

Pedro Daniel Da Cunha Kemerich

**ANÁLISE AMBIENTAL EM ÁREAS DE INFILTRAÇÃO  
MÁXIMA DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
VACACAÍ-MIRIM-RS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Roberto Martins

Co-orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

Florianópolis  
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kemerich, Pedro Daniel da Cunha  
ANÁLISE AMBIENTAL EM ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA DE  
ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM-RS /  
Pedro Daniel da Cunha Kemerich ; orientador, Sergio  
Roberto Martins ; co-orientador, Masato Kobiyama . -  
Florianópolis, SC, 2013.  
267 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Modelo PSR. 3. DRASTIC. 4.  
GOD. 5. Índices físicos. I. Martins, Sergio Roberto. II.  
Kobiyama, Masato. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.  
IV. Título.

**Pedro Daniel da Cunha Kemerich**

**“ANÁLISE AMBIENTAL EM ÁREAS DE INFILTRAÇÃO  
MÁXIMA DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
VACACAÍ-MIRIM - RS”.**

A Tese foi julgada e aprovada pela banca examinadora no Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

**DOUTOR EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Florianópolis, SC – Brasil; agosto/2013

---

Prof. William Gerson Matias, Dr.  
Coordenador do PPGEA

**Banca examinadora:**

---

Prof. Sergio Roberto Martins, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina –PPGEA/UFSC

---

Profª. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto, Drª.  
Universidade Federal de Santa Catarina –PPGEA/UFSC

---

Profª. Nadia Bernardi Bonumá, Drª.  
Universidade Federal de Santa Catarina –PPGEA/UFSC

---

Prof. José Antônio Saldanha Louzada, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/IPH

---

Prof. Jucinei José Comin, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof. Sérgio Luiz Zampieri, Dr.  
Empresa De Pesquisa Agropecuária E Extensão Rural De Santa  
Catarina/EPAGRI

Dedico este trabalho aos meus pais:  
José Fernando Kemerich e Sandra  
Regina da Cunha Kemerich.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a força interior que me move, me inspira, me faz ser forte, me faz sonhar. A esta força interior, nosso Deus, só tenho a agradecer.

O período destinado ao Doutorado foi repleto de experiências únicas, tempo de conhecer e também aprender com grandes pessoas, às quais tenho muito a agradecer.

Meu muito obrigado a:

Professor Sergio Roberto Martins e a Professor Masato Kobiyama que foram sempre presentes durante os anos dedicados a este estudo. Tenham certeza que esse período de convívio foi de extrema importância em minha formação como pesquisador e como pessoa.

Professor Galileo Adeli Buriol por ter me permitido o utilizar o Projeto **MCT/CNPq nº 014/2008 – Universal**, como instrumento para a realização desta Tese de Doutorado e pelos grandes ensinamentos enquanto fomos colegas ministrando aulas no Centro Universitário Franciscano – UNIFRA.

Aos Professores Dr. Rodrigo Ferreira da Silva, Dr. Afranio Almir Righes e Dr. Velci Queiróz pelas contribuições nas discussões realizadas neste trabalho de Tese. Ao Professor Dr. Antônio Luis Santi por ceder parte dos equipamentos destinados à realização deste trabalho. Ao Professor Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva e ao Engenheiro Agrônomo Ezequiel Koppe pelo auxílio nas determinações dos índices físicos do solo.

Meus alunos e amigos Willian Fernando de Borba, Carlos Eduardo Balestrin Flores e Gabriel Fernandes pelo enorme apoio nos trabalhos de campo desta tese, em longas viagens, fazendo muitas vezes 1500 km tornar-se uma ida à esquina.

Aos demais alunos frequentadores assíduos da sala 313 (Laboratório de Monitoramento e Planejamento Ambiental, carinhosamente chamado de Senzala por eles) da Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen – RS, pelas boas risadas nas horas vagas, entre tantos trabalhos que fizemos durante três anos nesta cidade distante da minha casa, que ficaram mais curtos pela acolhida recebida.

Meus pais José Fernando Kemerich e Sandra Regina da Cunha Kemerich que sonharam em me dar o melhor, trabalharam muito para

isso e sempre acreditaram em mim! Sem vocês eu nada seria! A vocês eu dedico mais esta conquista!

À Deborah, minha companheira para todas as horas. A pessoa que torna meus dias mais especiais.

Ao Centro Universitário Franciscano – UNIFRA, pela excelente formação recebida durante a realização do Curso de Engenharia Ambiental e no Curso de Engenharia de Segurança no Trabalho. Agradeço também pela oportunidade de ter trabalhado nesta ótima Instituição de Ensino Superior por quase quatro anos, despertando em mim a paixão pela profissão de Professor!

Agradeço àquelas pessoas que de alguma forma não acreditaram em mim! Sem dúvida isso me motivou muito!

“E nossa história  
Não estará  
Pelo avesso assim  
Sem final feliz  
Teremos coisas bonitas pra contar  
E até lá  
Vamos viver  
Temos muito ainda por fazer  
Não olhe pra trás  
Apenas começamos  
O mundo começa agora, ah!  
Apenas começamos”.

(R. Russo – Metal Contra as Núvens)

## RESUMO

A bacia hidrográfica é adotada como unidade básica de planejamento e gestão dos recursos hídricos, porém com os avanços dos níveis de contaminação do solo e da água, faz-se necessária a adoção de políticas que minimizem estes danos. O presente trabalho foi desenvolvido sob a hipótese de que, a maior parte das áreas de infiltração máxima localiza-se em áreas de vulnerabilidade natural à contaminação considerada alta e estão exposta às alterações antrópicas (Pressões) em decorrência dos mais variados tipos de uso e ocupação do solo, que modificam suas características físicas e químicas (Estado), desse modo é necessária uma resposta efetiva dos órgãos gestores, em especial do comitê de gerenciamento de bacias hidrográficas, visando à preservação destas áreas, o que em muitos casos deixa de acontecer, favorecendo a ocorrência de graves danos ambientais. O objetivo geral deste trabalho foi realizar a análise ambiental das áreas de infiltração máxima de água na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, já os objetivos específicos foram: a) Determinar as áreas de infiltração máxima presentes na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim; b) Determinar a vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim; c) Quantificar o perigo e o risco à contaminação na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim; d) Determinar as alterações das propriedades físicas e químicas do solo em função dos diferentes usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica; e) Analisar a infiltração e o escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim em função dos diferentes usos e formas de ocupação do solo; f) Verificar a efetividade do comitê de gerenciamento de recursos hídricos da bacia hidrográfica quanto às suas ações frente aos fatores de Pressão e Estado. Com a aplicação da metodologia DRASTIC no ano de 2010, as áreas de infiltração máxima representaram 24% da área da bacia hidrográfica, já no ano de 2011 representaram 18,55%, sendo que as maiores taxas de infiltração localizam-se nas várzeas da bacia hidrográfica, onde predominam o cultivo de arroz. As áreas de infiltração máxima no ano de 2011 estiveram presentes nas classes de vulnerabilidade DRASTIC classificadas como baixa, média, alta e extrema, já na metodologia GOD estiveram presentes nas classes média, alta e extrema vulnerabilidade. Com relação à infiltração DRASTIC, as áreas de maiores infiltrações estiveram presentes na região central da bacia hidrográfica, coincidindo com as áreas de infiltração máxima. Porém utilizando-se o Infiltrômetro de Cornell, as áreas de mata nativa e área urbana não apresentaram

escoamento superficial, já as áreas de arroz apresentaram as menores taxas. A vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, determinada utilizando-se a metodologia GOD, foi classificada variando de insignificante a extrema, principalmente em função dos níveis estáticos próximos a superfície, incluindo surgências em alguns casos, e das formações geológicas com alta permeabilidade (Formação Serra Geral, Aluvião e Terraços Fluviais). Os índices socioeconômicos (renda, saúde, condições de domicílios e saneamento e educação) variaram de baixo a alto. O perigo variou de baixo a muito alto, já o risco variou entre baixo/nulo a muito alto. Com relação aos parâmetros físicos e químicos do solo, os mesmos apresentaram as maiores alterações nas áreas que sofrem influência direta do meio antrópico (áreas de arroz e cultivo de soja). No que diz respeito à efetividade do comitê de gerenciamento de recursos hídricos, ficou evidenciado que suas ações/respostas ainda não são totalmente capazes de diminuir as pressões ambientais existentes no território da bacia hidrográfica, porém em função de algumas ações pontuais, bem como a realização de projetos que estão em andamento, há uma pequena melhoria do estado ambiental.

**Palavras-chave:** Metodologia DRASTIC. Metodologia GOD. Comitê de gerenciamento. Risco. Perigo.

## ABSTRACT

The hydrographic basin is adopted as the basic unit for planning and management of water resources, but with the advances of the levels of contamination of soil and water, it is necessary to adopt policies that minimize this damage. This study was developed under the assumption that, the most part of the areas of maximum infiltration is located in areas considered highly vulnerable for contamination, and are exposed to anthropogenic changes (pressures) due to the various types of use and occupancy of the soil, which modify its chemical and physical characteristics (state), thus, it is necessary an effective response from the management sectors, in particular the hydrographic basins management committee, in order to preserve these areas, which in many cases do not happen, favoring the occurrence of severe environmental damage. The objective of this study was to environmentally analyze the areas of maximum infiltration of the Basin of River Vacacaí-Mirim, the specific objectives were: a) Determine the area of maximum infiltration present in the Basin of River Vacacaí-Mirim; b) Determine the natural vulnerability to the contamination of the groundwater resources in the Basin of River Vacacaí-Mirim; c) Quantify the danger and the risk of contamination in Basin of River Vacacaí-Mirim; d) Determine the physical and chemical changes in soil due to the different uses and occupations in the basin's soil; e) Analyze the infiltration and the runoff in the Basin of River Vacacaí-Mirim due to the different forms of use of the land; f) Verify the effectiveness of the hydrographic basin water resources management committee as to its actions against state and pressure factors. Through the application of DRASTIC methodology in 2010, the areas of maximum infiltration represented 24% of the hydrographic basin area, by the year of 2011, it accounted for 18.55%, being the highest rates of infiltration located in the floodplains of the basin area, where rice farming predominates. The areas of maximum infiltration in 2011 were present in the classes of vulnerability of DRASTIC considered as low, medium, high and extreme, as for the GOD methodology, they were present in medium, high and extreme classes of vulnerability. Regarding DRASTIC infiltration, the areas of highest infiltration were present in the central region of the basin, coinciding with the areas of maximum infiltration. However, when using Cornell infiltrometer, the areas of native forest and urban areas showed no runoff, and the rice planting areas showed the lowest rates. The natural vulnerability to contamination of groundwater, determined using the GOD methodology was classified ranging from negligible to

extreme, mainly due to the static levels near the surface, including resurgences in some cases, and the geological formations with high permeability (Serra Geral Formation, Alluvium, and River Terraces). Socioeconomic indexes (income, health, housing conditions, sanitation and education) ranged from low to high. The danger ranged from low to very high, as for the risk it ranged from low/zero to very high. With regard to the physical and chemical parameters of the soil, they presented the greatest changes in the area that suffered direct influence of human environment (areas of rice and soy culture). With regard to the effectiveness of water resources management committee, it was evident that their actions/responses are still not fully able to reduce existing environmental pressures within the basin area, however due to some specific actions, as well as conducting ongoing environmental projects, there is a small improvement in the environmental status.

**Keywords:** DRASTIC Methodology. GOD Methodology. Management committee. Risks. Danger.

## LISTA DE SIGLAS

- ASCII** - *American Standard Code for Information Interchange*  
**B.L.U.E.** - *Best Linear Unbiased Estimator*  
**CETESB** - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
**CGBHRV** - Comitê De Bacia Hidrográfica Dos Rios Vacacaí E Vacacaí-Mirim  
**CNAE** - Classificação Nacional das Atividades Econômicas  
**CNPQ** – Conselho Nacional De Desenvolvimento Científico E Tecnológico  
**CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
**CPRM** - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
**SGB** – Serviço geológico do Brasil  
**CRH-RS** - Conselho de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul  
**DRASTIC** - D = Profundidade à água subterrânea (x5); R = Taxa de recarga natural (x4); A = Características do meio aquífero (x3); S = Características do solo (x2); T = Aspecto topográfico (x1); I = Impacto (efeito) da zona não saturada (vadoza) (x5); C = Condutividade hidráulica (x3).  
**EDXRF** - Shimadzu Energy Dispersion Fluorescence X-ray Spectrometer Ray, Serie EDX-720  
**EMBRAPA** - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
**EUA** – Estados Unidos Da América  
**FEE** - Fundação de Economia e Estatística  
**FEPAM** - Fundação Estadual de Proteção Ambiental  
**FRH-RS** - Fundo de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul  
**GOD** - G – *groundwater hydraulic confinement*; **O** – *overlying strata*;  
**D** – *depth to groundwater table*  
**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
**Idese** - Índice de desenvolvimento sócio econômico  
**IDH** - Índice de Desenvolvimento Humano  
**IICA** - *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura*  
**INPE** – Instituto Nacional de pesquisas Espaciais  
**Inpp-I** - Índice de Potencial Poluidor da Indústria  
**IVAB** - Valor Adicionado Bruto da Indústria  
**MDT** - modelo digital do terreno  
**MG** – Minas Gerais  
**OECD** - Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico  
**OMS** - Organização Mundial da Saúde

**PER** - Pressão – Estado – Resposta  
**PI** – Produção Integrada  
**PIB** - Produto Interno Bruto  
**PSR** - *Pressure-State-Response*  
**RS** – Rio Grande do Sul  
**SEMA** – Secretaria Estadual do Meio Ambiente  
**SEPLAN** - A Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública  
**SIAGAS** - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas  
**SIG** – Sistema De Informação Geográfica  
**SINCOMCAM** - Sindicato do Comércio Patronal de Camaçari e Região  
**UFSC** – Universidade Federal De Santa Catarina  
**UFSM** - Universidade Federal de Santa Maria  
**UNDP** - *United Nations Development Programm*  
**UNEP** - *United Nations Environmental Program*  
**USDA** - *Department of Agriculture United States*  
**USEPA** - Agência de Proteção Ambiental norteamericana  
**USP** – Universidade de São Paulo  
**UTM** - Sistema Universal Transversa de Mercator  
**WRI** - *World Resources Institute*

## LISTA DE SÍMBOLOS

**AGUT** - Quantidade Máxima De Água Armazenável No Solo  
**As** - umidades volumétricas na condição  
**CC** - capacidade de campo  
**Cd** - Cádmiu  
**Cr** - Cromo  
**CTC** - capacidade de troca de cátions  
**Cu** - Cobre  
**Dens** - densidade do solo seco  
**Ds** - densidade do solo  
**F** - infiltração  
**Fc** - capacidade de infiltração  
**Fe** - Ferro  
**Hg** - Mercúriu  
**IFI** - Índice de Facilidade de Infiltração  
**K** - Potássio  
**Km** – quilômetro  
**Ksat** - condutividade hidráulica saturada  
**Macro** - macroporosidade  
**Micro** - microporosidade  
**mm** – milímetros  
**Mn** - Manganês  
**M.O.** - matéria orgânica  
**Zn** - Zinco  
**Ni** - Niquel  
**P** - Fósforo  
**Pb** - Chumbo  
**pH** – acidez  
**PMP** - ponto de murcha permanente  
**R.P.** - Resistência à penetração  
**L.D.** – Limite de detecção

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Síntese de algumas vantagens e limitações da aplicação de indicadores de desenvolvimento sustentável. ....	36
<b>Tabela 2:</b> Síntese de algumas potencialidades e fragilidades do modelo PER .....	37
<b>Tabela 3:</b> Valores limites para cada classe dos parâmetros tipo de solo, declividade e AGUT na definição das áreas de infiltração máxima. ....	88
<b>Tabela 4:</b> Uso e ocupação do solo Bacia Hidrográfica Vacacai-Mirim-RS.....	97
<b>Tabela 5:</b> Tipos de solo Bacia Hidrográfica Vacacai-Mirim-RS. ....	97
<b>Tabela 6:</b> Pesos e blocos de indicadores constituintes do Idese. ....	107
<b>Tabela 7:</b> Critérios de classificação das demandas dos municípios ...	120
<b>Tabela 8:</b> Descrição das áreas de uso do solo para o ano de 2010. ....	123
<b>Tabela 9:</b> Áreas de uso do solo para o ano de 2011 .....	125
<b>Tabela 10:</b> Valor utilizado para profundidade média das raízes .....	126
<b>Tabela 11:</b> Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Insignificante.....	142
<b>Tabela 12:</b> Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Baixa. ....	143
<b>Tabela 13:</b> Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Média. ....	144
<b>Tabela 14:</b> Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Alta.....	145
<b>Tabela 15:</b> Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Extrema. ....	147
<b>Tabela 16:</b> Variação do Idese e média no período de 2000 a 2006....	160
<b>Tabela 17:</b> Comparação estatística dos parâmetros PMP, Arg, Ksat e CC entre diferentes usos do solo.....	186
<b>Tabela 18:</b> Comparação estatística dos parâmetros Dens, Micro, Macro e RP entre diferentes usos do solo. ....	187
<b>Tabela 19:</b> Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis PMP, Arg, RP, CC, Dens., Micro, Macro e Ksat.....	189
<b>Tabela 20:</b> Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo em diferentes usos e manejos do solo na Bacia Hidrográfica do Vacacai-Mirim.....	191
<b>Tabela 21:</b> Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo determinado pelo método	

“Cornell Sprinkle Infiltrometer” em locais utilizados por arroz na bacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim. ....	197
<b>Tabela 22:</b> Projetos desenvolvidos pelo comitê .....	212
<b>Tabela 23:</b> Potenciais Impactos ambientais e conflitos ocorridos na Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim.....	218

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Modelo conceitual da metodologia Pressão-Estado-Resposta .....	29
<b>Figura 2:</b> Classes de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS, 2013. ....	78
<b>Figura 3:</b> Municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. ....	80
<b>Figura 4:</b> Modelo Pressão, Estado e Resposta <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
<b>Figura 5:</b> Mapa da formação geológica da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim-RS.....	87
<b>Figura 6:</b> Mapa das Classes de Declividades (%) na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. ....	89
<b>Figura 7:</b> Tipos de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS, segundo David (1976).....	90
<b>Figura 8:</b> Mapa planialtimétrico com a localização dos 26 pontos amostrados na Bacia Hidrográfica Vacacaí-Mirim-RS.....	95
<b>Figura 9:</b> Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero .....	99
<b>Figura 10:</b> Exemplos de aplicação do Sistema GOD Foster et al. (2006) em poços com diferentes índices de vulnerabilidades. ....	101
<b>Figura 11:</b> Método Cornell Sprinkle Infiltrometer em uma área de pastagem na bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim.....	116
<b>Figura 12:</b> Utilização do PenetroLOG em uma área de mata nativa na bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim, 2011. ....	119
<b>Figura 13:</b> Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2010 na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, RS, 2010. ....	121
<b>Figura 14:</b> Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2011 na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, RS, 2011. ....	124
<b>Figura 15:</b> Variação do AGUT na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim-RS, 2011. ....	127
<b>Figura 16:</b> $I_{FI}$ na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim em 2010. ....	129
<b>Figura 17:</b> $I_{FI}$ na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim em 2011. ....	130
<b>Figura 18:</b> Variação das áreas de infiltração máxima na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, RS, 2010. ....	132
<b>Figura 19:</b> Variação das áreas de infiltração máxima na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim em 2011 .....	134

<b>Figura 20:</b> Variação do índice nível estático na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.....	136
<b>Figura 21:</b> Variação do índice Grau de Confinamento do Aquífero na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.....	165
<b>Figura 22:</b> Variação do índice ocorrência litológica na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. ....	140
<b>Figura 23:</b> Variação da Vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea. ....	150
<b>Figura 24:</b> Falta de manutenção e ocorrência irregularidades na disposição de resíduos especiais.....	151
<b>Figura 25:</b> Índice Condições de Domicílio e Saneamento entre os anos de 2000 a 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim. ....	153
<b>Figura 26:</b> Índice Educação entre os anos de 2000 a 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.....	154
<b>Figura 27:</b> Índice Saúde entre os anos 2000 a 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.....	156
<b>Figura 28:</b> Índice Renda entre os anos 2000 a 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.....	157
<b>Figura 29:</b> Variação do Idese no período entre os anos de 2002 a 2006. ....	159
<b>Figura 30:</b> Variação do percentual de atividades com potencial poluidor baixo, médio e alto nos municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim no período de 2002 a 2006.....	161
<b>Figura 31:</b> Variação do Innpp-I no período entre os anos de 2002 a 2006.....	165
<b>Figura 32:</b> Vulnerabilidade natural à contaminação na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. ....	167
<b>Figura 33:</b> Classificação do Perigo na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.....	201
<b>Figura 34:</b> Risco na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.....	171
<b>Figura 35:</b> Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em áreas de cultivo de arroz.	199
<b>Figura 36:</b> Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em áreas de cultivo de soja. .	201
<b>Figura 37:</b> Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em áreas de pastagem. ....	203
<b>Figura 38:</b> Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em área urbana. ....	204
<b>Figura 39:</b> Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em área de mata nativa. ....	206

