



Geoprocessamento Aplicado à Determinação do Índice de Susceptibilidade das Captações por Poços Tubulares do Sistema Aquífero Serra Geral em Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul

Geoprocessing Applied to the Determination of Susceptibility Index

Funding for Tubular Wells of the Serra Geral System in Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul

Willian Fernando de Borba¹; José Luiz Silvério da Silva²; Daniel Gustavo Allasia³;
Cristiano Niederauer da Rosa⁴; Jean Ricardo Favaretto⁵ & Luis Filipe Tavares Ribeiro⁶

¹ Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), Avenida Roraima, 1000, Bairro Camobi, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul

² Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Geociências (DGEO), 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul

³ Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul

⁴ Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul

⁵ Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Engenharia Civil (DEC), 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul

⁶ Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico (IST), Avenida Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa, Portugal
E-mails: borbawf@gmail.com; silverioufsm@gmail.com;

dallasia@gmail.com; cristianoanr@hotmail.com; jeanfavaretto@gmail.com; luis.ribeiro@ist.utl.pt

Recebido em: 24/05/2016 Aprovado em: 25/07/2016

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2016_3_79_88

Resumo

A problemática relacionada à contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, associada à falta de monitoramento do ambiente, instigam pesquisadores e profissionais pela busca de novas fontes de informações e métodos que visem promover sua gestão adequada. Deste modo, buscando um maior conhecimento sobre a suscetibilidade à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do município de Frederico Westphalen-Rio Grande do Sul, Brasil, e suas potenciais fontes de contaminação. Esse trabalho combina as metodologias do Índice de Susceptibilidade (IS) com o sistema *Pollutant Origin Surcharge Hydraulically* (POSH), por meio de ferramentas de geoprocessamento. Para isto, construiu-se um banco de informações hidrogeológicas com base no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil, para os parâmetros profundidade do nível d'água e o material do aquífero. Ainda, foram levantadas informações de relevo e uso do solo a partir das imagens disponibilizadas pelo United States Geological Survey (USGS). A partir destas informações, foi determinado o IS e aplicado o método POSH para a determinação das fontes potenciais de geração de carga poluidora do aquífero local. Os resultados apresentaram um IS variando entre baixo e muito baixo em 14 % do município, moderado baixo em 55 %, moderado alto em 30% e elevado em 1 %, sendo as maiores classes encontradas ao leste do município principalmente nas áreas de cultivos agrícolas de subsistência. O emprego do método POSH indicou que as fontes potenciais de geração de carga contaminante estão localizadas nas áreas de moderada a alta susceptibilidade à contaminação, sendo essas áreas, mais sujeitas a contaminação de origem difusa, em função dos cultivos anuais, dos mananciais superficiais e subterrâneos. Portanto, conclui-se que as técnicas de Geoprocessamento, aplicadas na associação entre o IS e POSH, otimizam a identificação dos potenciais locais e fontes de poluição das águas subterrâneas, sendo úteis no monitoramento e planejamento do ambiente.

Palavras-chave: Água Subterrânea; Contaminação; POSH

Abstract

The issue related to the contamination of the superficial and underground water resources, associated to the lack of environmental monitoring, instigates researchers and professionals to seek new information and methods to promote a proper management. Thus, searching for a better understanding of the susceptibility to contamination of groundwater resources in the city of Frederico Westphalen -RS, Rio Grande do Sul, Brazil, and its potential sources of contamination. This work combines the methodologies of Susceptibility Index (IS) with the *Pollutant Origin Surcharge Hydraulically* (POSH) system through geoprocessing tools. For this, it has built up a database of hydrogeological information based on System Groundwater Information (SIAGAS) from the Geological Service of Brazil, to the depth parameters of water level and the material of the aquifer. Also, there has been raised information of relief and land use from the images provided by the United States Geological Survey (USGS). From this information, we determined the IS and applied the POSH method for the determination of potential sources of pollution load generation from the local aquifer. The results showed an IS ranging from low to very low in 14% of the city, moderately low in 55%, moderate high at 30% and higher by 1%, with the largest classes found east of the city mainly in the areas of agricultural crops subsistence. The use of POSH method indicated that the potential sources of contaminant load generation are located in areas of moderate to high susceptibility to contamination. These being areas more susceptible to contamination from diffuse sources, depending on annual crops of surface and groundwater sources. Therefore, it was concluded that the geoprocessing techniques applied in the relationship between the IS and POSH, optimize the identification of potential sites and sources of groundwater pollution, being useful in monitoring and environmental planning.

Keywords: Groundwater; Contamination; POSH

1 Introdução

O aumento da contaminação dos recursos hídricos superficiais, tem-se tornado um dos principais problemas enfrentados no abastecimento de água dos grandes centros urbanos. Com isso, a água subterrânea tem sido utilizada para complementar as necessidades que envolvem o consumo de água, seja em processos produtivos, abastecimento público ou usos múltiplos. Porém, seu uso e/ou gestão inadequada, pode gerar sérios problemas ambientais de difícil ou onerosa solução.

Diante dessa situação, surgem ferramentas computacionais que visam auxiliar na proteção e nos processos de gerenciamento adequado dos recursos hídricos subterrâneos por meio da determinação de sua vulnerabilidade natural à contaminação. Foster *et al.* (2002; 2006) definem a expressão “vulnerabilidade do aquífero à contaminação” como a busca da representação da sensibilidade do aquífero aos efeitos adversos de uma carga contaminante imposta na superfície.

Existem diversas metodologias utilizadas para a determinação da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, dentre elas destaca-se o DRASTIC (Aller *et al.*, 1987). O método DRASTIC utiliza informações de sete parâmetros hidrodinâmicos dos quais recebe seu nome, sendo eles a profundidade do nível da água (D), recarga (R), material do aquífero (A), tipo de solo (S), topografia (T), influência das características da zona vadosa (I) e a condutividade hidráulica do solo ou zona vadosa (C).

Ribeiro (2005), modificou o método DRASTIC original (Aller *et al.*, 1987), considerando apenas os parâmetros D, R, A e T e adicionando um novo item, o uso do solo (em inglês Land Use). A partir disso, ocorreu uma simplificação do método, reduzindo variáveis que, na maioria das vezes, são de difícil obtenção. O método descrito por Ribeiro (2005), determina o Índice de Susceptibilidade (IS) dos aquíferos à contaminação e foi adotado por diversos pesquisadores portugueses.

