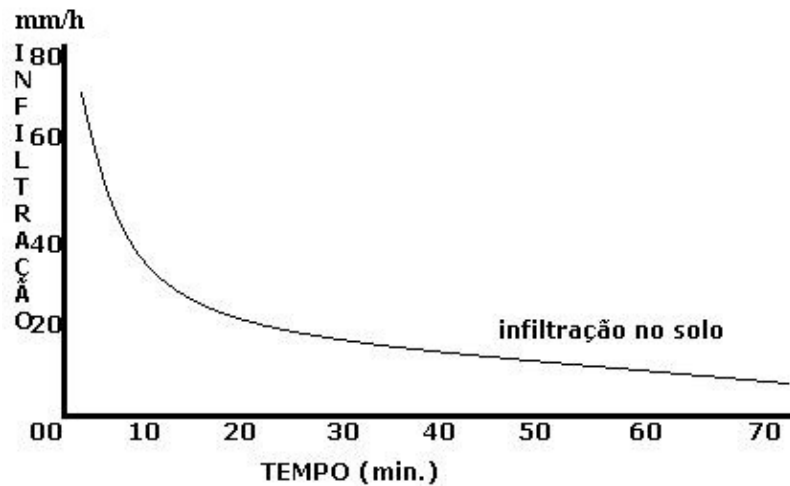


Figura 8: Processo de infiltração. Adaptado de HORTON (1971).

O processo de infiltração tem vários fatores intervenientes, entre os quais as características do próprio solo. Partículas do solo podem formar distintos espaços porosos, os quais definem a capacidade de retenção de água, aeração e drenagem. A estrutura do solo é condicionada pela textura, a presença de material orgânico e outras substâncias, influenciando as taxas de infiltração. Normalmente, um solo é estratificado e composto por diferentes horizontes. Cada um desses horizontes tem a sua própria capacidade de infiltração. Um dos horizontes pode ter uma capacidade de infiltração muito baixa reduzindo, por conseguinte a capacidade total de infiltração do perfil de solo (Fig. 9). A taxa de infiltração é eventualmente limitada pela taxa de percolação através da camadas menos permeáveis do subsolo. Uma fina camada de argila pode limitar a infiltração de um solo composto em sua maior parte por areia grossa.



Figura 9: Formações estruturais do solo. Adaptado de WARD; ROBINSON (1990).

O solo tem efeito pronunciado sobre a infiltração. Na época das secas, é muito comum encontrar fissuras no solo argiloso (gretas de contração), sendo a taxa de infiltração inicial para esse tipo de solo extremamente elevada. Com o umedecimento, ocorre a expansão das argilas e o fechamento das fissuras, reduzindo a taxa de infiltração (Fig. 10).

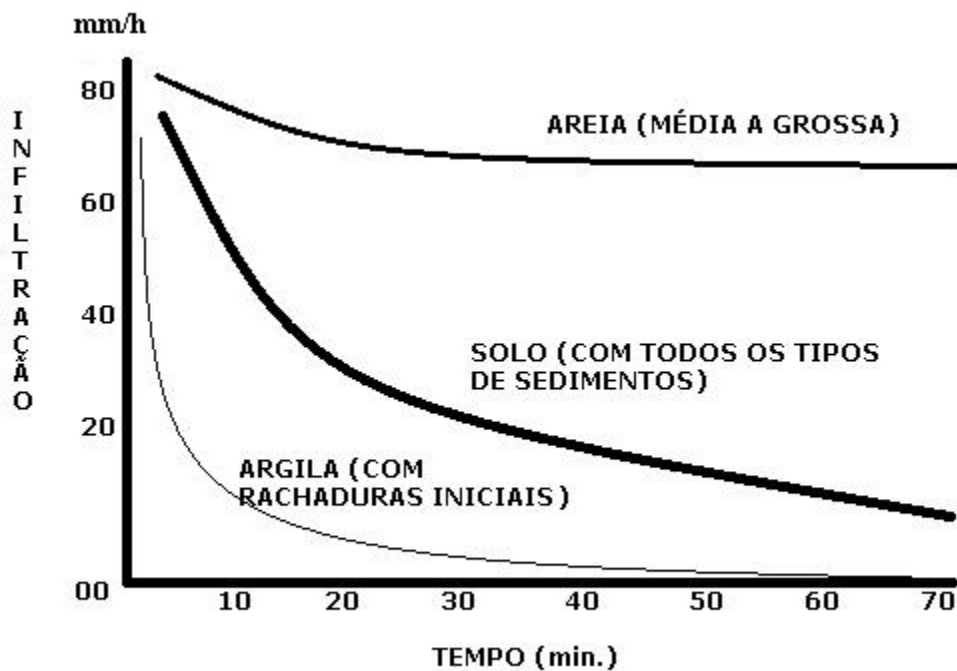


Figura 10: Curvas de infiltração típicas de solos.
Adaptado de WARD; ROBINSON (1990).

A capacidade de infiltração de um solo pode ser reduzida pela compactação, causada por animais (especialmente em torno de pontos de água) ou pelo homem devido ao uso de máquinas (veículos, equipamentos agrícolas, etc). Alguns solos perdem capacidade de absorção de água devido a desestruturação. Em lugares de plantação de arroz, por exemplo, é muito comum a desestruturação mecânica para impermeabilização da lavoura.

Além destas características, outros fatores são determinantes do comportamento da infiltração e recarga subterrânea, entre eles o uso atual e a cobertura atual do solo (Fig. 11). Neste sentido, a expansão urbana é fator de impermeabilização superficial e redução da recarga subterrânea.

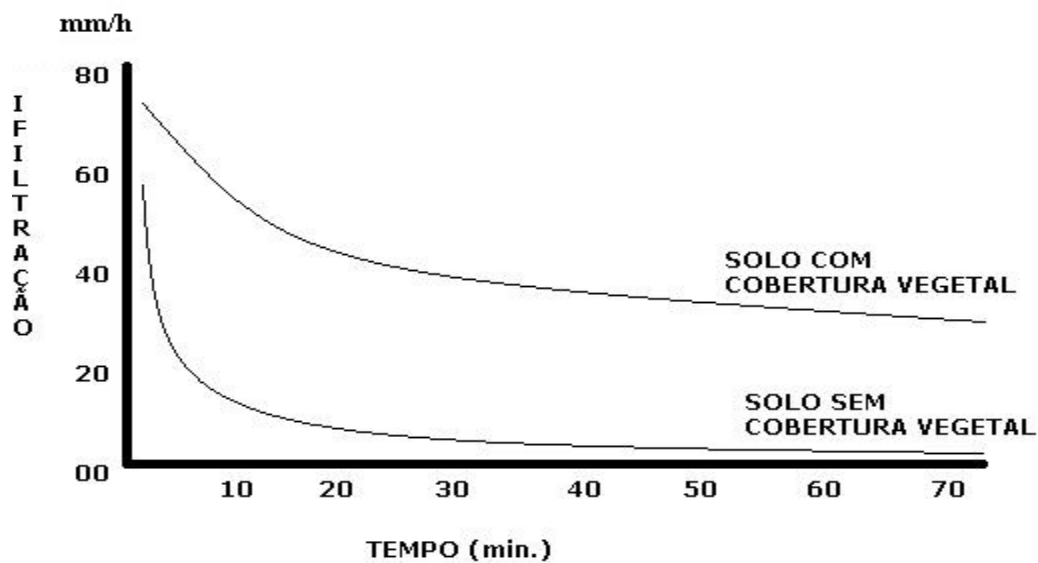


Figura 11: Infiltração em solos com e sem vegetação. Adaptado de WILCOCK; ESSERY (1984).

A cobertura vegetal tende a aumentar a infiltração, pois retarda o fluxo e a permanência da lâmina d'água superficial. A vegetação aumenta a permeabilidade da camada de superfície pelo seu sistema de raízes, aumentando o teor de matéria orgânica e estimulando a atividade biológica do solo, o que conduz a uma maior porosidade e permeabilidade (BERGKAMP, 1998) (Quadro 6).

Quadro 6: Influência de cobertura do solo na infiltração.

Adaptado de (MUSGRAVE; HOLTAN 1964)

| COBERTURA DO SOLO | INFILTRAÇÃO (mm/h) |
|--------------------|--------------------|
| Vegetação densa | 57 |
| Vegetação moderada | 19 |
| Vegetação baixa | 13 |
| Campo | 10 |
| Pastagem | 9 |
| Agricultura | 7 |
| Solo sem vegetação | 6 |

As propriedades do solo desempenham um papel crucial no processo de infiltração, porém modificações na superfície do solo como, por exemplo, a retirada da vegetação produzem mudanças neste processo (NERIS et al. 2012) (Fig. 12).

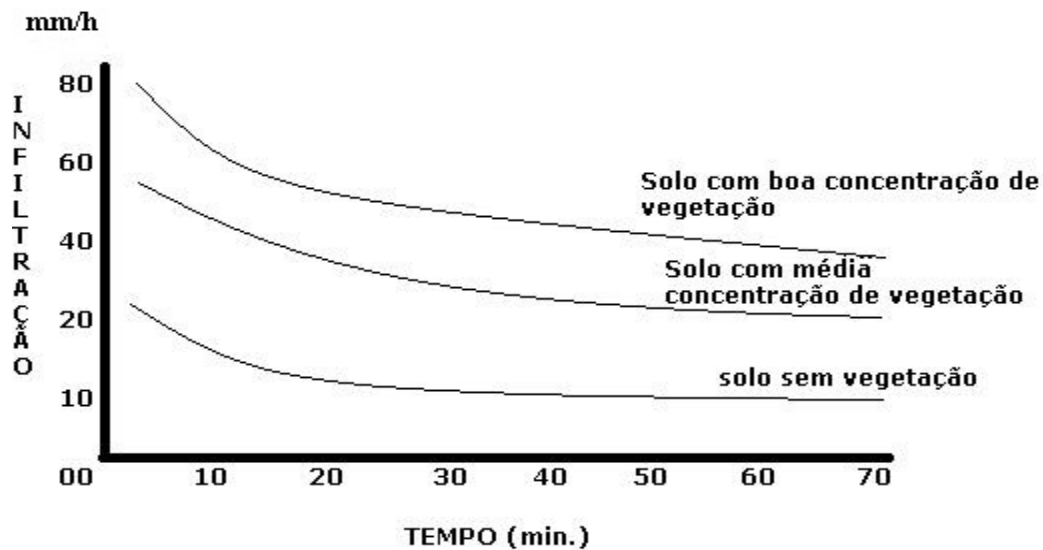


Figura 12: Taxa de infiltração para diferentes densidades de cobertura vegetal.
Adaptado de DUNNE; LEOPOLD (1978).

3.2 PRECIPITAÇÃO E INFILTRAÇÃO

A recarga de um aquífero começa após a precipitação e infiltração da água na superfície do solo. Na fase inicial a água é absorvida pelo solo para compensar a sua capacidade de evapotranspiração, em seguida, a água infiltra até atingir a zona saturada, sendo que precipitação excedente torna-se escoamento superficial (WIDODO 2012).

As curvas de infiltração definem a capacidade de infiltração superficial ao longo do tempo, determinando a capacidade de recarga potencial em cada local. Toda vez que a precipitação pluviométrica excede a capacidade de infiltração, a quantidade de água excedente obrigatoriamente transforma-se em escoamento superficial (Fig.13).

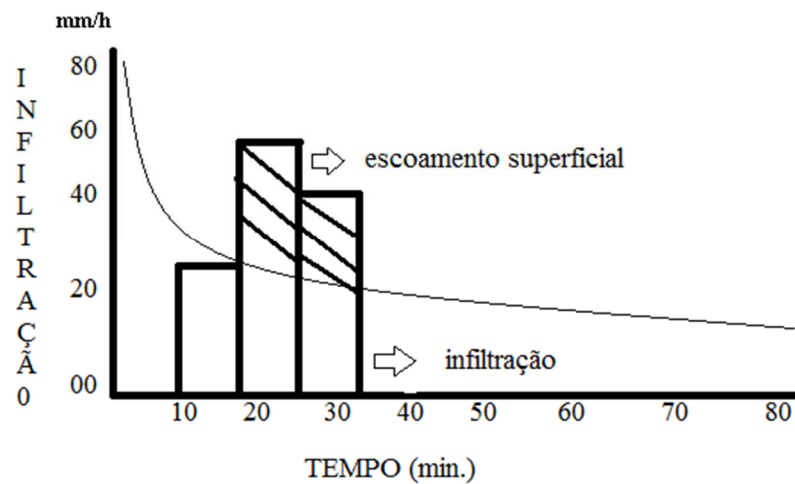


Figura 13: Taxa de infiltração e escoamento superficial. Adaptado de HORTON (1971).

Além da recarga superficial, os aquíferos recebem aporte hídrico lateral, devido ao fluxo subterrâneo. No caso de São Leopoldo, os aquíferos aluvionares situados ao longo do rio dos Sinos recebem aporte hídrico do Sistema Aquífero Guarani (ZARDO, 2007) (Fig.14).

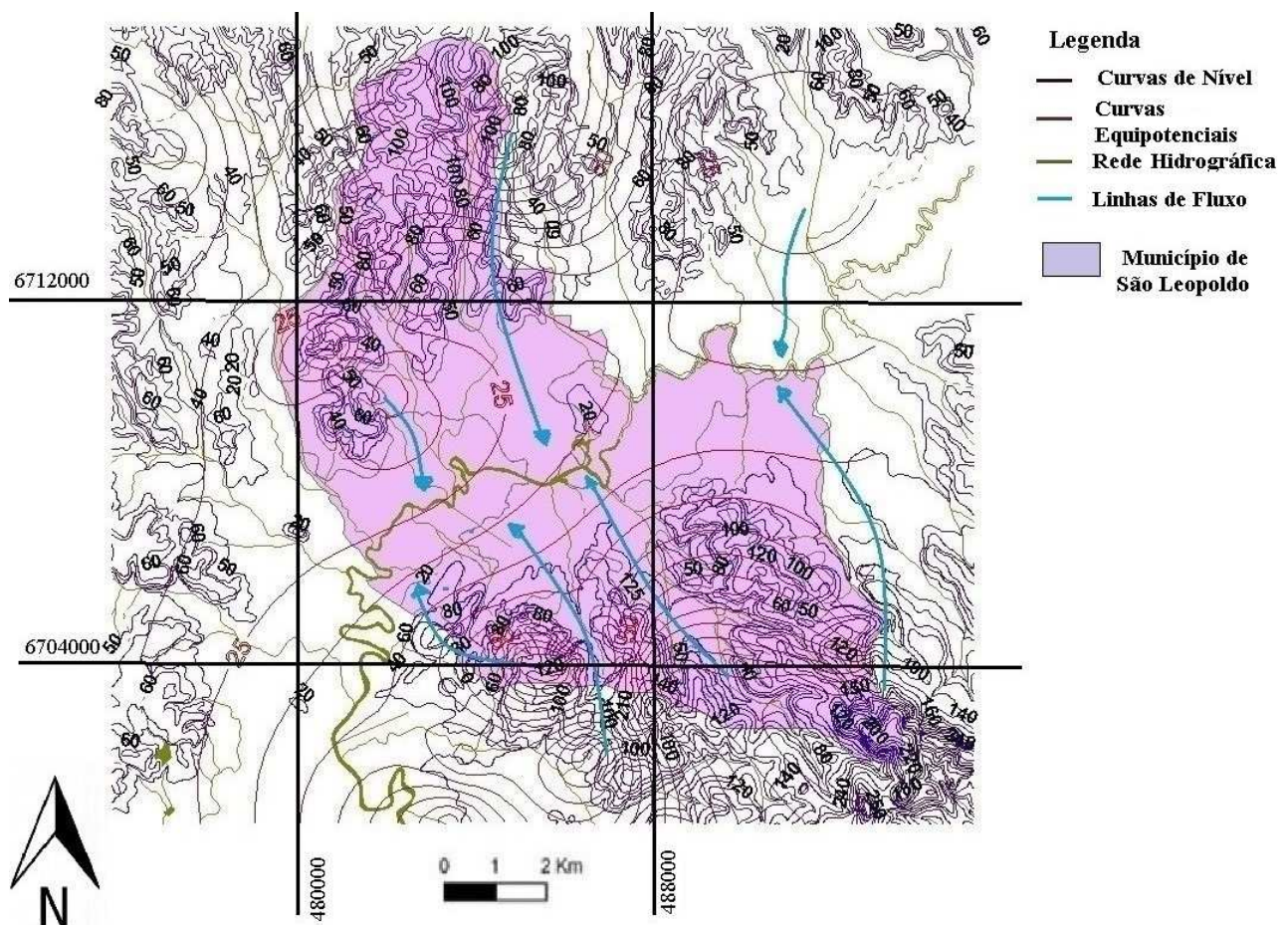


Figura 14: Carta potenciométrica e fluxo subterrâneo em São Leopoldo – RS. Adaptado de ZARDO (2007).

3.3 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Tratando-se de um problema complexo, a recarga subterrânea tem sido abordada por técnicas estimativas e/ou avaliações espaciais, entre as quais a análise multicritério. Este processo utiliza álgebra de cartas/mapas para avaliação espacial de problemas complexos com múltiplas variáveis. Esta análise pressupõe a definição clara do problema e envolve a escolha de um número finito de alternativas a partir de critérios inicialmente selecionados.

A partir década de 1960, a análise multicritério passou a ser utilizada em substituição aos métodos de decisão tradicionais, nos quais os critérios eram estabelecidos de forma rígida. Estes métodos muitas vezes ignoravam fatos ou objetos que poderiam interferir nos resultados, o que muitas vezes conduzia a conclusões inadequadas ou a resultados não verificados na prática. Com o aperfeiçoamento da análise multicritério, a partir da década de 1970, esta passou a apresentar resultados mais condizentes com a realidade, ao incluir múltiplas variáveis no processo de avaliação do conhecido/desconhecido. Ao contemplar todas as possíveis inferências relacionadas a um determinado problema, a análise multicritério passou a constituir uma forma racional de apontar resultados, tanto esperados como totalmente novos, facilitando a implementação de ações práticas na solução e gerenciamento de problemas nas mais diversas áreas (JORDÃO; PEREIRA, 2006).

Atualmente, a análise multicritério vem sendo utilizada em inúmeras áreas do conhecimento (VILAS BOAS, 2004), entre elas a hidrogeologia, na análise da recarga natural ou artificial de aquíferos granulares, tanto livres quanto confinados (GONÇALVES et al., 2007; FORTES et al., 2007).

A análise com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é um método fraco em lidar com a incerteza podendo gerar conflitos e com isto perderem-se importantes informações, podendo levar a uma má decisão. Por sua vez, a Análise Multicritério integrada ao (SIG) fornece soluções

adequadas ao problema, pois engloba fatores não quantificáveis tais como o ambiente, o uso do solo, os limites geológicos, entre outros (RAHMAN et al. 2012).

A análise multicritério, conforme LOPEZ-MARRERO et al. (2013), consiste na sequencialização de etapas, tais como a definição de objetivos, identificação de critérios, ponderação dos fatores, mapeamento dos critérios e execução do modelo multicritério no programa GIS.

3.3.1 definição do objetivo

O primeiro passo na realização de uma análise multicritério é definir o objetivo da análise

3.3.2 identificação dos critérios

Identificar os critérios e determinar quais são os mais importantes no apoio a esse objetivo. As restrições são critérios que excluem áreas da análise e os fatores são critérios que influenciam a viabilidade do objetivo em apreço.

3.3.3 geração de matriz de importância relativa dos fatores

A geração da matriz permite comparar os fatores entre si, identificando-se a cada comparação o fator de maior influência.

3.3.4 normalização dos critérios e uso do SIG

Conta-se o número de vezes que o fator foi identificado como o mais influente, normalizando-se este resultado pelo número total de comparações.

3.3.5 aplicação ao objeto de estudo

O mapa resultante da avaliação multicritério fornece informação geográfica que pode ser utilizada para resolver situações conflitantes. O mapa resultante pode atuar como uma ferramenta para ajudar a visualizar escolhas e avaliar alternativas de gestão.