<b>Figura 40:</b> Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em área de em campo nativo.....	208
<b>Figura 41:</b> Distribuição anual de recursos ao Comitê da Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim .....	210
<b>Figura 42:</b> Demandas do município de Restinga Seca.....	215
<b>Figura 43:</b> Demandas do município de Santa Maria.....	216

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
1.1. OBJETIVOS .....	30
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>30</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>32</b>
2.1 ANÁLISE AMBIENTAL .....	32
<b>2.1.1 Uso de indicadores de sustentabilidade ambiental: desafios para a análise ambiental</b> .....	<b>32</b>
<b>2.1.2 A função dos indicadores na avaliação da sustentabilidade ambiental</b> .....	<b>37</b>
<b>2.1.3 A complexidade dos indicadores de sustentabilidade ambiental</b> .	<b>38</b>
<b>2.1.4 O Modelo Pressão-Estado-Resposta (P-E-R)</b> .....	<b>45</b>
2.2 ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA DE ÁGUA .....	49
2.3 VULNERABILIDADE AMBIENTAL E ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA DE ÁGUA.....	51
<b>2.3.1 A bacia hidrográfica como unidade básica para estudos ambientais</b> .....	<b>51</b>
<b>2.3.2 Geologia, Clima e Vegetação</b> .....	<b>53</b>
<b>2.3.3 Solos</b> .....	<b>54</b>
<b>2.3.4 Características físicas do solo que influenciam na infiltração e na vulnerabilidade</b> .....	<b>57</b>
2.4 VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA .....	64
2.5 CONTAMINAÇÃO QUÍMICA DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO.....	68
2.6 A ATUAÇÃO E A EFETIVIDADE DOS COMITÊS DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	71
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>74</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	75
3.2 ANÁLISE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA .....	82
3.3 DELIMITAÇÃO DA BACIA .....	84
3.4 DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA ....	84
3.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FACILIDADE DE INFILTRAÇÃO (IFI) .....	91
3.6 PONTOS PARA A MEDIÇÃO DA INFILTRAÇÃO .....	95
3.7 DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUIFERO À CONTAMINAÇÃO.....	97
3.8 ÍNDICE DE RISCO .....	102

3.9 INDICADOR DE PERIGO.....	103
3.10 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE POTENCIAL POLUIDOR DA INDÚSTRIA - INPP-I.....	103
3.11 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO SÓCIO ECONÔMICO – IDESE .....	104
3.12 DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO À CONTAMINAÇÃO .....	107
3.13 CADASTRAMENTO DOS POÇOS E MONTAGEM DO BANCO DE DADOS.....	107
3.14 DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO.....	108
3.15 MÉTODOS ANALÍTICOS.....	109
<b>3.15.1 Fósforo.....</b>	<b>111</b>
<b>3.15.2 Potássio.....</b>	<b>111</b>
<b>3.15.3 Cálcio e Magnésio.....</b>	<b>111</b>
3.15.3.1 Alumínio Trocável .....	114
3.16 PREPARO DAS AMOSTRAS E DETERMINAÇÃO DOS METAIS .....	115
3.17 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL .....	116
3.18 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO .....	118
3.19 EFETIVIDADE DO COMITÊ DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS VACACAÍ E VACACAÍ-MIRIM .....	119
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>121</b>
4.1 ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ MIRIM – RS .....	121
<b>4.1.1 Mapas de uso e ocupação do solo – Profundidade das raízes ....</b>	<b>121</b>
<b>4.1.2 Profundidade das raízes nas diferentes classes de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.....</b>	<b>125</b>
<b>4.1.3. Quantidade máxima de água no solo disponível para evapotranspiração - AGUT .....</b>	<b>126</b>
<b>4.1.4. Índice de facilidade de infiltração - I<sub>FI</sub> (2010 - 2011) .....</b>	<b>127</b>
4.2 VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM .....	135
<b>4.2.1 Nível estático .....</b>	<b>135</b>
<b>4.2.2 Grau de confinamento da água subterrânea.....</b>	<b>137</b>
<b>4.2.3. Ocorrência Litológica.....</b>	<b>139</b>
<b>4.2.4 Vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.....</b>	<b>141</b>
<b>4.2.5. O cadastramento de fontes alternativas de abastecimento e as pressões sobre os recursos hídricos subterrâneos.....</b>	<b>151</b>

4.3 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE RISCO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM COM O USO DE INDICADORES DE PERIGO E VULNERABILIDADE.....	152
4.3.1. Índice condições de domicílio e Saneamento .....	152
4.3.2. Índice educação .....	154
4.3.2. Índice saúde .....	155
4.3.3. Índice Renda.....	157
4.3.4. Índice de desenvolvimento sócio econômico – Idese.....	158
4.3.5. Perigo e Risco .....	161
4.3.7. Perigo .....	168
4.3.8. Risco .....	170
4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM .....	172
4.4.1. Argila.....	172
4.4.2. Fósforo (P) .....	173
4.4.3. Matéria Orgânica (M.O) .....	174
4.4.4. pH .....	175
4.4.5. Potássio (K).....	176
4.4.6. Alumínio (Al).....	176
4.4.7. Cálcio (Ca) .....	177
4.4.8. Ferro (Fe).....	178
4.4.9. Magnésio (Mg).....	179
4.4.10. Potássio (K).....	179
4.4.11. Bário (Ba).....	180
4.4.12. Fósforo (P) .....	181
4.4.13. Manganês (Mn) .....	182
4.4.14. Silício (Si) .....	182
4.4.15. Zinco (Zn) .....	183
4.5 ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO SOB DIFERENTES USOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM .....	184
4.5.1 Resistência à penetração.....	184
4.5.2 Análise de componentes principais dos dados dos índices físicos e químicos do solo - ACP.....	190
4.6. INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL SOB DIFERENTES USOS E OCUPAÇÃO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA .....	196
4.6.1 Áreas de cultivo de arroz.....	198
4.6.2 Áreas de cultivo da Soja .....	199
4.6.3 Áreas de pastagem .....	202
4.6.4 Área urbana.....	203
4.6.5 Áreas de mata nativa .....	205
4.6.6 Áreas de campo nativo.....	207
4.6.7 Resistência à penetração.....	209

<b>4.6.8 Taxas médias de infiltração e escoamento superficial.....</b>	<b>209</b>
<b>4.7 EFETIVIDADE DO COMITÊ DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS VACACAÍ E VACACAÍ-MIRIM .....</b>	<b>210</b>
<b>4.7.1. Recursos financeiros do Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim.....</b>	<b>210</b>
<b>4.7.2. Atendimento das demandas dos municípios que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim no Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim .....</b>	<b>214</b>
<b>4.7.3. Impactos ambientais ocorridos na Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e a Resposta via Comitê de Gerenciamento .....</b>	<b>217</b>
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>222</b>
<b>5.1 CONCLUSÕES.....</b>	<b>222</b>
<b>5.2 RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>224</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>224</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica é adotada como unidade básica de planejamento e gestão de recursos hídricos. O gerenciamento das bacias hidrográficas no Estado do Rio Grande do Sul é realizado pelos Comitês de Gerenciamento de Bacias Hidrográficas, que são colegiados instituídos pelo Governo do Estado, integrantes do Sistema Estadual de Recursos hídricos, Lei nº 10.350, de 1994. Os representantes dos comitês têm como função discutir e deliberar sobre temas de interesse aos usuários da água, definindo as prioridades do seu uso e as intervenções necessárias à gestão integrada da bacia hidrográfica.

A rede hidrográfica do Estado do Rio Grande do Sul foi dividida em várias Bacias Hidrográficas, sendo uma delas a dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim. Esta Bacia Hidrográfica é contribuinte do Rio Jacuí, possui área aproximada de 11.000 km<sup>2</sup>, sendo a do Rio Vacacaí de 10.000 km<sup>2</sup> e a do Rio Vacacaí-Mirim, em torno de 1.000 km<sup>2</sup>. Esta última se constitui na principal bacia hidrográfica da região de Santa Maria - RS.

Na parte alta da bacia está localizado o reservatório de abastecimento público, com área inundada de 0,74 km<sup>2</sup>, volume de 3,8 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, com bacia contribuinte de aproximadamente 29 km<sup>2</sup>, com uso do solo predominante de mata nativa, agricultura de cultivos anuais e permanentes, pecuária (em menor escala) e diversos balneários.

O reservatório do Vacacaí-Mirim é responsável por 40% do abastecimento público de água da Cidade de Santa Maria-RS, sendo que sua bacia sofre os efeitos da expansão urbana e da atividade agrícola, com sérios problemas de qualidade e quantidade de água (PAIVA; PAIVA, 2006).

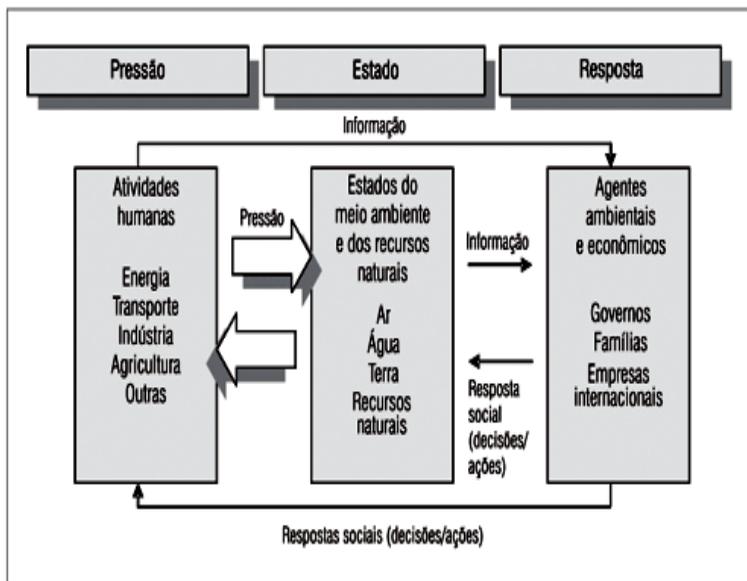
A bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim apresenta diversos problemas, como por exemplo, as enchentes causadas pelo crescimento desenfreado da urbanização, causando diversos prejuízos nas áreas agrícolas e ribeirinhas. Cabe destacar que nos períodos de estiagem há uma grande demanda de água para irrigação, com a existência de muitos pontos de bombeamento de água para o cultivo de arroz, agravando ainda mais o problema de falta de água. Na região há um incontável número de captações clandestinas de água subterrânea que colocam em risco a qualidade da água e a saúde dos usuários.

Diante da problemática vivenciada nesta região, por meio do Projeto “Precipitações pluviométricas e áreas de recarga do aquífero na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim” aprovado junto ao Conselho

Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ no edital MCT/CNPq nº 014/2008 - **Universal, com o apoio do Professor Dr. Galileo Adeli Buriol, coordenador do Projeto**, deu-se início a este trabalho de Tese de Doutorado, sob a orientação do Professor Dr. Sergio Roberto Martins e Co-Orientação do Professor Dr. Masato Kobiyama, na Linha de Pesquisa “Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas e Desenvolvimento Sustentável”. Cabe salientar que desempenhei por dois anos o papel de Secretário Executivo do Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, presenciando as discussões acaloradas em busca de soluções para os conflitos existentes sobre o uso dos recursos hídricos na região. Esta vivência me incentivou na realização de um trabalho que pudesse servir como base aos tomadores de decisão, ajudando na gestão ambiental, especialmente no que diz respeito às áreas de infiltração máxima de água, áreas estas de fundamental importância para a manutenção do ciclo hidrológico, podendo em alguns casos serem consideradas áreas de preservação permanente.

Um instrumento fundamental para a análise ambiental de bacias hidrográficas é a utilização de modelos como o modelo Pressão-Estado-Resposta (PER/PSR), onde é possível descrever a dinâmica dos problemas ambientais existentes na área de interesse. Faz-se necessário identificar os indicadores de: Pressão, que traduzem a utilização dos recursos naturais (solo, água e ar) e dos fatores de produção (fertilizantes, produtos fitofarmacêuticos e energia); Estado, que avaliam os impactos sobre o solo, a água, o ar, a biodiversidade, os *habitats* e a paisagem; Resposta, que expressam os esforços sociais e políticos que são desenvolvidos no sentido de melhorar o desempenho ambiental. Na figura 1 pode ser observado o modelo conceitual Pressão-Estado-Resposta (PER/PSR).

Figura 1 – Modelo conceitual da metodologia Pressão-Estado-Resposta



Fonte: OECD, 1993.

Frente à importância de se conhecer os processos de inter-relação entre os componentes ambientais na bacia hidrográfica, é necessária a quantificação dos elementos físicos que a compõem, como orografia, cobertura vegetal, solos, rede de drenagem e balanço hídrico (BELTRAME, 1994). Outro parâmetro importante a ser determinado na área de uma bacia hidrográfica são os locais de infiltração máxima de água das chuvas. São áreas em que, em função da natureza do solo e do substrato geológico e, ainda, da morfologia do terreno, possuem condições favoráveis à infiltração da água da chuva, que vão alimentar o lençol freático, podendo também ser áreas vulneráveis à contaminação de origem antrópica.

O conhecimento das áreas de infiltração máxima de água é de fundamental importância para a gestão adequada dos recursos hídricos, áreas estas que muitas vezes situam-se em locais de vulnerabilidade e risco, o que demanda maiores esforços para a conservação da qualidade da água subterrânea. Neste sentido, é importante conhecer a real situação da qualidade física e química do solo, podendo assim buscar ações em prol das áreas mais susceptíveis aos impactos ambientais, por

serem áreas de grande importância ambiental, podem ser adotadas como áreas de preservação ambiental.

O papel de órgão gestor dos recursos hídricos cabe ao comitê de gerenciamento, e sua efetividade é o primeiro passo no que concerne à garantia de qualidade ambiental em bacias hidrográficas. O Comitê de Bacia Hidrográfica é um órgão colegiado da gestão de recursos hídricos, com atribuições de caráter normativo, consultivo e deliberativo e integra o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Estes órgãos devem visar o respeito aos diversos ecossistemas naturais; promover a conservação e recuperação dos corpos d'água e garantir a utilização racional e sustentável dos recursos hídricos. Dessa forma, o presente trabalho foi desenvolvido sob a hipótese de que grande parte das áreas de infiltração máxima localiza-se em áreas de vulnerabilidade natural à contaminação considerada alta e estão expostas as alterações antrópicas (Pressões), em decorrência dos mais variados tipos de uso e ocupação do solo, que modificam as características físicas e químicas do solo (Estado). Desse modo, é necessária uma ação efetiva dos órgãos gestores (Resposta), em especial do comitê de gerenciamento de bacias hidrográficas visando à preservação destas áreas para diminuir a ocorrência de graves danos ambientais.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral realizar a análise ambiental das áreas de infiltração máxima de água na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.

### 1.1.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar ao objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar as áreas de infiltração máxima presentes na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim;
- b) Determinar a vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim;

- c) Quantificar o perigo e o risco à contaminação na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim;
- d) Determinar as alterações das propriedades físicas e químicas do solo em função dos diferentes usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica;
- e) Analisar a infiltração e o escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim em função dos diferentes usos e formas de ocupação do solo;
- f) Verificar a efetividade do comitê de gerenciamento de recursos hídricos da bacia hidrográfica quanto as suas ações frente aos fatores de Pressão e Estado.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ANÁLISE AMBIENTAL

#### **2.1.1 Uso de indicadores de sustentabilidade ambiental: desafios para a análise ambiental**

Durante a última década, particularmente em sua segunda metade, desenvolveu-se o interesse pela busca de indicadores de sustentabilidade por parte de organismos governamentais, não governamentais, institutos de pesquisa e universidades em todo o mundo. Muitas conferências já foram organizadas por entidades internacionais, bem como outras iniciativas de pesquisadores ligados a algumas instituições governamentais e/ou universitárias.

Com a publicação do relatório Brundtland a questão ambiental ganhou outra proporção, impulsionando pesquisas sobre indicadores de sustentabilidade. Canadá e outros países da Europa foram pioneiros em tentar delinear indicadores de sustentabilidade (QUIROGA, 2001). O trabalho com este tema, no entanto, se intensificou depois da RIO-92, com iniciativas da Comissão de Desenvolvimento Sustentável e outras propostas nacionais que incentivaram o progresso na área. É importante ressaltar que a Agenda 21, iniciativa proposta na Declaração da Conferência do Rio de Janeiro, no seu capítulo 40, recomenda a implementação de indicadores de desenvolvimento sustentável.

O *World Resources Institute* (WRI) (HAMMOND et al. 1995) fez um levantamento e acompanhou trabalhos que foram ou estão sendo realizados com indicadores de sustentabilidade, principalmente no que se refere a informações ambientais, observando a evolução e o incremento de trabalhos nessa direção nos últimos seis anos. O evento de referência é a Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente (Rio-92), com a elaboração de seu documento final, a Agenda 21. Nesse documento, em seu capítulo 40, é enfatizada a necessidade do desenvolvimento de indicadores por parte de cada país, em função de sua realidade. O texto referido cita ainda o Encontro sobre Indicadores Ambientais e de Desenvolvimento Sustentável, realizadas em fins de 1993, em Genebra, organizado pelo *United Nations Environmental Program* (UNEP). Hammond et al. (1995) citam ainda o trabalho desenvolvido pelo governo holandês, que desde 1991 tem o programa de indicadores ambientais que permite o monitoramento efetivo das ações de desenvolvimento, agilizando a tomada de decisões e tendo uma

grande participação popular no processo. Pode-se mencionar ainda, no contexto europeu, o colóquio internacional tendo como tema “Indicadores de Desenvolvimento Sustentável”, realizado em 1996, na França. (BOUNI, 1996).

O conceito de desenvolvimento sustentável, disseminado a partir da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, Rio-92, enseja mudanças de comportamento na forma como os seres humanos se relacionam com o meio ambiente, bem como no modo de formular, implementar e avaliar políticas públicas de desenvolvimento. Na operacionalização deste conceito emerge, nas agendas de governos e da sociedade, a necessidade de pensar em novas formas de mensurar o crescimento e de garantir a existência de um processo transparente e participativo para o debate e para a tomada de decisões em busca do desenvolvimento sustentável (GUIMARÃES; FEICHAS, 2009).

Porém, ainda em 1991, na Áustria, iniciou-se um programa de “eco-pontos”, dentro do programa nacional agroambiental, com a aplicação de 13 indicadores, subdivididos em sete para superfícies cultivadas e seis para pastagens. Em 1992 foram desenvolvidas pela Organização Internacional da Luta Biológica e Integrada, na Suíça, experiências-piloto em produção integrada (PI), onde se determinaram as exigências mínimas quanto à produção integrada, e na qual são usados 16 indicadores. Na Alemanha, a Universidade de Bonn desenvolve o diagnóstico biótico, com objetivo de avaliar a biodiversidade (CLAIN, 1997).

Além desses trabalhos e iniciativas, encontram-se disponíveis *on line*, via Internet, documentos desenvolvidos por alguns municípios, como o de Rushmoor, na Inglaterra (MACDONALD, 1996), que desenvolvem sua própria Agenda 21, com seus respectivos indicadores, urbanos em sua maioria. Existem ainda estudos efetuados em períodos anteriores que propõem tecnologias para avaliar desempenhos na agricultura, mas nem sempre é possível interpretá-los à luz dos novos conceitos trazidos pela discussão da sustentabilidade, pois estes representam um referencial maior, requerendo dos especialistas ultrapassar as linhas disciplinares bem estabelecidas, para possibilitar desenvolver trabalhos multi e interdisciplinares (FREYENBERG; JANKE; NORMAN, 1996). Além disso, deve-se considerar que, por estarem em desenvolvimento um quadro conceitual e metodológico ainda não totalmente claro, há grande dificuldade para se chegar a um consenso (MARZALL; ALMEIDA, 1998). Assim, o uso dos

indicadores surge para responder às questões relacionadas à expansão continuada das atividades socioeconômicas, se as mesmas não comprometem o funcionamento dos ecossistemas, sob dois aspectos fundamentais: a taxa de biorreposição dos estoques de recursos providos pelo Planeta Terra e a manutenção da qualidade dos serviços ecológicos, dos quais os humanos dependem para a qualidade de vida (FURTADO, 2009).