No que se refere à classificação de fontes potenciais de contaminação, um dos métodos que vem sendo frequentemente utilizado é o *Pollutant Origin Surcharge Hydraulically* (POSH) (Cutrim & Campos, 2010a, 2010b; Espinoza, 2005; Estévez & Munguía, 2013; Paris *et al.*, 2006; Toro & Espinoza, 2003) proposto por Foster *et al.* (2002; 2006). Esse método classifica as fontes a partir de seu potencial de geração de carga contaminante no meio

(reduzida, moderada e elevada). Com isso, é possível alocar as fontes classificadas e assim, identificar à classe de vulnerabilidade e/ou susceptibilidade à contaminação a qual o aquífero se encontra.

Salienta-se que estudos anteriores de Mancuso *et al.* (2013) encontraram água subterrâneas contendo concentrações naturais de flúor, acima dos valores para consumo humano, na escala municipal, em Frederico Westphalen, Ametista do Sul e Cristal do Sul.

Nesse sentido, estudos desse cunho temático são importantes por ilustrarem as áreas nas quais instalar atividades com o menor impacto ambiental. Sendo assim, essa informação pode ser utilizada como auxílio para órgãos gestores nos planos de bacias hidrográficas, visando o processo de licenciamento ambiental e a preservação das águas subterrâneas.

Atualmente, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) estão sendo amplamente utilizados no controle e monitoramento ambiental. Originados da Ciência da Informação Geográfica, os SIGs reúnem os conceitos e técnicas de Geografia, Cartografia, Geodésia, Ciências da Computação, Matemática, Estatística, entre outras, a algoritmos e modelos, num meio computacional que fornece amparo a tomada de decisões nas mais diversas questões do ambiente (Mark, 2003).

Neste contexto, esse estudo tem como objetivo, determinar e mapear o IS (Ribeiro, 2005) e as principais fontes potenciais de contaminação (cemitérios, postos de combustíveis e lagoas de tratamento de efluentes) no Aquífero Serra Geral, cristalino fissural, no Município de Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul, utilizando-se de técnicas de geoprocessamento para integrar o método POSH (Foster *et al.*, 2002; 2006) ao IS (Ribeiro, 2005), gerando assim uma fonte de informação local (Costa *et al.*, 2011) para subsidiar os estudos ambientais da região.

2 Metodologia

2.1 Caracterização da Região de Estudo

O Município de Frederico Westphalen está localizado no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (RS), no Planalto da Serra Geral (Figura 1). Segundo IBGE (2010), o município possui uma população total de 28.843 habitantes, sendo 5.510 residentes no meio rural e 23.333 no meio urbano. Segundo SEMA (2004), o município situa-se sob

a Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (U100), na região hidrográfica do Uruguai. O clima é do tipo Cfa (clima tropical úmido com verão quente) de acordo com a classificação de Köppen (Moreno, 1961) e as precipitações pluviométricas anuais são da ordem de 1900 mm (Hausman, 1995) igualmente distribuídas ao longo do ano.

A principal atividade econômica da região é a agricultura de subsistência (culturas de soja, milho, trigo), onde no preparo, manejo e cultivo do solo são utilizados fertilizantes a base de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K). Esses fertilizantes, se utilizados em grandes quantidades, podem impactar nos recursos hídricos (superficiais e/ou subterrâneos). Destaca-se ainda, a pecuária extensiva criação de gado, além da criação de suínos, como outra importante atividade econômica local.

2.2 Caracterização Geológica e Hidrogeológica

A representação geológica do Município de Frederico Westphalen, está ilustrada na Figura 2a. Observa-se a ocorrência, em superfície, da Formação Geológica Serra Geral, constituída por vários derrames vulcânicos (CPRM, 2006). A Fácies Paranapanema (k1_beta_pr), é caracterizada, segundo a CPRM (2006), por derrames basálticos granulares finos, melanocráticos, contendo

horizontes vesiculares, espessos preenchidos com quartzo (ametista), zeólitas, carbonatos, seladonita, cobre nativo e barita. No mapa de hidrogeologia local (Figura 2 B), observa-se a presença do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) I (sg1) e II (sg2) (Machado & Freitas, 2005).

Ainda, Machado & Freitas (2005) afirmam que o sistema sg1 constitui-se principalmente de litologias basálticas, amigdalóides e fraturadas, capeadas por espesso solo avermelhado. Já o sistema sg2 ocupa a parte oeste do Estado do Rio Grande do Sul, nos limites das rochas vulcânicas com o rio Uruguai e as litologias gonduânicas, além de uma extensa área no nordeste do planalto da Serra Geral, associada com os derrames da Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral ou SASG. As litologias desses sistemas aquíferos são predominantemente constituídas por rochas ácidas (teores de SiO₂ maiores do que 65 %) riólitos, riodacitos e em menor proporção, basaltos fraturados básicos (teores de SiO₂ entre 45 e 52 %), conforme Leinz & Amaral (1980). Portanto, ambos os sistemas formam aquíferos freáticos associados à porção superior dos derrames constituídos por seus solos e/ou seus materiais intemperizados. Enquanto nas porções mais profundas, maciças ou amigdalóides, formam aquíferos cristalinos fissurais.