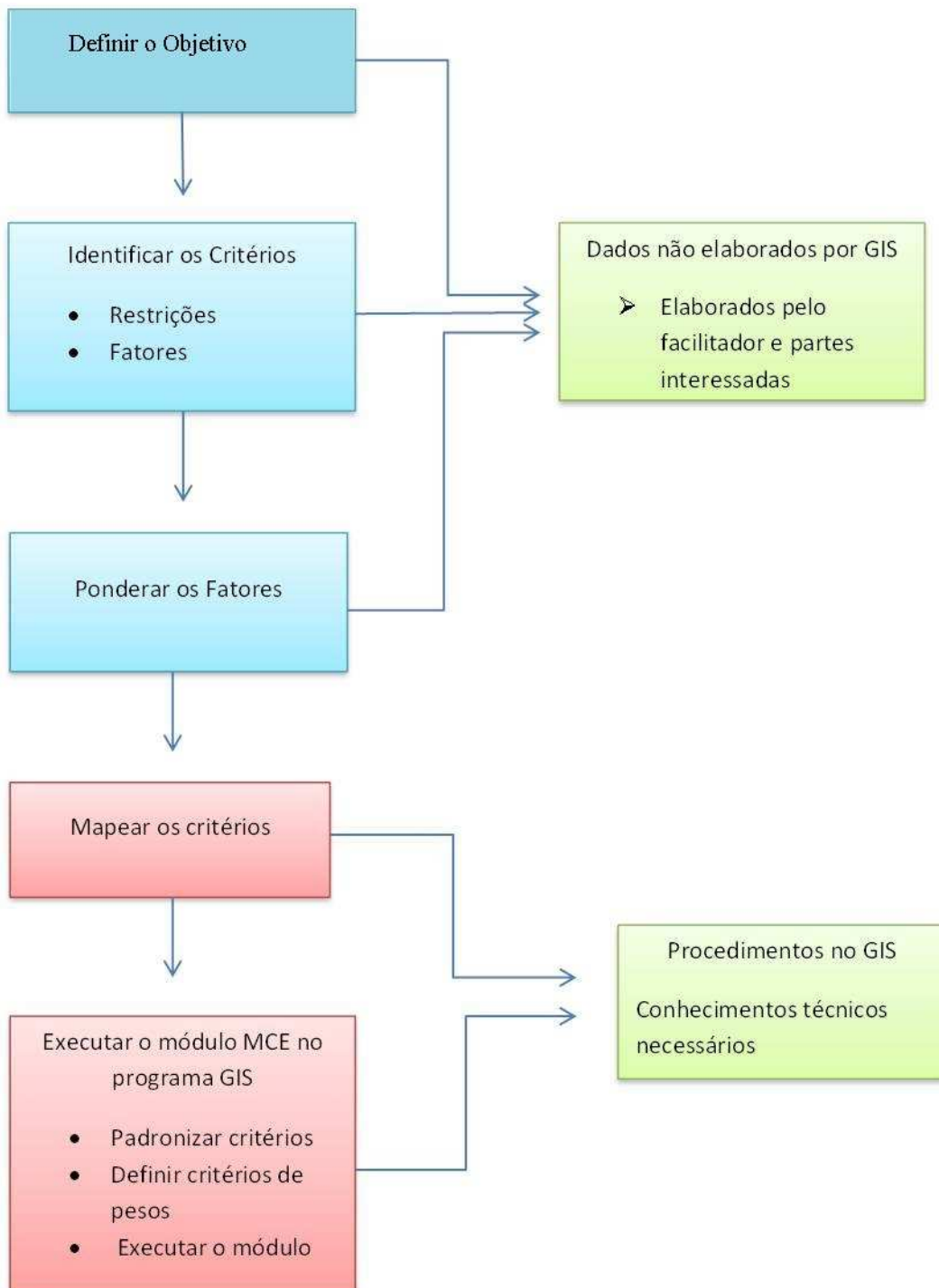


Figura 15: Síntese do processo de análise multicritério.
Adaptado de LÓPEZ-MARRERO et al. (2013)

Quadro 7: Exemplo de matriz de importância relativa e pontuação dos fatores considerados. Adaptado de LÓPEZ-MARRERO et al. (2013).

| Fator | Distância do Rio | Distância do El Yunque National Forest | Cobertura Florestal | Porção nordeste da área de estudo | Paisagem | Cobertura de zonas úmidas | Pontuação |
|--|------------------|--|--|-----------------------------------|--|--|-----------|
| Distância do Rio | | Distância do Rio | Distância do Rio | Distância do rio | Distância do rio | Cobertura de zonas úmidas | 4 |
| Distância do El Yunque National Forest | | | Distância do El Yunque National Forest | Porção nordeste da área de estudo | Distância do El Yunque National Forest | Distância do El Yunque National Forest | 3 |
| Cobertura florestal | | | | Porção nordeste da área de estudo | Paisagem | Cobertura florestal | 1 |
| Porção nordeste da área de estudo | | | | | Paisagem | Porção nordeste da área de estudo | 3 |
| Paisagem | | | | | | Paisagem | 3 |
| Cobertura de zonas úmidas | | | | | | | 1 |

TOTAL 15

Quadro 8: Peso dos fatores considerados, calculados a partir da pontuação de cada fator, obtida pela matriz de importância relativa (quadro 7), dividido pelo somatório de todos os fatores considerados.

| FATOR | PESO |
|---------------------------|---------------|
| Distancia do Rio | 0,2667 |
| Distância de El Yunque | 0,2000 |
| Cobertura Florestal | 0,0667 |
| Porção Nordeste | 0,2000 |
| Paisagem | 0,2000 |
| Cobertura de zonas úmidas | 0,0667 |
| TOTAL | 1,00 |

Como exemplo de aplicação, o peso do fator “Paisagem” é obtido pela razão da sua pontuação na matriz de importância relativa e total da soma da pontuação desta mesma matriz.

$$\text{Peso "Paisagem"} = 3/15 = 0,2$$

4 MÉTODO E TÉCNICAS

A abordagem do problema, considerando a proposta de LÓPEZ-MARRERO et al. (2013), visa a execução de simulações e a geração de cenários evolutivos no espaço geográfico do Município de São Leopoldo. Esta abordagem foi concebida conforme a seqüência metodológica indicada na Figura 16 e detalhada no Quadro 9.

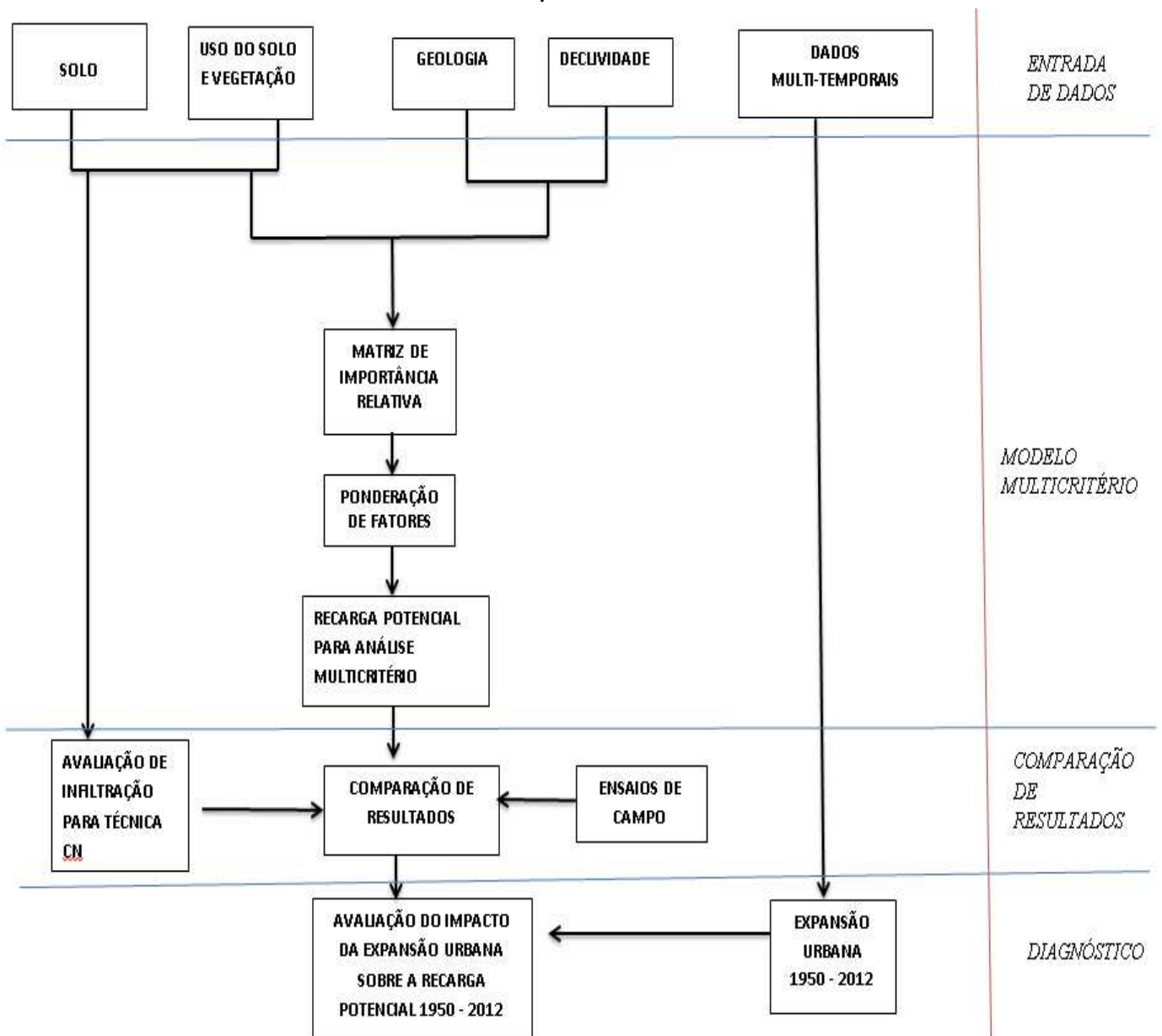


Figura 16: Concepção da abordagem metodológica

Quadro 9: Etapas Metodológicas

| Etapas | | Dados | Processos/produtos | Técnicas/software |
|---------------|---|---|---|---|
| A | Entrada de dados | Bibliografia e dados pré-existent | Seleção de material | ILWIS 3.4 |
| B | Avaliação da expansão urbana | Série histórica de cartas municipais (1950 – 2012) e dados populacionais | Digitalização Sobreposição Gráficos temporais | ILWIS 3.4 EXCEL 2010 |
| C | Concepção e Construção do modelo de análise espacial | Cartas Pedológica, Uso e ocupação do solo, Cobertura vegetal, declividade, geologia | Ponderação dos fatores condicionantes Cruzamento de cartas temáticas | ILWIS 3.4 Análise Multicritério (LOPEZ-MARRERO et al.) |
| D | Comparação de resultados | Cartas de solos, uso e vegetação Resultado Análise Multicritério Valores de infiltração | Ensaio de campo Processamento CN Cruzamento de cartas temáticas | Testes com infiltrômetro de duplo anel Método CN (USA Agriculture Department, 1986) ILWIS 3.4 |
| E | Diagnóstico do impacto da expansão urbana sobre recarga potencial | Cartas multitemporais de recarga potencial (1950 – 2012) | Cruzamento de cartas temáticas | ILWIS 3.4 Análise para 1950 - 2012 |

4.1 COLETA E ENTRADA DE DADOS

A coleta de dados consistiu na análise bibliográfica de estudos e técnicas já existentes sobre infiltração e recarga, bem como na seleção da técnica mais adequada para a realização deste tipo de estudo. Na entrada de dados foi feita a seleção de dados e material digital, os quais foram importados para o programa ILWIS 3.4.

4.2 ANÁLISE DA EXPANSÃO URBANA

As cartas multitemporais de 1950 a 2012 (Quadro 10) foram escaneadas, introduzidas no ILWIS 3.4 e georeferenciadas (WGS 84), sendo estas sobrepostas obtendo-se a carta de expansão urbana.

Quadro 10: Cartas multitemporais de São Leopoldo e suas respectivas escalas (disponíveis na biblioteca da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos)

| Carta/Ano | Escala |
|------------------|---------------|
| 1950 | 1:25.000 |
| 1960 | 1:25.000 |
| 1970 | 1:10.000 |
| 1980 | 1:10.000 |
| 1997 | 1:10.000 |
| 2012 | 1:10.000 |

4.3 CONCEPÇÃO IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE ESPACIAL MULTICRITÉRIO

A concepção do modelo iniciou pela seleção dos critérios relevantes quanto ao potencial de infiltração e recarga no município de São Leopoldo. Nesta fase foram ponderados os mapas com critérios que vão distinguir os pontos de maior e menor infiltração, o que foi feito com base em bibliografia e testes já realizados com esta técnica.

As cartas foram georeferenciadas pelo sistema de coordenadas WGS 84 e possuem orientação para o norte geográfico, sendo as escalas de cada carta especificadas no Quadro 11.

Quadro 11: Cartas-base e suas respectivas escalas

| Cartas | Escalas |
|-------------------------|-----------------|
| Declividade | 1:10.000 |
| Vegetação e uso do solo | 1:10.000 |
| Geologia | 1:25.000 |
| Solos | 1:25.000 |
| Cenário Final | 1:25.000 |

As cartas temáticas foram submetidas à ponderação de acordo com análise bibliográfica, sendo que muitos dados já haviam sido testados por pesquisas na área da hidrogeologia. A seguir estão indicadas as classes de cada carta temática, com os seus respectivos pesos e justificativas (Quadros 12, 13, 14 e 15). A escala aplicada aos fatores de ponderação, utiliza o método baseado em pontos de 1 a 5, sendo: 5 - ótimo, 4 - bom, 3 - regular, 2 - ruim e 1 - péssimo (RAMOS, 2000; BARETTA, 2007).

Quadro 12: Ponderação das classes de declividade.

| Classe declive | Peso | Justificativa |
|-----------------------|-------------|---|
| 0% a 8% | 5 | A declividade apresenta escoamento superficial mínimo. Ótimo para infiltração e recarga. |
| 8% a 20% | 4 | A declividade apresenta um escoamento pouco mais elevado. Boa para infiltração. |
| 20% a 45% | 3 | A declividade apresenta um escoamento acelerado. Regular para infiltração. |
| 45% a 75% | 2 | A declividade apresenta um escoamento bastante acelerado devido a elevada inclinação do terreno fazendo com que a infiltração seja muito restrita. Ruim para infiltração. |
| Maior de 75% | 1 | A declividade apresenta alto fluxo linear. Péssimo para infiltração. |

Quadro 13: Ponderação das classes de solos.

| Classe de solo | Peso | Justificativa |
|----------------------------------|-------------|--|
| Argissolos Amarelos Eutróficos | 5 | Apresenta alta capacidade de infiltração, com boa permeabilidade |
| Argissolos Vermelhos Diatróficos | 4 | Apresenta boa capacidade de infiltração |
| Gleissolos e Planossolos Hápicos | 2 | Apresenta baixa capacidade de infiltração |
| Nitossolos Vermelhos Distróficos | 2 | Apresenta baixa capacidade de infiltração |

Quadro 14: Ponderação das classes de geologia.

| Classe geologia | Peso | Justificativa |
|--------------------------------------|-------------|---|
| Formação Piramboia | 5 | Arenitos finos a médios, quartzosos bem selecionados com boa permeabilidade. |
| Formação Botucatu | 5 | Arenitos finos a médios, quartzosos bem selecionados com boa permeabilidade. |
| Depósitos Aluvionares e Coluvionares | 4 | Depósitos arenosos inconsolidados com boa porosidade. Permeabilidade boa, porém heterogênea |
| Formação Rio do Rasto | 1 | Pelitos, siltitos e arenitos finos a muito finos, acamadados pouco permeáveis. |

Quadro 15: Ponderação das classes de vegetação, uso e ocupação.

| Classe | Peso | Justificativa |
|--|-------------|--|
| Mata Nativa Mata Mista Reflorestamento | 5 | Apresenta um ótimo potencial de infiltração de água, bom amortecimento da energia da queda d'água nas folhas e grande quantidade de enraizamento profundo. |
| Sucessão vegetal | 4 | Apresenta bom potencial de infiltração de água, grande quantidade de enraizamento, porém pouco profundo. |
| Campo Antrópico | 3 | A exposição do solo as intempéries o torna compactado, dificultando a infiltração e possível recarga do aquífero. |
| Banhado | 2 | Apresenta um baixo potencial de infiltração e recarga devido ao perfil argiloso do solo. |
| Área Urbana | 1 | Apresenta uma baixíssima ou nula capacidade de infiltração e recarga, pelo alto índice de construções e pavimentação. |

O modelo de avaliação espacial da recarga potencial subterrânea (Fig. 17), seguindo a proposta de LOPEZ-MARRERO et al. (2013), foi implementado no *software* ILWIS 3.4 conforme a equação “a”

$$\text{POTrec} = (\text{DECp} * \text{DECs}) + (\text{GEOp} * \text{GEOs}) + (\text{SOLp} * \text{SOLs}) + (\text{USOp} * \text{USOs}) + (\text{VEGp} * \text{VEGs}) \quad (\text{equação “a”})$$

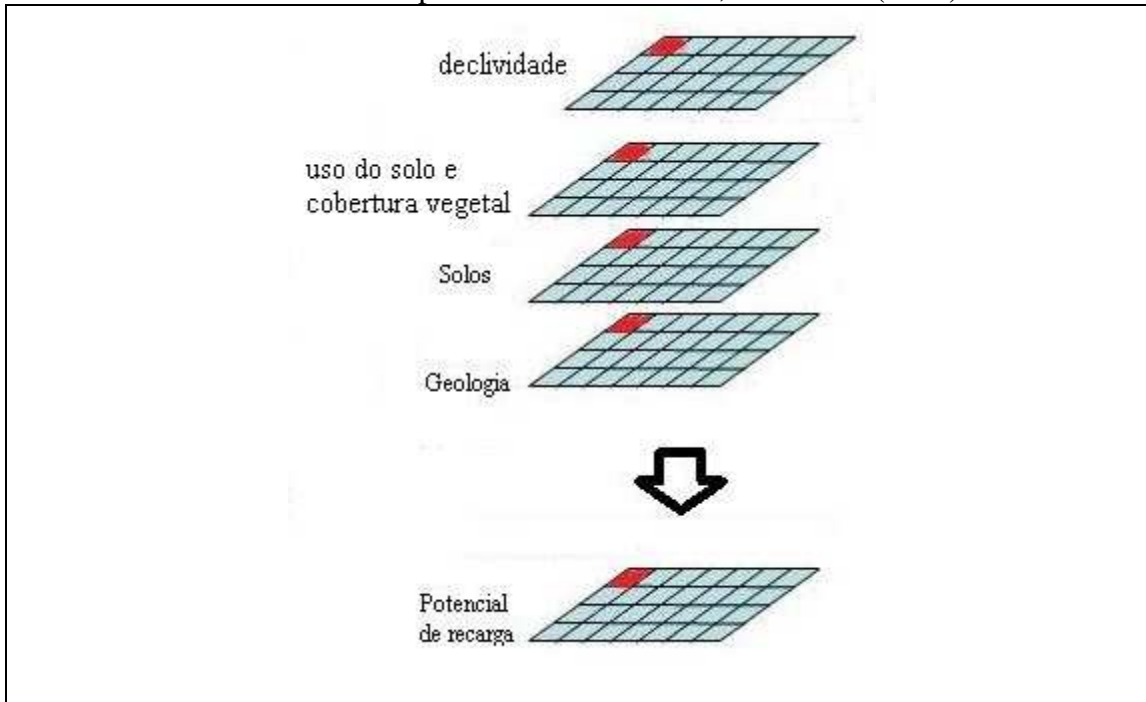
Em que:

- POTrec - carta de estimativa da recarga potencial subterrânea
- DECp – peso relativo do parâmetro declividade
- DEC – carta de declividade classificado (score)
- GEOp - peso relativo do parâmetro geologia
- GEOs - carta geológico classificado (scores)
- SOLp - peso relativo do parâmetro solos
- SOLs - carta de solos classificado (scores)
- USOp - peso relativo do parâmetro uso superficial
- USOs - carta de uso classificado (scores)

- VEGs – carta de cobertura vegetal classificado (escores)
- VEGp – peso relativo do parâmetro cobertura vegetal

Figura 17: Operação de sobreposição e fusão de mapas pela técnica de análise multicritério para a geração e simulação de cenários pela alteração dos fatores influentes realizados pelo software ILWIS (mapas Uso e Ocupação, Solos e Geologia), tendo como produto final a recarga potencial subterrânea.