Com objetivo de melhor integrar os aspectos ambientais às políticas setoriais, a OECD (1993) procurou agrupar os indicadores por temas e por setores. A classificação por temas é dividida em: mudança climática, diminuição da camada de ozônio, eutrofização, acidificação, contaminação tóxica, qualidade ambiental urbana, biodiversidade, paisagens culturais, resíduos, recursos hídricos, recursos florestais, recursos pesqueiros, degradação do solo (desertificação e erosão) e indicadores gerais. Os setores são classificados em transportes, energia e agricultura pressão (FERREIRA; LIRA; CÂNDIDO, 2010).

O modelo PER possibilita uma visão conjunta dos vários componentes de um problema ambiental, sendo esta uma grande vantagem que facilita o diagnóstico do problema e a elaboração da respectiva política pública, pois vai além da mera constatação da degradação ambiental e revela seu impacto, suas causas, o que está por trás dessas causas e as ações que estão sendo tomadas para melhorar esse quadro (CARVALHO; BARCELLOS; MOREIRA, 2007).

Entretanto, este modelo reduz as pressões sobre o ambiente àquelas causadas pela ação do homem, desconsiderando as provenientes da ação da natureza, e sabe-se que os eventos naturais também podem causar impacto ambiental, sendo fontes de pressão (FERREIRA; LIRA; CÂNDIDO, 2010).

De acordo com Martinez (2001), a principal crítica a esses modelos é que induzem a leitura da existência de uma relação de causalidade linear, o que causa uma simplificação excessiva de uma situação complexa que envolve causalidades múltiplas e interação de fenômenos sociais, econômicos e ambientais. A adoção do modelo PER acabaria, portanto, estimulando a adoção de políticas corretivas, de curto prazo. Esse modelo também não estabelecem metas de sustentabilidade a serem alcançadas e como foi concebido originalmente para tratar de indicadores ambientais, nem sempre é adaptável para indicadores de desenvolvimento sustentável (IDS) onde a complexidade é maior.

A fim de que se alcance êxito na avaliação é importante à definição clara dos objetivos que devem ser alcançados pelo programa e

pelos indicadores propostos. Também se deve prezar pela qualidade do indicador, sendo que esta depende das propriedades dos componentes utilizados em sua formulação e da precisão dos sistemas de informação empregados. O grau de excelência de um indicador deve ser definido por sua validade, ou seja, sua capacidade de medir o que se pretende, por sua confiabilidade, capacidade de reproduzir os mesmos resultados quando aplicado em condições similares. Em geral, a validade de um indicador é determinada pelas características de sensibilidade, capacidade de medir as alterações do fenômeno e especificidade, capacidade de medir somente o fenômeno analisado (SALDANHA, 2007).

Em função das simplificações que são efetuadas na aplicação dos indicadores, sempre há alguma controvérsia técnica/científica. As eventuais perdas de informação têm constituído um entrave à adoção de forma generalizada e consensual dos sistemas de indicadores. Na Tabela 1 é apresentada uma síntese de algumas das principais vantagens e limitações da aplicação destes métodos.

Tabela 1. Síntese de algumas vantagens e limitações da aplicação de indicadores de desenvolvimento sustentável.

Vantagens	Limitações
-Avaliação dos níveis de desenvolvimento sustentável.	-Inexistência de informação base;
-Capacidade de sintetizar a informação de carácter técnico/científico;	-Dificuldades na definição de expressões matemáticas que melhor traduzam os parâmetros seleccionados;
-Identificação das variáveis-chave do sistema;	-Perda de informação nos processos de agregação dos dados;
-Facilidade de transmitir a informação;	-Diferentes critérios na definição dos limites de variação do índice em relação às imposições estabelecidas;
-Bom instrumento de apoio à decisão e aos processos de gestão ambiental;	-Ausência de critérios robustos para seleção de alguns indicadores;
-Sublinhar a existência de tendências;	-Dificuldades na aplicação em determinadas áreas como o ordenamento do território e a paisagem.
-Possibilidade de comparação com padrões e/ou metas pré-definidas.	

Fonte: DGA, 2000

Na Tabela 2 apresenta-se uma síntese das principais potencialidades e fragilidades do modelo PER.

Tabela 2. Síntese de algumas potencialidades e fragilidades do modelo PER

Modelo Pressão-Estado-Resposta (PER)	
Potencialidades	Fragilidades
-Evidencia os elos entre a atividade humana e o ambiente.	-Pressões sobre o ambiente são reduzidas àquelas causadas pela ação do homem.
-Visão conjunta dos vários componentes de um problema ambiental.	-Existência de uma relação de causalidade linear, a qual simplifica excessivamente uma situação complexa.
	-Não estabelece metas de sustentabilidade a serem alcançadas.

Fonte: Elaborada pelos autores

### 2.1.2 A função dos indicadores na avaliação da sustentabilidade ambiental

Os indicadores exercem uma função fundamental na geração de dados para a avaliação de sustentabilidade, indicando a direção, a prioridade das mudanças e direcionando um caminho de proposta para contribuir com um desenvolvimento sustentável baseados nos agroecossistemas. Sendo assim, um estudo com indicadores não apenas proporciona a construção de propostas de agroecossistemas mais adequados, através da transformação de dados em relevantes informações, mas também informações para a construção de estratégias políticas e de planejamento para um desenvolvimento sustentável (KEMERICH et al. 2013).

A maioria das propostas de avaliação de sustentabilidade são esforços para integrar indicadores, com o objetivo de visualizar o que está ocorrendo em um determinado sistema.

Aprofundando esta teoria e dando origem ao estudo de agrupamento de indicadores, Freudenberg (2003) classifica e define os indicadores como: a) Individuais - na forma de menu, com indicadores isolados ou um banco de dados estatísticos; b) Temáticos - como indicadores individuais que são agrupados em conjunto considerando

suas características acerca de um específico tema ou área. Este modelo de avaliação requer uma identificação de determinados tipos de indicadores que estão ligados ou relacionados de alguma forma específica; c) Compostos - formados quando os indicadores temáticos são sintetizados em um índice e apresentados como uma média composta simples. Geralmente, esta proposta apresenta os indicadores isoladamente, ao invés de sintetizado em um indicador composto;

Segundo Hammond et al. (1995) o uso de indicadores ajuda a conhecer uma determinada situação, mas também podem indicar uma tendência ou fenômeno não detectado imediatamente. Por outro lado, é conveniente alertar que os indicadores não são soluções para todas as dificuldades que envolvem a sustentabilidade, seja na sua avaliação ou na sua operacionalização. Para Fernandes (2004), o que deve ficar claro é que os indicadores cumprem com sua função, ou seja, simplesmente indicam os caminhos para avaliação, a discussão e a percepção da sustentabilidade.

### **2.1.3 A complexidade dos indicadores de sustentabilidade ambiental**

Atualmente, pode-se afirmar que a Conferência Nacional das Nações Unidas para o Desenvolvimento, conhecida como ECO 92, realizada no Rio de Janeiro no ano de 1992, foi decisivo para a construção de elementos essenciais de um marco legal de uma nação que pretende aprimorar as relações entre sociedades e naturezas, e do qual tem emanado um conjunto de políticas públicas (VERONA et al. 2012). Durante dois anos (1997-1999) realizou-se um levantamento e análise de alguns programas desenvolvidos em diferentes organismos e instituições nacionais e internacionais. Esse trabalho desenvolvido por Marzall (1999) teve por objetivo determinar o estado da arte sobre o tema, tentando responder a várias perguntas básicas: o que são indicadores e o que os caracteriza? São realmente válidos, e importantes? O que se entende por sustentabilidade e o que implica e caracteriza essa ideia-conceito? Afinal, o que os indicadores devem medir para avaliar a sustentabilidade? Como as diferentes nações e seus organismos governamentais e não-governamentais estão observando esse assunto e que indicadores são, para eles prioridade? Que ênfase vem sendo dada ao assunto? Que objetivo pretende ser alcançado com o uso de indicadores? Quem é o público-meta? Quais os desafios que os indicadores de sustentabilidade colocam à sociedade, aos governos e/ou à comunidade científica? Os atuais instrumentos de medida são válidos?

Existe conhecimento suficiente sobre a sustentabilidade e sobre a realidade avaliada para a determinação de indicadores? As propostas têm aplicabilidade prática?

Assim, provavelmente, uma das causas principais dessa desregulada relação do ser humano com o meio ambiente, seja o reflexo da falta de regulação do indivíduo consigo mesmo e na interação com os demais, incluindo o meio ambiente. Para discutir a sustentabilidade, é necessário um olhar abrangente, apoiado na multidisciplinaridade e capaz de começar por incluir a relação do ser humano consigo mesmo, com o outro e com seu meio (PAULISTA et al. 2008).

O que é tratado a seguir tenta contemplar respostas a algumas dessas questões. Um indicador é uma ferramenta que permite a obtenção de informações sobre uma dada realidade. (MITCHELL, 1997). Tem como principal característica a de poder sintetizar um conjunto complexo de informações, retendo apenas o significado essencial dos aspectos analisados (HATCHUEL; POQUET, 1992; BOUNI, 1996; MITCHELL, 1997). É visto ainda como uma resposta sintomática às atividades exercidas pelo ser humano dentro de um determinado sistema (DPIE, 1995).

Segundo o documento do DPIE (1995), indicadores são medidas da condição, processos, reação ou comportamento que fornecem confiável resumo de sistemas complexos. Se forem conhecidas as relações entre os indicadores e o padrão de respostas dos sistemas, pode-se permitir a previsão de futuras condições. As medidas devem evidenciar modificações que ocorrem em uma dada realidade (BROWN JÚNIOR, 1997), principalmente aquelas mudanças determinadas pela ação antrópica (MARZALL, 1999). Benbrook e Groth III (1996) afirmam que muitos aspectos (matéria orgânica, qualidade da água, qualidade do solo etc.) podem ser medidos de diferentes formas.

Um indicador é apenas uma medida, não um instrumento de previsão ou uma medida estatística definitiva, tampouco uma evidência de causalidade; ele apenas permite constatar uma dada situação. As possíveis causas, consequências ou previsões que podem ser feitas são um exercício de abstração do observador, de acordo com sua bagagem de conhecimento e sua visão de mundo (MARZALL, 1999). Paulista et al. (2008) dizem que também é de relevante importância para a construção dos indicadores a abordagem científica, na qual se estabelecem as proposições teórico-metodológicas do desenvolvimento sustentável.

O que caracteriza os indicadores de sustentabilidade? Um indicador deve inicialmente referir-se aos elementos relativos à sustentabilidade de um sistema (CAMINO; MÜLLER, 1993). Isso significa também que é fundamental que haja uma clara definição do que a organização, instituição de pesquisa, grupo ou indivíduo entende por sustentabilidade. A visão clara do objetivo (sustentabilidade) é que irá estabelecer o processo de interpretação dos resultados obtidos com a leitura do indicador.

Um indicador deve fornecer uma resposta imediata às mudanças efetuadas ou ocorridas em um dado sistema (CAMINO; MÜLLER, 1993; SWINDALE, 1994; MITCHEL, 1997), ser de fácil aplicação (custo e tempo adequados e viabilidade para efetuar a medida) (HAMMOND et al. 1995; IISD, 1997), deve permitir um enfoque integrado (CAMINO; MÜLLER, 1993; LIGTHFOOT, 1994; IISD, 1997), relacionando-se com outros indicadores e permitindo analisar essas relações. Além disso, deverá ser dirigido ao usuário, ser útil e significativo para seus propósitos, além de compreensível (LIGTHFOOT, 1994; HAMMOND et al. 1995). Dentro deste aspecto, considera-se de fundamental importância a participação ampla, representativa de todos os segmentos envolvidos, na realidade, sob análise (IISD, 1997).

Um dos aspectos críticos é a metodologia que será adotada tanto para a determinação do indicador quanto para sua leitura e interpretação. Independente da escolha, esta deve ser clara e transparente, não deixando dúvidas sobre quais os princípios que estão na base do processo. Observa-se, porém, que alguns autores (LAL; PIERCE, 1989; FIREBAUGH, 1990; UNITED NATIONS, 1992; REDCLIFT, 1995; TIEZZI; MARCHETTINI, 1995) frisam a necessidade do enfoque sistêmico, pois este permite uma adequação maior à complexidade intrínseca, não apenas à idéia de sustentabilidade, mas a da realidade propriamente dita.

Mas, por que determinar indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas? De maneira geral, a procura por avaliação se justifica em contextos de incertezas (CAMINO; MÜLLER, 1993; BOUNI, 1996), isso porque se está lidando com conhecimentos, ainda não fixados, sobre os mecanismos e lógicas em disputa, o que leva à necessidade de informações, pragmáticas, mas interligadas a teorias e modelos, onde estes existem, para fazer progredir o conhecimento e esclarecer e controlar a ação (GERMES, 1981 *apud* BOUNI, 1996).

Uma avaliação tem por objetivo caracterizar e acompanhar um dado sistema (CLAIN, 1997), dentro de uma realidade conceitual, e dessa forma permitir *(i)* a quantificação de fenômenos complexos (BOUNI, 1996); *(ii)* a simplificação dos mecanismos e lógicas atuantes na área considerada (BOUNI, 1996); *(iii)* a determinação de como as ações humanas estão afetando seu entorno (BENBROOK; MALLINCKODT, 1994); *(iv)* alertar para as situações de risco e conseqüente mobilização dos atores envolvidos (BENBROOK; MALLINCKODT, 1994; BOUNI, 1996); *(v)* prever situações futuras (BENBROOK; MALLINCKODT, 1994); e *(vi)* informar e guiar decisões políticas (BENBROOK; MALLINCKODT, 1994; BOUNI, 1996).

Um aspecto importante é que não existe a possibilidade de determinar a sustentabilidade de um sistema considerando apenas um indicador, ou indicadores que se refiram apenas a um aspecto do sistema. A sustentabilidade é determinada por um conjunto de fatores (econômicos, sociais e ambientais), e todos devem ser contemplados. Dessa forma, ao se avaliar a sustentabilidade se deve usar sempre um conjunto de indicadores (BOUNI, 1996). Quantos indicadores formarão o conjunto? Quais os fatores a serem considerados como prioritários? Esses são aspectos que devem ser determinados pelos princípios de sustentabilidade que estão na base do processo (MARZALL, 1999).

É importante a definição clara dos objetivos que devem ser alcançados pelo programa e pelos indicadores propostos. Objetivos distintos revelam preocupações diferentes, o que leva à consideração de aspectos específicos, característicos a cada situação; o monitoramento de um sistema, que eventualmente exige mudanças imediatas de atitudes, ou a determinação de políticas, quando as decisões são principalmente em longo prazo, não significa maior ou menor importância de um ou outro aspecto (MARZALL; ALMEIDA, 1998).

A definição do público-meta do programa deve ser clara. A aplicabilidade dos indicadores deve ser adequada ao usuário das informações, tanto dos resultados quanto do processo de leitura e interpretação dos indicadores. Pesquisadores que querem monitorar um ambiente para caracterizá-lo ou estudar os efeitos de técnicas distintas, podem precisar de indicadores que forneçam informações mais detalhadas, podendo usar indicadores que eventualmente exigem um processo mais complexo de leitura e análise se comparados com aqueles demandados/utilizados por técnicos ou agricultores, estes necessitando de indicadores de imediata leitura e interpretação (MARZALL, 1999).

Nesse contexto, Martins (2005) diz que os desafios para a construção da sustentabilidade do desenvolvimento, estão colocados para todos, tanto no plano individual como no coletivo das organizações. Esse tema está presente nas agendas internacionais, nos inúmeros eventos, planos, estratégias e programas de milhares de organizações governamentais e não governamentais.

Os indicadores precisam ser os mais específicos possíveis, de modo a se evitar ambigüidades e problemas de validade e confiabilidade, devendo incluir fatores como objetivo ou as metas a serem alcançados, aspectos a ser medido, o período abrangido ou ainda a área física em questão (PASSOS; PIRES, 2008). Além de específicos, devem ser mensuráveis, atingíveis, relevantes e oportunos, conforme afirmam Guijt (1999) e Moura (2002).

Moura (2002) diz que o objetivo geral de um conjunto de indicadores de sustentabilidade, é ser capaz de mostrar se o processo de desenvolvimento de um determinado sistema esta sendo conduzido para a sustentabilidade ou não, de acordo com as metas estabelecidas. Para isso, alguns objetivos específicos que estão, diretamente, ligados ao objetivo geral, podem ser relacionados.

Os indicadores de desempenho ambiental fornecem, ao gestor, a informação necessária sobre uma grande variedade de dados ambientais. Dessa forma, possibilitam aos decisores obter um panorama geral dos problemas de proteção ambiental ainda por resolver (RIBEIRO et al. 2011). Isso é de suma importância para fins de discussão e tomadas de decisões ao longo do processo.

Resumidamente, um bom indicador é aquele em que podemos confiar, é útil e não é caro. Um indicador precisa tratar de um tema relevante, ter base na teoria (validade), ter uma boa cobertura estatística (em termos regionais e de seus componentes, etc.), ser sensível às mudanças do objeto que está sendo mensurado, ser específico para esse objeto, ser de fácil entendimento para o público especializado (inteligibilidade de sua construção) e para o público em geral (comunicação), ser periodicamente atualizável, ser desagregável nas suas partes e ter uma série histórica (CARVALHO; BARCELLOS, 2009).

A metodologia mais empregada é aquela criada pela Organização para a Cooperação Econômica e o Desenvolvimento (OCDE), descrita por Marzall; Almeida (2000). Essa é uma estrutura bem definida, clara quanto ao que se quer, determinando bem as perguntas. A abordagem se dá por três aspectos (Pressão-Estado-Resposta), e permite determinar os

pontos onde se deve ter maior preocupação. A estrutura PSR (*Pressure-State-Response*), proposta por Hammond et al. (1995), ou ainda a proposta pelo Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), segundo Camino; Müller (1993), possuem aspectos consistentes. Mas, ressalta-se, não se enquadra dentro do enfoque sistêmico. A interação da qual fala, na realidade, considera a lógica linear, avaliando o problema (efeito) em função de sua causa, e a partir desta, a busca da solução. São, portanto, os elementos (causa e efeito), não sua interação.

Marzall e Almeida (1998) afirmam que os indicadores propostos devem se enquadrar no conjunto de características determinadas. Outro aspecto que se observa é a falta de aplicabilidade prática de diversos conjuntos de indicadores propostos. Indicadores prontamente visíveis são importantes para que, se necessária uma correção, esta possa ser realizada de forma imediata. Dentro das condições naturais, um pequeno atraso pode ser determinante. Assim alguns autores apresentam alguns métodos mais simples, como Dumanski (1994), que propõe alguns indicadores de fácil visualização, usados e propostos por agricultores que estão acostumados a observar alguns “sinais naturais” em sua realidade e cotidiano. Apesar de não se ter tido acesso aos indicadores propriamente ditos, a proposta do SRISTI (MCCANN, 1995) também vai neste caminho científico.

As observações descritas anteriormente levam em conta que o agricultor necessita de algo com rápida identificação (a existencia ou não de um retorno financeiro, se consegue realizar a colheita ou não, por exemplo). O que pode, então, ser visto de imediato que permite a mudança de atitude por parte dos agricultores em relação a um impacto negativo sobre a sustentabilidade? É importante, por isso, entender os padrões culturais de um dado indivíduo ou grupo social, de forma a entender sua lógica de tomada de decisões, seu valores, e dessa forma, poder contribuir efetivamente para uma mudança que possa ser julgada necessária. E, principalmente, é fundamental a participação efetiva do agricultor desde o primeiro instante, ou seja, desde a observação e avaliação do sistema em questão.

Assim, não é apenas necessário um trabalho interdisciplinar, envolvendo especialistas de diversas áreas, como mencionado anteriormente, mas é também importante considerar o entendimento do agricultor em relação a uma dada questão ou problema, pois em última instância é ele o agente principal das atividades em sua propriedade (MARZALL; ALMEIDA, 2000). Martins (1999) diz que a partir das

dimensões do desenvolvimento podem ser construídas as respectivas alternativas para superar os problemas limitantes. Assim, atingir a sustentabilidade pode ser uma simples questão de adequação tecnológica, ou então algo bastante mais complexo, como poder ser a construção de uma nova ordem social mais justa.