2.3 Construção do Banco de

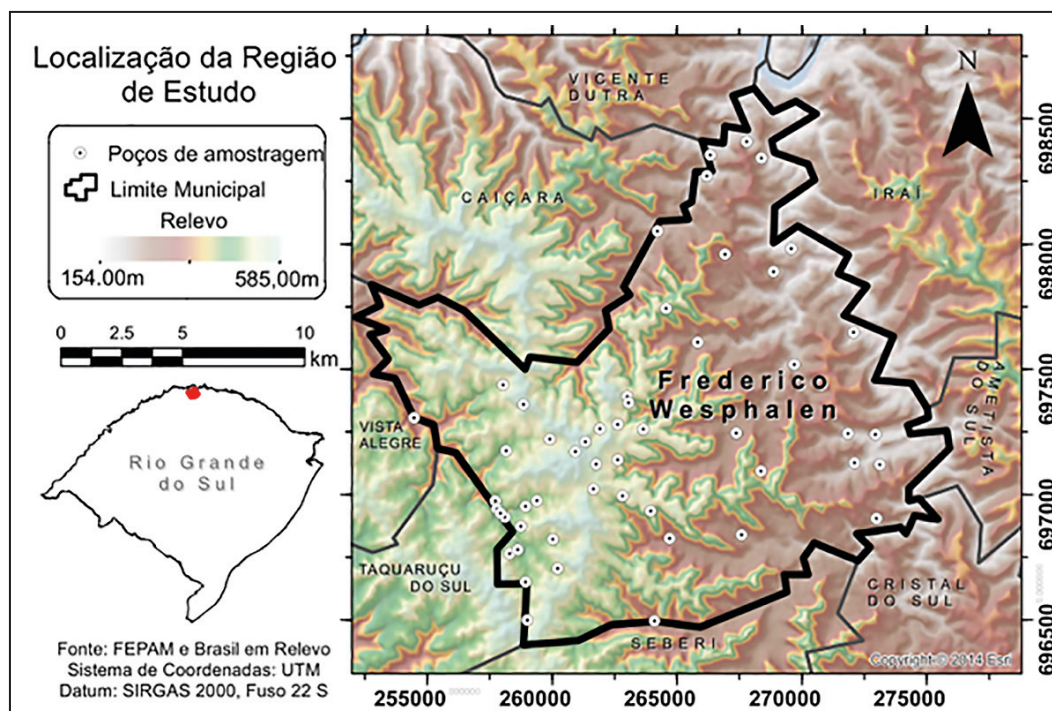


Figura 1
Localização
do município
de Frederico
Westphalen, região
noroeste do Estado do
Rio Grande do Sul.

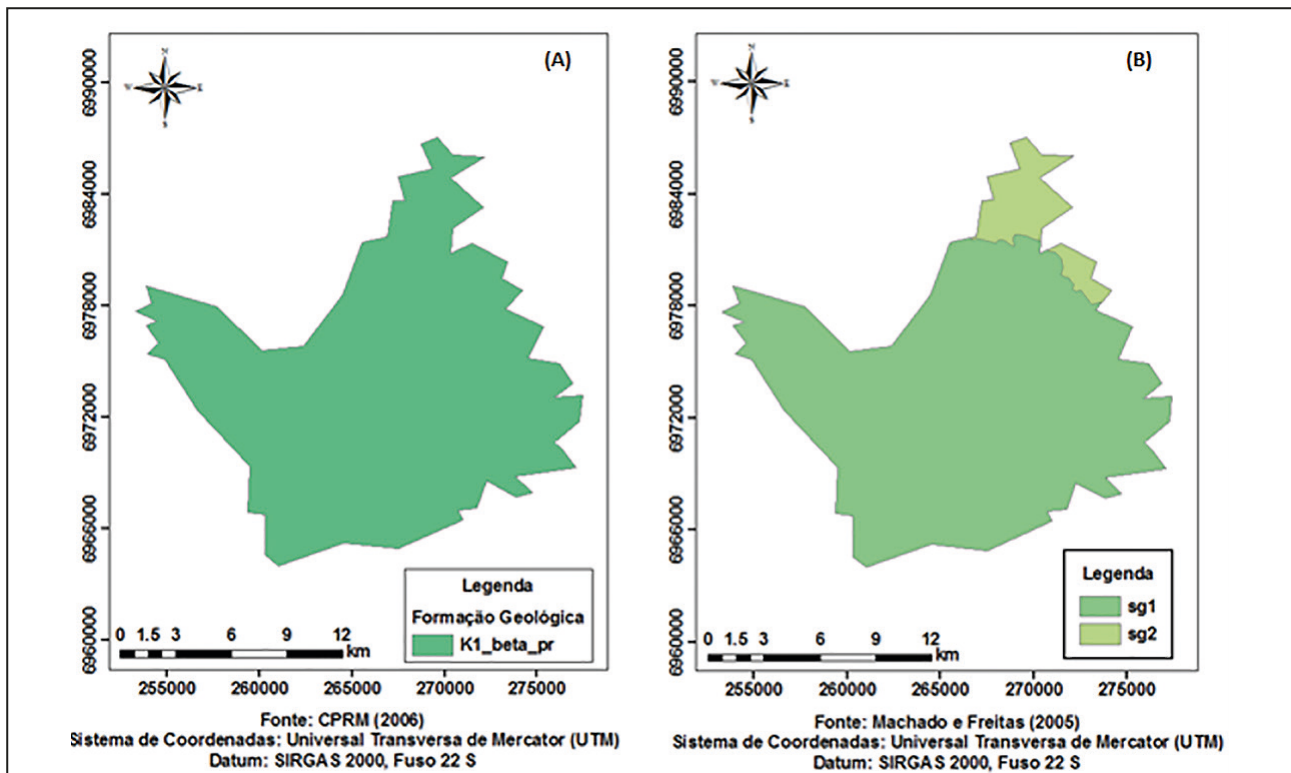


Figura 2 Geologia (A) rochas vulcânicas Formação Serra Geral Fácies Parapanema e Hidrogeologia (B) Sistema Aquífero Serra Geral I (sg1) e Serra Geral II (sg2), presente no município de Frederico Westphalen - Rio Grande do Sul. Fonte: Construído a partir de (A) CPRM (2006) e (B) Machado & Freitas (2005).

Informações Hidrogeológicas

Foram diversas as fontes de informações consideradas neste estudo, o que gerou a necessidade da utilização de um SIG para integrá-las, de modo a permitir acesso, edição e manipulação dos dados aqui utilizados.

As informações geológicas e hidrogeológicas foram adquiridas no portal do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), mantido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)/Serviço Geológico do Brasil, relativo aos parâmetros profundidade do nível da água e material do aquífero. Para determinar o uso do solo foi classificada uma imagem multiespectral datada de abril de 2013, sem a presença de nuvens, pertencente a missão *Landsat 8*, com resolução espacial de 30 metros (NASA, 2013). Ainda, calcularam-se as declividades com base nas imagens da missão do ônibus espacial de topografia por radar (acrônimo em inglês SRTM), com resolução espacial de 30 metros (USGS, 2004). Ambas imagens foram obtidas no site *Earthexplorer* do USGS em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

Na estimativa da recarga subterrânea, foram utilizados os valores propostos por Hausman (1995), considerando-se a precipitação média anual de 1900 mm e uma recarga média anual de 125 mm, obtendo-se um valor de 6,5 % de recarga do aquífero.