Adaptado de BOERBOOM; SHARIFI (2004)



Os pesos utilizados para as cartas temáticas na Equação “a” (DECp, GEOp, SOLp, USOp e VEGp) foram determinados por uma matriz de importância relativa (Quadro 16), nesta esta matriz os fatores influentes no objeto do estudo, permitiram a atribuição de pesos relativos às variáveis consideradas. Nesta matriz os fatores são comparados entre si, identificando-se a cada comparação o fator de maior influência. Ao final conta-se o número de vezes que o fator foi identificado como o mais influente, normalizando-se este resultado pelo número total de comparações (LÓPEZ-MARRERO et al. 2013) (Quadro 17). Os critérios de atribuição de importância relativa encontram-se indicados no Quadro 18.

Quadro 16: Matriz de importância relativa e pontuação dos fatores considerados.

| FATOR | GEOLOGIA | SOLOS | DECLIVIDADE | USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL | PONTUAÇÃO Importância Relativa |
|--|-----------------|--------------|--------------------|--|--|
| GEOLOGIA | | SOLOS | GEOLOGIA | USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL | 1 |
| SOLOS | | | SOLOS | USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL | 2 |
| DECLIVIDADE | | | | DECLIVIDADE | 1 |
| COBERTURA VEGETAL E USO DO SOLO | | | | | 2 |
| TOTAL: | | | | | 6 |

Quadro 17: Peso dos fatores considerados, calculados a partir da pontuação de cada fator, obtida pela matriz de importância relativa (Quadro 16), dividido pelo somatório de todos os fatores considerados.

| FATOR | PESO |
|---------------------------------|-------------|
| Geologia | 0,167 |
| Solos | 0,333 |
| Declividade | 0,167 |
| Cobertura vegetal e uso do solo | 0,333 |
| TOTAL | 1,0 |

Quadro 18: Comparação da importância relativa de fatores de infiltração e recarga

| FATORES | FATOR PREDOMINANTE | JUSTIFICATIVA |
|--|--|---|
| GEOLOGIA X SOLOS | SOLOS | Os solos têm maior influência, devido ao fato de condicionarem a infiltração superficial, afetando o processo de recarga subterrânea. |
| GEOLOGIA X DECLIVIDADE | GEOLOGIA | A área apresenta predominantemente declividade baixa a moderada. As áreas íngremes, onde o escoamento superficial é mais acentuado, são condicionadas por características geológicas. |
| GEOLOGIA X USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL | USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL | A impermeabilização superficial devida ao uso do solo tem efeito preponderante sobre a geologia. |
| SOLOS X DECLIVIDADE | SOLOS | Nas áreas de baixa declividade, os solos exercem efeito restritivo, embora o relevo plano favoreça a infiltração superficial. |
| SOLOS X USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL | USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL | O tipo de uso, por alterar as características dos solos, é mais influente que a cobertura vegetal. |
| DECLIVIDADE X USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL | DECLIVIDADE | A alta declividade limita a infiltração, mesmo onde a cobertura vegetal é densa. |

4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO COM A TÉCNICA CN

A avaliação foi feita tanto para coeficiente de infiltração dos solos, como para o resultado final da análise espacial.

Comparação das estimativas Multicritério com técnica CN

Os resultados da análise Multicritério foram comparados com a técnica CN, para diagnosticar as áreas com ou sem coincidência entre as duas técnicas, assim como para analisar as tendências de desvios entre ambos.

Segundo USDA (1986), o SCS (Serviço de Conservação dos Solos dos Estados Unidos) avaliou mais de 4.000 solos para verificar o potencial de escoamento superficial, classificou estes solos em quatro grupos hidrológicos segundo a sua capacidade de infiltração (teores de areia e argila), identificando-os com as letras A, B, C e D (Quadro 19), os quais são utilizados na técnica CN.

Quadro 19: Classificação dos solos CSC – USDA (1986). Adaptado de TOMAZ (2011)

| Grupo de solos | Características do solo |
|-----------------------|--|
| A | Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. (PORTO et al., 1979). Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila. (TUCCI, 1993). |
| B | Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Não pode haver Concreções Fe e Ca e nem camadas argilosas até 1,5m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que acamada superficial (PORTO et al., 1979). Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o Grupo A e com permeabilidade superior à média (TUCCI, 1993). |
| C | Solos barrentos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidade de 1,2m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade (PORTO et al., 1979). Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo (TUCCI, 1993). |
| D | Solos argilosos (30% a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solos arenosos como do Grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados (PORTO et al., 1979). Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial (TUCCI, 1993). |

A técnica CN (*runoff Curve Number*), desenvolvida pelo Natural Resources Conservation Service do USDA (*United States Department of Agriculture*), utiliza uma abordagem numérica empírica para obter uma quantificação do escoamento superficial direto ou de infiltração em função do volume de precipitação. Trata-se de uma técnica relativamente precisa, sendo amplamente utilizada para determinar a quantidade aproximada de escoamento superficial direta ou infiltração. Conforme o documento USDA (1986), o escoamento superficial é fornecido pela equação “b”:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{(equação “b”)}$$

Sendo:

- Q = escoamento superficial ou chuva excedente (mm);
- P = precipitação (mm);
- I_a = abstração inicial (mm) e
- S = potencial máximo de retenção após começar o escoamento superficial (mm).

A abstração inicial I_a representa todas as perdas antes do início do escoamento superficial, incluindo a água retida nas depressões superficiais, infiltrada, evaporada ou interceptada pela vegetação. Empiricamente, foi determinado que I_a pode ser estimado pela Equação “c”:

$$I_a = 0,2 S \quad \text{(Equação “c”)}$$

Substituindo o valor de I_a na Equação “d” obtemos:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{válida quando } P > 0,2 S \quad \text{(Equação “d”)}$$

Sendo S fornecido pela Equação “e”

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{(Equação “e”)}$$

A Equação “e” é válida para precipitação $P > 0,2S$, pois quando $P < 0,2S$ o valor de Q é igual a 0. A estimativa da infiltração (Inf), desconsiderando a abstração inicial, é feita pela equação “f”:

$$\text{Inf} = P - Q - I_a \quad \text{(Equação “f”)}$$

4.5 AVALIAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO EM SOLOS

Os valores de infiltração considerados foram testados em campo, através de ensaios de duplo anel para medir a taxa de infiltração nos pontos de menor, intermediária e maior infiltração, apontadas pela técnica de análise multicritério.

Utilizou-se um infiltrômetro de anel com dois cilindros concêntricos, com diâmetros de 25 cm e 50 cm (Fig. 18), os quais são inseridos no solo. A água é aplicada e mantida a um nível constante (uma profundidade cerca de 5 a 10 mm). O anel externo serve para evitar o movimento lateral da água, a partir do anel interno. Isto conduz a água em movimento vertical a uma maior profundidade.

As medidas são feitas através da taxa de reposição para manter o nível constante, assim determina-se a taxa de infiltração.

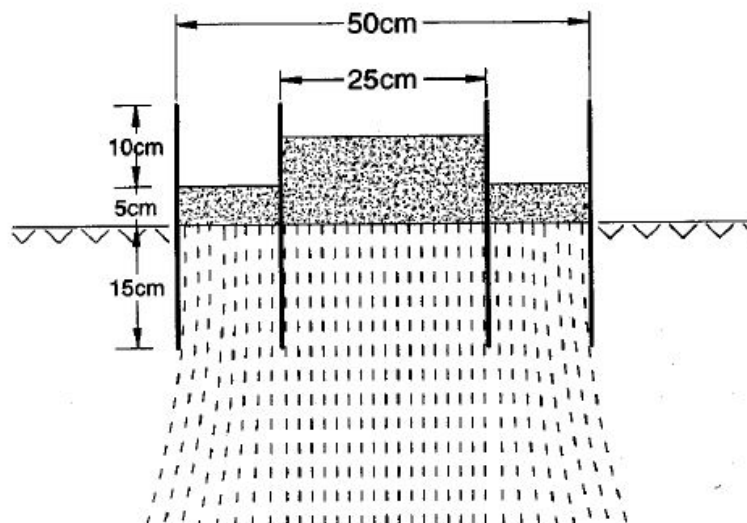


Figura 18: Funcionamento ensaio do Duplo Anel (TOMAZ, 2011)

A instalação do Infiltrômetro (*Double Ring*) é feita por cravação no solo com auxílio de marreta e, para isso, as bordas inferiores do Infiltrômetro devem ser finas (cortantes). O infiltrômetro deve estar cravado no solo em torno de 15 cm de profundidade (Fig. 19).

Coloca-se água, simultaneamente nos dois anéis, sendo que os níveis d'água devem estar posicionados 10 cm abaixo da borda do anel externo e 5 cm abaixo da borda do anel interno. Cada anel é abastecido por um tubo de *Mariotte* (Fig. 20). Neste tipo de ensaio a infiltração é calculada pela quantidade de água que infiltra pelo anel interno, sendo desconsiderada a infiltração do anel externo, pois este tem a função conduzir a água que infiltra no solo, conforme a Figura 19.



Figura 19: Ensaio de infiltração com infiltrômetro de duplo anel

Os tubos de Mariotte que abastecem os anéis estão graduados em milímetros, perfazendo um total de 8 litros de água em cada tubo (Fig. 20).



Figura 20: Detalhe dos tubos de Mariotte

As leituras são realizadas de minuto em minuto, até atingir-se 5 min, quando passa-se a medir a cada 10 minutos até o tempo total de 30 minutos de teste. Após esse período, as medidas ocorrem a cada 15 minutos, até completar uma hora de teste. Após isto, a leitura ocorre a cada 30 minutos até o encerramento do teste, perfazendo um total de 2 horas de ensaio de infiltração.

Os ensaios de infiltração foram realizados no dia 14 de janeiro de 2014, nos locais indicados na Figura 21. A taxa de infiltração estabelecida independe das estações do ano ou da umidade anterior do solo, uma vez que o próprio ensaio propicia a saturação do solo até a estabilização da infiltração superficial.

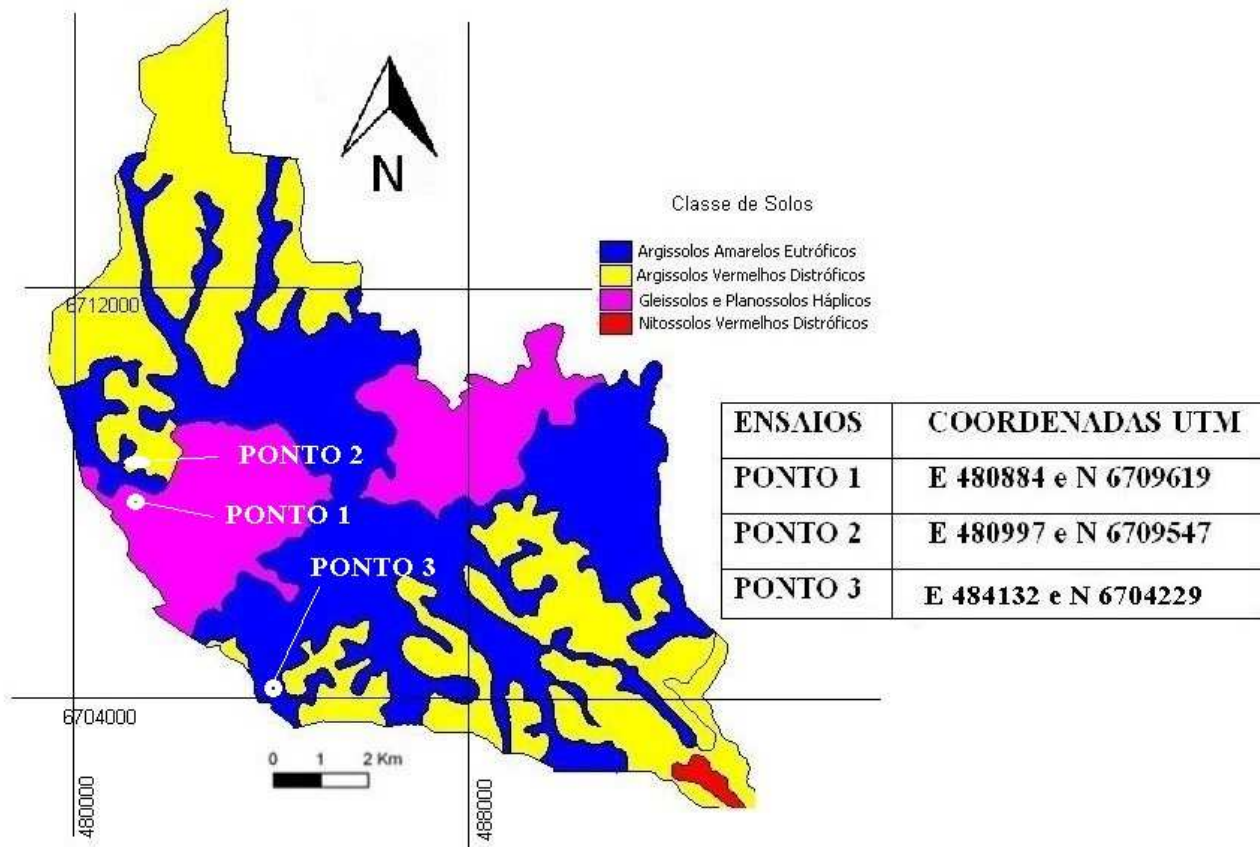


Figura 21: Carta de classes de solos, Adaptado de NASCIMENTO (2001), com os pontos onde foram realizados os ensaios de infiltração.

4.6 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA SOBRE A RECARGA POTENCIAL SUBTERRÂNEA

A avaliação do impacto da expansão urbana sobre a recarga potencial subterrânea foi feita comparando-se os resultados da análise multicritério para datas de 1950 e 2012.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 EXPANSÃO URBANA

O município de São Leopoldo teve uma grande expansão da sua área urbana a partir de 1950 (Fig. 22). A população em 1950 era de 25.794 habitantes e passou para 214.210 habitantes em 2010, representando um aumento de 860% na população do município.

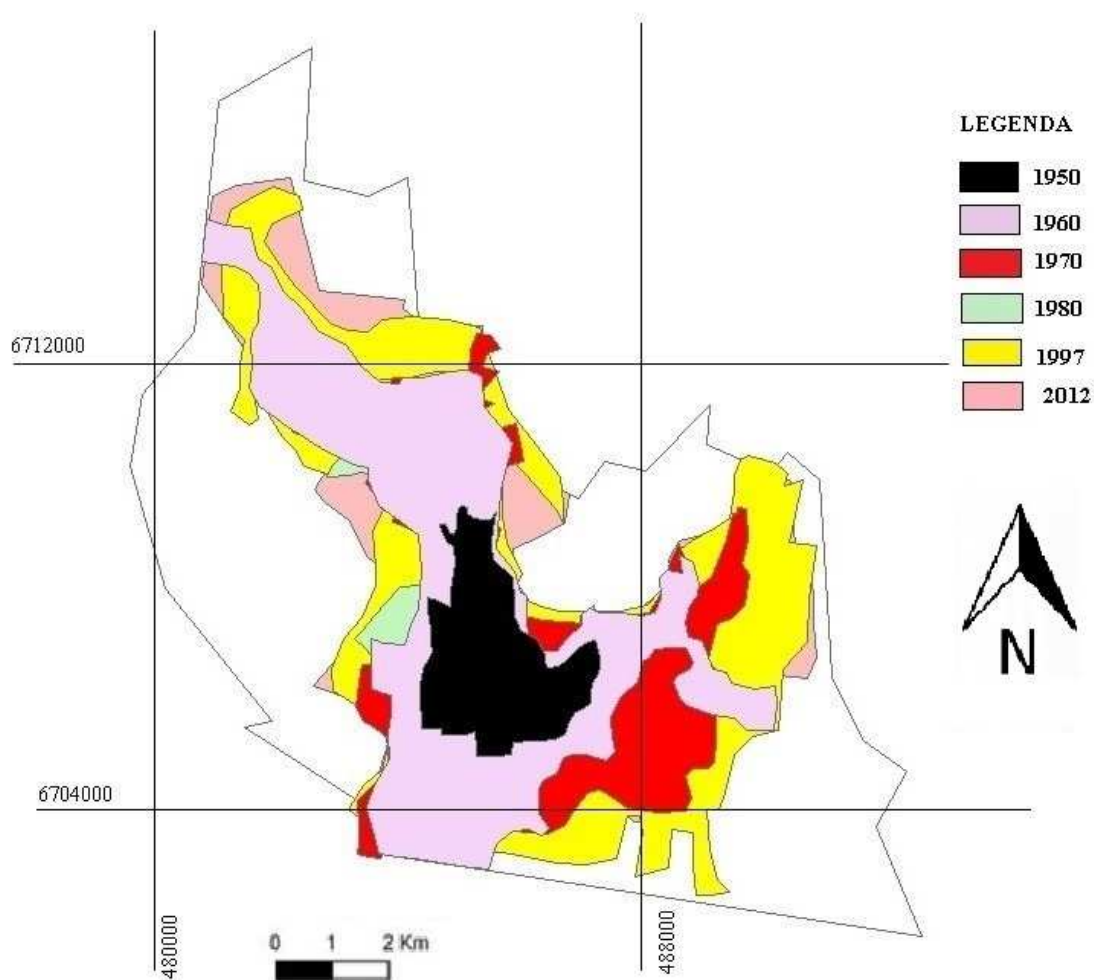


Figura 22: Carta de expansão urbana de São Leopoldo no período de 1950 – 2012 (1:25.000).
Executado pelo autor

A evolução da área urbana do município de São Leopoldo mostra que em 1950 esta constituía 20 km² e passou para 71 km² em 2012 (Quadros 20 e 21).

Quadro 20: Expansão urbana de 1950 - 2012 no Município de São Leopoldo

| Ano | Área urbana km² | Aumento real km² |
|------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1950 | 20 | ----- |
| 1960 | 38 | 18 |
| 1970 | 49 | 11 |
| 1980 | 53 | 04 |
| 1997 | 65 | 12 |
| 2012 | 71 | 06 |

Quadro 21: Expansão urbana no período de 1950 – 2012 do Município de São Leopoldo

| Ano | Área urbana km² | Variação no período (km²) | Taxa de expansão km²/ano |
|------------|-----------------------------------|---|--|
| 1950 | 20 | ----- | ----- |
| 1960 | 38 | 18 | 1,8 |
| 1970 | 49 | 11 | 1,1 |
| 1980 | 53 | 04 | 0,4 |
| 1997 | 65 | 12 | 1,7 |
| 2012 | 71 | 06 | 1,2 |

A partir do momento em que há um aumento na população, imediatamente temos um aumento do consumo de recursos hídricos. Na Figura 23, é possível perceber o aumento do consumo de água com o aumento do número de habitantes. O consumo médio por habitante é de 55m³/ano.