Considera-se ainda que exista uma diferença entre os indicadores desenvolvidos para uma aplicabilidade prática, levando a mudanças nas atitudes gerais e pontuais em relação a um dado sistema, e aqueles indicadores que são úteis para o estudo e melhor entendimento do sistema e de todas suas características. Rohner (1994), com sua *Pigvision*, traz uma proposta nova e bastante interessante, pois propõe quebrar com a linearidade do pensamento, procurando através de associações muitas vezes consideradas sem sentido ou sem fundamento, chegar a respostas criativas. Ao se afirmar a necessidade de mudanças para se atingir a sustentabilidade, é necessário, sem dúvida, reposicionar algumas formas de pensar (MARZALL; ALMEIDA, 2000).

De um modo geral, observa-se uma grande ênfase em indicadores ambientais, como afirmam diversos autores, como no caso do WRI (HAMMOND et al. 1995) e de Clain (1997), que alegam que indicadores sociais e econômicos já existem e há uma grande lacuna quanto ao aspecto ambiental, propondo-se a contribuir na construção de uma base de dados com informações sobre o meio natural. Outros, provavelmente pelo entendimento de que a preocupação com a sustentabilidade é essencialmente ambiental, e que os impactos gerados são apenas sobre o meio natural, não considerando as consequências socioculturais (MARZALL; ALMEIDA, 2000).

Os resultados obtidos com a avaliação de sustentabilidade apontam, portanto, para uma série de desafios cuja superação demanda o estabelecimento de um processo cíclico e permanente de melhoria, pautado em atividades de planejamento, execução, controle e análise crítica – atividades básicas da gestão. Em outras palavras, mais importante que o desempenho dos indicadores e a classificação dos agroecossistemas em escalas de sustentabilidade, é o planejamento e a operacionalização da melhoria contínua, sendo fundamental que o elemento da “gestão ambiental” seja incluído na rotina dos atores envolvidos (SOUZA, 2013).

## 2.1.4 O Modelo Pressão-Estado-Resposta (P-E-R)

O Modelo PER - “Pressão – Estado – Resposta” - é o marco ordenador mais utilizado para apresentação de estatísticas e indicadores das áreas ambientais e de desenvolvimento sustentável. Foi desenvolvido pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), que regularmente publica seus indicadores nesse formato.

Um marco ordenador pode ser entendido como uma classificação de indicadores em categorias ou, pode estar muito relacionado a uma concepção teórica, específica ao tema estudado, facilitando desse modo a interpretação dos resultados dos indicadores (SCANDAR NETO, 2004).

No caso do modelo PER, trata-se da primeira aceção dos termos, a de classificação de indicadores. Além de marcos ordenador, pode-se trabalhar com a categoria de marcos referencial. Essa última expressaria uma determinada visão dos componentes e inter-relações entre sociedade e natureza (MARTINEZ, 2001). Existiriam quatro tipos de marcos referenciais sobre meio ambiente e desenvolvimento sustentável: marcos simples de componentes ambientais; marco de desenvolvimento sustentável; marco do capital natural (sustentabilidade fraca ou forte) e marcos sistêmico da relação natureza-sociedade. O modelo PER estaria inserido no primeiro marco referencial, que é o mais utilizado na América Latina e que tem como referência a Divisão de Estatísticas das Nações Unidas. Nesse marco o meio ambiente está constituído por uma série de componentes que podem ser organizados e distinguidos segundo critérios distintos (MARTINEZ, 2001).

No modelo PER, as estatísticas e indicadores relativos a cada tema são divididos em três categorias, conforme afirma Kemerich et al. (2013):

- **PRESSÃO:** Apresentam as pressões que as atividades humanas exercem sobre o meio ambiente. Ex: emissões de poluentes provenientes de fábricas e veículos automotores;
- **ESTADO:** Expressam as condições do meio ambiente tanto em termos quantitativos quanto qualitativos. O objetivo final da política é melhorar esses indicadores. Ex.: índices qualidade do ar;
- **RESPOSTA:** Mostram a reação da sociedade às mudanças das condições ambientais. São as medidas tomadas para diminuir ou anular as pressões ambientais para com isso, melhorar o estado do meio

ambiente. Ex.: fiscalização e controle de emissões de poluentes provenientes de fábricas e veículos automotores, que pode ser mensurado na forma de número de multas, vistorias, autuações, licenças emitidas, alteração na legislação ambiental, reformulação dos órgãos fiscalizadores etc.

Em síntese o modelo PER, baseia-se na ideia de que, as atividades humanas exercem pressões sobre o meio ambiente e afetam a sua qualidade e a quantidade de recursos naturais (estado); a sociedade responde a estas mudanças, adotando políticas ambientais, econômicas e setoriais, tomando consciência das mudanças ocorridas e a elas adaptando o seu comportamento (resposta da sociedade). Este modelo apresenta a vantagem de evidenciar estes elos e, ajudar os tomadores de decisão e o público a perceber a interdependência entre as questões ambientais e as outras (sem, todavia, esquecer que existem relações mais complexas nos ecossistemas e nas interações meio ambiente-sociedade, como descreve Kemerich et al. (2013).

A grande vantagem do modelo PER e suas variantes é apresentar uma visão conjunta dos vários componentes de um problema ambiental, o que facilita o diagnóstico do problema e a elaboração da respectiva política pública, pois vai além da mera constatação da degradação ambiental e revela seu impacto, suas causas, o que está por trás dessas causas e as ações que estão sendo tomadas para melhorar esse quadro.

Segundo Miranda et al. (2006), o modelo Pressão-Estado-Resposta permite uma visão interdisciplinar do fenômeno. Ramos; Sanches (2000) apresentam um levantamento exaustivo de sistemas de indicadores de desempenho ambiental, identificando os respectivos quadros conceituais e os seus objetivos, e conclui que, apesar da grande variedade de sistemas, muitos seguem as mesmas abordagens, sendo na sua maioria adaptações do Modelo Pressão – Estado – Resposta.

### **2.1.5 Metodologia Pressão-Estado-Resposta em processos de análise ambiental**

Os indicadores de sustentabilidade são ferramentas utilizadas para auxiliar no monitoramento da operacionalização do desenvolvimento sustentável, sendo a sua principal função fornecer informações sobre o estado das diversas dimensões (ambientais, econômicas, socioeconômicas, culturais, institucionais, etc.) que compõem o desenvolvimento sustentável do sistema na sociedade (CARVALHO; BARCELLOS; MOREIRA, 2007).

A utilização de indicadores tem por objetivo reunir e quantificar informações de um modo que sua importância se destaque, simplificando informações sobre fenômenos complexos tentando melhorar com isso o processo de comunicação (VAN BELLEN, 2006). Os indicadores também têm sido utilizados como ferramenta padrão, auxiliando na compreensão das informações sobre fenômenos complexos, em diversos estudos nacionais e internacionais, pois permite verificar os impactos das ações humanas no ecossistema (SILVA; CORREIA; CÂNDIDO, 2010).

Uma das grandes aplicações dos indicadores encontra-se na necessidade de monitoramento do progresso nas distintas dimensões, pois eles funcionam como ferramentas de apoio aos tomadores de decisões e àqueles responsáveis pela elaboração de políticas em todos os níveis, além de serem norteadores para que se mantenha o foco em direção ao desenvolvimento sustentável (GARCIA; GUERRERO, 2006). Servindo também como uma ferramenta para medir e avaliar as consequências das atividades antrópicas no sistema biológico (DANZ et al, 2005) bem como para permitir que as pessoas ajam sobre questões do meio ambiente (EEA, 1999).

Através da utilização de indicadores ambientais deve ser possível a análise das condições, mudanças da qualidade ambiental, além de favorecer o entendimento das interfaces da sustentabilidade, bem como de tendências, como uma ferramenta de suporte no processo de tomada de decisão e formulação de políticas e práticas sustentáveis (GOMES; MALHEIROS, 2012), pois os indicadores têm como função diagnosticar a saúde do ecossistema e fornecer uma ferramenta para monitorar condições e mudanças ambientais ao longo do tempo (JORGENSEN, 2005).

ANZECC (2000) e Fairweather (1998) apresentam uma série de indicadores relacionados a estudos de bacias hidrográficas tanto no que diz respeito à questão social como ambiental, destacam-se a mensuração de áreas, com vegetação remanescente natural e áreas recuperadas, podem ser realizadas com auxílio de fotos aéreas, imagens de satélite, cujo objetivo é caracterizar o uso e ocupação do solo.

Outro dado a ser estudado é a razão entre população atendida pela rede de abastecimento de água e a população total (%), este indicador foi proposto, dentre as experiências identificadas nesta pesquisa, por Domingues (2000) e Pompermayer (2003). Este indicador tem por objetivo demonstrar o nível de atendimento dos serviços essenciais de saneamento, considerados como direito de todos pelo princípio da

universalização do acesso, com objetivo de garantir condições de vida e de saúde pública adequada.

Dados a respeito da morbidade devido a doenças de veiculação hídrica também são utilizados como indicadores em bacias hidrográficas destacando-se as experiências de Domingues (2000) e FBC (2000).

Os problemas decorrentes da ausência ou insuficiência no atendimento à população pelos serviços de saneamento, como abastecimento de água, esgotamento sanitário, coleta de resíduos sólidos, e destinação adequada das águas pluviais, podem ocasionar danos à saúde humana, são as chamadas doenças de veiculação hídrica. O indicador proposto para mensurar a ocorrência deste problema foi à morbidade devido às doenças previamente citadas. A morbidade é definida como a taxa de portadores de determinada doença em relação ao número de habitantes em boas condições de saúde.

Têm-se também o uso de indicadores mais ligados à gestão de recursos hídricos via Comitê de Gerenciamento de Recursos Hídricos, onde são levantados dados como: avaliar a participação da sociedade civil no processo de tomada de decisão no âmbito da gestão dos recursos hídricos; razão entre metas previstas no Plano de Bacia e metas efetivamente atingidas (%); número de entidades civis registradas no comitê, sendo que este indicador é obtido de forma simples e direta por meio do levantamento junto ao Comitê de bacia das entidades civis registradas e a evolução deste parâmetro ao longo do tempo. A mensuração deste indicador tem por objetivo avaliar a participação da sociedade civil no processo de tomada de decisão no âmbito da gestão dos recursos hídricos. Razão entre metas previstas no Plano de Bacia e metas efetivamente atingidas (%). Este indicador propõe a avaliação contínua do Plano de Bacia com o objetivo de possibilitar a revisão das metas e ações propostas de acordo com as novas demandas, bem como analisar se as ações e programas previstos no Plano estão sendo compreendidos no CBH.

Um dos atributos principais do Comitê é arbitrar sobre eventuais conflitos existentes devido aos usos múltiplos dos recursos hídricos. Desta forma, a avaliação do gerenciamento dos recursos hídricos deve contemplar a existência de conflitos, a procedência destes e como o comitê de bacia reage e atua sobre os conflitos. Este indicador pode ser trabalhado através do levantamento do número de conflitos que chegam ao comitê de bacia. A solução de conflitos é monitorada por Fairweather (1998), demonstrando o potencial de aplicação dos indicadores na gestão de recursos hídricos.

Cabe salientar que as informações necessárias para avaliar a existência de conflitos e qual sua procedência ainda não são suficientes para consolidar um indicador contemplando estes dados, contudo propõe-se que os conflitos que chegam até o comitê de bacia sejam registrados e quantificados. Este indicador tem por objetivo conhecer a evolução do número de conflitos e pode conter ainda informações como, local de ocorrência, impactos ocasionados e existência ou não de solução. A partir destas informações é possível mapear os locais de ocorrência de conflitos e buscar detalhamento para a solução destes de forma sistematizada.

## 2.2 ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA DE ÁGUA

A infiltração da água no solo é um processo importante da fase terrestre do ciclo hidrológico, uma vez que determina quanto de água da chuva penetra no solo e quanto esco superficialmente. As atividades de uso da terra exercem significativa influência sobre a infiltração, e o homem pode, assim, modificar a capacidade de infiltração dos solos através do manejo. A meta maior de um programa de manejo integrado de microbacias hidrográficas deve ser a manutenção das condições ótimas da infiltração (LIMA, 2007).

Esse mesmo autor afirma que o processo de infiltração define a entrada de água no solo. Já o movimento da água dentro do perfil é comumente referido como percolação. A infiltração é desta forma, um processo de superfície, ao passo que a percolação é um processo interno.

Alguns atributos físicos do solo podem ser alterados pelas práticas de manejo e, dessa maneira a taxa de infiltração de água no solo modifica-se, permitindo, em alguns casos, o aumento do escoamento superficial e a aceleração das perdas de solo e de água, alterando o equilíbrio hidrológico natural do sistema. Os valores da taxa de infiltração estável são imprescindíveis aos modelos utilizados na descrição de infiltração de água no solo, e também ao planejamento e ao manejo dos sistemas de irrigação, drenagem e conservação de solo e de água (PANACHUKI, 2003).

O conceito de infiltração no ciclo hidrológico foi introduzido por Horton (1933). Este autor definiu "capacidade de infiltração" ( $f_c$ ) como sendo a taxa máxima com que um dado solo, em determinadas condições, pode absorver água. Quando a intensidade da chuva for inferior ao valor de  $f_c$ , então a infiltração ocorre a uma taxa menor, referida como "taxa real de infiltração", ou simplesmente infiltração ( $f$ ).

Segundo este conceito Hortoniano, toda vez que a intensidade da chuva for maior que a capacidade de infiltração ( $f_c$ ), ocorre escoamento superficial. Por outro lado, quando a intensidade da chuva for menor que o valor de  $f_c$ , toda a água se infiltra ( $f$ ) e não ocorre escoamento superficial (ZAKIA, 1998).

O processo de infiltração de água no solo pode ser influenciado por diversas características do meio ou ainda por ações antrópicas exercidas sobre o solo. Dentre as principais destaca-se a superlotação animal, o tráfego intenso de maquinários agrícola ou ainda precário técnicas de manejo do solo.

Lima (2008) diz que em resumo, as características do meio permeável (o meio poroso onde ocorre a infiltração) são governadas pelo tipo de solo, sua textura e estrutura, a quantidade e o tipo de argila que este contém a espessura e a profundidade de suas camadas mais permeáveis e o uso a que foi submetido no passado.

De acordo com as diferenças encontradas no que diz respeito à infiltração, os solos podem ser classificados em quatro grupos principais (USDA, 1972; LIMA, 2008):

"A" - SOLOS COM ALTA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO (ou baixo potencial de Runoff): Quando totalmente molhados, consistindo de camadas de areias e cascalhos profundos, de drenagem boa a excessiva. Tais solos apresentam alta taxa de transmissão de água.

"B" - SOLOS COM CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO MODERADA: Quando totalmente molhados, consistindo de solos de profundidade moderada a alta, drenagem moderada a alta, textura moderadamente fina a moderadamente grosseira. Tais solos apresentam taxas moderadas de transmissão de água.

"C" - SOLOS COM BAIXA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO: Quando totalmente molhados, consistindo de solos contendo camadas impermeáveis que impedem o movimento descendente da água, ou solos de textura moderadamente fina a fina. Tais solos apresentam baixas taxas de transmissão de água no perfil.

"D" - SOLOS COM CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO MUITO BAIXA (alto potencial de Runoff): Quando totalmente molhados, consistindo de solos argilosos com alto potencial de intumescimento, ou com lençol freático permanentemente superficial, ou com camada de impedimento superficial, ou solos rasos assentados sobre estrato impermeável. Tais solos apresentam taxa de transmissão de água muito baixa.

Dessa maneira, pode-se dizer que o conhecimento referente ao comportamento do solo quanto à infiltração de água e as perdas de solo e de água em cada sistema de exploração agrícola é de grande importância, pois permite que sejam estabelecidas comparações em relação aos aspectos qualitativos e quantitativos entre os sistemas em uso, possibilitando a escolha daquele que melhor se adapta às condições específicas de cada região (PANACHUKI, 2003).

## 2.3 VULNERABILIDADE AMBIENTAL E ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA DE ÁGUA

### 2.3.1 A bacia hidrográfica como unidade básica para estudos ambientais

Uma bacia hidrográfica compreende essencialmente um rio principal e seus afluentes delimitados por um divisor de águas, mas dentro desta bacia existem inúmeros fatores que exercem ações positivas e negativas, que influenciam diretamente na qualidade do seu meio ambiente. A gestão ambiental é um processo de articulação das ações dos diferentes agentes sociais que interagem em um dado espaço com vistas a garantir a adequação dos meios de exploração dos recursos ambientais – naturais, econômicos e sócio-culturais – às especificações do meio ambiente com base em princípios e diretrizes previamente acordados e definidos (LANNA, 2000).

A bacia hidrográfica é uma área topograficamente definida pela drenagem de um canal fluvial ou por um sistema de canais fluviais conectados, de tal forma que toda água drenada nesse espaço tenha uma única saída. Cada bacia hidrográfica pode ser subdividida em bacias menores, o que significa dizer que uma bacia hidrográfica é formada por um conjunto de pequenas bacias Rosa et al. (2004). De acordo com Tucci (1997), bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório.

Pode-se considerar que a bacia hidrográfica é a área que drena as águas de chuvas por ravinhas, canais e tributários para um curso principal, com vazão efluente convergindo para uma única saída e desaguando diretamente no mar ou em um grande lago. As sub-bacias hidrográficas deságuam diretamente em outro rio. A micro-bacia hidrográfica é definida como a área de formação natural, drenada por

um curso d'água e seus afluentes. Em termos gerais, a micro-bacia é uma sub-bacia hidrográfica de área reduzida (ROCHA, 1997).

As bacias hidrográficas possuem em sua rede de drenagem uma hierarquização, sendo que a água sofre escoamento do ponto mais alto para o mais baixo. A drenagem significa o traçado produzido pelas águas fluviais modelando a topografia (GUERRA et al. 2003). Contudo, Christofolletti (1980) afirma que a drenagem fluvial é composta por um conjunto de canais de escoamento interrelacionados que formam a bacia de drenagem, sendo definida como a área drenada por um rio ou sistema fluvial.

A LEI Nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, que cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, prevê no seu Artigo 1º, que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

A LEI Nº 10.350/1994 institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos e estabelece, para os rios do estado, a formação de um comitê de gerenciamento, o Comitê de Bacia. Segundo a SEMA (2008), o estado do Rio Grande do Sul, de acordo com a referida lei, foi dividido em Regiões Hidrográficas, que foram subdivididas em bacias hidrográficas, totalizando, até o presente momento, 23 unidades. Para cada uma destas está previsto a formação de um comitê para a gestão integrada dos seus recursos hídricos.

As bacias hidrográficas compreendem áreas geográficas que drenam suas águas para determinados recursos hídricos (MOTA, 1995). Devem compreender espaços de desenvolvimento econômico e preservação ambiental, integrando uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nelas desenvolvidas (GUERRA; CUNHA, 1996), fazendo-se necessário um planejamento sustentável de sua utilização.

A avaliação ambiental de uma região permite a identificação de suas potencialidades de uso (ou não uso), de ocupação, de vulnerabilidade, da dinâmica e da complexidade do ecossistema, levando à realização de ações que possibilitem sua preservação e conservação (MACEDO, 1995).

A tomada de consciência, por parte da sociedade, no que diz respeito à utilização dos recursos hídricos, impulsionou o desenvolvimento de estudos e criações de leis para a regulamentação de seu uso. A utilização e a ocupação de bacias hidrográficas têm

despertado maior interesse, pois a partir destas é possível avaliar de forma integrada as ações antrópicas sobre o meio ambiente e suas consequências sobre o equilíbrio ecológico, considerando que a qualidade da água de um manancial está intimamente ligada ao seu uso.

Segundo Botelho e Silva (2004), cresceu enormemente o valor da bacia hidrográfica como uma unidade de análise e planejamento ambiental e estudos de erosão, manejo e conservação do solo, água e planejamento ambiental, são aqueles que mais têm utilizado a bacia hidrográfica como unidade de análise. Uma importante ferramenta para auxiliar nas definições dos usos de uma bacia é o zoneamento ambiental, que é de fundamental importância, pois atua no sentido de direcionar propostas em função das características naturais de cada área da bacia. Contribui para o gerenciamento dos recursos hídricos, que se torna cada vez mais necessário em virtude da multiplicidade dos usos da água decorrente do processo de industrialização, de urbanização e de agricultura intensiva.