Foram também, tabuladas as informações referentes aos 84 poços tubulares cadastrados no SIAGAS, entre o município de Frederico Westphalen e seus municípios vizinhos, sendo eles: Ametista do Sul, Caiçara, Cristal do Sul, Iraí, Seberi, Taquaruçu do Sul, Vicente Dutra e Vista Alegre (Figura 1). Estas informações foram utilizadas para estimativa de informações em locais não amostrados através do interpolador inverso da distância ponderada (acrônimo em inglês IDW).

2.4 Determinação do Índice de Susceptibilidade e Classificação das Fontes Potenciais de Contaminação

A determinação do IS seguiu o modelo proposto por Ribeiro (2005). Na classificação

das imagens, para a determinação do uso do solo, utilizou-se o algoritmo da Máxima Verossimilhança em que foram classificadas todas as formas de vegetação existente em florestas e zonas semi-naturais, considerando ainda as classes pastagens, áreas urbanas e ambientes aquáticos.

Cabe ressaltar que não foi avaliada a vulnerabilidade específica associada a um poluente, sendo avaliada a vulnerabilidade intrínseca (Ribeiro, 2005). Estudos de vulnerabilidade intrínseca, hidroquímica e potencial hidrogeológico foram executados por Freitas *et al.* (2012) em uma porção do SASG no noroeste do estado do Rio Grande do Sul em escala de Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.

As informações de profundidade, declividade, recarga, material do aquífero, e uso do solo, foram reclassificadas de acordo com as Tabelas 1 e 2. Os valores de D, R, A e T, foram exagerados em 10 vezes, conforme sugerido por Veríssimo (2010). Este autor indica que, com essa extrapolação, ocorre uma melhor visualização dos parâmetros quando comparados ao parâmetro LU. A determinação do IS foi obtida a partir da Equação 1, inserida na ferramenta *Calculadora Raster* do SIG. A classificação final do IS está ilustrada na Tabela 3.

Para a determinação do perigo à contaminação do aquífero, foi utilizado o método POSH (Foster *et al.*, 2002; 2006). Com isso, as principais fontes pontuais potenciais de contaminação foram classificadas a partir de imagens de satélite de alta resolução obtidas do *software Google Earth Pro* (GOOGLE, 2014), da zona urbana do município de Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul. Posteriormente, foram alocadas nas diferentes áreas do IS (Ribeiro, 2005) estimado na área de estudo.

| Parâmetros | | | | | |
|------------------|-----------|------------------|-----------|-----------------|-----------|
| D | | R | | T | |
| Profundidade (m) | Pontuação | Recarga (mm/ano) | Pontuação | Declividade (%) | Pontuação |
| < 1,5 | 10 | < 51 | 1 | < 2 | 10 |
| 1,5 - 4,6 | 9 | 21 – 102 | 3 | 2 - 6 | 9 |
| 4,6 - 9,1 | 7 | 102 – 178 | 6 | 6 - 12 | 5 |
| 9,1 - 15,2 | 5 | 178 – 254 | 8 | 12 - 18 | 3 |
| 15,2 - 22,9 | 3 | < 254 | 9 | > 18 | 1 |
| 22,9 - 30,5 | 2 | | | | |
| > 30,5 | 1 | | | | |

Tabela 1 Parâmetros D, R e T, do índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e suas respectivas pontuações.
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

| Parâmetros | | | | |
|---|-------|-------|---|-------|
| A | | | LU | |
| Natureza do aquífero | Pont. | Usual | Ocupação do solo | Pont. |
| Xisto argiloso, argilito | 1-3 | 2 | Áreas agrícolas | |
| Rocha metamórfica/ ígnea | 2-5 | 3 | Perímetro de rega (Culturas anuais..) | 90 |
| Rocha metamórfica/ ígnea alterada | 3-5 | 4 | Culturas permanentes (vinhas..) | 70 |
| Till glacial | 4-6 | 5 | Pastagem e áreas agroflorestais, áreas agrícolas heterogêneas | 50 |
| Arenito, calcário e argilito estratificados | 5-9 | 6 | Áreas artificiais | |
| Arenito maciço | 4-9 | 6 | Descargas de resíduos artificiais e aterros | 100 |
| Calcário maciço | 4-9 | 8 | Pedreiras e estaleiros, áreas minerais a céu aberto | 80 |
| Areia a basalto | 4-9 | 8 | Áreas urbanas contínuas, aeroportos | 75 |
| Basalto | 2-10 | 9 | Áreas urbanas descontínuas | 70 |
| Calcário carsificado | 9-10 | 10 | Áreas naturais | |
| | | | Ambientes aquáticos (sapais, salinas..) | 50 |
| | | | Florestas e zonas semi-naturais | 0 |

Tabela 2 Parâmetros A e LU e suas respectivas pontuações
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

$$IS = 0,186D + 0,212R + 0,256A + 0,121 T + 0,222LU \quad (1)$$

| Valores | Vulnerabilidade |
|---------|-------------------------|
| > 90 | Extremamente vulnerável |
| 80 - 90 | Muito elevada |
| 70 - 80 | Elevada |
| 60 - 70 | Moderada a alta |
| 50 - 60 | Moderada a baixa |
| 40 - 50 | Baixa |
| 30 - 40 | Muito baixa |
| < 30 | Extremamente baixa |

Tabela 3 Classificação das categorias do IS
 Fonte: Adaptado de Stigter *et al.* (2006).

3 Resultados e Discussão

A vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação pode ser definida de forma intrínseca e específica (Paralta *et al.*, 2005; Ribeiro *et al.*, 2005). A vulnerabilidade intrínseca, segundo Ribeiro (2005) leva em consideração apenas as propriedades dos aquíferos (hidrológicas, hidrogeológicas, geológicas e geomorfológicas). Já a vulnerabilidade específica Ribeiro *et al.* (2005) e Paralta *et al.* (2005) dizem

que é utilizada quando as propriedades do poluente, além de sua relação com os fatores intrínsecos do meio que são considerados.

Ribeiro (2005), afirma que o IS tenta corrigir duas das principais deficiências encontradas no método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), a redundância entre os parâmetros e o sistema de ponderação. Ao adicionar o parâmetro ocupação do solo (LU), segundo esse mesmo autor, o método avalia de uma forma mais realista a vulnerabilidade específica, a partir dos impactos causados pelo uso do solo, além dos contaminantes aliados a situação.