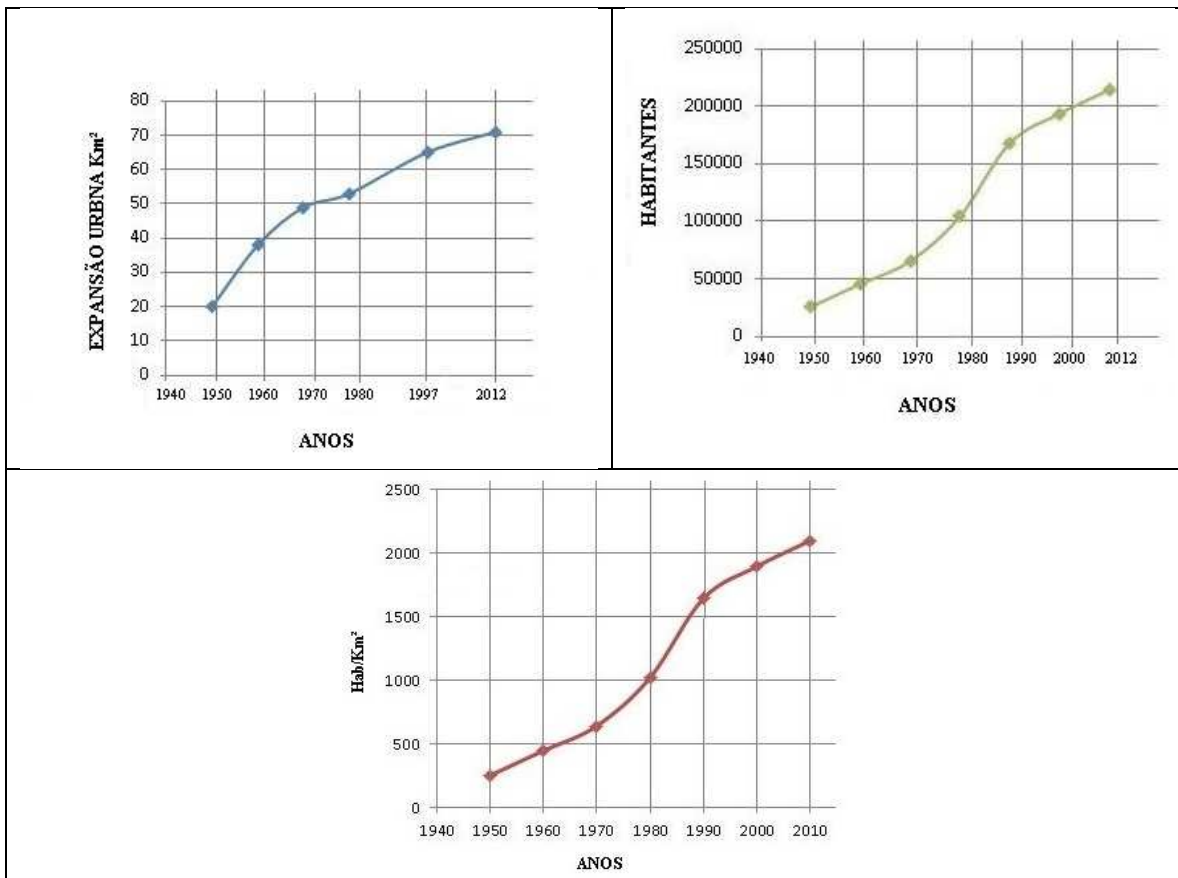


Figura 23: Gráficos de Expansão Urbana, Habitantes, Densidade Demográfica e Consumo de Água.

Os Quadros 22 e 23 mostram a evolução do consumo de água conforme o crescimento da população do município de São Leopoldo.

Quadro 22: Variação da demanda hídrica no período 1950-2010 do município de São Leopoldo

| Ano | Demanda hídrica Anual (m³) x 10 | variação no tempo m³ x 10 ⁶ | taxa de consumo ao ano m³ x 10 ⁶ |
|------|---------------------------------|--|---|
| 1950 | 1,41 | ----- | ----- |
| 1960 | 2,51 | 1,10 | 0,11 |
| 1970 | 3,60 | 1,09 | 0,10 |
| 1980 | 5,73 | 2,13 | 0,21 |
| 1990 | 9,23 | 3,5 | 0,35 |
| 2000 | 10,64 | 1,41 | 0,14 |
| 2010 | 11,78 | 1,14 | 0,11 |

Quadro 23: Variação populacional e de consumo de água no período 1950 a 2010 no município de São Leopoldo

| Ano | Nº de habitantes | m ³ de água consumidos por ano |
|------|------------------|---|
| 1950 | 25.794 | 1.418.670 |
| 1960 | 45.638 | 2.510.090 |
| 1970 | 65.462 | 3.600.410 |
| 1980 | 104.216 | 5.731.880 |
| 1990 | 167.908 | 9.234.940 |
| 2000 | 193.547 | 10.645.085 |
| 2010 | 214.210 | 11.781.550 |

5.2 ANÁLISE ESPACIAL MULTICRITÉRIO DA RECARGA POTENCIAL EM 2012

As cartas temáticas obtidas pelos fatores de ponderação, para o ano de 2012 estão apresentadas nas figuras 24, 25, 26 e 27. A carta de estimativa da recarga potencial em 2012, obtida pelo cruzamento das cartas temáticas ponderadas segundo o modelo de análise espacial multicritério, encontra-se na figura 28.

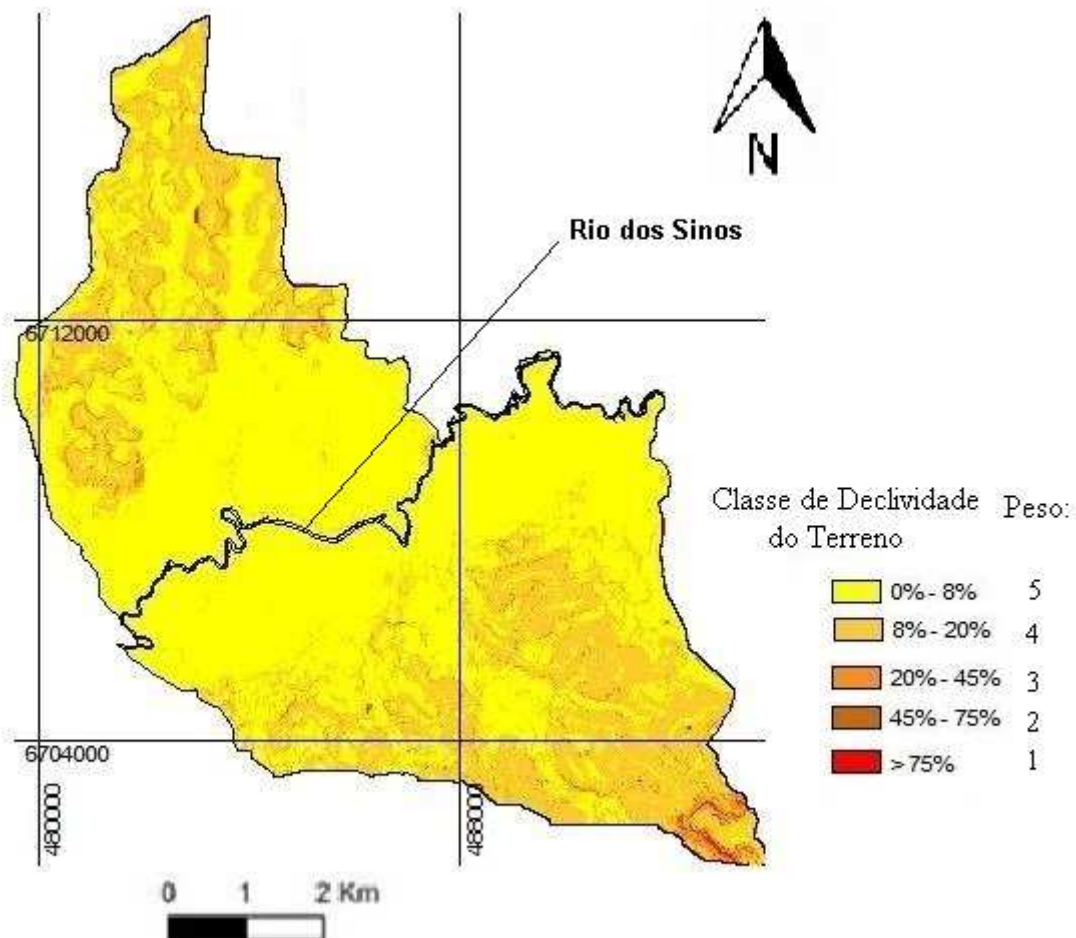


Figura 24: Carta de Declividade ponderada

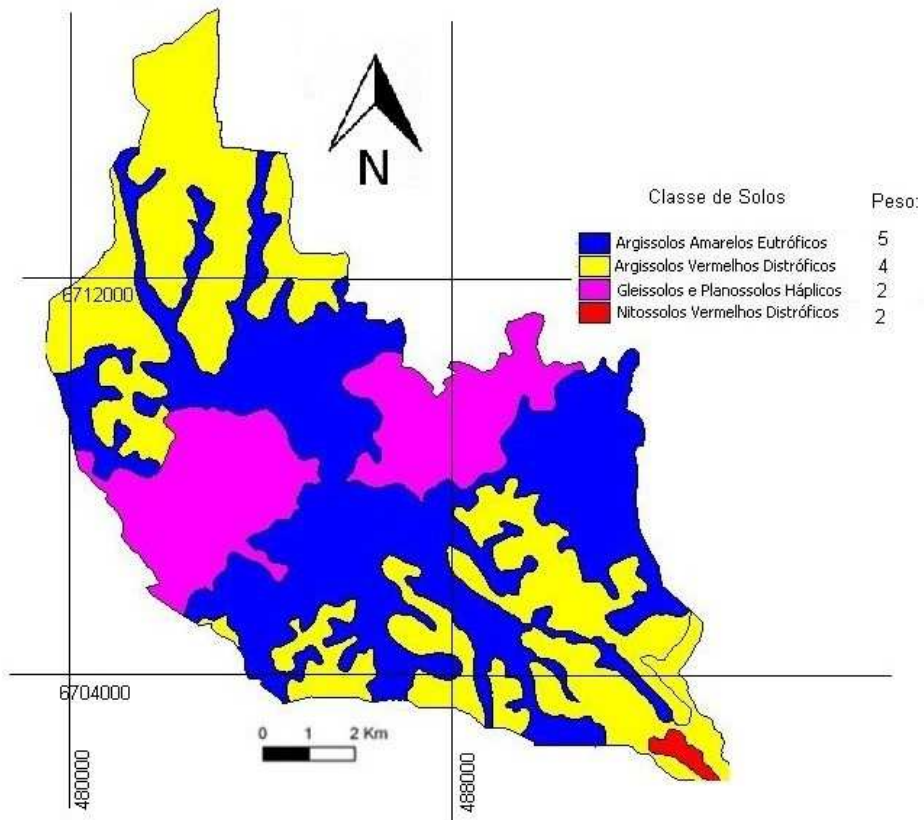


Figura 25: Carta de Solos ponderada

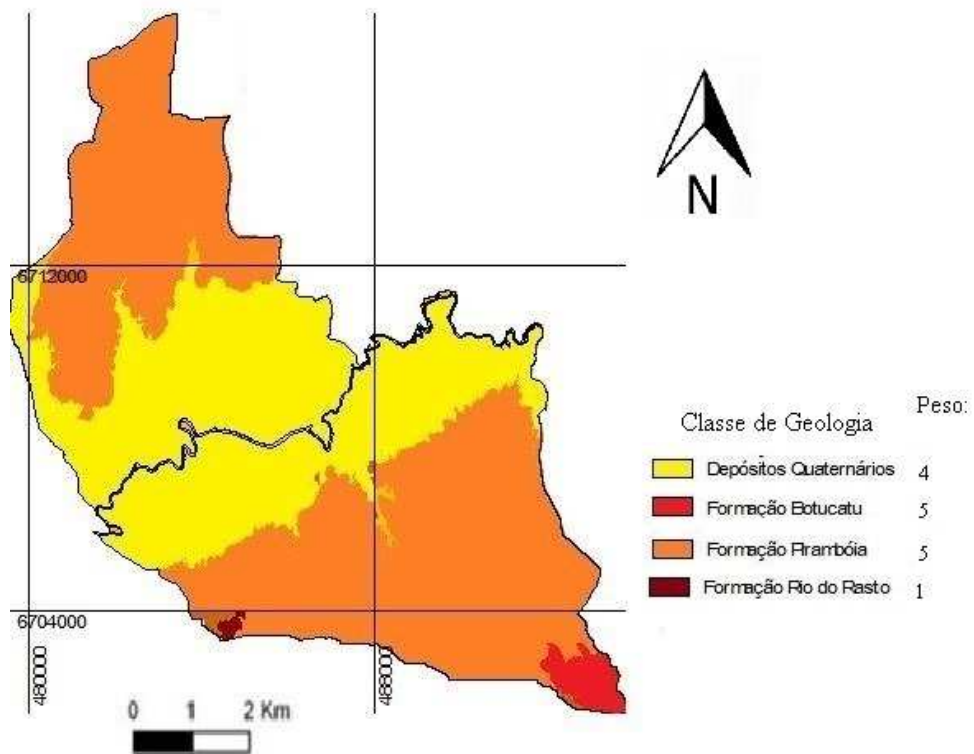


Figura 26: Carta de Geologia ponderada

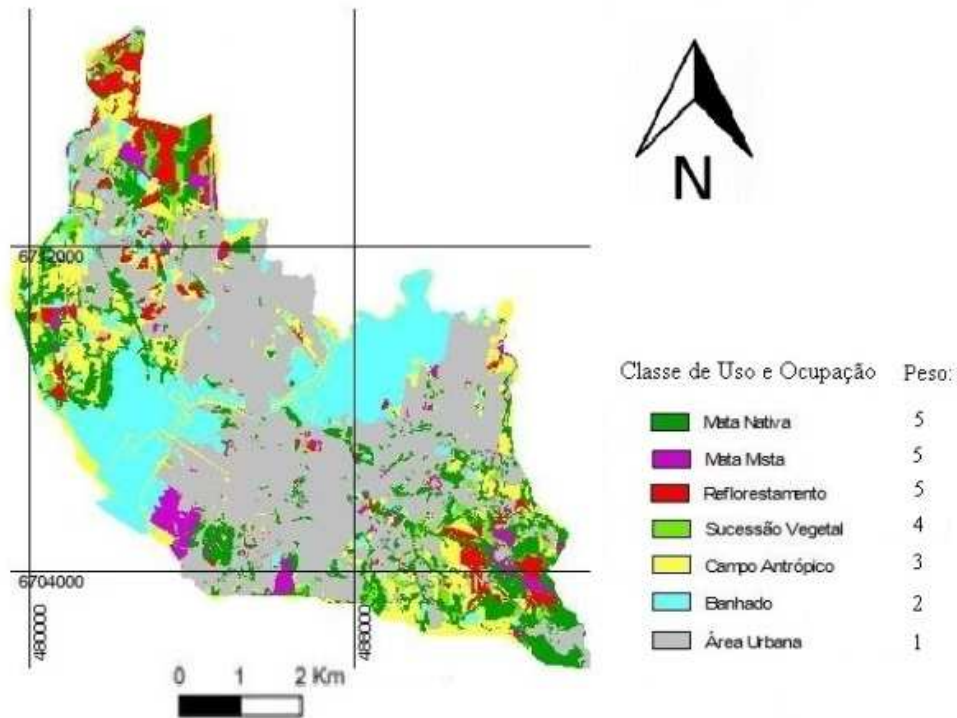


Figura 27: Carta de Uso do Solo e Vegetação ponderada

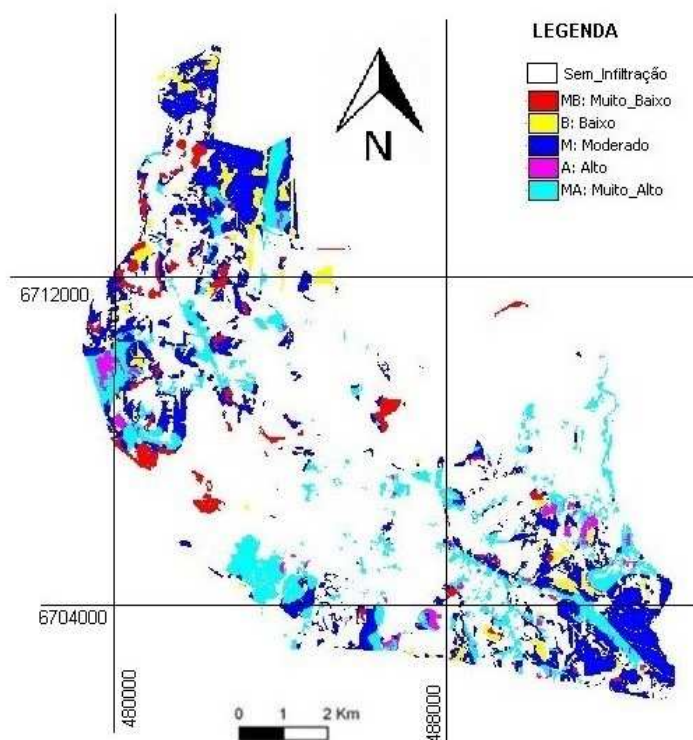


Figura 28: Carta de recarga potencial subterrânea 1:25.000 do Município de São Leopoldo para o ano 2012 obtida a partir das cartas-base geologia, declividade, solos, uso e ocupação. Executado pelo autor

Os valores adimensionais de recarga potencial estimados pela análise multicritério variaram de 25 a 75. Em função dos valores obtidos, foram estabelecidos intervalos de classe de dez em dez, com os valores mais elevados posicionados no centro de classe de maior recarga potencial (classe muito alto). Tomando as classes assim estabelecidas (quadro 24), obteve-se os resultados indicados no histograma (figura 29) e quadro 25. As áreas praticamente sem recarga correspondem à área urbana, sendo que no restante da área municipal predomina a recarga potencial moderada.

Quadro 24: Intervalos de classe estabelecidos para a análise multicritério.

| CLASSE | INTERVALO |
|---------------|------------------|
| Muito Baixo | 0 - 35 |
| Baixo | 35 - 45 |
| Moderado | 45 - 55 |
| Alto | 55 - 65 |
| Muito Alto | > 65 |

As áreas praticamente sem infiltração ocupam 50 % da área do município em contrapartida, as áreas de muito alta infiltração estão limitadas a apenas 13 % da área (Quadro 25).

Quadro 25: Porcentagem da área ocupada por cada classe de recarga potencial em 2012

| Classe | % da área |
|-------------------------------|------------------|
| Área praticamente sem recarga | 50% |
| Muito Baixo | 8% |
| Baixo | 3% |
| Moderado | 20% |
| Alto | 6% |
| Muito Alto | 13% |

Como visto no quadro 25, as áreas praticamente sem infiltração ocupam a metade área do Município de São Leopoldo, nas áreas que ainda temos algum tipo de infiltração predominam as áreas de moderada infiltração (20%), seguidas das áreas de muito alta infiltração (13%) e as outras partes da área são ocupadas pelas demais classes de infiltração (muito baixa, baixa e alta) (Fig. 29).

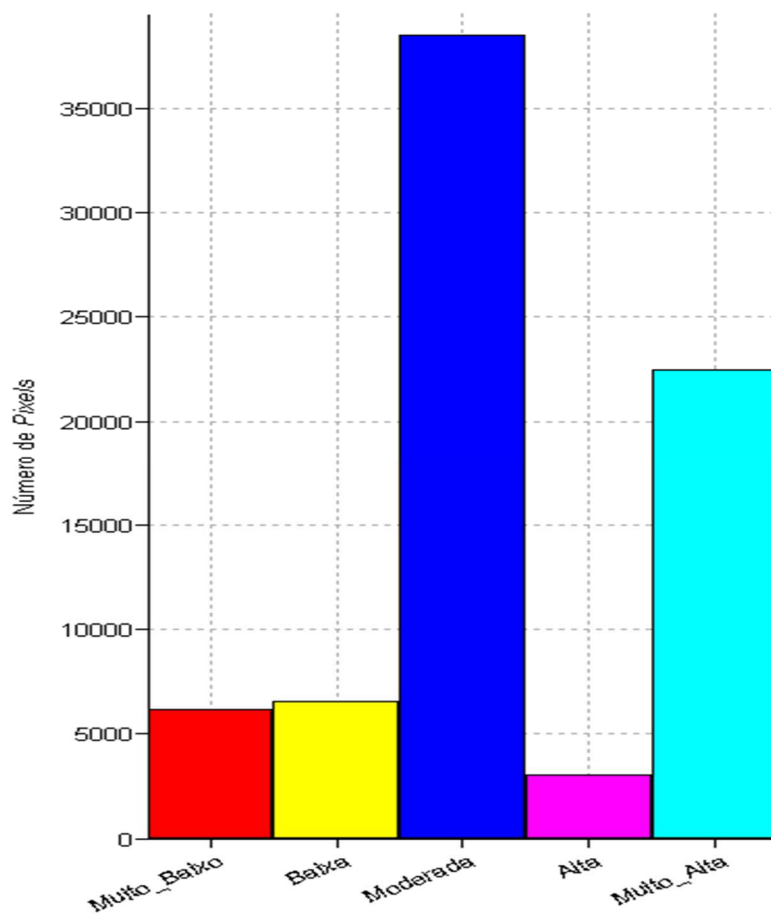


Figura 29: Histograma de classes de recarga potencial subterrânea em 2012.