### **2.3.2 Geologia, Clima e Vegetação**

Na realização do diagnóstico físico da área de uma bacia hidrográfica, é fundamental o levantamento detalhado dos parâmetros como: relevo, geologia, rede de drenagem, solos, clima e vegetação (BELTRAME, 1994).

O estudo geológico dos terrenos da bacia tem por objetivo principal classificá-los quanto à maior ou menor permeabilidade, característica esta que intervém fundamentalmente na rapidez e no volume das enchentes e na parcela levada às vazões de estiagens pelos lençóis subterrâneos; em certos terrenos, entretanto, o estudo deve ser aprofundado principalmente quanto à localização de lençóis aquíferos, o escoamento subterrâneo e a origem das fontes. Ainda, a cobertura vegetal, especialmente as florestas e campos cultivados, soma sua influência à dos fatores geológicos para condicionar a rapidez do escoamento superficial, as taxas de evaporação e a capacidade de retenção (PAIVA; PAIVA, 2001).

A ação do homem no planejamento e desenvolvimento da ocupação do espaço na terra requer cada vez mais uma visão ampla sobre as necessidades da população, os recursos terrestres e aquáticos disponíveis e o conhecimento sobre o comportamento dos processos naturais na bacia, para racionalmente compatibilizar necessidades crescentes com recursos limitados (TUCCI, 2001).

### 2.3.3 Solos

As rochas, sob a ação de agentes do intemperismo, dão origem ao regolito, material de origem dos solos, que, por sua vez, submetido à ação do clima e organismos, em determinado relevo e durante determinado espaço de tempo, irá se transformar no solo (LEPSCH, 1982).

Entre fatores que influenciam na formação do solo pode-se citar o material de origem, o clima, a atividade biológica dos organismos vivos, a topografia e o tempo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999). O clima é condicionado principalmente pela ação da água da chuva e temperatura. O material de origem pela circulação interna da água, composição e conteúdo mineral. A atividade biológica interfere no microclima, formando elementos orgânicos e minerais, e modificando as características físicas e químicas. A topografia interfere na dinâmica da água, no microclima e nos processos de erosão e sedimentação. O tempo dependerá da ação dos fatores anteriores (SALOMÃO; ANTUNES, 1998).

A interação entre estes fatores determinará o seu grau de desenvolvimento e, portanto, sua classificação. Esta é feita através da caracterização de peculiaridades da formação, ocorrência, constituição física e química e da sua capacidade de uso (PAIXÃO et al. 2004).

Ao longo do seu perfil vertical, o solo pode ser dividido em camadas de espessura variável ou horizontes. Atualmente, para nomear os horizontes vêm sendo utilizadas letras maiúsculas, números arábicos e letras minúsculas. As letras maiúsculas (O, H, A, B, C) designam a presença dos horizontes principais do solo. Os números arábicos (1, 2, 3) indicam a subdivisão dos horizontes. As letras minúsculas (w, t, j, k, h, etc.) indicam os subhorizontes ou a presença de características relevantes como seqüência da significativa ação de determinado processo (MATA, 2005).

O horizonte O corresponde à camada superficial de cobertura, de constituição orgânica, sobreposto a alguns solos minerais, podendo estar ocasionalmente saturado com água. O material orgânico pode estar pouco ou nada decomposto, dependendo das condições de drenagem (LEMO; SANTOS, 1996).

O horizonte H ou camada de constituição orgânica, superficial ou não, composto por resíduos acumulados ou em acumulação sob condições de prolongada estagnação de água, salvo se artificialmente

drenado, consiste em camadas de matéria orgânica em vários estágios de decomposição, podem incluir material pouco ou não decomposto correspondendo à manta morta e material (LEMOS; SANTOS, 1996).

A camada superficial do solo denominada horizonte A, em geral, tem um alto teor de matéria orgânica e é de coloração mais escura. A matéria orgânica encontra-se associada aos constituintes minerais. A camada subsequente, normalmente o horizonte B, contém mais argila e é bastante diferente na coloração, em geral bem mais clara que a superficial. Abaixo desta vem o horizonte C, constituído do material original, e o horizonte R, que é a rocha. (SANTOS et al. 2003).

No que diz respeito às propriedades físicas do solo, eles são constituídos por uma mistura de partículas sólidas de natureza mineral e orgânica, ar e água, formando um sistema trifásico, sólido, gasoso e líquido. Considerando o solo como um corpo natural organizado, portanto ocupando dado espaço, a recíproca da matriz do solo forma a porosidade dos solos. Outro fator que interfere diretamente na porosidade dos solos refere-se à maneira com que as partículas sólidas se arranjam na formação dos solos.

Das propriedades físicas mais importantes, aparece à textura do solo, que é definida pela distribuição de tamanho de partículas, e a estrutura do solo, definida pelo arranjo das partículas em agregados. A porosidade do solo, por sua vez, é responsável por um conjunto de fenômenos que desenvolvem uma série de mecanismos de importância na física de solos, tais como retenção e fluxo de água e ar, e, se analisada conjuntamente com a matriz do solo, gera um grupo de outras propriedades físicas do solo associadas às relações de massa e volume das fases do sistema solo. Não menos importantes são as propriedades associadas à reação mecânica do solo à aplicação de forças externas.

A física de solos estuda e define qualitativa e quantitativamente as propriedades físicas, bem como suas determinações e controle, com a finalidade principal de entender os mecanismos que governam a funcionalidade dos solos e seu papel na biosfera. A importância prática de se entender o comportamento físico do solo está associada ao seu uso e manejo apropriado, ou seja, orientar irrigação, drenagem, prepara e conservação de solo e água.

Em função do manejo a que está submetido, o solo tanto é passível de degradação quanto ao de melhoramento em seu potencial produtivo. Quando ocorre a degradação da estrutura do solo, tem-se como efeito imediato o aumento da densidade, redução da macroporosidade e armazenamento de água ao longo do perfil,

caracterizando a compactação desse solo (STONE; MOREIRA, 2000; ALVES, 2001).

A relação entre a massa e o volume do solo também pode ser alta devido a uma condição genética do solo, isto é, pela presença de horizontes ou níveis subjacentes endurecidos por processos geológicos e edafogenéticos naturais (PAZ GONZÁLEZ; NEIRA SEIJO; RUEDA, 1997).

Nessas condições de modificação da relação massa/volume do solo, quer seja natural ou antropogênica, ocorre redução da infiltração de água no perfil do solo e no comportamento da sua redistribuição e retenção, em virtude das alterações da porosidade do solo, principalmente em relação à distribuição de tamanho de poros (ALVES, 2001).

Várias são as maneiras pelas quais a qualidade física do solo pode se manifestar; são exemplos de má qualidade física dos solos a baixa capacidade de infiltração de água, o escoamento superficial, a baixa aeração, o sistema radicular reduzido e a dificuldade de mecanização. A condição física é considerada boa quando os solos exibem condição oposta ou ausência dos problemas já mencionados; frequentemente, um solo apresenta todos esses problemas físicos simultaneamente; o que é importante frisar é que todos esses sintomas têm uma causa em comum - a estrutura do solo degradada (DEXTER, 2004). A degradação da estrutura do solo pode comprometer o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, a produção agrícola (RICHART et al. 2005).

Em vista, a água ocupa os espaços porosos do arranjo físico das partículas da fase sólida competindo e, freqüentemente, concorrendo com a fase gasosa do solo. Da água que chega ao solo, uma parte é armazenada; a água do solo é altamente dinâmica, exibindo variação no tempo e no espaço, sobretudo perto da superfície do solo, devido à evaporação e atividade das raízes das plantas. Mudanças no conteúdo de água do solo e no seu estado de energia afetam muito as suas propriedades mecânicas, incluindo resistência, compactabilidade e penetrabilidade, podendo causar mudanças na densidade de solos expansivos (OR; WRAITH, 2000).

A retenção de água é primariamente dependente da distribuição de tamanho de partículas do solo, estrutura, mineralogia e matéria orgânica; numa segunda consideração, o uso e o manejo do solo podem afetar a retenção e o conteúdo de água no solo. O melhor aproveitamento da água capilar pode tornar-se fundamental para o incremento de produção e das condições do solo, pois, à medida que é

submetido a muitos ciclos de umedecimento e secagem, o solo pode ter suas propriedades físicas prejudicadas como, por exemplo, um aumento na densidade do solo (FASSBENDER, 1982).

Um solo é considerado fisicamente ideal para o crescimento de plantas quando apresenta boa retenção de água, bom arejamento, bom suprimento de calor e pouca resistência ao crescimento radicular. Paralelamente, boa estabilidade dos agregados e boa infiltração de água no solo são condições físicas importantes para qualidade ambiental dos ecossistemas.

### **2.3.4 Características físicas do solo que influenciam na infiltração e na vulnerabilidade**

#### 2.3.4.1 Textura do solo

A proporção relativa das frações granulométricas de tamanho inferior a 2 mm (frações areia, silte e argila) que compõem a massa do solo é definida como textura do solo (LEMOS; SANTOS, 1996). A análise granulométrica permite classificar os componentes sólidos em classes de acordo com seu diâmetro, sendo a parte sólida do solo constituída por material inorgânico e orgânico. Em certos solos, o material inorgânico sólido é constituído por partículas grosseiras, dando-lhes aspecto cascalhento ou arenoso. Em outros, predominam as frações coloidais, dando ao solo características argilosas.

No material que constitui a porção mineral do solo podem ser encontrados desde fragmentos de rochas até partículas com dimensões extremamente reduzidas. Solos argilosos e solos arenosos diferem distintamente em suas propriedades e características. Os primeiros apresentam em diferentes graus, certa dureza quando secos e plásticos e pegajosos quando molhados, assim como retém mais água que os arenosos. Por sua vez, os solos arenosos, além de geralmente não apresentarem características de dureza, plasticidade e viscosidade, secam mais rapidamente que os argilosos. De uma maneira geral, os solos argilosos têm maior capacidade de retenção de água e nutrientes que os arenosos. (LIMA; LIMA, 2000). Partículas de argila são caracterizadas por tamanhos extremamente pequenos, grande área externa por unidade de peso e pela presença de cargas em sua superfície; por isso atraem nutrientes e água (BRADY, 1989).

A textura por ser uma propriedade praticamente inalterável, com o uso e manejo do solo pode ser empregada como propriedade

diferencial na identificação dos horizontes diagnósticos subsuperficiais B textural e B plânico, horizontes que além de outras propriedades são identificados por apresentarem gradiente textural elevado (EMBRAPA, 1999).

#### 2.3.4.2 Porosidade do solo

Os poros do solo são representados por cavidades de diferentes tamanhos e formas, determinados pelo arranjo das partículas sólidas (HILLEL, 1980; MARQUES, 2000), e constituem a fração volumétrica do solo ocupada com ar e a solução de água e nutrientes. Os poros do solo correspondem, portanto, ao espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo (HILLEL, 1980).

A porosidade do solo interfere na aeração, condução e retenção de água, resistência à penetração e à ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis (TOGNON, 1991).

A variação composicional em função da porosidade do solo ocorre em função de vários fatores, tais como superfície específica, atividade da fração sólida (argila > silte > areia), grau de intemperismo dos minerais, matéria orgânica em suspensão na água gravitacional, diferença entre a taxa rápida de liberação e retenção das espécies químicas (absorção, adsorção e atividade microbiana) e os processos mais lentos de difusão e de convecção entre os micro e macroporos, resultando num gradiente de concentração. A soma dos fenômenos deveria resultar numa distribuição complexa e altamente variável dos íons na porosidade do solo (GLOAGUEN et al. 2009).

Pela dinâmica da água no solo, Klein (2008) e Vomocil (1965) afirmam que, para diversas finalidades como o movimento e armazenamento de água e gases, fluxo e retenção de calor e desenvolvimento do sistema radicular, a determinação somente da porosidade total (macro e microporosidade) fornece informações de importância limitada. Deste modo, a determinação da distribuição dos poros na matriz do solo apresenta-se mais importante, visto que, de acordo com a distribuição dos diferentes tamanhos dos poros, pode haver restrição do fluxo de água no solo.

### 2.3.4.3 Condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ )

Os processos de infiltração de água no solo, projetos de irrigação e drenagem, as perdas de solo por erosão e de substâncias químicas por lixiviação são geralmente relacionados ao fluxo de água nos solos, o qual influencia toda a utilização dos recursos solo e água. (MESQUITA; MORAES, 2004).

Dentre as variáveis que influenciam esse fluxo, a condutividade hidráulica do solo se destaca por ser um parâmetro que representa a facilidade com que o solo transmite água. O valor máximo de condutividade hidráulica é quando o solo se encontra saturado, e é denominado condutividade hidráulica saturada (REICHARDT, 1990). A partir da condutividade hidráulica e utilizando modelos matemáticos pode-se determinar a condutividade hidráulica do solo e assim obter informações sobre o movimento de água e solutos nos solos.

A condutividade hidráulica é uma das propriedades físicas do solo mais importantes na determinação quantitativa e qualitativa do movimento de água no solo e no dimensionamento de sistemas de drenagem (FEITOZA, 2006). A sua determinação pode ser feita utilizando-se método de laboratório e campo. Para a sua determinação existe uma grande variedade de métodos, com diferentes níveis de precisão; alguns aplicáveis apenas em determinadas condições ou com certos objetivos, os quais, de modo geral, podem ser agrupados em métodos indiretos ou diretos. Os métodos indiretos relacionam a condutividade hidráulica com propriedades do solo (distribuição do tamanho dos poros, textura, porosidade drenável, densidade do solo, etc). Nos métodos diretos, a  $K_{sat}$  pode ser determinada em condições de laboratório e campo.

Conforme a literatura (GARDNER, 1986; LIBARDI, 2000), os permeâmetros de carga constante, aparelhos utilizados para determinação da condutividade hidráulica do solo saturada ( $K_{sat}$ ), são recomendados para solos que apresentam alta  $K_{sat}$ , enquanto que os de carga decrescente são descritos como adequados para solos com baixa  $K_{sat}$ .

Como pode ser observado nos trabalhos de Silva e Katto (1997) e Ankeny et al. (1990), estes autores, trabalhando com diferentes sistemas de cultivo, constataram que esses sistemas alteram a porosidade e as propriedades hidráulicas dos solos cultivados. Variações na velocidade de infiltração estão relacionadas com atributos tais como densidade do solo, macro e microporosidade e condutividade hidráulica com o qual,

segundo Freire (1979), é um parâmetro importante no manejo da água no solo. Trata-se de um processo físico de extrema complexidade, dado que o solo é um meio heterogêneo, com ampla variabilidade espacial, apresentando características que sofrem alterações diferenciadas no tempo e no espaço. Como essa propriedade é específica para cada solo, e devido aos fenômenos da água no solo ser dinâmicos e influenciáveis pelas camadas subjacentes, torna-se necessário identificá-la de forma global, na superfície do solo, para, a partir dessa caracterização, para cada tipo de manejo, compreender o todo.

#### 2.3.4.4 Uso e ocupação do solo

O estudo do uso da terra e ocupação do solo consiste em buscar conhecimento de toda sua utilização por parte do homem ou, quando não utilizado pelo homem, a caracterização dos tipos de categorias de vegetação natural que revestem o solo, como também suas respectivas localizações. De forma sintética, a expressão “uso da terra ou uso do solo” pode ser entendida como sendo a forma pela qual o espaço está sendo ocupado pelo homem (ROSA, 2007). A ocupação do solo interfere diretamente nos recursos hídricos bem como da sua gestão, pois o uso inadequado pode originar processos erosivos, compactação, aumento da salinidade do solo e conseqüentemente o assoareamento de corpos de água e perdas em termos qualitativos e quantitativos.

As bacias hidrográficas são consideradas excelentes unidades de gestão dos elementos naturais e sociais, pois, sobre essa ótica, é possível acompanhar as mudanças introduzidas pelo homem e as respectivas respostas da natureza.

As primeiras classificações de uso da terra baseavam-se em trabalhos de campo. Posteriormente a partir de década de 1950, um grande número de pesquisadores em várias partes do mundo têm se dedicado à identificação detalhada de culturas agrícolas em fotografias aéreas (STEINER, 1970).

Deste modo, existe a necessidade de atualização constante dos registros de uso e ocupação do solo, para que suas tendências possam ser analisadas, com o objetivo de fornecer subsídios às ações do planejamento regional (ROSA, 1990).

Segundo Anderson et al. (2005), o mapeamento da cobertura vegetal e seu monitoramento mostram-se de extrema importância, e existe um esforço por parte da comunidade científica em melhorar a acurácia destes estudos. Estes trabalhos visam observar as mudanças

devido a fatores naturais e antrópicos, buscar uma maior eficiência nas elaborações de planos de manejo de recursos naturais, assim como na análise da paisagem, delimitarem áreas prioritárias para a conservação, ou ainda realizar estudos que envolvem tópicos sobre mudanças globais, modelagens de ciclos biogeoquímicos, estimativas de emissão de carbono dentre outros.

O levantamento e mapeamento do uso e cobertura da terra de uma dada região ou município são importantes para mostrar a distribuição espacial das atividades de exploração e conservação na área (PEREIRA, 1994). Para Pacheco e Ribas (1998), o conhecimento atualizado da distribuição e da área ocupada pela agricultura, vegetação natural, áreas urbanas e edificadas, bem como informações sobre as proporções de suas mudanças, se tornam cada vez mais necessárias aos legisladores e planejadores.

Desse modo, existe a necessidade de atualização constante dos registros de uso da terra, para que suas tendências possam ser analisadas. O conhecimento atualizado das formas de utilização e ocupação do solo, bem como seu uso histórico, tem sido um fator imprescindível ao estudo dos processos que se desenvolvem em determinada região, tornando-se de fundamental importância, na medida em que os efeitos do seu mau uso causam deterioração no meio ambiente (BORGES; PFEIFER; DEMATTÊ, 1993).

Entre os fatores da degradação da paisagem, seja nas áreas rurais, seja nas áreas urbanas, a principal causa, segundo Guerra; Cunha (1996), é o manejo inadequado do solo. O crescente interesse sobre uso e cobertura do solo desperta interesse em toda a sociedade, pois além de monitorar os possíveis impactos ambientais, pode-se acompanhar o desenvolvimento sócio-econômico de um local, tanto em escala municipal, regional e até mesmo global (MONTEBELO et al. 2005).

O conhecimento do uso e cobertura do solo favorece para que medidas que garantam a preservação e manutenção do meio ambiente e a gestão do espaço sejam adequadas à realidade. (SCHLINDWEIN et al. 2007). França e Ferreira (2005) destacam que muitos ciclos ambientais dependem do equilíbrio de florestas como a Amazônia e que sua destruição acarreta em mudanças no clima de forma global, regional e local.

O mapeamento do uso e cobertura do solo é de grande importância, visto que o uso de forma não planejada degrada o meio ambiente. Com este mapeamento facilita-se a detecção de áreas exploradas de forma inadequada e, com sua localização precisa,

promove-se a tomada de decisões pelos órgãos competentes encarregados da fiscalização.

Os processos de erosão intensos, desertificação, inundações, assoreamentos de cursos d'água têm sido exemplos cotidianos de mau uso. De acordo com Linhares et al. (2005), a utilização do solo desempenha um importante papel no ciclo hidrológico, com a vegetação tendo influência direta no processo de erosão, na qualidade da água, na dinâmica de nutrientes, na proteção de mananciais e na produção de água.

Santos (2003) afirma que a bacia hidrográfica é a melhor unidade territorial de investigação, pesquisa e planejamento, devido à possibilidade de observação de fenômenos naturais ou antrópicos que refletem diretamente seus resultados em determinado limite observável da paisagem.

A caracterização, a análise e o monitoramento desses impactos, vêm sendo facilitados por meio de técnicas de geoprocessamento, utilizadas no tratamento de imagens, colaborando ainda com o planejamento e a gestão ambiental. Nesse sentido, Costa e Feitosa (2004) enfatizam que a aplicação de SIG tornou-se uma ferramenta poderosa que, atrelada ao uso de outros softwares de mapeamento, permite não somente maior rigor e precisão nas análises, mas também a atualização periódica dos dados, fatores de grande importância num cenário ambiental de constantes alterações.

O geoprocessamento pode ser definido como um conjunto de tecnologias para coleta, processamento, análise e disponibilização de informação com referência geográfica. Estas são compostas por soluções em hardware, software e peopleware, que, juntos, constituem poderosas ferramentas para tomada de decisão (ROSA et al. 2004).