3.1 Profundidade do Nível Freático

A Figura 3 e a Tabela 4 apresentam, respectivamente, a profundidade do nível freático e

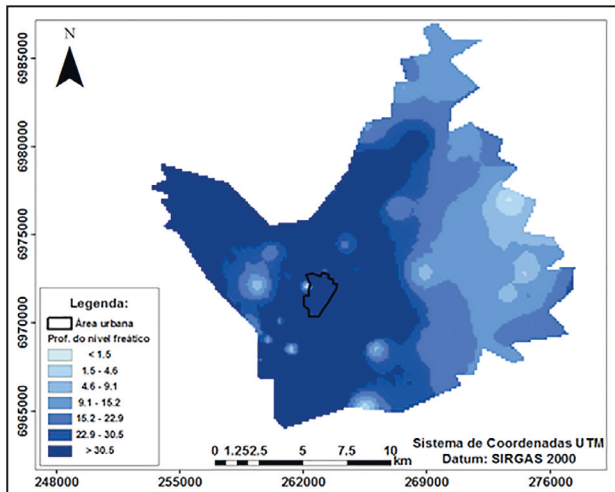


Figura 3 Mapa da profundidade do nível freático no Município de Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul
 Fonte: Construído a partir de SIAGAS, 2015)

a sua respectiva pontuação na região de estudo. As zonas claras do mapa ilustram os menores níveis de profundidade da água subterrânea, correspondendo as maiores pontuações. Sendo que, quanto mais superficial for o aquífero (menores profundidades), maior será a sua susceptibilidade à poluição.

| Profundidade (m) | Pontuação |
|------------------|-----------|
| < 1,5 | 100 |
| 1,5 - 4,6 | 90 |
| 4,6 - 9,1 | 70 |
| 9,1 - 15,2 | 50 |
| 15,2 - 22,9 | 30 |
| 22,9 - 30,5 | 20 |
| > 30,5 | 10 |

Tabela 4 Pontuação referente a profundidade do nível freático
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

3.2 Recarga e Material do Meio Aquífero

A estimativa da recarga, material do meio aquífero na zona vadosa ou aerada, e suas referentes pontuações para a região de estudo podem ser observados na Figura 4 (A) e (B), e na Tabela 5.

3.3 Topografia

A paisagem topográfica da região de estudo foi considerada declivosa devido a variação das cotas entre 203 e 585 m. Cunha *et al.* (2012) citam a ocorrência de chapadas residuais, compreendendo formas de relevo aplainadas convexas com superfícies íngremes.

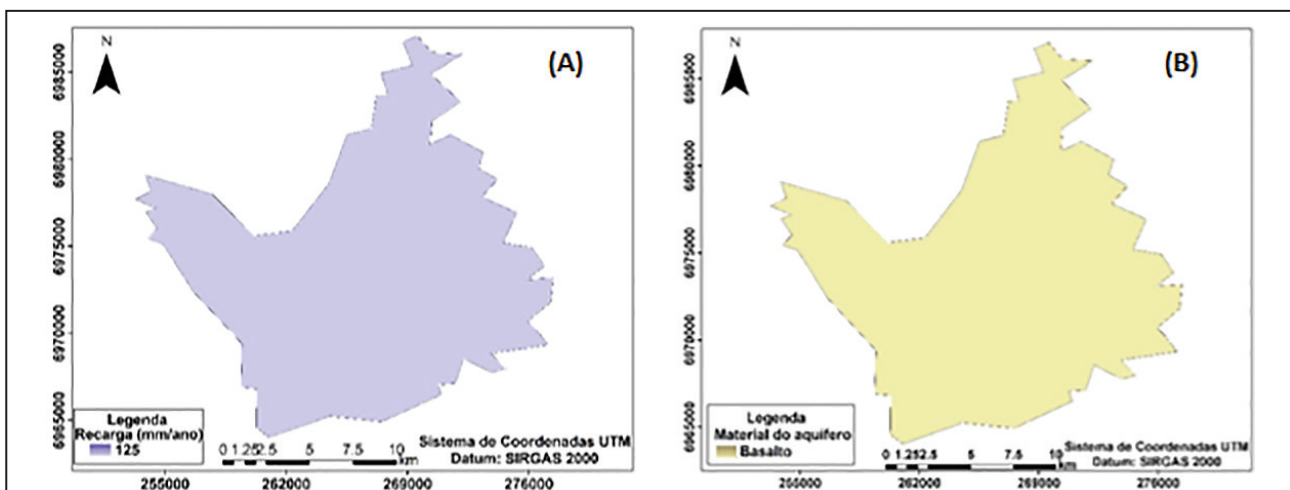


Figura 4 Recarga (A) e material do aquífero (B) no município de Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul.
 Fonte: Construído a partir de Hausman (1995) e (B) construído a partir de SIAGAS (2015).

| Recarga (mm/ano) | Pontuação |
|----------------------|-----------|
| 102 - 178 | 60 |
| Material do aquífero | Pontuação |
| Basalto | 90 |

Tabela 5 Pontuação referente a recarga do aquífero (SASG).
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

A Figura 5 apresenta a declividade em percentagem e a Tabela 6 sua respectiva pontuação no método. A partir da Tabela 6 verifica-se que as menores declividades receberam uma maior pontuação e, em consequência, estão mais susceptíveis à poluição. Isso ocorre porque nessas áreas há preferencialmente menor escoamento

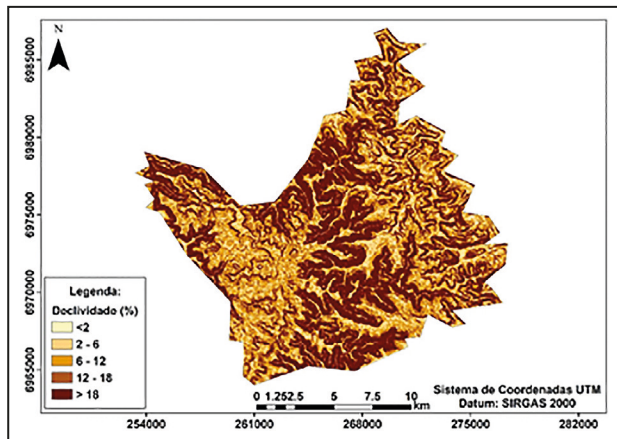


Figura 5 Mapa da declividade do Município de Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul.
 Fonte: Construído a partir de USGS/SRTM (2004).