5.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO COM TÉCNICAS NUMÉRICAS

Artigo submetido a revista da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS).

ANÁLISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS QUANTITATIVAS E NÃO QUANTITATIVAS PARA AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO SUPERFICIAL E RECARGA POTENCIAL SUBTERRÂNEA EM SÃO LEOPOLDO, ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL - BRASIL.

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTIFIABLE AND NON-QUANTIFIABLE TECHNIQUES FOR SUPERFICIAL INFILTRATION AND POTENTIAL GROUNDWATER RECHARGE ASSESSMENT IN SÃO LEOPOLDO, RIO GRANDE DO SUL STATE - BRAZIL.

RESUMO

A infiltração e a recarga potencial subterrânea no município de São Leopoldo – RS foram avaliadas através de critérios quantitativos e não quantitativos. A técnica numérica CN foi utilizada para estimar a infiltração superficial, a qual deve ser igual ou superior a recarga dos aquíferos em subsuperfície, esta última aqui avaliada pela técnica não quantitativa multicritério. A comparação dos resultados apresentou uma taxa de 73,5% de coincidência, excluindo a área urbana, para a qual, considerou-se uma infiltração e recarga extremamente baixa em ambos os casos. Quanto aos desvios de estimativa, da ordem de 26,5%, a técnica numérica CN apresentou resultados predominantemente mais elevados. Os desvios de estimativa devem-se predominantemente aos fatores de uso do solo e geologia, este último não considerado na técnica CN.

Palavras-chave: Infiltração Superficial, Recarga Subterrânea, Técnica CN, Análise Multicritério

ABSTRACT

The infiltration and potential groundwater recharge in São Leopoldo - RS were assessed through quantifiable and non-quantifiable criteria. The CN numerical technique was used to evaluate superficial infiltration, which must be equal to or greater than recharge of aquifers in the subsurface, the latter here assessed by multicriteria not quantifiable technique. The comparison of the results showed a rate of 73.5% match, excluding the urban area, for which both techniques invariably exhibit very low values as expected. As for deviations estimation of the order of 26.5%, the numerical technique presented CN predominantly higher results. Deviations of the estimate are due predominantly to land use and geology factors, the latter not considered in the CN technique.

Keywords: Surficial infiltration, Potential Groundwater, CN Technique, Multicriteria Analysis

INTRODUÇÃO

A infiltração superficial e a recarga potencial subterrânea podem ser avaliadas através de critérios quantitativos e não quantitativos, sendo estes últimos fundamentais para analisar a influência de parâmetros subjetivos não contemplados pelos métodos numéricos. A técnica de análise multicritério, ao considerar quaisquer tipos de parâmetros, torna-se mais abrangente, enquanto as técnicas numéricas, embora limitadas, fornecem resultados quantitativos com uso direto no planejamento de uso dos recursos hídricos. Este é justamente o foco da questão, presumindo-se que a técnica multicritério permita uma melhor aproximação do fenômeno, devido a sua abordagem ampla e a inclusão de critérios não contemplados nas técnicas quantitativas.

Sendo a recarga subterrânea diretamente ligada à infiltração superficial, uma avaliação das diferenças entre a análise multicritério e técnicas numéricas pode indicar a necessidade de adequações e limitações de uso de ambas as técnicas. A avaliação espacial dos resultados da técnica CN (Soil Conservation Service – United States Department of Agriculture, 1986) e da técnica Multicritério (LOPEZ-MARRERO et al., 2013) permite localizar as coincidências e diferenças resultantes, assim como identificar o efeito da inserção de critérios como geologia e declividade. Com este objetivo, o presente estudo compara os resultados de ambas as técnicas aplicadas ao município de São Leopoldo – RS.

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São Leopoldo, com uma área de 102 km², está localizado na Região Metropolitana de Porto Alegre, cujos limites confrontam com os Municípios de Estância Velha, Novo Hamburgo, Sapucaia do Sul e Portão (Figura 1). Situa-se entre as coordenadas UTM 479572 E, 493364 E e 6717304 N, 6702331 N, correspondendo à porção inferior da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, onde ocorre uma extensa planície constituída por banhados e áreas inundáveis.

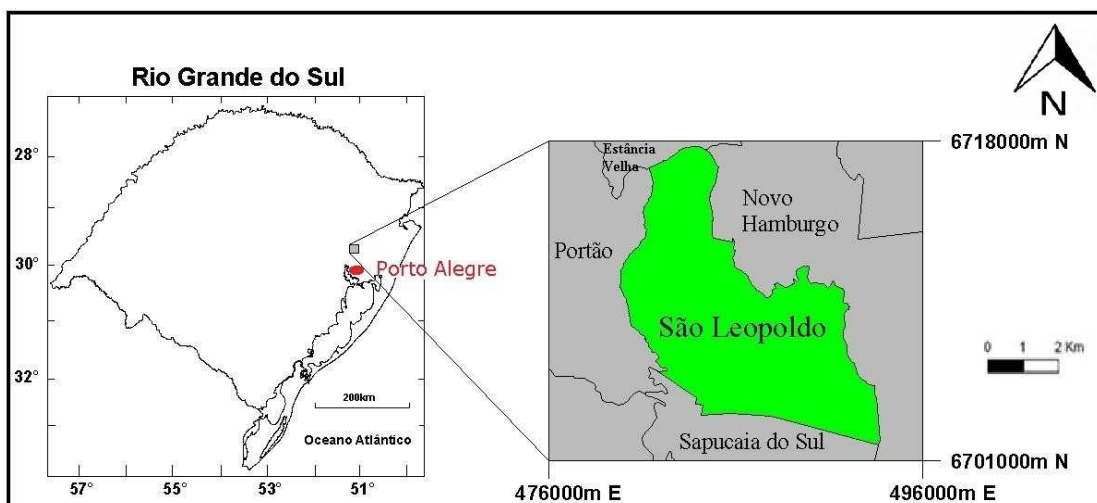


Figura 1: Localização geográfica da área de estudo. Adaptado de Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA, 2013).

Relevo e clima

A área situa-se na depressão periférica do Estado do Rio Grande do Sul apresentando altitudes entre 20 m e 300 m, sendo as maiores altitudes encontradas nas elevações ao norte do município. A classe de declividade plana a levemente ondulada (0 – 8%) é predominante (58% da área). O clima de São Leopoldo é subtropical úmido (Köppen) com temperaturas anuais entre – 1 °C e 40 °C e uma precipitação média anual de 1500 mm/ano.

Solos

Os solos predominantes são Gleissolos e Planossolos na planície inundação, assim como Argissolos e Nitossolos nas encostas e zonas mais elevadas. Os Gleissolos e Planossolos Háplicos encontram-se normalmente nas baixadas, próximos à rede de drenagem, com lençol freático elevado e com riscos de inundação. Esses solos apresentam normalmente baixa capacidade de infiltração.

Os Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelhos são solos normalmente profundos, bem estruturados e bem drenados. Os Nitossolos Vermelhos Distróficos argissólicos tem ocorrência localizada (NASCIMENTO, 2001), apresentando alto teor de argila e baixa capacidade de infiltração.

Geologia e hidrogeologia

A área de estudo é composta por rochas das formações Piramboia, Botucatu, Rio do Rasto e Depósitos Quaternários.

A Formação Piramboia é constituída predominantemente por arenitos eólicos, porosos, com granulometria bimodal e permeabilidades da ordem de $k=10^{-6}$ cm/s. Os Depósitos Quaternários ocorrem em terrenos planos a suavemente ondulados, de baixa

altitude e junto às drenagens. Os sedimentos constituintes destes depósitos são mal selecionados, predominantemente com boa porosidade e permeabilidade, porém com intercalação de argila pouco permeável. As formações Botucatu e Rio do Rasto ocupam apenas uma pequena porção da área de estudo.

Vegetação e Uso do solo

O município encontra-se densamente ocupado pela atividade antrópica, tendo ocorrido uma significativa expansão urbana no período de 1950 a 2012. Nos locais onde houve abandono da atividade agrícola, a vegetação natural voltou a desenvolver-se, gerando zonas de sucessão vegetal e melhorando a capacidade de infiltração (GRAVENA, 1993).

As áreas de banhado, planas e alagadiças, apesar da infiltração lenta, têm alto potencial de recarga subterrânea, sendo responsáveis pela alimentação da rede hídrica superficial em épocas de seca (CARVALHO e OZÓRIO, 2007). Estas áreas foram significativamente ocupadas para plantio de arroz.

As edificações e vias pavimentadas da área urbana reduzem drasticamente a infiltração das águas da chuva, resultando em um incremento significativo do escoamento superficial. Por sua vez, as áreas de matas são formações florestais densas e com copas bem desenvolvidas, protegendo o solo da ação erosiva da precipitação, sendo que a maior profundidade do sistema radicular da floresta facilita a infiltração da água no solo (MONEGAT, 1991; SOARES et al., 2002; GRAVENA, 1993).

Os campos antrópicos são compostos por pastagens, lavouras, solos expostos e desmatamentos. O uso contínuo favorece a compactação do solo, reduzindo a sua permeabilidade e a infiltração superficial.

MÉTODO E TÉCNICAS

A abordagem metodológica baseou-se na comparação dos resultados da Análise Multicritério e da técnica numérica CN.

A análise multicritério, utilizando a proposta de LÓPEZ-MARRERO et al., (2013), foi realizada gerando-se inicialmente uma matriz ampla de fatores influentes na recarga subterrânea, cada um destes representado por uma carta temática. Estes fatores foram comparados entre si, conforme a sua maior ou menor influência sobre a recarga potencial subterrânea, gerando uma tabela de pesos normalizados. Também, para cada uma destas cartas, as classes temáticas receberam escores de 1 a 5, conforme sua contribuição para a recarga subterrânea.

Para execução da análise multicritério, após atribuição de escores para cada classe, bem como dos pesos relativos aos temas geologia, declividade, solos e uso do solo, realizou-se o cruzamento das cartas temáticas com o *software* ILWIS 3.4 (Figura 2), como indicado na expressão (a). As cartas utilizadas têm as seguintes escalas: solos 1:25.000, declividade 1:10.000 geologia 1:50.000 e uso e ocupação 1:10.000, tendo sido todas as cartas utilizadas com *pixel* 20m x 20m.

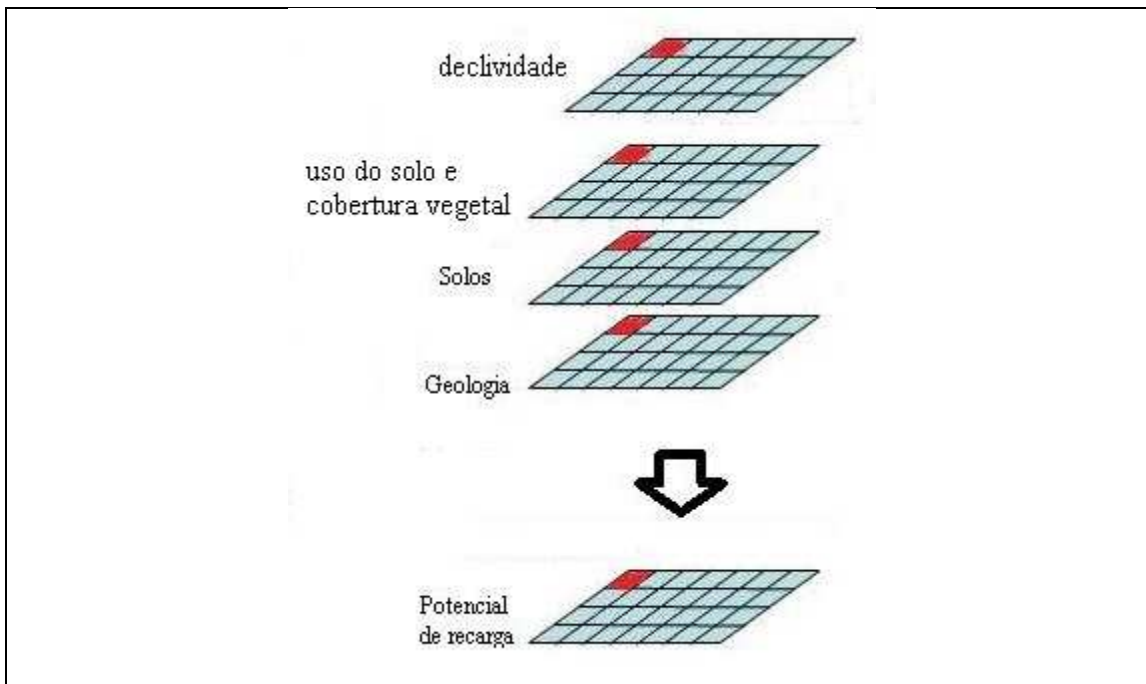


Figura 2: Síntese da análise multicritério considerando os fatores geologia, declividade solos e uso do solo, para avaliação do recarga potencial no município de São Leopoldo - RS (adaptado de BOERBOOM; SHARIFI ,2004)

$$\text{POTrec} = (\text{GEOp} \cdot \text{GEOs}) + (\text{SOLp} \cdot \text{SOLs}) + (\text{USOp} \cdot \text{USOs}) + (\text{DECLp} \cdot \text{DECLs}) \quad (\text{a})$$

Em que:

- POTrec - carta de estimativa do potencial de recarga
- DECp – peso relativo do parâmetro declividade
- DEC – carta de declividade classificado (score)
- GEOp - peso relativo do parâmetro geologia
- GEOs - carta geológica classificada (scores)
- SOLp - peso relativo do parâmetro solos
- SOLs - carta de solos classificado (scores)
- USOp - peso relativo do parâmetro uso superficial
- USOs - carta de uso classificado (scores)
- VEGs – carta de cobertura vegetal classificado (scores)
- VEGp – peso relativo do parâmetro cobertura vegetal

A técnica CN (*runoff Curve Number*), desenvolvida pelo Natural Resources Conservation Service do USDA (*United States Department of Agriculture*), utiliza uma abordagem numérica empírica para obter uma quantificação do escoamento superficial direto ou de infiltração em função do volume de precipitação. Trata-se de uma técnica amplamente utilizada para estimar a quantidade de escoamento superficial direto e infiltração. Conforme o documento (USDA, 1986), o escoamento superficial é fornecido pela equação “b”:

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

Sendo:

- Q= escoamento superficial ou chuva excedente (mm);
- P= precipitação (mm);
- I_a = abstração inicial (mm) e
- S= potencial máximo de retenção após o início do escoamento superficial (mm).

A abstração inicial (I_a) representa todas as perdas antes do início do escoamento superficial, incluindo a água retida nas depressões superficiais, infiltrada, evaporada ou interceptada pela vegetação. Empiricamente determinou-se que a abstração inicial pode ser estimada pela equação “c”:

$$I_a = 0,2 S \quad (c)$$

Substituindo o valor de I_a em “b” obtemos:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{válida quando } P > 0,2 S \quad (d)$$

Sendo S fornecido pela equação “e”

$$\text{Sendo } S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (e)$$

Onde:

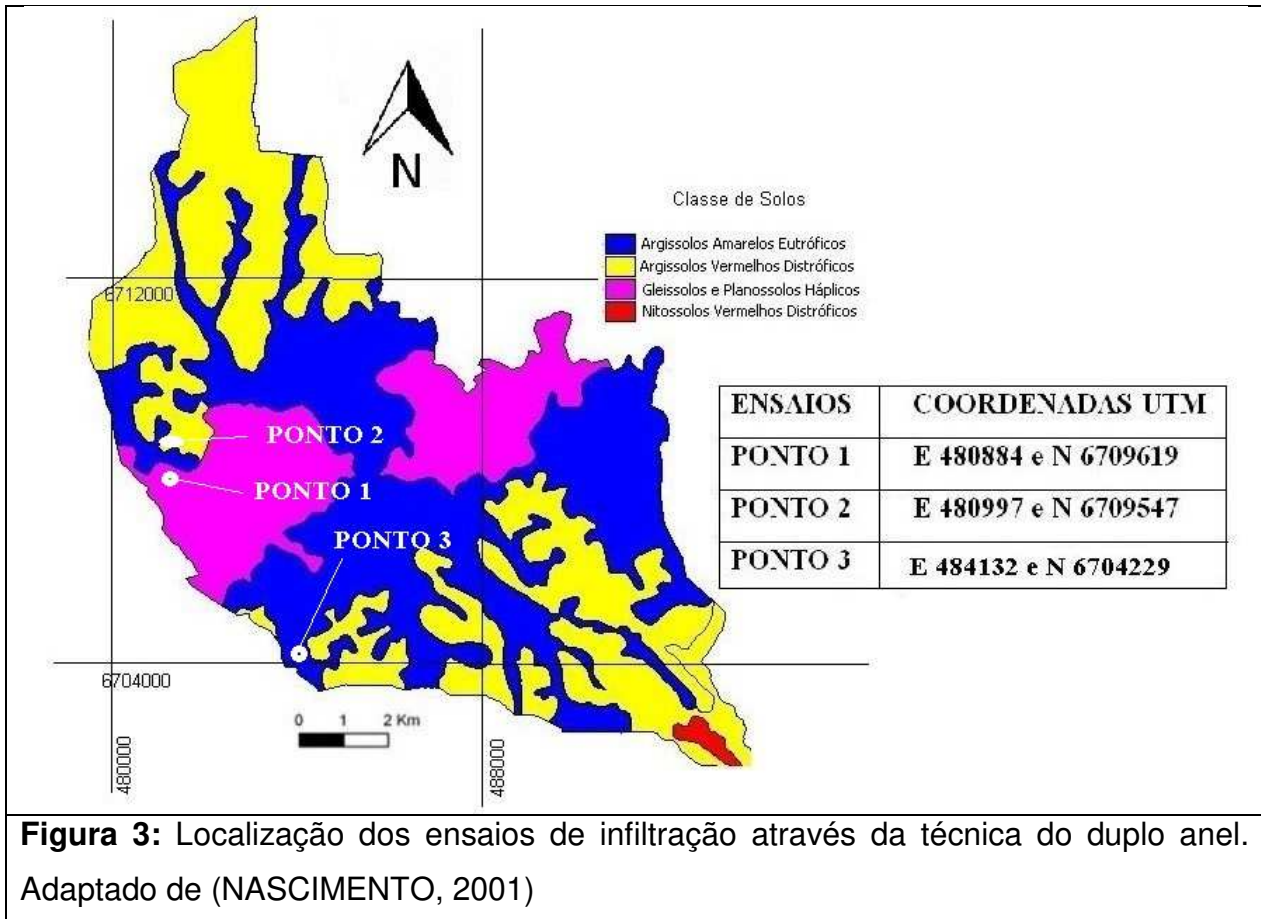
CN = valor tabelado de acordo com o uso do solo e o grupo hidrológico dos solos.

A expressão “d” é válida para precipitação $P > 0,2S$, pois quando $P < 0,2 S$ o valor de $Q=0$. A estimativa da infiltração (Inf) desconsiderando a abstração inicial, é feita pela equação (f).

$$\text{Infiltração} = P - Q - I_a \quad (f)$$

Com vistas a testar os escores atribuídos às classes de solos na técnica multicritério, foram realizados ensaios de infiltração de campo (Figura 3) através do método do duplo anel. Este método permitiu a determinação da taxa de infiltração estabilizada para as distintas classes de solo, o qual foi utilizado para comparação da capacidade de infiltração inicialmente estimada subjetivamente para análise multicritério.

Os resultados de ambas as técnicas foram classificados em cinco classes, variando de muito baixo a muito alto (Quadro 1). Para o técnica CN, utilizaram-se intervalos iguais de 100 mm/h. Para a técnica multicritério utilizaram-se classes de variação de 10 para os escores adimensionais (Quadro 1). Os maiores valores obtidos em cada técnica corresponde ao centro da classe mais elevada (Fig. 4). Para ambas as técnicas considerou-se a área urbana com infiltração e recarga extremamente baixa.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação dos resultados das técnicas multicritério e CN (Figura 4 e 5), excluindo-se a área urbana para a qual os valores foram considerados extremamente baixos em ambas as técnicas, mostra uma coincidência de classificação de 73,5%, conforme expresso na matriz comparativa dos resultados (Quadro 2). Observa-se, nesta mesma matriz, que os desvios em relação a diagonal, da ordem de 26,5%, ocorrem predominantemente no sentido da técnica CN, indicando que a mesma, tende a fornecer estimativas de infiltração mais elevadas que as estimativas de recarga potencial pela análise multicritério. Este resultado é coerente com as premissas iniciais.