Dentre as geotecnologias, está o Sensoriamento Remoto por Satélites, sendo este um conjunto de processos e técnicas usado para medir propriedades eletromagnéticas de uma superfície ou de um objeto, sem que haja contato físico entre o objeto e o equipamento sensor. Em outras palavras, é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, por meio da captação do registro da energia refletida ou emitida pela superfície (MOREIRA, 2003).

O geoprocessamento, em especial os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e o Sensoriamento Remoto representam importantes ferramentas para estudos aplicados ao mapeamento de uso do solo e para delimitação de bacias hidrográficas, fornecendo apoio a trabalhos com informações sistematizadas, que proporcionam uma análise da área

de estudo em um bom nível de detalhes, sem onerar e tornar prolongada a pesquisa. Segundo Pina (1998) o SIG é uma ferramenta que atende à abordagem territorial na medida em que permite a distribuição espacial dos dados, a visualização das relações espaciais entre dados, a detecção de processos de concentração e de dispersão de fluxos e contra fluxos.

As modernas técnicas de cultivo com mecanização intensa e a elevada taxa de uso dos solos têm promovido mudanças no comportamento dos seus atributos físicos, o que, conseqüentemente, influencia a produção, o equilíbrio dos recursos naturais e a dinâmica da água no solo.

Segundo Bertol (2001), as propriedades físicas do solo precisam ser monitoradas visto que o uso intensivo ou acima da capacidade de suporte pode provocar mudanças indesejáveis, como aumento da densidade do solo (Ds), redução do teor de matéria orgânica (MO), diminuição da porosidade, tamanho de agregados, taxa de infiltração de água e resistência a penetração das raízes. (ALLEONI; BORBA, CAMARGO, 1999). Souza et al. (2001), Souza, Marques Junior e Pereira (2004a), Eguchi et al. (2002) e Pocay (2000) relatam que as frações texturais são estáveis, ou seja, se modificam pouco ao longo do tempo, apresentando baixo coeficiente de variação.

Trabalhando em um Cambissolo Álico em Santa Catarina, Bertol (2001) verificou que, com o aumento do teor de MO ocorreu diminuição da Ds e aumento da porosidade e, conseqüentemente, da taxa de infiltração de água no solo. Melo (2011) enfatizam que a MO promove aumento na porosidade total e macroporosidade, diminuição da Ds e aumento na capacidade de retenção de água, quando aplicada em grande quantidade.

No contexto da conservação do solo, a Ds é um dos atributos físicos que mais se destaca em virtude de refletir, especialmente, as condições de compactação do solo, a qual é reflexo do manejo empregado (DIAS JÚNIOR, 2000). O aumento do conteúdo volumétrico de sólidos traduz-se em redução drástica na macroporosidade, na quantidade de água prontamente disponível e na aeração (ALVARENGA et al. 2010).

Com o auxílio da geoestatística, a estrutura de dependência espacial dos atributos físicos do solo vem sendo intensamente estudada e modelada, permitindo a sua visualização espacial. Souza, Marques Junior e Pereira (2004b) encontraram grau moderado de dependência espacial para todos os atributos texturais de um Latossolo Vermelho Eutroférico, no estado de SP, sob cultivo de cana-de-açúcar, com

alcances do semivariograma esférico na ordem de 230,1, 157,7 e 210,0 m para argila, silte e areia, respectivamente, na camada de 0 a 0,20 m. Trabalhando em um solo aluvial da região de Lavras, MG, Eguchi et al. (2002) relatam dependência espacial para os atributos texturais com alcance dos semivariogramas gaussiano, exponencial e esférico, na ordem de 49,5, 14,5 e 15,0 m para argila, silte e areia, respectivamente. Veloso et al. (2001) afirmam moderado grau de dependência espacial para a  $D_s$ , com alcances do semivariograma esférico variando de 13,1 a 22,6m para as camadas de 0 a 0,05 e 0,15 a 0,2m, respectivamente.

Usualmente, o interesse da análise geoestatística não se limita à obtenção de um modelo de semi-variograma e seus parâmetros, desejando-se também prever valores em pontos não amostrados, sobretudo de atributos que sofrem influência do manejo, caso da matéria orgânica e densidade do solo.

O interesse pode concentrar-se em um ou mais pontos específicos da área ou na obtenção de uma malha de pontos interpolados, de modo a permitir a visualização do comportamento da variável na região, o que é obtido empregando a interpolação por krigagem. Segundo Silva Júnior (1984) e Gonçalves (1997) este interpolador pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não tendenciosidade e mínima variância.

Portanto, a krigagem produz a melhor estimativa linear não viciada dos dados de um atributo em um local não amostrado, com a modelagem do variograma. “A krigagem ordinária é geralmente associada como B.L.U.E. (*best linear unbiased estimator*). A krigagem ordinária é ‘linear’ porque suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados disponíveis; é ‘não-viciada’ porque busca o valor de erro ou resíduo médio igual a 0; e é ‘melhor’ porque minimiza a variância dos erros” (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

## 2.4 VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Em hidrogeologia o conceito de vulnerabilidade das águas subterrâneas começou a ser usado primeiramente por Le Grand (1964), nos EUA, e Margat (1968), na França.

Na década de 1980 foi amplamente utilizado por vários autores (ALLER et al. 1987; BACHMAT; COLLIN, 1987; FOSTER, 1987; FOSTER; HIRATA, 1993), e, nos anos 90, por autores como Civita (1990). Embora se referisse à suscetibilidade relativa dos aquíferos à

contaminação antropogênica, o termo vulnerabilidade inicialmente era usado sem nenhum objetivo de definição formal.

O termo vulnerabilidade referindo-se a contaminação da água subterrânea foi introduzido pelo Hidrogeólogo Frances J. Margat, no final da década de 60 (MARGAT, 1968), baseado no feito real de que, de certo modo, o meio físico protege o aquífero de contaminantes que podem infiltrar da superfície.

Diniz e Michaluate (2001) definem aquífero como sendo uma unidade geológica permeável e saturada que pode transmitir quantidades significativas de água sob gradientes hidráulicos ordinários, de forma a suprir diversos poços.

Ribeira (2004) comenta que em hidrologia subterrânea a vulnerabilidade pode consistir na subdivisão em dois termos: vulnerabilidade natural e vulnerabilidade específica. Vrba e Zaparozec (1994 *apud* RIBEIRA, 2004) definem a vulnerabilidade natural ou intrínseca dos aquíferos como a soma de uma série de atributos ou características dos mesmos que são: o solo, a zona não saturada, os parâmetros hidráulicos do aquífero e a recarga que controlam a aptidão do mesmo para tomar frente a um impacto indeterminado e sua capacidade de autorecuperação. Os mesmos autores definem a vulnerabilidade específica como a aptidão do aquífero para fazer frente a um tipo de contaminante/impacto concretamente, dentro de um contexto conjuntural (sócio econômico) específico. A diferença que no caso anterior, os parâmetros que medem esta vulnerabilidade estão também definidos pelo impacto.

De um modo geral, o termo vulnerabilidade é compreendido como sendo a suscetibilidade do aquífero à contaminação.

A vulnerabilidade natural se costuma calcular e expressar em termos hidrogeológicos, como por exemplo, a profundidade do nível freático, a permeabilidade, etc. Pelo contrário, a vulnerabilidade específica da água subterrânea costuma-se expressar em termos de riscos frente a um determinado impacto (RIBEIRA, 2004, p. 20).

Ribeira (2004) afirma que os aquíferos livres granulares e os aquíferos carbonatados cársticos situam-se como os grupos mais vulneráveis diante de um contaminante potencial. Os primeiros devido à sua relativa e pequena capacidade de autodepuração do terreno. É

importante que a posição local do nível freático nesse tipo de aquífero condicione seu grau de vulnerabilidade.

No caso do aquífero Cárstico, o mesmo autor comenta que a sua alta vulnerabilidade natural se atribui à velocidade de circulação da água subterrânea relativamente alta e sua escassa interação contaminante-rocha, que provoca uma elevada capacidade de propagação neste meio.

Uma caracterização aproximada da ideia de risco de poluição das águas subterrâneas consiste na associação e interação da vulnerabilidade natural do aquífero com a carga poluidora aplicada no solo ou em subsuperfície. Isso significa que se pode ter uma situação de alta vulnerabilidade, porém, sem risco de contaminação se não existir carga poluidora significativa, ou vice-versa. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada; mas o mesmo não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma propriedade intrínseca (KEMERICH et al. 2011).

A vulnerabilidade significa a maior suscetibilidade de um aquífero de ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta. Os autores complementam: “É um conceito inverso da capacidade de assimilação de contaminantes de um corpo receptor de água superficial, com a diferença de que os aquíferos possuem uma cobertura de substratos que proporciona maior proteção” (FOSTER; HIRATA, 1993).

Com relação aos fatores que influenciam a vulnerabilidade dos aquíferos, Ribeira (2004) comenta que a vulnerabilidade natural aumenta quanto menor for sua capacidade de atenuação ao impacto e quanto maior for sua acessibilidade.

Aprofundando mais, podem-se discriminar os seguintes grupos de parâmetros que influenciam na determinação da vulnerabilidade:

1) As características geológicas do aquífero: porosidade primária, tipo e grau de fraturação;

2) Os parâmetros hidráulicos do aquífero: sua condutividade hidráulica e sua transmissividade;

3) O regime de recarga do aquífero: tanto em seus aspectos quantitativos como a localização espacial, extensão e magnitude;

4) A existência, continuidade e a espessura da zona saturada e no caso de existir as características hidrológicas e de composição dos níveis suprajacentes do solo.

A atividade humana em superfície pode alterar e induzir novos mecanismos de recarga do aquífero,

modificando a taxa, a frequência e a qualidade na recarga de águas subterrâneas. O entendimento desses mecanismos e a correta avaliação de tais modificações são fundamentais para a determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas (OSÓRIO, 2004, p. 75).

É importante lembrar que se existir um aquífero com elevada vulnerabilidade, não significa que este já esteja contaminado, mas sim que esta área é de risco. Sua contaminação ou não vai depender das atividades antrópicas que estão sobre ele localizadas, ou seja, ele pode ser altamente vulnerável, mas não correr nenhum risco de ser contaminado por estar localizado numa área distante de fontes contaminantes, principalmente da presença humana, tais como lixões, cemitérios, distritos industriais entre outros (SANTOS, 2010).

Os componentes da vulnerabilidade de um aquífero não são diretamente mensuráveis, mas sim, determinados por meio de combinações de outros fatores. Além disso, dados referentes a vários fatores não podem ser facilmente estimados ou não estão disponíveis, o que obrigam na prática, uma simplificação no número de parâmetros requeridos. (KEMERICH et al. 2011).

Nesse sentido, a metodologia “**GOD**”, **G** – *groundwater hydraulic confinement*; **O** – *overlying strata*; **D** – *depth to groundwater table* (reduz o número desses fatores para apenas três que são:

1) Tipo de ocorrência de água subterrânea ou condição do aquífero (**G**);

2) Características dos estratos acima da zona saturada, em termos de grau de consolidação e tipo litológico (**O**);

3) A profundidade do nível da água (**D**).

Destacam-se vários métodos de avaliação de vulnerabilidade natural de aquíferos, dentre eles o “**GOD**” e o **DRASTIC**. Segundo Foster et al. (2003), os fatores e pesos atribuídos na avaliação do índice de vulnerabilidade à contaminação no Método **DRASTIC** são:

D = Profundidade à água subterrânea (x5);

R = Taxa de recarga natural (x4);

A = Características do meio aquífero (x3);

S = Características do solo (x2);

T = Aspecto topográfico (x1);

I = Impacto (efeito) da zona não saturada (vadoza) (x5);

C = Condutividade hidráulica (x3).

A metodologia DRASTIC (ALLER et al. 1987) foi desenvolvida pela *National Ground Water Association*, e é empregada pela Agência de Proteção Ambiental norteamericana (USEPA), constituindo-se num modelo qualitativo para avaliar a potencial poluição das águas subterrâneas. O cenário hidrogeológico inclui os principais fatores geológicos e do meio aquífero que conferem o nome à metodologia, sendo que para cada um dos fatores são atribuídos pesos, os quais estão relacionados, a maior ou a menor importância do fator na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos.

## 2.5 CONTAMINAÇÃO QUÍMICA DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO

O termo metal pesado é utilizado, de maneira um pouco confusa na literatura, segundo Leinz e Amaral (1989) para definir elementos com densidade atômica  $> 6 \text{ gcm}^3$  que estejam essencialmente ligados à poluição. Os metais podem ser classificados em metais alcalinos (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) coluna 1A, metais alcalino-terrosos (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) coluna 2A, e os demais metais, como é o caso do cádmio. Esse termo é o mais empregado para designar elementos classificados como poluentes do ar, da água, do solo e alimentos (CRUVINEL, 2009).

Os metais pesados possuem número atômico maior que 20, podem ser encontrados na forma elementar (sem sofrer alterações) ou formando compostos. A presença de metais pesados no solo se apresenta como um componente natural ou como um resultado da atividade humana (RAMALHO, 1996).

Metais pesados formam um grupo de elementos com particularidades relevantes e de ocorrência natural no ambiente, como elementos acessórios na constituição de rochas. Esses elementos, apesar de associados à toxicidade, exigem tratamento diferencial em relação aos xenobióticos, uma vez que diversos metais possuem essencialidade comprovada para plantas (Ni, Cu, Fe, Mn, Zn) e animais (Ni, Cu, Fe, Mn, Zn, Cr). Outra peculiaridade dos metais é o fato de não serem modificados ou degradados, como ocorre aos contaminantes orgânicos (BIONDI, 2010).

Algumas regiões detêm altíssimas concentrações desses contaminantes na sua forma solúvel. De origens diversas, tais compostos acumulam-se, em locais próximos a estradas, pela deposição de particulados poluídos que, posteriormente, são conduzidos pelas águas

das chuvas, afetando vegetais, contaminando águas superficiais e profundas, e desta forma atingindo homens e animais (FREIRE, 2005).

Esse mesmo autor afirma que a utilização de água de irrigação contaminada também é importante fonte de metais pesados, principalmente na cultura do arroz. A necessidade de resíduos industriais e domésticos utilizados como adubo orgânico é outra fonte possível. A necessidade de pesadas adubações de origem mineral, assim como os agrotóxicos e herbicidas, também acrescentam ao solo grandes quantidades de metal pesado.

A aplicação de insumos agrícolas aos solos e culturas tornou-se uma prática comum na agricultura. Os principais objetivos do uso desses agroquímicos são o aumento do suprimento de nutrientes e correção do pH do solo (fertilizantes e corretivos) e a proteção das lavouras pelo controle de patógenos e pragas (agrotóxicos). Essas práticas podem, entretanto, causar degradação química do solo, como resultado da acumulação de elementos e, ou, compostos em níveis indesejáveis (RAMALHO et al. 2000).

O transporte de contaminantes inorgânicos no solo não é facilmente medido. No entanto, o assunto é de grande importância, sobretudo quando considerados os riscos que estes podem acarretar à qualidade das águas superficiais e subterrâneas e os elevados custos usualmente envolvidos em operações de remediação (SOARES; YOKOWAMA; FREIRE, 2008).

A contaminação do solo por metais pesados causa interferência nas diversas formas de vida e no funcionamento dos ecossistemas. Uma das principais consequências é a difícil revegetação de áreas contaminadas e, por isso, há grande interesse no papel de microrganismos do solo capazes de minimizar a toxidez destes metais no ambiente, evidenciando sua importância no sistema (CABRAL et al. 2010).

Os fertilizantes, como não são suficientemente purificados durante o processo de manufatura, por razões econômicas, geralmente contêm diversas impurezas, entre elas os metais pesados (LEINZ; AMARAL, 1989). Esses metais, frequentemente, fazem parte dos componentes ativos dos pesticidas (FRANK; ISHIDA; SUDA, 1976), sendo, segundo vários autores, a adição desses elementos nos solos agrícolas causada pelo uso repetido e excessivo de fertilizantes, pesticidas metálicos e resíduos orgânicos (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1992; TILLER, 1989; ALLOWAY, 1990; BLUME; BRÜMMER, 1991; GIMENO-GARCIA; ANDREU; BOLUDA, 1996).

Com base no avanço tecnológico, é de consenso entre os cientistas que o próprio melhoramento genético convencional esgotou-se pela falta de variabilidade genética dentro das espécies. Os agrotóxicos, por exemplo, não têm sido mais eficientes para controlar insetos-praga e doenças das plantas, pois a velocidade com que adquirem resistência aos produtos químicos é maior do que a velocidade de elaboração de novas fórmulas de defensivos agrícolas por parte da indústria (MAIRESSE; COSTA, 2009).

Segundo Van Put et al. (1994), os metais pesados presentes no material de solo perdido por erosão, quando atingirem cursos d'água, poderão ser liberados com mudanças de certas condições físico-químicas do meio, tais como: pH, potencial de oxirredução e força iônica. Segundo esses pesquisadores, os processos de oxirredução e o pH são os mais importantes nas mudanças de solubilidade desses metais adsorvidos na superfície de óxidos de Fe e Mn, que são fases do solo passíveis de sofrer redução, podendo ser liberados ao sofrerem mudanças no potencial redox, tornando-se, por isso, perigosos nessas condições redutoras (PARDO et al. 1990). Entretanto, a solubilidade dos metais pesados existentes nos sedimentos de rios, ao serem depositados na superfície do solo, dependerá da facilidade com que esses metais possam sofrer remobilização.

Outra fonte que se destaca nas alterações das propriedades químicas do solo segundo Andrade et al. (2009), é a intensificação das atividades industriais, agrícolas e de urbanização, que aumentam o risco de poluição dos solos por metais pesados. Entre as atividades industriais, destaca-se a metalúrgica de metais pesados, que produz grandes quantidades de rejeitos ricos nesses poluentes.

Portanto, sob condições de oxidação, a solubilidade dos metais pesados dos sedimentos de rios pode ser reduzida, ocorrendo mudanças através da passagem gradual desses elementos ligados a sulfetos metálicos para carbonatos, oxidróxidos, óxidos ou silicatos. As frações trocáveis e ligadas a carbonato poderão liberar os metais mais facilmente por efeito da diminuição do pH (ALLOWAY, 1990).

O solo foi considerado por muito tempo um receptor ilimitado de materiais descartáveis, como o lixo doméstico, os efluentes e os resíduos industriais, com base na suposição de que este meio apresenta uma capacidade ilimitada de atenuação das substâncias nocivas presentes, que levaria ao saneamento dos impactos criados. Essa capacidade, como ficou comprovada, é limitada (CETESB, online).

Com isso, grandes esforços têm sido feitos para integrar conhecimentos que facilitem a reabilitação de solos contaminados com metais pesados e, assim, possibilitar o retorno da funcionalidade e estabilidade do ecossistema (ANDRADE et al. 2009).

Segundo a CETESB, o emprego de lista de valores orientadores de metais tem sido prática frequente em países com tradição na questão de monitoramento da qualidade de solos e águas subterrâneas e também no controle ambiental.

Os valores de referência de qualidade do solo segundo a CETESB são a concentração de determinada substância no solo que define um solo como limpo. Os valores de prevenção indicam a concentração de determinada substância, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo. Este valor indica a qualidade de um solo capaz de sustentar suas funções primárias, protegendo-se os receptores ecológicos.

Os valores de intervenção indicam que a concentração de determinada substância no solo acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição genérico (CETESB, online).

O solo atua frequentemente como um “filtro”, tendo a capacidade de depuração, imobilizando grande parte das impurezas nele depositadas. No entanto, essa capacidade é limitada, podendo ocorrer alteração da qualidade do solo, devido ao efeito cumulativo da deposição de poluentes atmosféricos, aplicação de defensivos agrícolas, fertilizantes, disposição de resíduos sólidos industriais, urbanos, materiais tóxicos e radioativos.

## 2.6 A ATUAÇÃO E A EFETIVIDADE DOS COMITÊS DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

Os comitês de gerenciamento de bacias hidrográficas são colegiados instituídos oficialmente pelo Governo do Estado que representam a instância básica de participação da sociedade no Sistema Estadual de Recursos Hídricos (SEMA, 2008).

Os comitês de bacias hidrográficas configuram-se como instituições relativamente recentes no Brasil, criadas nas duas últimas décadas do século XX, em um contexto de descentralização da gestão implementada pelo Estado, notadamente a partir da Constituição Federal de 1988 – CF/1988, onde a competência de alguns aspectos da gestão de

recursos hídricos, bem como da gestão ambiental, está relacionada aos três entes federados, dispostas no art 23 da CF.