| Declividade (%) | Pontuação |
|-----------------|-----------|
| < 2 | 100 |
| 2 – 6 | 90 |
| 6 – 12 | 50 |
| 12 – 18 | 30 |
| > 18 | 10 |

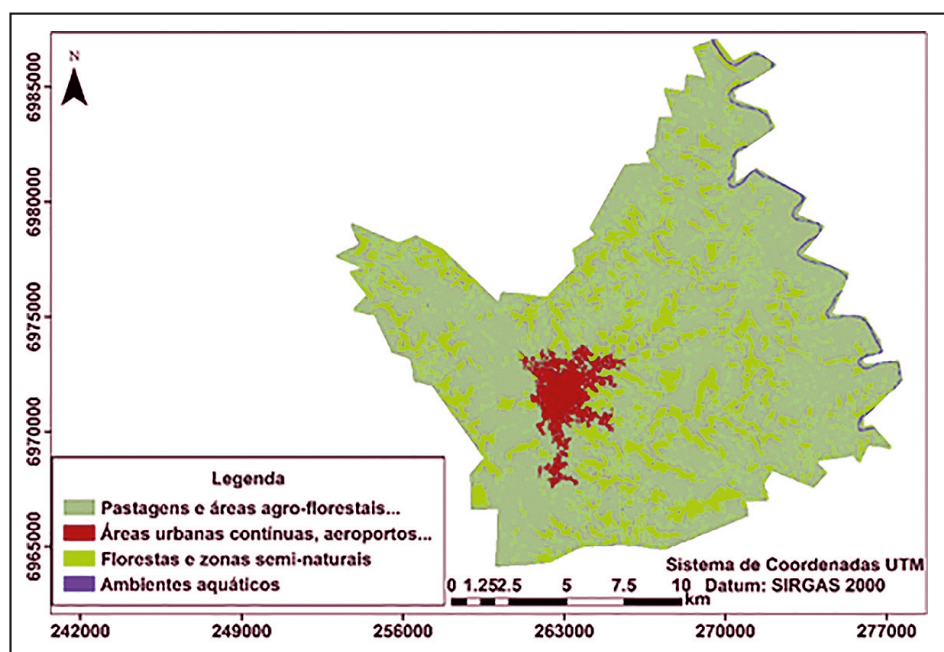
Tabela 6 Pontuação referente as classes de declividade em Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul.
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005) e Aller *et al.* (1987).

superficial, possibilitando assim o acúmulo de água e uma maior infiltração (Veríssimo, 2010).

3.4 Uso do Solo

Em relação ao uso e ocupação do solo, a Figura 6 ilustra as classes dos usos encontrados na região de estudo. Quantitativamente, estas classes ordenam-se, da maior para menor, em pastagens e áreas agro-florestais (80 %), áreas de florestas e zonas semi-naturais (16 %), seguida de áreas urbanas contínuas (3 %) e por fim ambientes aquáticos (1 %). A alta da percentagem da primeira classe pode ser justificada devido ao período de análise ter ocorrido no mês de abril, em que se tem uma maior cobertura do solo com pastagens de inverno, como aveia e azevém, além de cultivos de trigo, reflexo da alta produtividade rural do município. A Tabela 7 mostra as ponderações referentes as categorias de uso e ocupação do solo.

Figura 6 Mapa das classes de uso de solo presentes no Município de Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul.
 Fonte: Construído a partir de informações obtidas do Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC -<http://lpdaac.usgs>).



| Ocupação do solo | Pontuação |
|---|-----------|
| <u>Áreas agrícolas</u> | |
| Pastagem e áreas agroflorestais, áreas agrícolas heterogêneas | 50 |
| <u>Áreas artificiais</u> | |
| Áreas urbanas contínuas, aeroportos | 75 |
| <u>Áreas naturais</u> | |
| Ambientes aquáticos (sapais, salinas..) | 50 |
| Florestas e zonas semi-naturais | 0 |

Tabela 7 Pontuação referente as classes de uso e ocupação do solo.
 Fonte: Adaptado de Ribeiro (2005).

3.5 Estimativa do IS (Ribeiro, 2005) e Avaliação do Risco à Contaminação pelo Método POSH (Foster *et al.*, 2002; 2006)

Segundo Serra *et al.* (2003), o IS foi desenvolvido por Ribeiro (2000), visando a determinação da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação agrícola, principalmente por nitratos, sendo essa uma das principais preocupações nos países ibéricos. Segundo o autor, o IS apresentou bons resultados em condições portuguesas, destacando-se os trabalhos de Francés *et al.* (2001), Paralta *et al.* (2001) e Simas (2014).

Na região de estudo, destaca-se também, a criação de suínos como atividade econômica, aliada à agricultura, pecuária, como mencionado anteriormente (IBGE, 2010). Segundo Santos Filho *et al.* (2013), o Estado do Rio Grande do Sul, corresponde a 25,74 % da produção de carne com inspeção federal do País, destacando-se a região Noroeste do Rio Grande do Sul com as maiores concentrações dessa atividade.

Nesse contexto, a suinocultura, como qualquer outra atividade, gera resíduos, sendo que a produção diária de efluente por suíno é muito variada, pois depende de vários fatores. Já sua composição está relacionada principalmente ao manejo (Oliveira, 1993). Com isso, segundo Diesel *et al.* (2002) estima-se que cada suíno produza em média sete litros de dejetos líquidos por dia.

A partir disso, destaca-se o potencial de geração de efluentes, além do posterior tratamento ou aproveitamento adequado desse efluente. Os

efluentes podem ser utilizados na fertilização de lavouras, prática muito comum na região. Porém, seu uso inadequado pode acarretar sérios problemas ambientais relacionados à contaminação dos recursos hídricos superficiais e/ou subterrâneos, destacando mais uma vez, a importância da realização de estudos envolvendo a vulnerabilidade do meio subterrâneo as atividades antrópicas.

Nessa pesquisa, os valores de IS variaram entre muito baixo a elevado (39 a 77 %), semelhantemente àqueles encontrados por Paralta *et al.* (2005) nos estudos do sistema Aquífero Gabros de Beja, em Portugal. Lá, os valores encontrados variaram de 33 a 75 %. Porém, cabe salientar que o aquífero em destaque é do tipo Cristalino Fissural. Valores diferentes, com intervalo variando de 0 a 80 %, foram encontrados por Stigter *et al.* (2002) na região do Algarve (Sul de Portugal).