Quadro 1: Classes de infiltração (CN) e recarga potencial subterrânea (análise multicritério)

| | Análise Multicritério | CN (mm) |
|-------------|------------------------------|----------------|
| Muito baixo | 0 – 35 | 0 – 80 |
| Baixo | 35 – 45 | 80 – 180 |
| Moderado | 45 – 55 | 180 – 280 |
| Alto | 55 – 65 | 280 – 380 |
| Muito Alto | > 65 | > 380 |

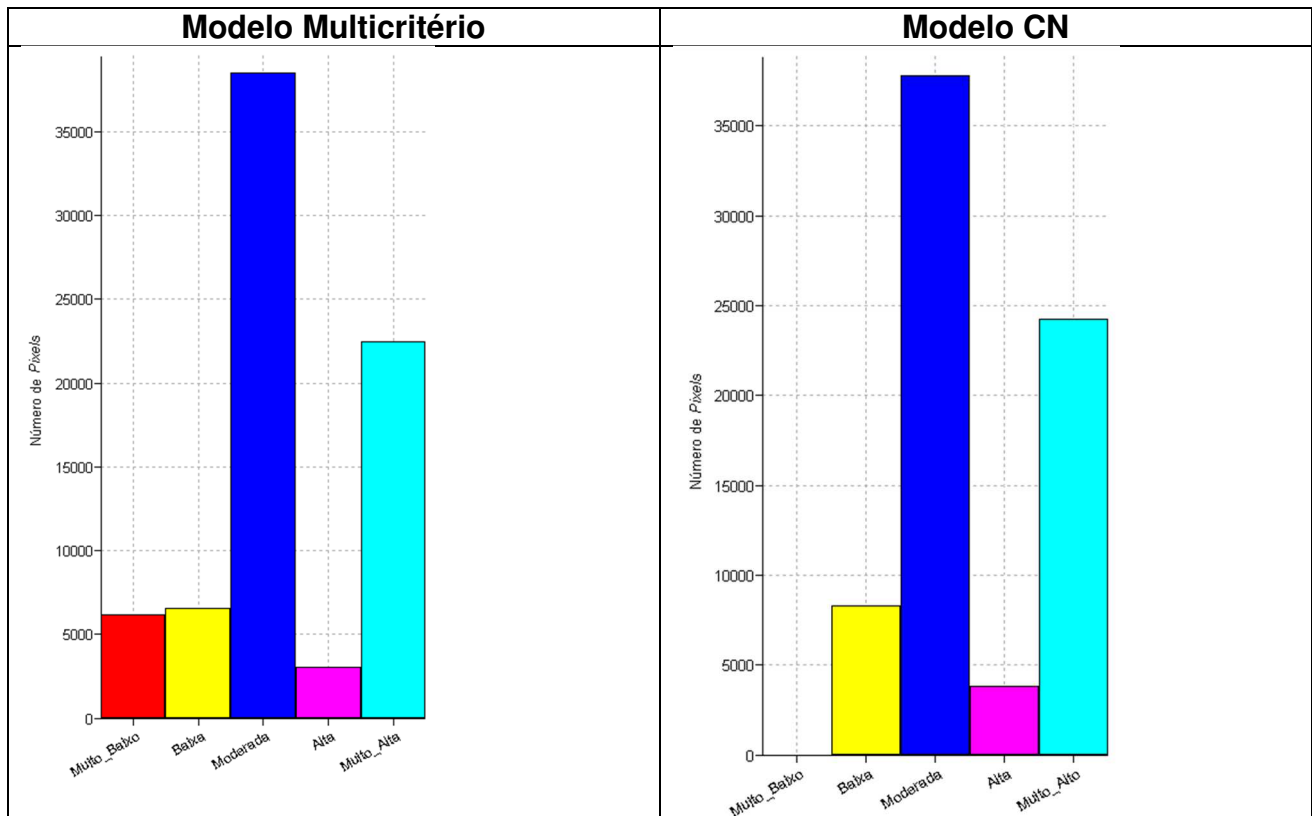


Figura 4: Histogramas de classes resultantes das técnicas de análise multicritério e técnica CN

Quadro 2: Matriz comparativa dos resultados da análise multicritério e técnica CN

| Técnica Multicritério | Técnica CN | | | | |
|-----------------------|-------------|-------|----------|-------|------------|
| | Muito Baixo | Baixo | Moderado | Alto | Muito Alto |
| Muito Baixo | ----- | 8,3% | ----- | ----- | ----- |
| Baixo | ----- | 0,1% | 7,8% | ----- | ----- |
| Moderado | ----- | 2,2% | 43,3% | 5,1% | ----- |
| Alto | ----- | ----- | ----- | ----- | 2,7% |
| Muito Alto | ----- | ----- | ----- | ----- | 30,1% |

23,9%
 73,5%
 2,2%

O desvio em relação ao técnica CN mostrou-se relacionado à geologia, fator considerado apenas na análise multicritério.

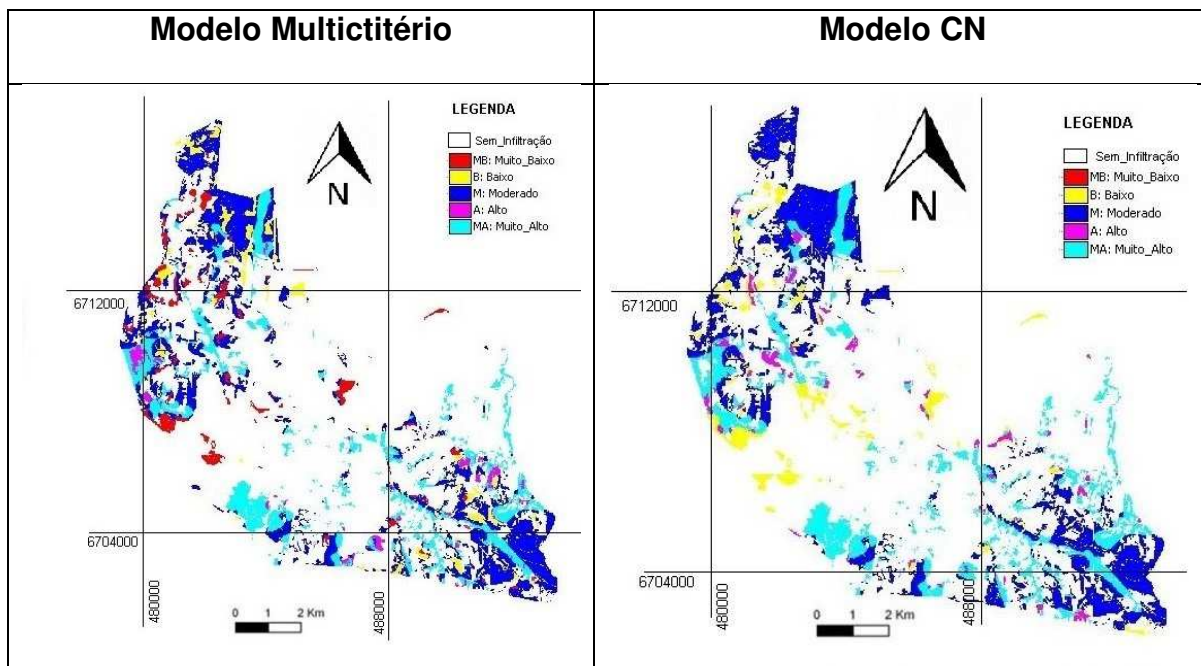


Figura 5: A) carta de classes de recarga potencial subterrânea pela técnica multicritério (esquerda); B) carta de classes de infiltração superficial pela técnica CN (direita).

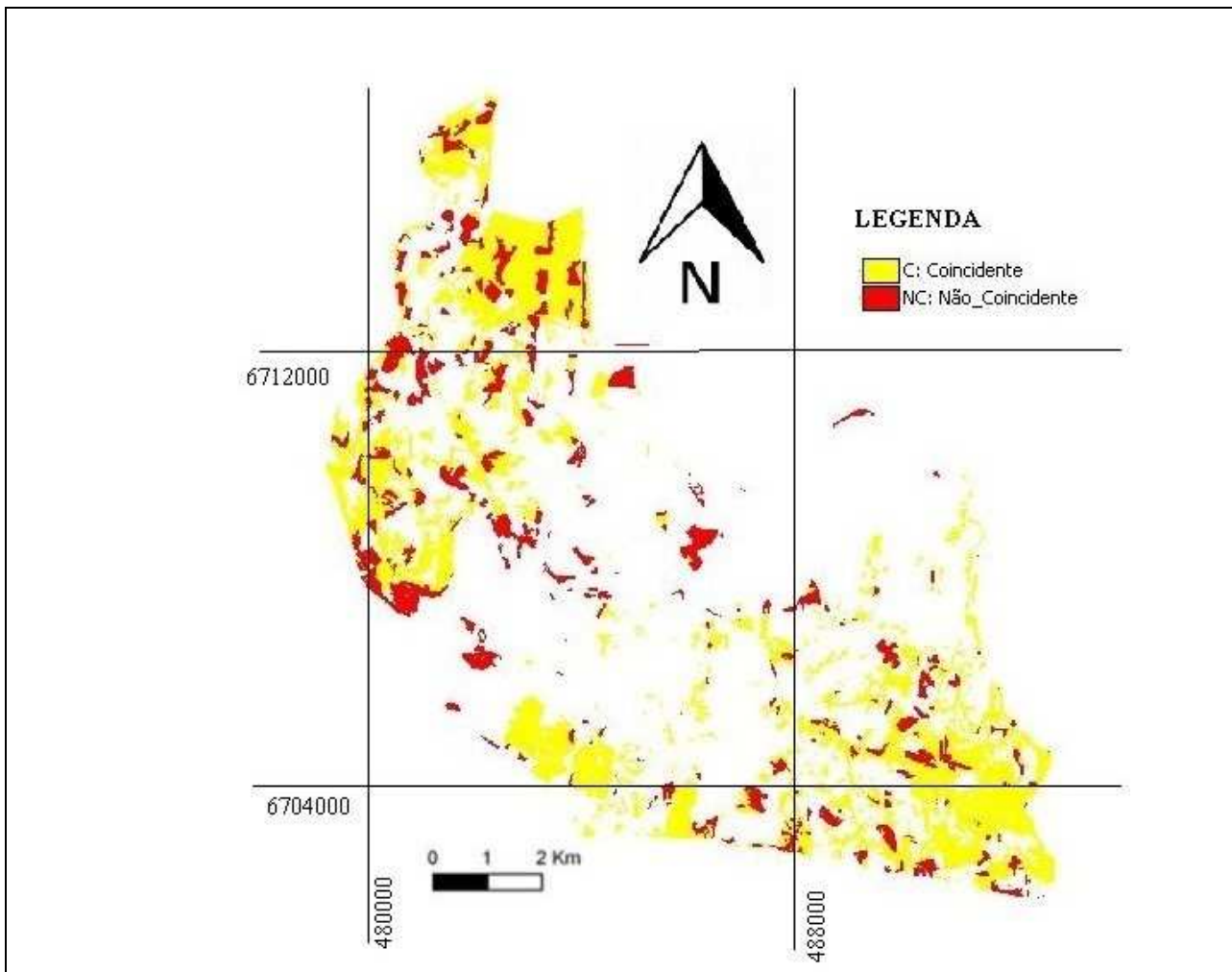


Figura 6: Carta comparativa de ambas as técnicas quanto as classes de infiltração e recarga potencial subterrânea. A área urbana não é considerada, uma vez que estima-se para a mesma valores extremamente baixos.

Embora ambas as técnicas apresentem um elevada taxa de coincidência das classificações resultantes, existe a possibilidade de que as taxas de infiltração dos solos tenham sido subavaliadas na técnica multicritério. Com relação a isto, os resultados dos testes de campo (Figura 7), mostraram-se coerentes com os escores inicialmente atribuídos (Quadro 3), descartando-se esta hipótese.

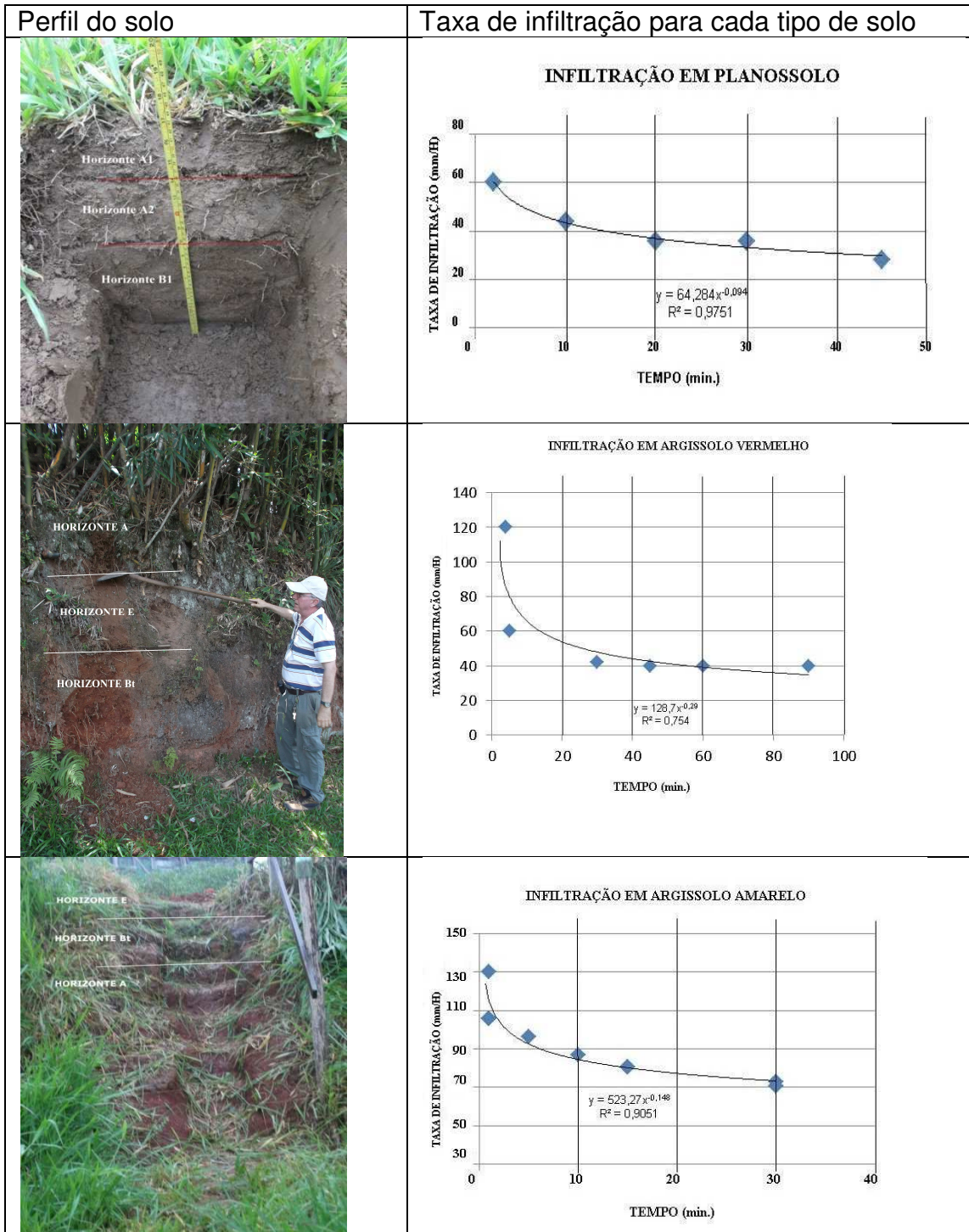


Figura 7: Resultados dos ensaios de infiltração com duplo anel em distintas classes de solos.

Quadro 3: Comparação dos dados de campo com as premissas e resultados da técnica multicritério para cada classe de solo

| Ponto | Dados de campo | | | Técnica multicritério | |
|-------|--------------------|-----------------|---|------------------------------------|--|
| | Classe de solo | Declividade (%) | Taxa de infiltração com duplo anel (mm/h) | Escores da carta temática de solos | Classes de recarga potencial subterrânea |
| 1 | Planossolo | 2% | 30 | 2 | Baixo |
| 2 | Argissolo Vermelho | 8% | 40 | 4 | Moderado |
| 3 | Argissolo Amarelo | 3% | 70 | 5 | Alto |

CONCLUSÃO

A comparação dos resultados apresentou uma taxa de 73,5% de coincidência, excluindo a área urbana, para a qual ambas as técnicas apresentam valores invariavelmente muito baixos.

Quanto aos desvios de estimativa, da ordem de 26,5%, a técnica CN apresentou predominantemente resultados mais elevados. A tendência de desvio ocorre no sentido do método CN devido ao fator geologia, o qual foi considerado apenas na análise multicritério.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOERBOOM, L.G.J., SHARIFI, M.A. **Spatial multi - criteria evaluation to enhance governance : changes in Malaysian planning.** In: GISDECO 2004 : proceedings of the 7th international seminar on GIS for developing countries : GIS capacity building and infrastructure . Malaysia. 2004. 12 p.

CARVALHO, A. B. P.; OZÓRIO, C. P., **AVALIAÇÃO SOBRE OS BANHADOS DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.** REVISTA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, Canoas, v.1, n.2, p. 83 a 95, 2007.

GRAVENA, S. **Manejo integrado de pragas dos citros: adequação para manejo do solo.** Cordeirópolis, v.14, n. 2, p. 401-419, 1993

LÓPEZ-MARRERO, T.; GONZÁLEZ-TORO, A.; HEARTSILL-SCALLY, T.; HERMANSEN-BÁEZ, A. **Multi-Criteria Evaluation and Geographic Information Systems for Land-Use Planning and Decision Making**. 2013. Disponível em http://www.interfacesouth.org/products/fact_sheets/el-yunque-ecosystem-services-fact-sheets-and-guides/multi-criteria-evaluation-and-geographic-information-systems-for-land-use-planning-and-decision-making/index_html Acessado em 06/05/13.

MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo: características e manejo em pequenas propriedades**. Chapecó. Editora Gráfica Metrópole, 1991. 337 p.

NASCIMENTO, C.E.G.B **Verificação de Critérios Técnicos para Seleção de Áreas Aptas a Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de São Leopoldo – RS**. 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2001.

Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio grande do Sul

<http://www.sema.rs.gov.br/link//enola.procergs.com.br/i3geo/aplicmap/geral.htm?srm9npui35e0c3rppa38re2af7> acesso em 10/05/13.

SOARES, D.J.; PEDRINHO JÚNIOR, A.F.F.; GRAVENA, R. **Dinâmica da água no perfil do solo em pomar de citrus submetido à diferentes manejos do solo e de plantas infestantes**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17., 2002, Belém, 2002.

TOMAZ, P. **Recarga artificial das águas subterrâneas**. In: **Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos para Obras Municipais**. Ed. Navegar. São Pulo, 2011.

USDA. **Urban hydrology for small watersheds. Technical release, nº 55 (TR-55)**. Soil Conservation Service, Washington, DC, 1986.

5.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA SOBRE A RECARGA POTENCIAL SUBTERRÂNEA NO PERÍODO 1950 - 2012

Artigo submetido à revista Ambiente e Água (Ambiagua)

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA EXPANSÃO URBANA SOBRE A RECARGA POTENCIAL DOS SISTEMAS AQUÍFEROS EM SÃO LEOPOLDO – RS

ABSTRACT

The assessment of potential groundwater recharge variation in São Leopoldo – RS, concerning the 1950-2012 period, was carried out by multicriteria analysis. During this period, the population had a 860% growth, ranging from 25.794 to 214.210 inhabitants. At the same time, urban area changed from 20 km² to 71 km², what means an increasing rate of 252%. Due to this urban expansion, a reducing of surficial infiltration was expected. In fact, by multicriteria analysis of several steps of urban expansion, it was detected a reduction around 75% of high potential infiltration areas.

Keywords: Infiltration Capacity, Multicriteria Analysis, Variation Recharge.