Desse modo, representantes dos três setores compõem o Comitê de Bacia Hidrográfica: representantes do poder público (União, Estados, Distrito Federal e municípios, conforme a abrangência da bacia), usuários das águas e organizações da sociedade civil ligada a recursos hídricos. Sendo que o número de representantes de cada 'setor' e os critérios para sua indicação são estabelecidos nos regimentos internos dos próprios comitês (algumas leis estaduais também explicitam esta composição), limitando a representação dos poderes executivos à metade do total de membros (CARDOSO, 2003).

A legislação de recursos hídricos concede aos comitês atribuições/poder para deliberarem sobre o processo de planejamento de suas respectivas bacias, bem como opinarem sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos, entre outras atribuições (art. 19, Lei 10.350/1994) (SEMA, 2008).

Os Comitês de Bacias Hidrográficas estão previstos no Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGRH (instituído pela Lei Federal nº 9433/1997), sendo órgãos colegiados onde são debatidas as questões regionais referentes à gestão das águas. São compostos por representantes do poder público, dos usuários de água e entidades da sociedade civil atuantes na respectiva bacia.

De acordo com a Legislação Federal e Estadual de Recursos Hídricos, os comitês de bacia hidrográfica devem promover a gestão participativa e social, sendo que os mesmos devem ser compostos por vários seguimentos da sociedade, entre eles: setor dos usuários, sociedade civil organizada e órgãos públicos envolvidos na questão dos recursos hídricos. Cabe aos comitês amenizar conflitos entre os diferentes atores sociais envolvidos, a fim de que as necessidades sejam atendidas, mas sempre levando em consideração a conservação das águas (MEIER, 2011).

Funcionando como fórum integrador de políticas, o comitê tem o potencial de articular a política de recursos hídricos com a política ambiental, socioeconômica e de uso do solo, entre outras, possibilitando gerenciar de forma integrada e sustentável a utilização e conservação dos recursos naturais da bacia hidrográfica (MASCARENHAS, 2006).

Os comitês desempenham um papel estratégico na Política de Recursos Hídricos, pois tem o potencial de sintetizar suas diretrizes. No caso da Política de Recursos Hídricos gaúcha, a qual preconiza uma gestão descentralizada - no nível espacial das bacias, participativa e

integrada – o Comitê de Bacia configura-se em um espaço institucional o qual pode ser caracterizado como uma arena de tomada de decisões para o compartilhamento de interesses e integração de políticas dos setores usuários da água e da sociedade civil.

Assim, o êxito de seu funcionamento em certa medida significa o êxito da própria política das águas. Sua legitimidade tem sido conferida não apenas pela própria lei e pelas políticas nacional e estaduais, mas por políticas paralelas que têm sido implementadas tanto no âmbito nacional como no estadual e, em alguns casos, até no municipal (CARDOSO, 2003).

Ao atribuir aos comitês o gerenciamento dos recursos hídricos centralizado, o mesmo torna-se possível um novo mecanismo de cooperação multilateral entre a esfera federal e as demais, na solução de problemas regionais, sobretudo nas regiões conturbadas (NASCIMENTO; VILLAÇA, 2008).

No entanto, os comitês têm enfrentado dificuldades na sua implementação, como é relatado por Costa, Almeida e Nazaki (2002) que, com base em sua experiência, afirma que os problemas dos comitês começam com a ausência de pautas concretas, diminuindo o número de participantes das reuniões, e com a burocracia do Estado.

Os comitês estão centrados na participação social, sendo esta outra dificuldade para o seu funcionamento, e para que ela ocorra verdadeiramente necessita de representação e representatividade de seus membros. Segundo Meier (2011), a falta de representatividade dos comitês junto à sociedade pode estar ancorada na falta de representatividade da sociedade junto aos comitês.

O processo de financiamento dos comitês é outro segmento que não funciona, dificultando a sua atuação, e este aspecto só terá mudanças quando se instituir a cobrança pelo uso dos recursos hídricos (PAIM, 2010).

É nas discussões, deliberações e projetos aprovados pelo comitê que são centradas as decisões mais importantes, quer quanto à aplicação e uso de suas atribuições, quer quanto a recursos a serem aplicados na Bacia.

Segundo a ANA (Agência Nacional de Águas), estão entre as atribuições do Comitê de Bacia Hidrográfica:

- a) promover o debate sobre questões relacionadas a recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes;
- b) arbitrar, em primeira instância administrativa, os conflitos relacionados aos recursos hídricos;

c) aprovar o Plano de Recursos Hídricos da Bacia, acompanhar a sua execução e sugerir as providências necessárias ao cumprimento das metas;

d) propor aos conselhos de recursos hídricos as acumulações, as derivações, as captações e os lançamentos de pouca expressão, para efeito de isenção da obrigatoriedade de outorga de direitos de uso;

e) estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos e sugerir os valores a serem cobrados.

Os Comitês surgem neste contexto, com o principal objetivo de tornar a gestão de recursos hídricos mais participativos envolvendo várias esferas da sociedade, desta forma, os membros que os compõem assumem papel de grande relevância, pois passam a tornarem-se importantes agentes locais na gestão de águas no espaço baiano. É importante ressaltar que tais Comitês foram criados na tentativa de viabilizar a gestão de recursos hídricos e torná-la menos centralizadora, portanto é importante verificar se os mesmos desenvolvem o papel que lhes é atribuído e se não funcionam como deveriam funcionar, quais os fatores limitam ou inviabilizam sua atuação.

Segundo Cury (2005), através dos documentos oficiais do Comitê, como as atas das plenárias, é possível analisar os diversos segmentos representados no Comitê e a atuação de suas forças, os participantes mais ativos, os temas debatidos e o destino dado a eles diante do fato de terem sido discutidos num fórum regional. Assim sendo, sua efetividade frente a solução de problemas e pressões é passível de ser medida, tendo em vista as ações concretas por ele realizadas.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim está localizada na parte central do Estado do Rio Grande do Sul, entre as latitudes de 29° 36' 55" S e 29° 39' 50" S e longitudes de 53° 46' 30" W e 53° 49' 29" W, abrangendo uma área total de 1145,7 km<sup>2</sup> (CASAGRANDE, 2004). Está inserida em três grandes compartimentos geomorfológicos, com características morfológicas e geológicas distintas: Região do Planalto, do Rebordo do Planalto e da Depressão Central ou Periférica. Na Região do Planalto é onde se localizam suas nascentes, à altitude entre 300 e 480 m e é formada pelo vulcanismo da Bacia do Paraná, ocorrido no Mesozóico, com a presença de basaltos e arenitos "intertraps". A região é caracterizada pela presença de um relevo ondulado e suavemente ondulado, resultante do trabalho de dissecação fluvial na superfície do Planalto. A drenagem tem padrão dendrítico, com vales em V ou de fundo plano.

Na região das nascentes da bacia, em sua porção de cotas altimétricas mais elevadas ocorre a Formação Serra Geral. De acordo com o Mapa Geológico da CPRM (2008) esta é constituída de derrames de rochas vulcânicas básicas (basaltos, teor em SiO<sub>2</sub> entre 45-52%) e rochas ácidas (riólitos, riodacitos, granófiros com teor em SiO<sub>2</sub> entre 52-55%) Leinz e Amaral (1989). Sequência superior ácida Caxias derrames de composição intermediária a ácido, riodacitos a riolitos, mesocráticos, microgranulares a vitrofíricos, textura esferulítica comum (tipo Carijó), forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central e dobras de fluxo e autobrechas frequentes, vesículas preenchidas predominantemente por calcedônia e ágata, fonte de minerações de brita na região. Serra Geral básica (fácies esmeralda) derrames basálticos, microgranulares, textura microgranular, predominantemente pretos, comuns vesículas mili a centimétricas com opala preta, eventual presença de Cobre nativo, alteração amarelo-ovo (jarosita) característica. A diferença mais importante nestas duas unidades reside no seu padrão de fraturas/diáclases, sendo as rochas ácidas com padrão tabular, horizontal enquanto as básicas com padrão poliédrico que favorece a esfoliação esferoidal e a infiltração de águas meteóricas, tanto nas maciças quanto nas amigdalóides (pedra sapo) e também diáclases verticais. Algumas destas são abertas e facilitam a infiltração da água e a recarga subterrânea.

Nesta unidade localizam-se os cultivos de soja, áreas de floresta e pastagem. Já na região oeste da bacia localizam-se as regiões de várzeas onde predomina o cultivo de arroz, compreendido pela formação a partir de sedimentos atuais (aluviões).

As sequências de rochas sedimentares arenosas clásticas com diferentes relações entre Porosidade e Permeabilidade, ocorrem na Depressão Periférica do Estado do Rio Grande do Sul, e na região próximo da cidade de Santa Maria, conforme descritas:

a) Formação Sanga do Cabral: ocorre em corpos tabulares ou lenticulares alongados, brecha e conglomerado intraformacional, siltito e raro argilito, ambiente continental, fluvial entrelaçado, contendo fragmentos de vertebrados fósseis, anfíbios e répteis. Segundo CPRM (1994) trata-se de um Aquitardo proporcionando baixas vazões nos poços, sendo a água de boa qualidade;

b) Formação Caturrita: constituída por arenitos, conglomerados, siltito areno-argiloso e folhelho, contendo tetrápodes fósseis e troncos de coníferas, ambiente continental depósitos fluviais e deltas lacustres, ex. Monumento do *Imigrante*, estrada Santa Maria para o Município de Silveira Martins;

c) Formação Botucatu: constituída de arenito fino a grosso, grãos bem arredondados e alta esfericidade, dispostos em *sets e cosets* de estratificação cruzada de grande porte. Paleambiente continental desértico, depósitos de dunas eólicas. De acordo com CPRM (1994) formam excelentes reservatórios aquíferos. Paleambiente continental de canais fluviais;

d) Formação Santa Maria, Membro Passo das Tropas: arenitos e arenitos conglomeráticos com pelitos subordinados, contendo elementos da Flora *dicroidium*. CPRM (1994) cita como o melhor aquífero da região, excelentes vazões, e águas em geral de boa qualidade, porém muito vulnerável à poluição. O Membro Alemoa constituído por siltito-argilosos vermelhos, maciços, contendo fauna de Tetrapodes fósseis e concreções carbonáticas (calcretes). Paleambiente com depósitos lacustres. De acordo com CPRM (1994) não são aquíferos, portanto Aquicludes (não armazena nem transmite a água). Exemplos ocorrem em vários pontos da cidade de Santa Maria a qual forneceu o nome da unidade devido a sua secção-tipo e a ocorrência de fósseis;

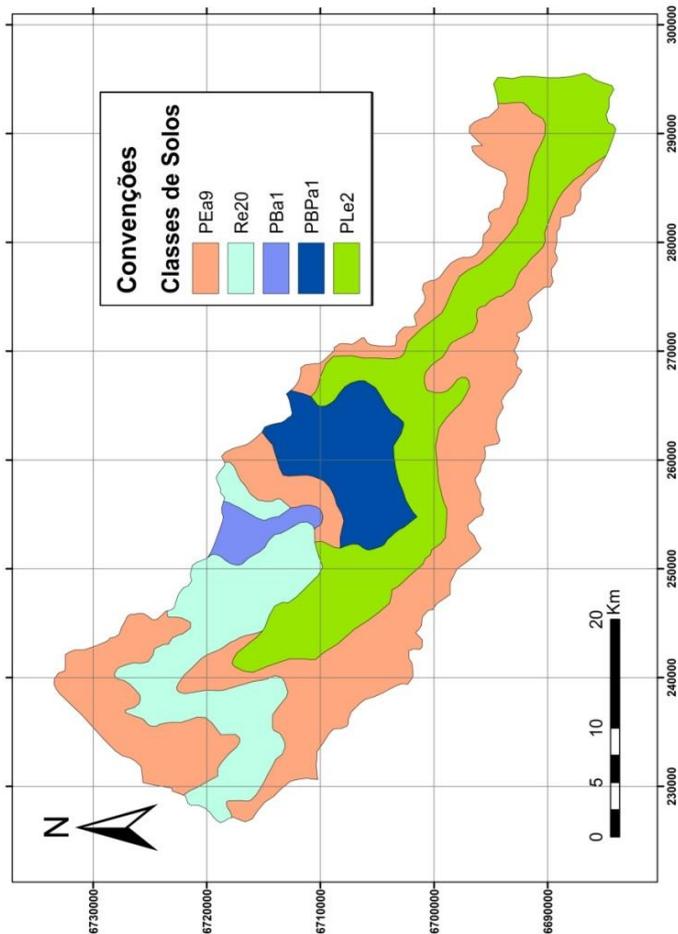
e) Depósitos (aluviões) e terraços fluviais: a CPRM (1994) descreve os Aluviões como aquíferos contínuos de grande extensão, livre. Consistiu-se de sedimentos clásticos não consolidados, de pequena espessura (máximo de 10m), permeabilidade alta, com água de boa

qualidade. Muito vulnerável à poluição. Já os Terraços Fluviais, são constituídos por conglomerados, arenitos médios a argilosos, siltitos arenosos fluviais. Aquífero irregular livre, constituídos por sedimentos pouco consolidados bastante argilosos, de pequena espessura. Permeabilidade é de média a baixa. A água é de boa qualidade. O aproveitamento é realizado por poços escavados.

O clima, na área da bacia hidrográfica, pela classificação climática de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Os solos predominantes, de acordo com o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (EMBRAPA, 1999) são na Região do Planalto os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Alumínicos, em alguns locais associados aos NEOSSOLOS LITÓLICOS, Eutróficos; na Região do Rebordo do Planalto os NEOSSOLOS LITÓLICOS, ocorrendo também CHERNOSSOLOS ARGILÚVICOS e; na Depressão Central, os PLANOSSOLOS e os CHERNOSSOLOS ARGILÚVICOS (CASAGRANDE, 2004). A vegetação natural, na área de Planalto e do Rebordo do Planalto é constituída, predominantemente, por floresta do tipo subtropical e na Depressão Central ou Periférica de campos de pastagem natural. Em meio aos campos é comum a presença de capões isolados de mata de pequeno e grande porte (SEPLAN, 1986).

As classes de solos presentes na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Classes de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS, 2013.



Como pode ser observado na Figura 2, os solos são descritos abaixo (IBGE, 2002):

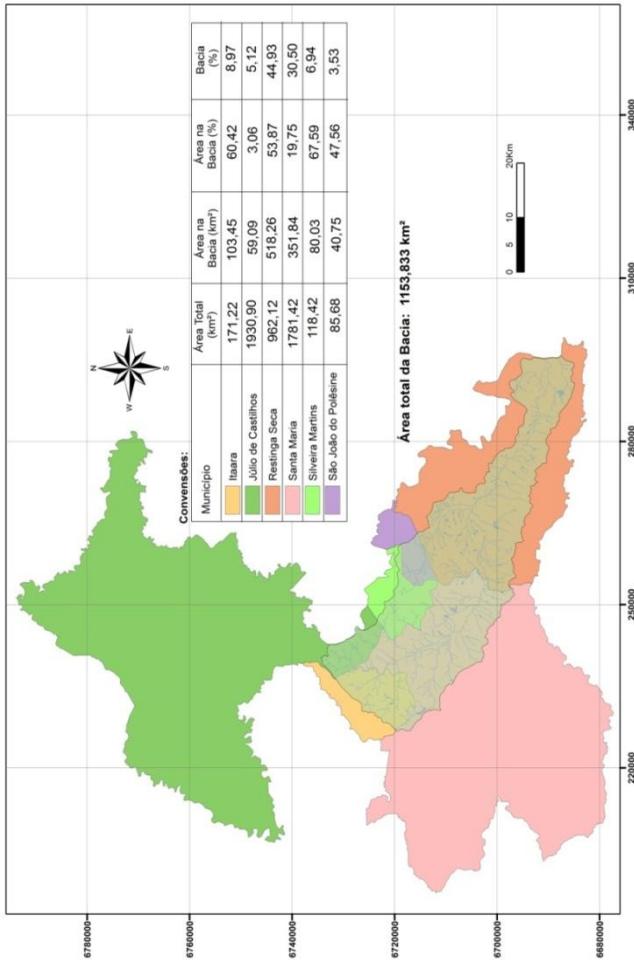
a) PBPa1: Pdzólico Bruno-acinzentado Planossólico álico e distrófico Ta A moderado e proeminente textura média/argilosa e planossolo eutrófico Ta A moderado textura média/argilosa relevo suave ondulado e plano;

- b) PBa1: Podzólico Bruno Acinzentado álico Ta A textura argilosa/muito argilosa fase pedregosa e não pedregosa e solos litólicos distróficos e álicos A proeminente textura média e argilosa cascalhenta fase pedregosa substrato riodacitos relevo ondulado e forte eondulado;
- c) PEa9: Podzólico vermelho-Escuro álico e distrófico Tb abrupático e não abrupático A moderado textura arenosa/argilosa e média/argilosa, Podzólico Bruno-Acinzentado Planossólico álico Ta A moderado textura média/argilosa e Podzólico Vermelho-Amarelo álico Tb plintico A moderado textura média/argilosa relevo suave ondulado;
- d) PLe2: Planossolo eutrófico Ta A moderado textura arenosa/média e média/argilosa relevo plano;
- f) Re20: Associação complexa de solos litólicos eutróficos A chernozênico e moderado textura média cascalhenta e média fase pedregosa substrato basalto com cambissolo eutrófico Tb e Ta A moderado e chernozênico textura argilosa e média fase pedregosa e Brunizém Avermelhado textura média/argilosa e argilosa fase pedregosa relevo forte ondulado.

A presença de grandes quantidades de áreas cultivadas por arroz, na bacia hidrográfica do Rio Vacacai-Mirim, RS, traz benefícios à comunidade local com a venda do produto, mas ao mesmo tempo ocupam grande parte das várzeas ao longo do rio principal e seus afluentes. A forma de cultivo de arroz na região exige uma demanda elevada de água. Os períodos de semeadura dessa cultura coincidem com o período de estiagem, ocasionando uma vazão praticamente nula na parte mais baixa do rio. A causa dessa debilidade do rio está diretamente relacionada aos inúmeros bombeamentos para a lavoura de arroz, distribuídos ao longo de seu curso. Essa situação tende a agravar os problemas qualiquantitativos do rio com o passar do tempo, propiciando a geração de conflitos de uso da água (GASTALDINI et al. 2011).

Na Figura 3 são apresentadas a localização e os municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacai-Mirim.

Figura 3: Municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.



É responsável por 40% do abastecimento público de água da cidade de Santa Maria. Sendo que a qualidade de suas águas é afetada, principalmente, pelas atividades agrícolas e pela expansão urbana. Nos períodos de estiagem, quando aumenta a demanda de água para

irrigação, o rio em sua parte baixa praticamente seca face aos inúmeros bombeamentos para a lavoura de arroz, distribuídos ao longo de seu curso.

Segundo o IBGE (2010), os municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim possuem as seguintes características:

- Itaara - RS possui uma população de 5.010 habitantes e uma área de 171,1 Km<sup>2</sup> e o PIB per capita para o ano de 2009 é de R\$ 9.499,00. O município possui 1.662 domicílios particulares permanentes, destes 1.167 tem acesso à rede de abastecimento de água, 1.649 a energia elétrica e uma a rede coletora de esgoto ou pluvial;

- Júlio de Castilhos – RS possui uma população de 19.579 habitantes, uma área territorial de 1.929,4 Km<sup>2</sup> e o PIB per capita do município para o ano de 2009 é de R\$ 19.839. O município possui 6.345 domicílios particulares permanentes, destes 5.420 tem acesso à rede de abastecimento de água, 6.299 a energia elétrica e duas a rede geral de esgoto ou pluvial;

- Restinga seca – RS possui uma população de 15.849 habitantes, uma área territorial de 961,8 Km<sup>2</sup> e o PIB per capita para o ano de 2009 é de R\$ 14.337,00. O município possui 5.353 domicílios particulares permanentes, destes 4.115 tem acesso à rede de abastecimento de água, 5.334 a energia elétrica e seis a rede geral de esgoto ou pluvial;

- Santa Maria – RS possui uma população de 261.031 habitantes, uma área de 1.779,6 Km<sup>2</sup> e o PIB per capita para ao ano de 2009 é de R\$ 12.855,00. O município possui 87.450 domicílios particulares permanentes, destes 79.967 tem acesso à rede de abastecimento de água, 87.165 a energia elétrica e 173 a rede geral de esgoto ou pluvial;

- Silveira Martins – RS possui uma população de 2.449 habitantes, uma área de 118,3 Km<sup>2</sup> e o PIB per capita pra ao ano de 2009 é de R\$11.617,00. O município possui 813 domicílios particulares permanentes, destes 430 possuem acesso à rede de abastecimento de água, 807 a energia elétrica e nenhum domicílio com acesso a rede geral de esgoto ou pluvial;

- São João do Polêsine – RS possui uma população de 2.635 habitantes, uma área de 85,6 Km<sup>2</sup> e o PIB per capita pra ao ano de 2009 é de R\$12.904,00. O município possui 855 domicílios particulares permanentes, destes 374 tem acesso à rede de abastecimento de água, 851 a energia elétrica e nenhum domicílio com acesso a rede geral de esgoto pluvial.