Na Figura 7 observa-se que os maiores valores de IS estiveram presentes próximos a área urbana. Isso ocorre, principalmente, pela representatividade do parâmetro uso do solo (0,222) na ponderação dos fatores do IS, sendo este o segundo parâmetro com maior peso.

As localizações das fontes pontuais de contaminação na zona urbana de Frederico Westphalen-Rio Grande do Sul, são mostradas na Figura 7. Como pode ser observado, foram localizadas as fontes potenciais de contaminação mais relevantes, como cemitérios, postos de combustíveis e as lagoas de tratamento de efluentes.

Assim, seguindo o proposto pelo método POSH (Foster *et al.*, 2002; 2006), os cemitérios, juntamente com as lagoas de tratamento de efluentes, têm um reduzido potencial de geração de carga contaminante. Já os postos de combustíveis apresentam moderado potencial. Como pode ser observado na Figura 7, a maioria das fontes com potenciais riscos de contaminação estão alocadas nas classes de susceptibilidade à contaminação moderada a alta. As fontes, embora apresentem reduzido potencial de geração de carga contaminante, segundo o método, oferecem perigo à contaminação, visto que se localizam nas áreas com susceptibilidade moderada a alta.

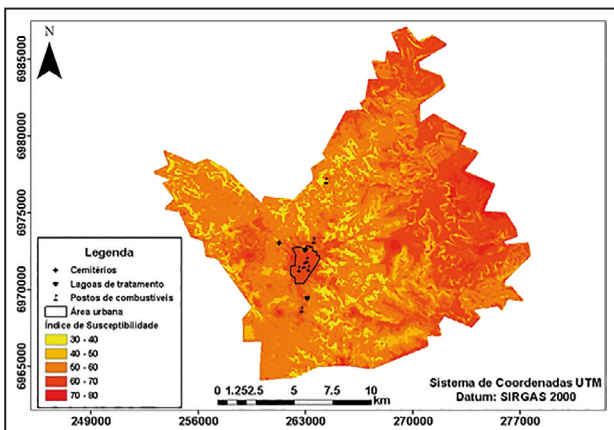


Figura 7 Representação do IS (Ribeiro, 2005) e das fontes potenciais de contaminação segundo o método POSH (Foster *et al.*, 2002; 2006) em Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul. Adaptado de Ribeiro (2005) e Foster *et al.* (2002; 2006).

4 Conclusões

Neste estudo foi determinado o IS para a escala do Município de Frederico Westphalen-Rio Grande do Sul. A região de estudo apresentou valores variando entre muito baixa (39) a elevada (77), sendo que os locais mais suscetíveis estão localizados nas áreas: central, norte e leste do município. Cabe salientar que nas áreas que apresentaram altos IS, estão presentes atividades agrícolas anuais (80 % da área do município) e área urbana (3 %). Esses podem ser possíveis pontos causadores de impacto ambiental difuso, não somente dos recursos hídricos subterrâneos, mas também dos mananciais superficiais.

Em relação à classificação das atividades com potencial risco de contaminação, vale destacar que, apesar da maioria das atividades não ser potencialmente geradoras de grandes impactos ambientais, por estarem localizadas em zonas de susceptibilidade moderada a alta, devem ser cuidadosamente geridas, ressaltando a importância de programas de acompanhamento do uso e conservação do solo na região.

As técnicas de Geoprocessamento aplicadas, ainda pouco utilizadas no Brasil, mostraram-se como uma importante ferramenta para a delimitação das áreas com maior e menor susceptibilidade à contaminação. Assim, aliadas a outras informações, podem ser úteis no monitoramento de atividades causadoras de impacto ambiental, além de permitir um

melhor planejamento no desenvolvimento de planos ambientais em Bacias Hidrográficas, bem como a melhor localização de novos empreendimentos potencialmente poluidores.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq/CAPES pelo auxílio financeiro através de bolsas de pós-graduação dos programas PPGEAmb/UFSM (primeiro e terceiro autor) e PPGEC/UFSM (quinto autor) e de produtividade em pesquisa dos demais autores brasileiros e ao intercâmbio com o CERIS/IST/Lisboa, Portugal.

6 Referências

- Aller, L.; Bennett, T.; Lehr, J.H.; Petty, R.J. & Hackett G. 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*, Chigado, NWWA/EPA. 58p.
- Cutrim, A.O. & Campos, J.E.G. 2010. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH. *Revista Geociências (UNESP. Impresso)*, 29: 401- 411.
- Cutrim, A.O. & Campos, J.E.G. 2010. Aplicação dos métodos DRASTIC e POSH para a determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 15: 127-142.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. 2006. *Mapa Geológico do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000*. Brasília, CPRM/SIAGAS.
- Costa, M. L. M. C.; Costa, M. M. R. R., Rego, J. C. R., Albuquerque, J. do P. T. 2011. Proposição de critérios de outorga para águas subterrâneas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16: 105 - 113.
- Cunha, N.G.; Silveira, R.J.C.; Koester, E.; Filippini Alba, J.M.; Costa, F.A.; Terres, V.C. & Lopes, R. T. 2011. *Estudo de solo do município de Seberi, RS*. Pelotas, Embrapa Clima Temperado. 36p.
- Diesel, R.; Miranda, C.R. & Perdomo, C.C. 1993. *Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos*. Concórdia, EMPRAPA/CNPSA. 31p.
- Espinoza, C. 2005. *Dinámica de aguas subterráneas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación. Aplicación al acuífero de Santiago Norte*. Santiago. Universidad de Chile, p. 69 - 127.
- Estévez, M.G. & Munguía, V.S. 2013. Riesgo de contaminación del acuífero arroyo Alamar en Tijuana, Baja California. *Revista Región y sociedad*, 25(56):103 - 126.
- Foster, S.; Hirata, R., Gomes, D.; D'elia, M. & Paris, M. 2002. *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. 1. ed. [s.l.] Washington, DC, World Bank. 114p.
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'elia, M. & Paris, M. 2006. *Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais*. Washington, DC, World Bank. 114p.
- Foster, S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: VAN

**Geoprocessamento Aplicado à Determinação do Índice de
Susceptibilidade das Captações por Poços Tubulares do Sistema Aquífero Serra Geral em Frederico Westphalen – Rio Grande do Sul**
Willian Fernando de Borba; José Luiz Silvério da Silva; Daniel Gustavo Allasia; Cristiano Niederauer da Rosa; Jean Ricardo Favaretto & Luis Filipe Tavares Ribeiro