RESUMO

A avaliação da variação da recarga subterrânea potencial em São Leopoldo – RS, relativa ao período 1950 – 2012, foi realizada através de dados multitemporais e análise multicritério. Durante este período, a população cresceu 860% - de 25.794 para 214.210 habitantes - enquanto a área urbana passou de 20 km² para 71 km², correspondendo a um aumento de 252%. Devido a esta expansão urbana, uma redução da infiltração superficial era esperada. De fato, utilizando a análise multicritério em vários estágios de expansão urbana, detectou-se uma redução em torno de 75% das áreas com alto potencial de infiltração.

Palavras-chave: Capacidade de Infiltração, Análise Multicritério, Variação da Recarga.

INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um dos recursos naturais mais importantes. Muitas vezes, os recursos hídricos superficiais encontram-se limitados e as águas subterrâneas são consideradas como alternativa para cobrir uma série de necessidades como irrigação, abastecimento industrial e principalmente abastecimento humano. No entanto a extração excessiva facilmente conduz a uma redução substancial no nível de água subterrânea (JANG et al. 2012).

A cobertura vegetal tende a aumentar a infiltração, pois retarda o fluxo e a permanência da lâmina d'água superficial. A vegetação aumenta a permeabilidade da camada de superfície pelo seu sistema de raízes, aumentando o teor de matéria orgânica e estimulando a atividade biológica do solo, o que conduz a uma maior porosidade e permeabilidade (BERGKAMP, 1998).

O uso do solo caracteriza-se por diferentes ocupações que vão desde a agricultura à recreação, da infraestrutura a edificações, colocando a preservação do meio ambiente à deriva. O uso do solo pode modificar e degradar os solos, implicando diretamente na diminuição da

infiltração, um exemplo disto é a impermeabilização criada pelo meio urbano (SCALENGHE; MARSAN, 2009).

A infiltração superficial e a capacidade de recarga potencial são determinantes da disponibilidade hídrica subterrânea. Este estudo, utilizando dados multitemporais e a técnica de Análise Multicritério, avalia o efeito da expansão urbana no período 1950-2012 sobre a infiltração e recarga subterrânea potencial em São Leopoldo - RS. Foram considerados fatores determinantes do aumento ou redução da infiltração e recarga potencial, tais como a declividade, tipos de solos, uso e ocupação do solo, vegetação e estrutura geológica, gerando cenários de infiltração superficial para diferentes épocas de expansão urbana.

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de São Leopoldo, com uma área de 102 km², está localizado na Região Metropolitana de Porto Alegre, fazendo divisa com os Municípios de Estância Velha, Novo Hamburgo, Sapucaia do Sul e Portão (Figura 1). Situa-se entre as coordenadas UTM 479572 E, 493364 E e 6717304 N, 6702331 N, correspondendo à porção inferior da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, onde ocorre uma extensa planície, constituída por banhados e áreas inundáveis.

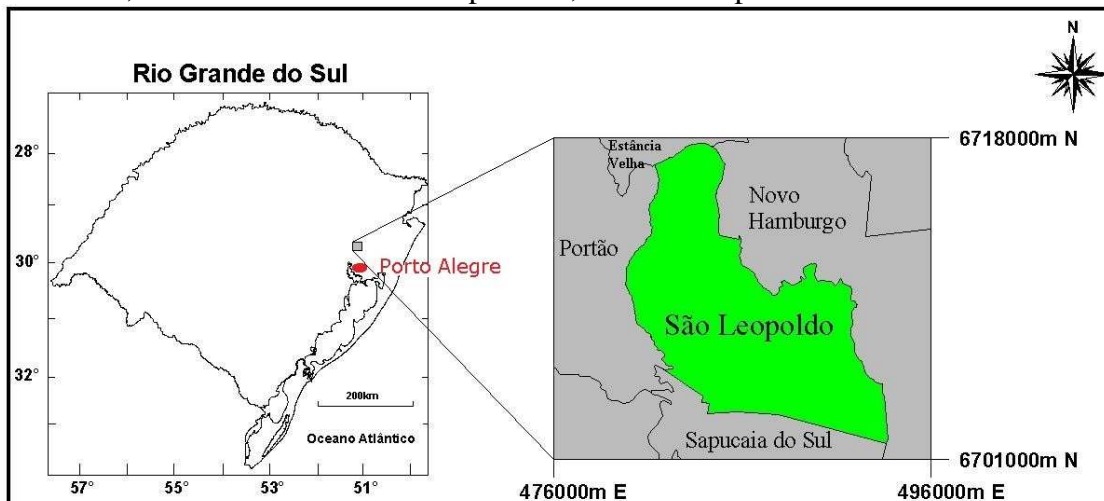


Figura 1: Localização geográfica da área de estudo (Modificado de SEMA, 2013) - Fonte: SEMA – Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul.

Relevo e clima

A área situa-se na depressão periférica do Estado do Rio Grande do Sul apresentando altitudes entre de 20 m até 300 m de altitude, sendo as menores e maiores altitudes encontradas respectivamente próximas ao Rio dos Sinos e nas elevações ao norte do município. O clima de São Leopoldo é subtropical úmido (Köppen) com temperaturas anuais entre - 1 °C a 40 °C e uma precipitação média anual de 1500 mm/ano.

Solos

Os solos da área de estudo são Gleissolos e planossolos na planície inundação, e argissolos e nitossolos nas encostas e zonas mais elevadas. Os Gleissolos e planossolos háplicos encontram-se normalmente nas baixadas, próximos à rede de drenagem, com lençol freático elevado e com riscos de inundação. Esses solos apresentam normalmente baixa capacidade de infiltração.

Os Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelhos são solos normalmente profundos, bem estruturados e bem drenados. Há predominância de argilas de atividade baixa, normalmente com baixa capacidade de infiltração. Por sua vez, os Nitossolos Vermelhos Distróficos Argissólicos tem ocorrência eventual, apresentando alto teor de argila e baixa capacidade de infiltração (NASCIMENTO, 2001).

Geologia e hidrogeologia

A área de estudo é composta por rochas das formações Rio do Rasto, Pirambóia, Botucatu e Depósitos Quaternários.

A Formação Pirambóia é constituída por extensas faixas de sedimentos eólicos e secundariamente lacustres ou fluviais, ocorrendo nas áreas mais elevadas do município. Os Depósitos Quaternários ocorrem em terrenos planos a suavemente ondulados, de baixa altitude e junto às margens das drenagens. Os sedimentos constituintes destes depósitos são mal selecionados, com boa porosidade e permeabilidade. As formações Botucatu e Rio do Rasto ocupam apenas uma pequena porcentagem da área de estudo.

Uso e ocupação do solo e vegetação

A área encontra-se densamente ocupada pela atividade antrópica, a qual apresentou uma significativa expansão no período de 1950 a 2012.

A área de sucessão vegetal corresponde a áreas abandonadas pela atividade antrópica, nas quais a vegetação natural voltou a se desenvolver, melhorando significativamente a capacidade de infiltração, porém com pouca profundidade (GRAVENA, 1993).

As áreas de banhado são planas, alagadiças, ocorrendo acumulação hídrica superficial e infiltração lenta. Estas áreas possuem alto potencial de recarga subterrânea em épocas de seca ou de baixa precipitação pluviométrica (CARVALHO; OZÓRIO, 2007).

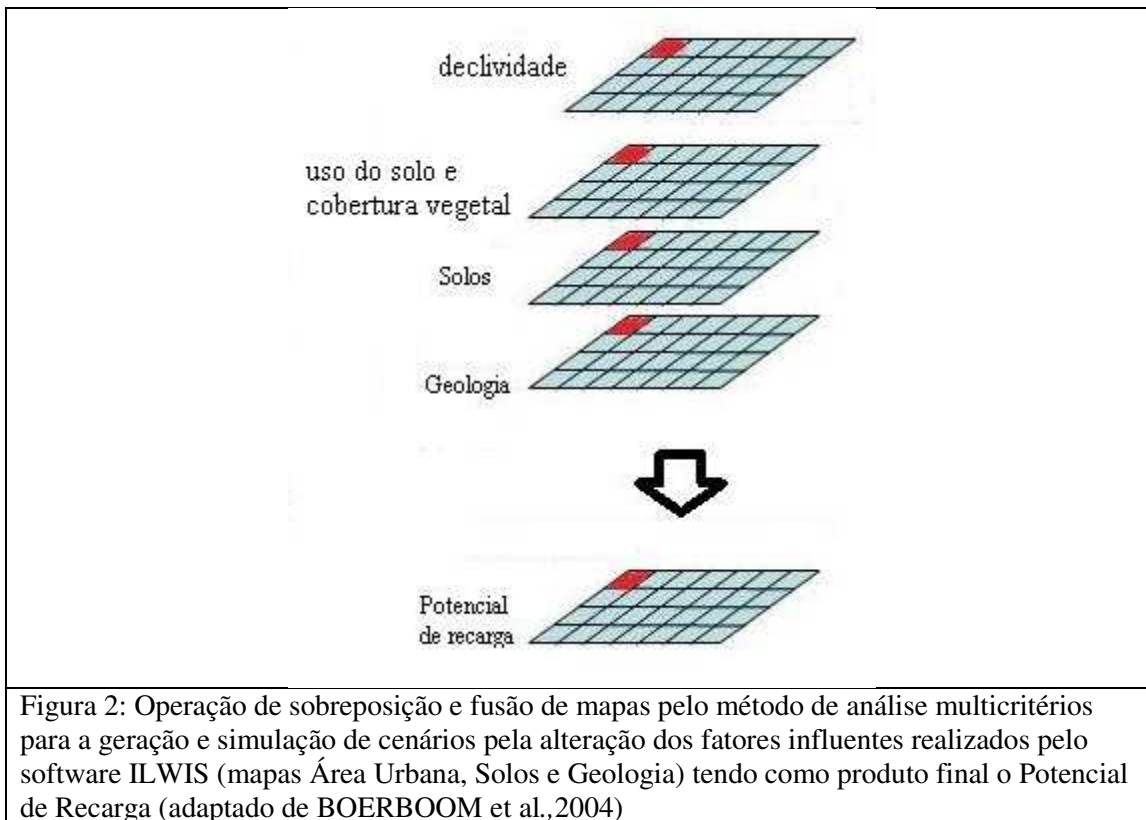
A área urbana é composta por edificações (telhados, vias asfaltadas, calçadas, encanamentos, etc.), ao quais reduzem drasticamente a infiltração das águas da chuva, resultando em um significativo aumento do escoamento superficial.

As áreas de matas são formações florestais densas e com espécies com copas bem desenvolvidas. A grande densidade da vegetação protege o solo da ação da precipitação, assim como a maior profundidade das raízes facilita a infiltração da água no solo (MONEGAT, 1991; SOARES et al., 2002; GRAVENA, 1993).

Campo antrópico é composto por campos sob manejo antrópico, solos expostos e desmatamentos. O solo é normalmente compactado pela exposição às intempéries, reduzindo a sua permeabilidade e, conseqüentemente, a infiltração das águas.

MÉTODO E TÉCNICAS

A abordagem metodológica (fig2) baseou-se na análise Multicritério espacializada e dados multitemporais da expansão urbana para o período 1950 - 2012.



A análise com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) é um método fraco em lidar com a incerteza podendo gerar conflitos. A Análise Multicritério integrada ao (SIG) fornece soluções adequadas ao problema, pois engloba fatores não quantificáveis como, ambiente, uso do solo, limites geológicos, entre outros (RAHMAN et al., 2012).

Para execução da análise multicritério, utilizou-se o programa ILWIS 3.4, no qual as cartas temáticas e classes já ponderadas são cruzadas como indicado na Equação “a”. Estes procedimentos, além da geração do cenário final na escala 1:25.000, reproduzem os principais fatores direta e indiretamente responsáveis pela capacidade de infiltração. Esta abordagem permite simulações e geração de cenários, através da alteração das variáveis consideradas (Figura 2).

$$\text{POTrec} = (\text{GEOp} * \text{GEOs}) + (\text{SOLp} * \text{SOLs}) + (\text{USOp} * \text{USOs})$$

Equação (a)

Em que:

- POTrec - carta de estimativa do potencial de recarga
- DECLp – peso relativo do parâmetro
- DECLs – carta de declividade classificado (escores)
- GEOp - peso relativo do parâmetro geologia
- GEOs - carta geológico classificado (escores)
- SOLp - peso relativo do parâmetro solos
- SOLs - carta de solos classificado (escores)
- USOp - peso relativo do parâmetro uso superficial
- USOs - carta de uso classificado (escores)
- VEGs – carta de cobertura vegetal classificado (escores)
- VEGp – peso relativo do parâmetro cobertura vegetal

A análise multicritério é realizada através de uma matriz com os fatores influentes no objeto do estudo, atribuindo-se a estas variáveis pesos relativos. Nesta matriz são comparados todos os fatores entre si, estimando-se a influência de cada um na infiltração e recarga. Os fatores, são ponderados com base em informações bibliográficas, dados primários de campo e auxílio de especialistas nas variáveis envolvidas (LÓPEZ-MARRERO et al., 2013). Para elaboração do cenário de recarga potencial de 1950, estimou-se que a área de maior infiltração já estava afetada por atividades antrópicas rurais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O município de São Leopoldo teve uma grande expansão da área urbana no período 1950 - 2012, a qual passou de 20 km² para 71 km² (fig. 3). Da mesma forma a população passou de 25.794 para 214.210 habitantes (fig. 4), correspondendo a um aumento de 860% neste período.

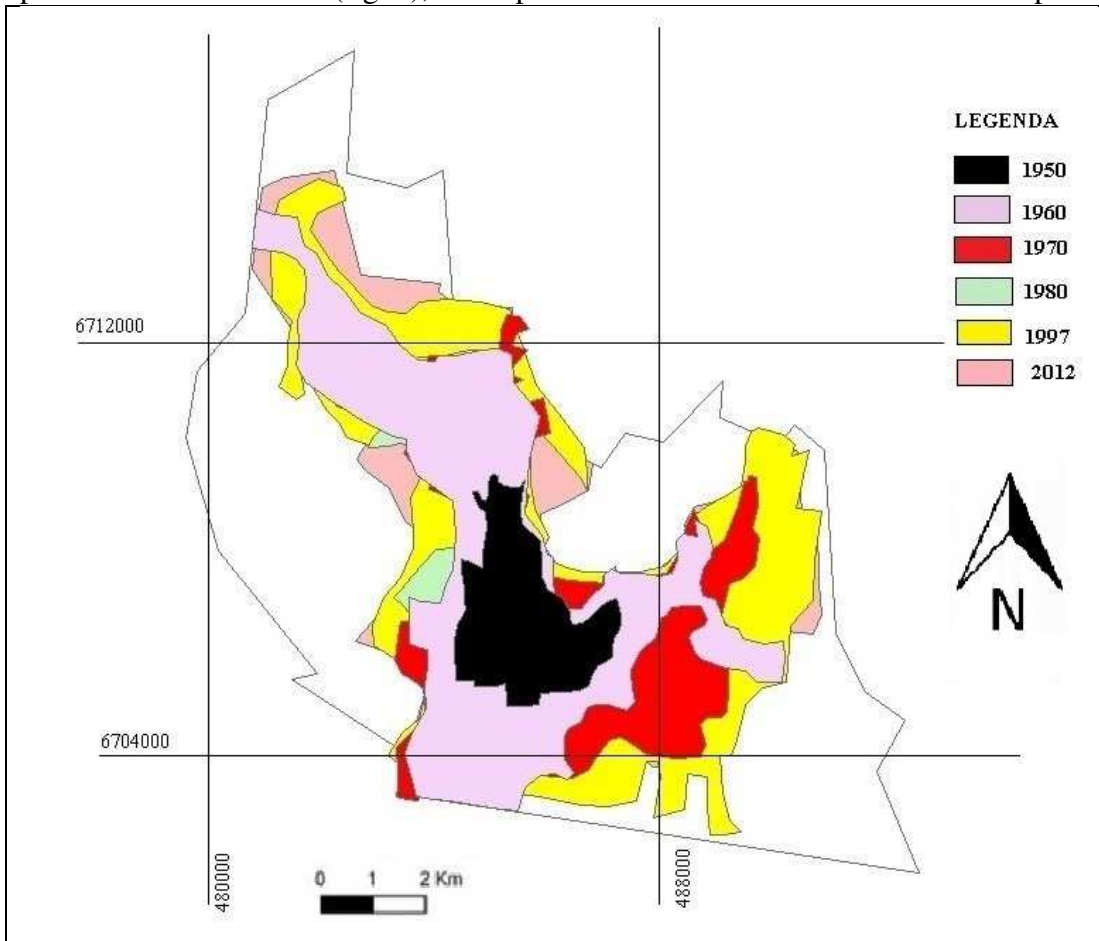
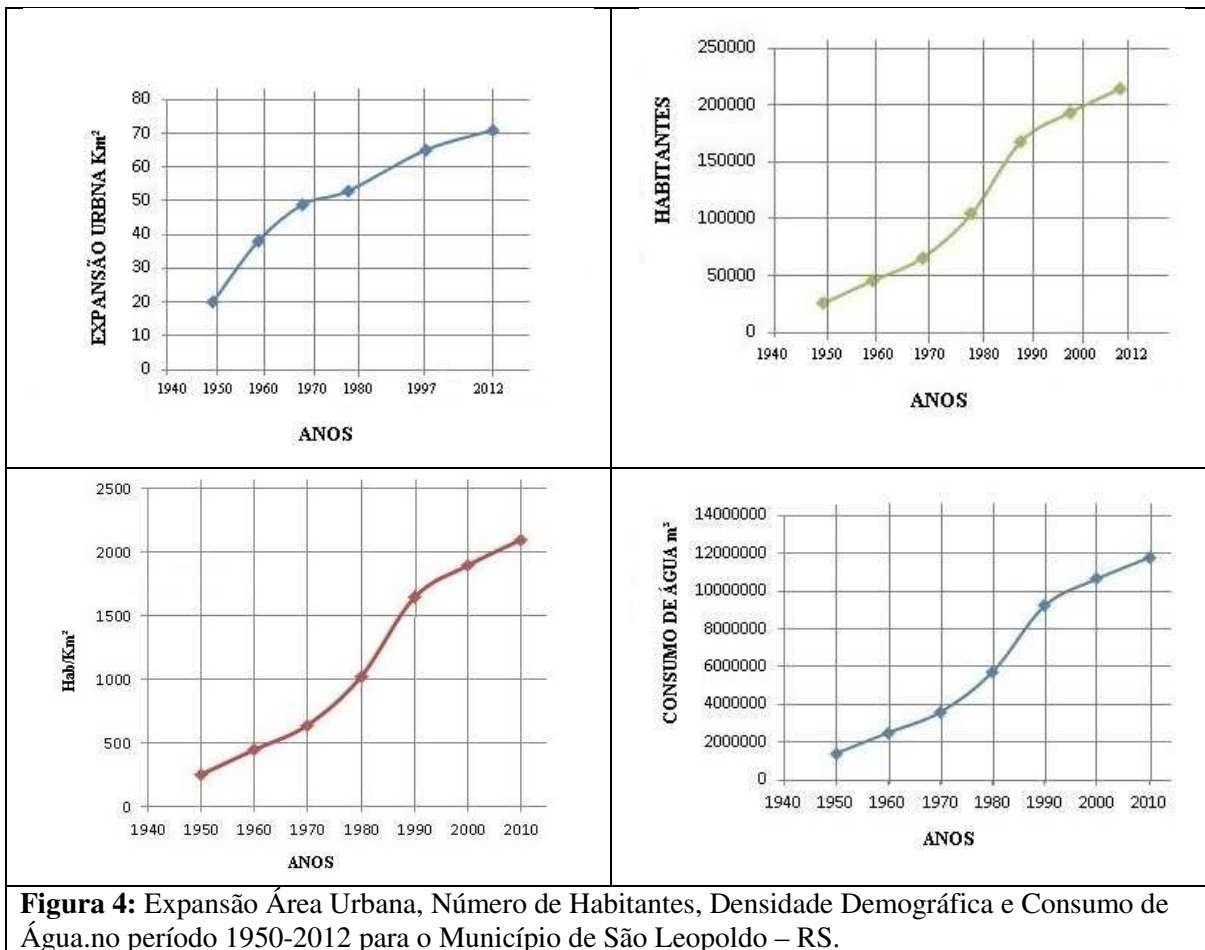


Figura 3: Expansão Urbana no período 1950-2012 no município de São Leopoldo - RS.