- DUIJVANBOODEN, W.V & VAN WAEGENINGH, H.G. (eds.). *Vulnerability of soil and groundwater to pollution, proceedings and information*. Haia, Netherlands Organization for Applied Scientific Research, p. 69-86.
- Francés, A.; Paralta, E., Fernandes, J. & Ribeiro, L. 2001. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the susceptibility index. In: RIBEIRO, L. (ed.). International Conference on Future Groundwater Resources at Risk (FRG'01),3, *Proceedings*. Lisbon, CVRM/IST, p. 35 - 44.
- Freitas, M.A.; Binotto, R.B.; Nanni, A.S.; Rodriguez, A.L.M. & Bortoli, C.R. 2012. Avaliação do potencial hidrogeológico, vulnerabilidade intrínseca e hidroquímica do Sistema Aquífero Serra Geral no noroeste do Estado do RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(2): 31- 41.
- GOOGLE. Google Earth. *Version PRO*. 2014. Nota Frederico Westphalen-RS. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 20 Mai. 2015.
- Hausman, A. 1995. *Esboço Hidrogeológico do Rio Grande do Sul*. Acta Geologica Leopoldensia, p. 37-71.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2010. *Censo demográfico 2010*. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 12 Mar. 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2005. *Malha Municipal Digital do Brasil: 2005 (escala 1:500.000)*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2005. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas/malhas_digitais/municipio_2005/E1000/Proj_Geografica/Arc_View_shp/Regiao/Sul/>. Acesso em: 20 Mai. 2015.
- Leinz, V. & Amaral, S.E. 1980. *Geologia Geral*. São Paulo, Editora Nacional. 360 p.
- Machado, J.L.F. & Freitas, M.A. 2005. *Projeto mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul: escala 1:750.000, relatório final*. Porto Alegre, CPRM.
- Mancuso, M. A.; Schroeder, J. K., Silvério da Silva, J. L. 2013. Análise dos teores de Flúor nas águas de abastecimento público nos municípios localizados sobre o Aquífero Serra Geral. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Bento Gonçalves, 2013. Trabalho completo, Bento Gonçalves, ABRH.
- Mark, D.M. 2003. Geographic information science: Defining the field. *Foundations of geographic information science*, 1: 3 – 18.
- Moreno, J.A. 1961. *Clima do Rio Grande do Sul*. Secção de Geografia. Secretaria da Agricultura. Porto Alegre. 42p.
- NASA LANDSAT PROGRAM. 2013. *Landsat ETM+ cena LC82230792013112LGN01, LIT*, USGS, Sioux Falls. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 de Dez. de 2015.
- Oliveira, P.V.A. 1993. *Manual de manejo e utilização dos dejetos suínos*. Concórdia, EMPRAPA/CNPISA. 188p.
- Paralta, E.; Francés, A. & Ribeiro, L.F. 2005. Avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja e análise crítica das redes de monitorização no contexto da directiva quadro da água. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 7, Évora, 2005. Trabalho completo, Évora, APRH, p.14.
- Paralta, E.; Oliveira, M.; Batista, S.; Francés, A.; Ribeiro, L. & Cerejeira, M.J. 2001. Aplicação de SIG na avaliação da vulnerabilidade aquífera e cartografia da contaminação agrícola por pesticidas e nitratos na região do Ribatejo. In: SEMINÁRIO A HIDROINFORMÁTICA EM PORTUGAL, Lisboa, 2001. Trabalho completo, Lisboa, LNEC, p.16.
- Paris, M.; D'élia, M.; Perez, M. & Tujchneider, O. 2006. Groundwater resources assessment at a local scale: monitoring of industrial effluents in a wetland. *Journal Sustainability of Groundwater Resources and its Indicators*, 302: 184 – 192.
- Ribeiro, L.F. 2000. *Development of a susceptibility index to be used in agriculture diffuse pollution*. International report: ERSHA-CVRM. 9p.
- Ribeiro, L.F. 2005. Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos – formulações e aplicações. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 7, Évora, 2005. Trabalho completo, Évora, APRH, p.14.
- Santos Filho, J.; Talamini, D. & Martins, F. 2013. *Distribuição espacial da produção de suínos no Brasil*. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/cias/index.php?option=com_content&view=article&id=59> Acesso em: 08 de Jun. de 2015.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – SEMA. 2004. *Mapa das Bacias Hidrográficas e Municípios do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, SEMA.
- Serra, E.M.; Paralta, E.A.; Nascimento, J.N. & Ribeiro, L.F. 2003. Análise comparativa de dois índices de poluição agrícola no sistema Aquífero dos Gabros de Beja (sector da margem esquerda do Rio Guadiana). In: JORNADAS LUSO-ESPANHOLAS SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO SUL DA PENÍNSULA IBÉRICA, Faro, 2003. Trabalho completo, Faro, APRH.
- Simas, L.S.B. 2014. *Índices de vulnerabilidade à contaminação de massas de água subterrânea: aplicação à delimitação da Rede Ecológica Nacional no Concelho de Almada (Portugal)*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de Lisboa, Dissertação de Mestrado, 71p.
- SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – SIAGAS/ COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 20 Mai. 2015.
- Stigter, T.Y.; Ribeiro, L.; Carvalho Dill, A.M.M. 2006. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*, 14(1): 79-99.
- Stigter, T.; Vieira, J. & Nunes, L. 2002. Avaliação da susceptibilidade à contaminação das águas subterrâneas no apoio à tomada de decisão caso de estudo: implantação de campos de golfe no concelho de Albufeira (Algarve). In: CONGRESSO DA ÁGUA, 6, Porto, 2002. Trabalho completo, Porto, APRH.
- Toro, P. & Espinoza, C. 2003. Evaluación del riesgo de contaminación de la parte norte del acuífero de Santiago. In: CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO, 10, Santiago, 2003. Trabalho completo, Santiago, Universidad de Concepción.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. 2004. Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second scene SRTM1S28W054V3, Unfilled Unfinished 2.0, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, Fevereiro de 2015.
- Verissimo, A.C.F. 2010. *Hidroquímica, vulnerabilidade e protecção do aquífero de torres vedras*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geológica, Universidade de Lisboa, Dissertação de Mestrado, 140p.