A taxa de expansão da área urbana apresentou um decréscimo entre 1965 e 1990, período em que houve um considerável aumento populacional e da demanda para abastecimento hídrico. A área urbana apresentou um crescimento da ordem de 252% no período 1950-2012.

Neste mesmo período, devido à expansão e impermeabilização urbana, a recarga subterrânea potencial foi afetada (Quadro 1 e Figura 5). Observa-se que as áreas com muito alto potencial de recarga, as quais eram predominantes em 1950, reduziram-se a apenas 25% do valor inicial, enquanto a área com muito baixa infiltração e recarga aumentou mais de 400%.

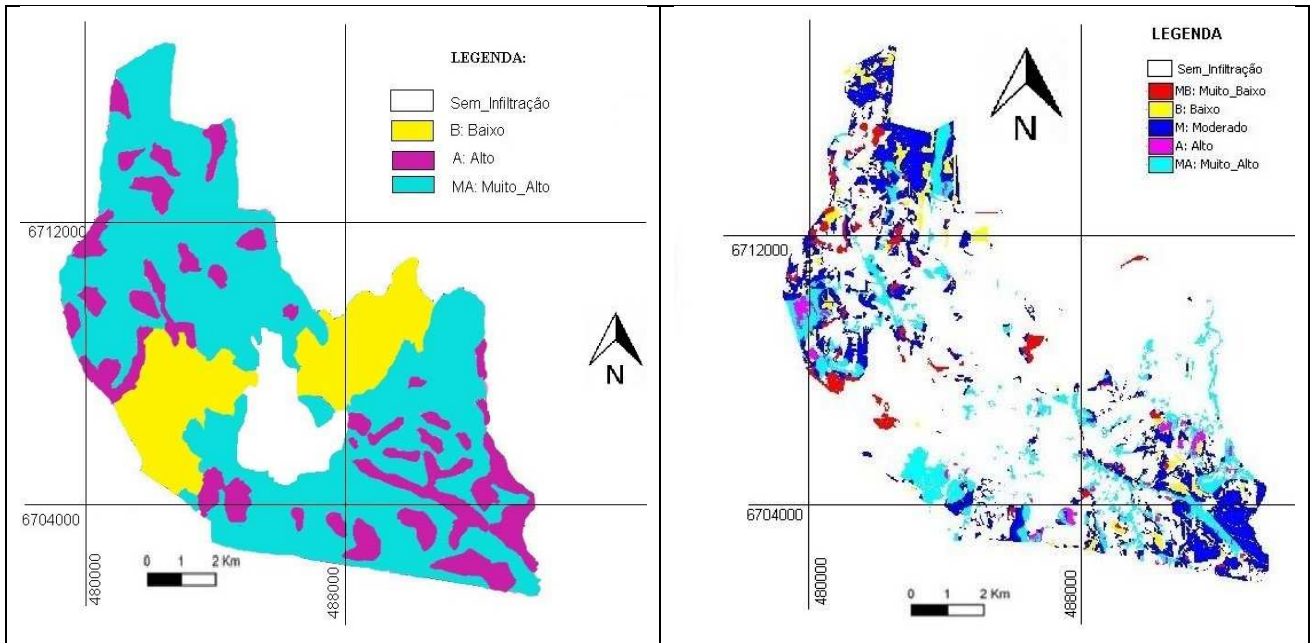


Figura 5: Cartas de recarga potencial subterrânea para os anos de 1950 e 2012 para o Município de São Leopoldo – RS.

| Quadro 1: Classes de potencial recarga subterrânea em 1950 e 2012 para o Município de São Leopoldo - RS | | | |
|--|-----------------|-----------------|------------------|
| CLASSES DE RECARGA POTENCIAL | 1950 (a) | 2012 (b) | (b) / (a) |
| Área praticamente sem infiltração | 11% | 50% | 4,5 |
| Muito Baixo | ----- | 8% | ----- |
| Baixo | 26% | 3% | 0,11 |
| Moderado | ----- | 20% | ----- |
| Alto | 12% | 6% | 0,5 |
| Muito Alto | 51% | 13% | 0,25 |

CONCLUSÃO

A expansão urbana de São Leopoldo – RS no período 1950-2012 afetou a capacidade de recarga potencial subterrânea, promovendo uma redução de 75% das áreas com muito alto potencial de recarga. Da mesma forma, as áreas com alto potencial foram reduzidas em 50%.

No mesmo período, a impermeabilização urbana promoveu um aumento de mais de 400% das áreas com muito baixo potencial de recarga. Este cenário aponta no sentido de uma redução da reserva reguladora anual, com conseqüente influência no ecossistema aquático, assim como aumento do escoamento e processos superficiais a este associados.

Os resultados gerados pela análise multicritério fornecem contribuições para o Plano Diretor Municipal, planejamento e gestão municipal dos recursos hídricos subterrâneos.

REFERÊNCIAS

BOERBOOM, L.G.J., SHARIFI, M.A. **Spatial multi - criteria evaluation to enhance governance : changes in Malaysian planning.** In: GISDECO2004 : proceedings of the 7th international seminar on GIS for developing countries : GIS capacity building and infrastructure . Malaysia. 2004. 12 p.

BERGKAMP, G. **A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands.** Catena 33, 1998

CARVALHO, A. B. P.; OZÓRIO, C. P., **AVALIAÇÃO SOBRE OS BANHADOS DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.** REVISTA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, Canoas, v.1, n.2, p. 83 a 95, 2007.

GRAVENA, S. **Manejo integrado de pragas dos citros: adequação para manejo do solo.** Cordeirópolis, v.14, n. 2, p. 401-419, 1993

Instituto de Geografia e Estatística (IBGE) disponível em:

<http://www.biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?acervo=periodico&campo=titulo&opeqry=&texto>. Acesso em 09/09/2014.

JANG, C.; CHEN, S.; KUO, Y. **Applying indicator-based geostatistical approaches to determine potential zones of groundwater recharge based on borehole data.** Catena 101, 2013

LÓPEZ-MARRERO, T.; GONZÁLEZ-TORO, A.; HEARTSILL-SCALLY, T.; HERMANSEN-BÁEZ, A. **Multi-Criteria Evaluation and Geographic Information Systems for Land-Use Planning and Decision Making.** 2013. Disponível em: http://www.interfacesouth.org/products/fact_sheets/el-yunque-ecosystem-services-fact-sheets-and-guides/multi-criteria-evaluation-and-geographic-information-systems-for-land-use-planning-and-decision-making/index_html Acessado em 06/05/13.

MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo: características e manejo em pequenas propriedades.** Chapecó. Editora Gráfica Metrópole, 1991. 337 p.

NASCIMENTO, C.E.G.B. **Verificação de Critérios Técnicos para Seleção de Áreas Aptas a Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de São Leopoldo – RS.** 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2001.

RAHMAN. M. A.; RUSTEBERG, B.; GOGU, R.C.; FERREIRA, A.P.L.; SAUTER M. **A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge.** Journal of Environmental Management 2012.

SCALENGHE, R.; MARSAN, F.A; **The anthropogenic sealing of soils in urban áreas.** Landscape and Urban Planning 90, 2009

Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio grande do Sul. Disponível em:
<http://www.sema.rs.gov.br/link//enola.procergs.com.br/i3geo/aplicmap/geral.htm?srn9npui35e0c3rppa38re2af7>. Acesso em 10/05/13.

SOARES, D.J.; PEDRINHO JÚNIOR, A.F.F.; GRAVENA, R. **Dinâmica da água no perfil do solo em pomar de citrus submetido à diferentes manejos do solo e de plantas infestantes.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17., 2002, Belém, 2002.

6 CONCLUSÃO

A expansão urbana de São Leopoldo – RS no período 1950-2012 afetou a capacidade de recarga potencial subterrânea, promovendo uma redução de 75% das áreas com muito alto potencial de recarga. Da mesma forma, as áreas com alto potencial foram reduzidas em 50%.

No mesmo período, a impermeabilização urbana promoveu um aumento de mais de 400% das áreas com muito baixo potencial de infiltração e recarga. Este cenário aponta para a redução da reserva reguladora anual, com consequente influência no ecossistema aquático, aumento do escoamento e processos superficiais a este associados.

A comparação dos resultados das técnicas multicritério e CN apresentou uma taxa de 73,5% de coincidência, excluindo a área urbana, para a qual ambas as técnicas apresentam valores invariavelmente muito baixos.

Quanto aos desvios de estimativa, da ordem de 26,5%, a técnica CN apresentou predominantemente resultados mais elevados. A tendência de desvio no sentido da técnica CN, ocorre devido principalmente ao fator geologia não ser nesta utilizado, sendo este, entretanto utilizado na Análise Multicritério.

A comparação dos resultados de infiltração de campo com os escores atribuídos para as classes de solos na técnica multicritério foram coerentes, indicando que a estimativa subjetiva deste parâmetro aproxima-se da realidade de campo.

Como trabalhos futuros sugere-se o monitoramento simultâneo do nível dos aquíferos e da precipitação pluviométrica, dados que permitirão avaliar a recarga subterrânea e os resultados da análise multicritério.

7 REFERÊNCIAS

- ALBINO, Sanches, V.M. **Avaliação da Susceptibilidade Hidrogeográfica à Recarga Aquífera em Meios Porosos. Estudo de Hidrogeografia.** Dissertação (Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território) – Universidade de Lisboa – Lisboa – Portugal, 2010.
- BARETTA, L. **Análise Ambiental para Implantação de Distritos Industriais com o uso do Geoprocessamento no Município de São Leopoldo – RS.** 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2007.
- BERGKAMP, G. **A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands.** *Catena* 33, 1998
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo.** Piracicaba: Livrocetes, 1985. 392p.
- BOERBOOM, L.G.J., SHARIFI, M.A. **Spatial multi - criteria evaluation to enhance governance : changes in Malaysian planning.** In: GISDECO 2004 : proceedings of the 7th international seminar on GIS for developing countries : GIS capacity building and infrastructure . Malaysia. 2004. 12 p.
- BOSCARDIN, N.R.B.; BORGHETTI, J.R.; ROSA FILHO, E.F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul.** Fundação Roberto Marinho, 2004.
- CAMPOS, V. R.; ALMEIDA, A. T. **Modelo Multicritério de Decisão para localização de Nova Jaguaribara com vip *analysis*.** In: *Revista Pesquisa Operacional*, v.26, n.1, p.91-107, Janeiro a Abril de 2006.
- CARVALHO, A. B. P.; OZÓRIO, C. P., **AVALIAÇÃO SOBRE OS BANHADOS DO RIO GRANDE DO SUL, BRASIL.** *REVISTA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS*, Canoas, v.1, n.2, p. 83 a 95, 2007.
- CETESB, **Água Subterrânea e Poços Tubulares;** tradução da primeira edição do original norte-americano publicado pela JOHNSON Division, UOP, Inc., Saint Paul, Minnesota, 3ed, rev. São Paulo 1978.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia.** Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS, Porto Alegre, 2011.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil.** Disponível em:
<http://www.cprm.gov.br/coluna/gpsaobento.html>. Acesso em 10/05/13.
- DUNNE, T. H.; LEOPOLD L.B. **Water in environment planning.** W.H. Freeman and Company.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília: EMBRAPA-SPI, 1999. 412 p.

ENGEFOTO. **Processamento de fotografias aéreas – São Leopoldo/RS.** UFPR, Curitiba, 1990

FACCINI, U.F.; GIARDIN, A.; MACHADO, J.L.F. **Heterogeneidades Litofaciológicas e Hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul.** In: Paim, P.S.G; Faccini, U.F.; Netto, R.G. (eds). 2003 Geometria, Arquitetura e Heterogeneidades de Corpos Sedimentares – Estudo de Casos. Convênio 88.98.0750.00 PADCT III. 2003

FORTES, P.T.F.O; OLIVEIRA; G.I.M.; CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S. **Geoprocessamento aplicado ao planejamento e gestão ambiental na Área de Proteção Ambiental de Cafuringa, Distrito Federal. Parte 2: processamento de dados espaciais.** XIII Simpósio Brasileiro de sensoriamento Remoto, SC, 2007.

GATTO, L. C. S. **Diagnóstico Ambiental da Bacia do Rio Jaguaribe: Diretrizes Gerais para a Ordenação Territorial.** Ministério de Planejamento e Orçamento, Salvador: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 1999. 77p.

GOMES, M.A. F.; FILIZOLA, H. F.; SPADOTTO, C. **Classificação das áreas de recarga do sistema aquífero guarani no brasil em domínios pedomorfoagroclicmáticos – subsídio aos estudos de avaliação de risco de contaminação das águas subterrâneas.** In: *Revista do Departamento de Geografia*, v.18, p. 67 – 74, 2006.

GONÇALVES, T. D.; CAMPOS, J. E. G.; BATISTA, G. T.; DINIZ, H. N.; TARGA, M. S. **Metodologia para elaboração de mapas hidrogeológicos: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio da Palma, DF, Brasil.** *Revista Ambiente e Água – An interdisciplinary Journal of Applied Science*: v. 2, n 2, 2007.

GRAVENA, S. **Manejo integrado de pragas dos citros: adequação para manejo do solo.** *Cordeirópolis*, v.14, n. 2, p. 401-419, 1993.

HORTON, R.E. **modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process.** Bull. 43, WaterResourcesResearch Center, Universityof Minnesota, Minneapolis.1971

Instituto de Geografia e Estatística (IBGE) <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em 02/01/2013.

JANG, C.; CHEN, S.; KUO, Y. **Applying indicator-based geostatistical approaches to determine potential zones of groundwater recharge based on borehole data.** *Catena* 101, 2013

JORDÃO, B. M.C.; PEREIRA, S. R.A **ANÁLISE MULTICRITÉRIONA TOMADA DE DESCISÃO – O Método Analítico Hierárquico de T. L. Saaty: Desenvolvimento do método com recurso à análise de um caso prático explicado ponto a ponto.** Instituto Superior de Engenharia de Coimbra: Departamento de Engenharia Civil - Gestão de Empreendimentos, 2006.

Laboratório Nacional de Energia e Geologia de Portugal(LNEG) <http://repositorio.lneg.pt/simplesearch?query=recarga+de+aquiferos&submit=Enviar>. Acesso em 27/12/2012.

LIBARDI, Paulo Leonel. **Dinâmica da Água no Solo.** EDUSP, São Paulo, 2005. 344p.

LÓPEZ-MARRERO, T.; GONZÁLEZ-TORO, A.; HEARTSILL-SCALLY, T.; HERMANSEN-BÁEZ, A. **Multi-Criteria Evaluation and Geographic Information Systems for Land-Use Planning and Decision Making.** 2013. Disponível em http://www.interfacesouth.org/products/fact_sheets/el-yunque-ecosystem-services-fact-sheets-and-guides/multi-criteria-evaluation-and-geographic-information-systems-for-land-use-planning-and-decision-making/index_html Acessado em 06/05/13.

MACHADO, J.L.F. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia – Área de Concentração em Geologia Sedimentar. Porto Alegre: UNISINOS, 2005.

MISHRA S.K., SINGH V.P **Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology** (Water Science and Technology Library, Vol. 42) - 2003

MONEGAT, C. **Plantas de cobertura do solo: características e manejo em pequenas propriedades.** Chapecó. Editora Gráfica Metrópole, 1991. 337 p.

MUSGRAVE, G.W.; HOLTAN, H.N. **Infiltration.**In: Chow, V.T. Handbook of applied hydrology, McGraw-Hill, NY, USA, 1964.

NASCIMENTO, C.E.G.B. **Verificação de Critérios Técnicos para Seleção de Áreas Aptas a Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Município de São Leopoldo – RS.** 2001. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2001.

NERIS, J.; JIMÉNEZ, C.; FUENTES, J.; MORRILAS, G.; TEJEDOR M.; **Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain).** Catena 98, 2012.

OLIVEIRA, M.J.; SOUTO, F.A.F.; ROSÁRIO, J.M.L.; SACASA, R.J.V.; MOURA, H.P. **Vulnerabilidade natural e sazonal do aquífero livre no loteamento Marabaixo III Macapá AP.** Universidade Federal do Amapá, 2003.

Perímetro Urbano de Tupanciretã/RS. I Simpósio de Águas da AUGM, 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul, 2005.

PORTO, R.L.L., ZAHED FILHO, K.; GIKAS. **Análise de Cheias em Bacias Complexas – Manual do usuário,** Labsid/Epusp. 1979

RAMGRAB, G.E. WIDNER, W.; LOPES, R. C.; FAVILLA, C.A.C.; SILVA, M.A.S.; SACHS, L.L.B.; SILVA, V.A.; BATISTA, I.H.. Folha SH.22-Porto Alegre. In: SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J.H.; SANTOS, J.O.S.; ABRAM, M.B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G.M.M.; VIDOTTI, R.M. RAMOS, M.A.B; JESUS, J.D.A de(eds). **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas.** Programa Geologia do Brasil. Brasília: CPRM, 2004. CD-ROM.

RAMOS, R. A. R. **Localização Industrial:** Um Modelo para o Noroeste de Portugal. 2000. 323 f. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Braga, 2000.

RAUDKIVI, A.J., Hydrology, Pergamon Press, Reino Unido, 1979.

RAHMAN, M. A.; RUSTEBERG, B.; GOGU, R.C.; FERREIRA, A.P.L.; SAUTER M. **A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge.** Journal of Environmental Management 2012.

SANTOS, R. M.; KOIDE, S. **Mapeamento da recarga de águas subterrâneas a partir da regionalização de estimativas pontuais via regressão múltipla espacial.** XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento remoto, Curitiba – PR, 2011.

SCALENGHE, R.; MARSAN, F.A; **The anthropogenic sealing of soils in urban areas.** Landscape and Urban Planning 90, 2009

Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio grande do Sul. Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/link//enola.procergs.com.br/i3geo/aplicmap/geral.htm?srn9npui35e0c3rp pa38re2af7> acesso em 10/05/13.

Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMMAM). Disponível em; https://www.saoleopoldo.rs.gov.br/home/show_page.asp?user=&id_CONTEUDO=1457&codID_CAT=1&imgCAT=&id_SERVICO=&ID_LINK_PAI=26&categoria=%3Cb%3ESecretarias%3C/b%3E. Acesso em 28/12/2012.

SOARES, D.J.; PEDRINHO JÚNIOR, A.F.F.; GRAVENA, R. **Dinâmica da água no perfil do solo em pomar de citrus submetido à diferentes manejos do solo e de plantas infestantes.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 17., 2002, Belém, 2002.

TEIXEIRA, M. B. (Coord.). **Plano Ambiental de São Leopoldo.** Porto Alegre: PUCRS, MCT, v. 4, 2002.

TOMAZ, P. **Recarga artificial das águas subterrâneas.** In: **Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos para Obras Municipais.** Ed. Navegar.São Paulo, 2011.

TUCCI, C.E.M. (organizador). **Hidrologia - Ciência e Aplicação.** ABRH, 1993, 943 p.

USDA. **Urban hydrology for small watersheds. Technical release, nº 55 (TR-55).** Soil Conservation Service, Washington, DC,1986.

VIANA, T. R.; CELLIGOI, A. **Análise das reservas de águas subterrâneas do Aquífero Serra Geral em Londrina: Recarga e Consumo.** In: **XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.** Florianópolis – SC, 2002.

VILAS BOAS, C. L.. **Análise da aplicação de Métodos Multicritérios de apoio à decisão (mmad) na gestão de recursos hídricos.** Dissertação (Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente) – Universidade de Brasília – DF, 2004.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1975. 245p.

WARD, R.C., ROBINSON, M. **Principles of Hydrology.** Third edition. McGraw-Hill Book Company, 1990.

WIDODO, L. E. **Estimation of Natural Recharge and Groundwater Build up in the Bandung Groundwater Basin Contributed from Rain Water Infiltration and Interaquifer Transfer.** International Symposium on Earth Science and Technology, CINEST 2012.

WILCOCK, D.N.; ESSERYC.I. **infiltration measurment in small lowland catchment.** Journal of Hydrology, vol74, p. 191-204, 1984.

ZARDO, D. **Mapeamento Geológico, em escala 1:25.000, do Município de São Leopoldo-RS. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Geologia.** Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2007.