Sendo então, o percentual médio dos domicílios com acesso a rede de abastecimento de 89%, e o percentual médio dos domicílios com acesso a rede de coleta de esgoto de 0,18%.

### 3.2 ANÁLISE AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA

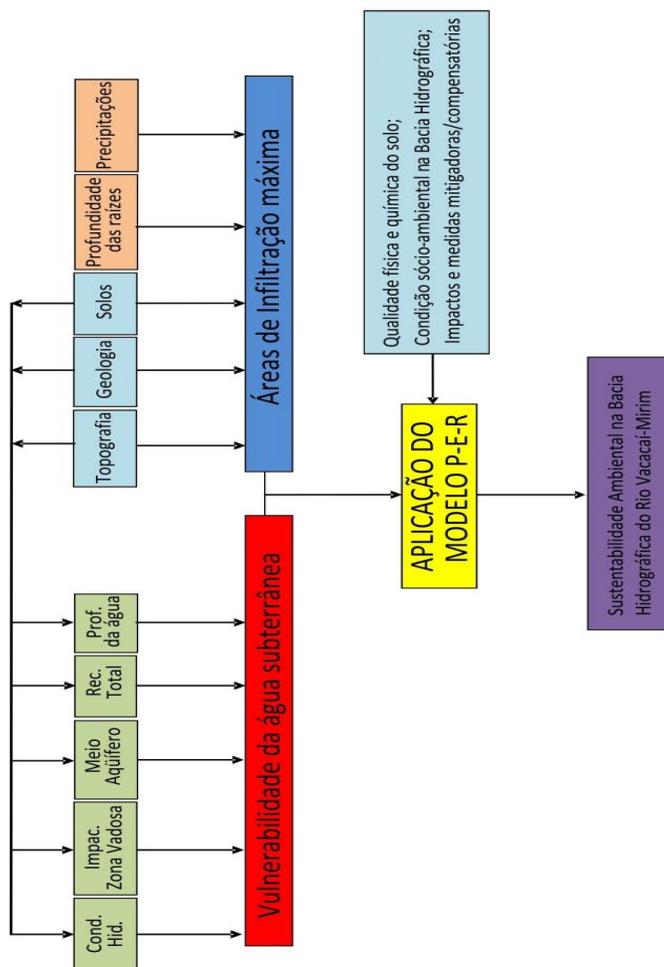
Para a análise ambiental da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, utilizou-se o Modelo PER/PSR - “Pressão – Estado – Resposta” que é o marco ordenador mais utilizado para apresentação de estatísticas e indicadores das áreas ambientais e de desenvolvimento sustentável. Foi desenvolvido pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), que regularmente publica seus indicadores nesse formato.

Um marco ordenador pode ser entendido como uma classificação de indicadores em categorias ou, pode estar muito relacionado a uma concepção teórica, específica ao tema estudado, facilitando desse modo a interpretação dos resultados apresentados pelos indicadores (SCANDAR NETO, 2004).

As pressões e o estado foram identificadas através do levantamento dos usos do solo na Bacia Hidrográfica, neste caso a ênfase dada ao modelo P-E-R foi a qualidade física e químicos do solo, sendo avaliada a ocorrência metais pesados, alterações na densidade do solo, porosidade do solo, condutividade hidráulica saturada, textura do solo, capacidade de campo dentre outros.

As respostas foram obtidas através da análise de Atas do Comitê de Gerenciamento de Bacias Hidrográficas, onde existem relatos de ações da sociedade para minimizar, mitigar ou compensar os impactos ambientais decorrentes das atividades desenvolvidas na área da Bacia (Figura 4).

Figura 4: Modelo Pressão, Estado e Resposta



Dessa forma foi possível realizar uma análise ambiental mais completa da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, identificando-se as Pressões (atividades desenvolvidas na Bacia Hidrográfica), o Estado do ambiente decorrente das pressões e as Respostas dadas pela sociedade aos problemas ambientais tem-se um instrumento capaz de nortear as tomadas de decisão no âmbito do gerenciamento dos Recursos Hídricos que não só apresenta os impactos ambientais na área estudada, mas também identifica sua origem, o quantifica, e levanta as

medidas adotadas até o momento de sua avaliação possibilitando assim intervenções mais precisas principalmente pelos órgãos gestores da qualidade ambiental.

### 3.3 DELIMITAÇÃO DA BACIA

Para a determinação dos limites da área da bacia hidrográfica, foram digitalizadas, através de um scanner, as cartas topológicas do exército de Val de Serra, Santa Maria, Camobi, Faxinal do Soturno, Arroio do Só, Restinga Seca e Jacuí, todas na escala 1:50.000. Após escaneadas, foi feito o mosaico das cartas utilizando o programa computacional Adobe Photoshop. Utilizando o software Spring 4.3, e seus aplicativos derivados, as mesmas foram georreferenciadas e suas curvas de nível vetorizadas. Após a vetorização das curvas de nível, o arquivo foi exportado para a utilização no software Surfer 8.0, possibilitando a geração do MDT (modelo digital do terreno). Com o software AutoCad Civil 3D, foi importada a topografia do terreno disponível no software Google Earth, e a partir daí gerada a grade de fluxo de escoamento. O MDT, associado à grade de fluxo, permitem a delimitação da área da bacia hidrográfica.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA

Uma das formas disponíveis para classificar os solos em termos de permeabilidade e de facilidade de infiltração é a classificação hidrológica dos solos do "Soil Conservation Service" (dos EUA) referida em David (1976), que compreende quatro tipos de solos distintos (A, B, C ou D).

Os solos do tipo A apresentam baixo potencial de escoamento direto e elevadas intensidades de infiltração, mesmo quando completamente umedecidos. Incluem, principalmente, áreas profundas com drenagem boa ou excessiva. Possuem uma elevada permeabilidade.

Os solos do tipo B apresentam potencial de escoamento direto abaixo da média e intensidades de infiltração moderadas, quando completamente umedecidos. Incluem, principalmente, solos medianamente profundos, com textura moderadamente fina e moderadamente grosseira e solos medianamente drenados. Possuem uma permeabilidade média.

Os solos do tipo C têm potencial de escoamento direto acima da média e baixa intensidade de infiltração, quando completamente

umedecidos. Incluem, principalmente, solos com camadas impermeáveis subjacentes e solos com textura moderadamente fina. Estes solos possuem uma permeabilidade baixa.

Os solos do tipo D apresentam um potencial de escoamento direto elevado e intensidade de infiltração muito baixa quando completamente umedecidos. Incluem, essencialmente, solos argilosos expansíveis, solos com o nível freático permanentemente próximo da superfície e solos com substratos impermeáveis a pouca profundidade. Estes solos possuem uma permeabilidade muito baixa.

O relevo também condiciona maior ou menor facilidade de ocorrência de escoamento direto e, simetricamente, de menor ou maior facilidade de existência de infiltração um terreno mais horizontal facilita a ocorrência de infiltração superficial enquanto que um terreno declivoso favorece o escoamento direto.

Na área da topografia, têm sido realizadas diversas aplicações do método DRASTIC para caracterizar a vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas (ALLER et al. 1987).

Este método corresponde a um índice composto por sete parâmetros, um dos quais o parâmetro T, que se refere ao relevo, mais especificamente ao declive do terreno (sua topografia). A consideração do parâmetro topografia tem o mesmo objetivo que se pretende aqui, ou seja, definir áreas onde a possibilidade de ocorrência de infiltração superficial é maior, relativamente a áreas onde a possibilidade de ocorrência de escoamento direto é maior. Neste método será utilizada a divisão dos declives nas seguintes cinco classes:

< 2%, 2%-6%, 6%-12%, 12%-18%, >18 %.

A quantidade máxima de água armazenável no solo (AGUT) é um fator que está ligado à quantidade de água que pode ser removida do solo para a evapotranspiração. Em condições em que não existe evapotranspiração, o teor de água no solo apresenta um valor mínimo que é dado pela capacidade de campo (CC). Acima deste valor é possível a ocorrência de escoamento subterrâneo por ação da gravidade, enquanto que, abaixo deste valor, a água fica retida no solo. No caso de existir evapotranspiração, a umidade do solo pode diminuir até um valor mínimo que é dado pelo ponto de murcha permanente das plantas (PMP). A profundidade máxima até onde pode ocorrer evapotranspiração é a profundidade atingida pelas raízes das plantas. Os

parâmetros acima foram determinados no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

Quanto maior o AGUT maior é a quantidade de água retida no solo (que pode ser renovada pelos processos conjuntos de evapotranspiração seguida de infiltração superficial) e menor é a percolação.

Finalmente, abaixo do solo, a natureza do substrato geológico vai condicionar todo o escoamento na zona vadosa até a água atingir a zona saturada. No caso de não existir solos, o afloramento de formações geológicas fraturadas ou carsificadas facilita a infiltração. Também em função do substrato geológico e respectiva estrutura se definem áreas com potencial aquífero muito distinto, pelo que, em última análise, a definição das áreas de infiltração máxima só fará sentido no caso de existirem corpos hídricos subterrâneos subjacentes com interesse.

No parâmetro geológico, o que interessa fundamentalmente é saber se as formações geológicas não se encontram cobertas por solo e, em caso afirmativo, o grau de fraturação ou existência ou não de cavidades que possam facilitar a infiltração das águas existentes à superfície. Neste caso, consideram-se apenas duas classes: (A) a existência de meios carsificados ou muito fissurados, onde as fraturas se encontram interligadas e contínuas em profundidade, ou (B), os meios restante, conforme descrito Hentges (2009). A formação geológica está ilustrada na figura 5.



valores dos parâmetros se encontram acima dos valores limites. As áreas em que o fator geológico pertence à classe A também são consideradas como de infiltração máxima (Tabela 3).

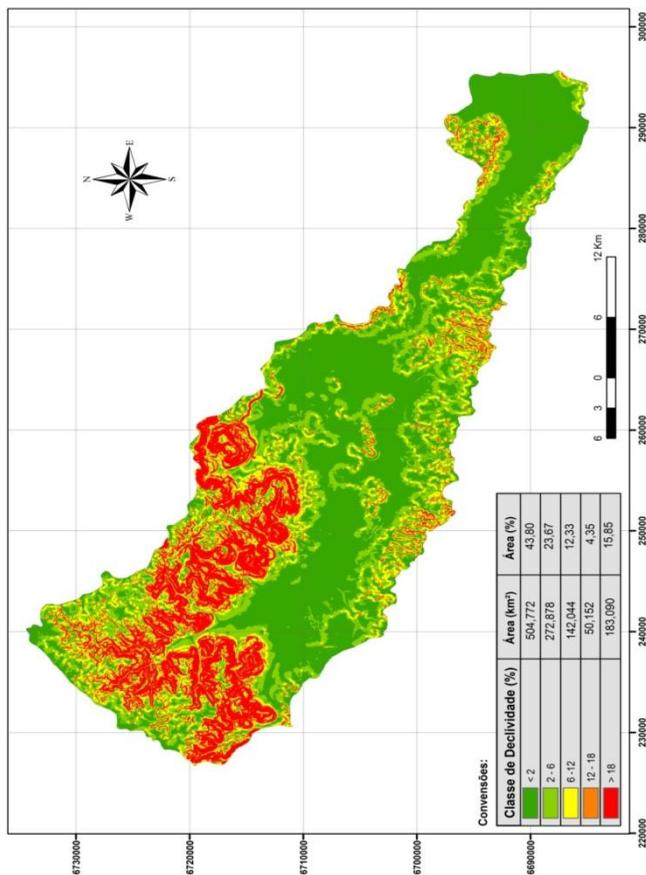
Tabela 3: Valores limites para cada classe dos parâmetros tipo de solo, declividade e AGUT na definição das áreas de infiltração máxima.

Parâmetro	Classe	Valor limite
Tipo de solo	A	10
	B	8
	C	4
	D	1
Declividade (%)	< 2	10
	2 - 6	9
	6 - 12	5
	12 - 16	3
	> 18	1
AGUT (mm)	< 50	10
	51 - 100	9
	101 - 150	8
	151 - 200	7
	201 - 250	6
	251 - 300	5
	301 - 350	4
	351 - 400	3
	401 - 450	2
	> 450	1

Fonte: Oliveira e Ferreira (2002).

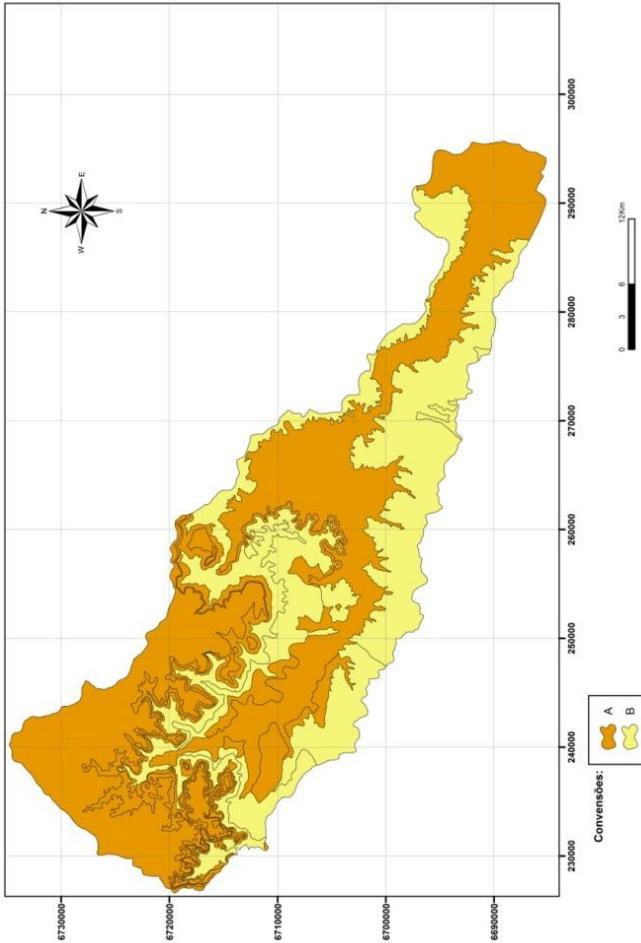
Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim que possui uma área total de 1145,7 km<sup>2</sup>, na classe de declividade < 2% estão 504,772 km<sup>2</sup> que representam 43,80% da área total e está distribuída na região central e SE (Figura 6).

Figura 6: Mapa das Classes de Declividades (%) na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.



Na Figura 7 são apresentados os tipos de solo presentes na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim para utilização em uma das variáveis na equação da metodologia DRASTIC. Como pode ser observado, na maior parte da bacia tem-se solo do tipo A, devido ao alto índice de infiltração mesmo quando umedecidos.

Figura 7: Tipos de solos presentes na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, RS, segundo David (1976).



Como observado na Figura 7 o solo tipo A apresenta 61,34% da área da bacia hidrográfica, já o solo tipo B é representado em 38,36% da área da bacia.

Conforme mencionado anteriormente, os solos do tipo A apresentam baixo potencial de escoamento direto e elevadas intensidades de infiltração, mesmo quando completamente umedecidos. Incluem, principalmente, áreas profundas com drenagem boa ou excessiva. Possuem uma elevada permeabilidade. Já os solos do tipo B apresentam potencial de escoamento direto abaixo da média e intensidades de infiltração moderadas, quando completamente umedecidos. Incluem, principalmente, solos medianamente profundos, com textura moderadamente fina e moderadamente grosseira e solos medianamente drenados. Possuem uma permeabilidade média.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FACILIDADE DE INFILTRAÇÃO (IFI)

A utilização de limites fixos faz com que a definição das áreas de infiltração máxima fique sempre dependente da verificação desses limites. Ou seja, ser ou não ser uma área de infiltração máxima. É útil haver uma forma de juntar todos os parâmetros em análise e poder obter um escalonamento de áreas mais e menos favoráveis à infiltração. Pode acontecer que, utilizando limites fixos, uma determinada região a caracterizar não apresente áreas de infiltração máxima. Contudo, nessa região pode haver interesse em saber quais são as zonas mais favoráveis à ocorrência de infiltração (OLIVEIRA; FERREIRA, 2002).

Neste sentido, a criação de um índice de facilidade de infiltração que permita conjugar todos os parâmetros, além de permitir a definição das áreas de infiltração máxima através da identificação de um valor limite, possibilita ordenar as áreas em função da facilidade de infiltração e permite obter a uniformização dos valores obtidos em diferentes áreas.

Para a definição de um índice é necessário atribuir valores a cada um dos parâmetros e é preciso arranjar uma expressão que ligue os diversos parâmetros. O tipo de solo pode assumir quatro valores, valorizando-se os solos que facilitam a infiltração superficial e penalizando-se os solos que favorecem o escoamento direto. O declive da superfície topográfica caracteriza-se da mesma forma que o parâmetro T (topografia) no método DRASTIC (ALLER et al. 1987). A quantidade máxima de água armazenável no solo que pode ser utilizada para a evapotranspiração (AGUT) é caracterizada dividindo o valor que esta variável pode assumir em intervalos de 50 mm. Para os cálculos abaixo, seguiu-se o proposto por Oliveira; Ferreira (2002).

O índice de facilidade de infiltração (IFI) foi calculado com a utilização da equação abaixo

$$IFI = \text{valorTS} + \text{valorT} + \text{valorAGUT} \quad (1)$$

Onde: IFI índice de facilidade de infiltração; TS se refere ao valor atribuído ao tipo de solo; T ao valor atribuído ao declive e valor AGUT ao valor atribuído à variável AGUT.

Com isso, sendo que, quanto maior for o índice, maior será a facilidade de infiltração. A facilidade de infiltração assume valores compreendidos entre 3 e 30.

Para se definir as áreas de infiltração máxima a partir do IFI é necessário definir um índice limite, que, utilizando-se os critérios apresentados anteriormente, as áreas de infiltração máxima devem corresponder, conforme a expressão:

$$IFI = 26 (\text{valor TS} \in \{10,8\} \wedge \text{Valor T} \in \{10,9\} \wedge \text{Valor AGUT} \in \{10,9\}) \quad (2)$$

Ou seja, as áreas de infiltração máxima irão ocorrer quando os valores de F forem maiores que 26, ou seja, na soma das variáveis, os valores de TS estiverem entre 8 e 10, T e AGUT entre 9 e 10.

Para a obtenção dos parâmetros exigidos para o estabelecimento das áreas de infiltração máxima sobre os aquíferos da bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, foram utilizados os seguintes métodos e materiais.

A carta clinográfica necessária para estabelecer a inclinação do terreno foi obtida a partir das cartas topográficas publicadas pelo Exército, em escala 1:50.000 e curvas de nível de 20 em 20 m.

O enquadramento dos solos em tipos A, B, C e D da classificação hidrológica dos solos do “Soil Conservation Service” dos EUA foi realizado através da interpretação das características dos solos mapeados nas cartas existentes (BRASIL, 1973; STRECK et al. 2002). O resultado dessa interpretação será uma carta de solos adaptada.

Para a estimativa do AGUT foram coletadas amostras dos solos localizados sobre os aquíferos e determinados os valores de CC e PMP no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Com os valores obtidos foi aplicada a equação abaixo:

$$AGUT = rp (CC - PMP) \quad (3)$$

Onde: AGUT é a quantidade máxima de água armazenável; rp é a profundidade das raízes, CC é a capacidade de campo e PMP ponto de murcha permanente.

Para determinação do rp, inicialmente mapeou-se o uso e ocupação do solo da bacia a partir de imagens de satélite.

Para a geração do mapa de uso e ocupação do solo, da bacia hidrográfica, foram utilizadas cenas do satélite Landsat TM 5 (órbita ponto 223/81 e 222/81), disponíveis no catálogo de imagens do INPE – Instituto Nacional de pesquisas Espaciais. Com o auxílio do software ArcGIS versão 9.3, as imagens foram processadas e georreferenciadas no sistema de coordenadas UTM, e adotado como referência o Datum SIRGAS2000.

O satélite Landsat TM 5, tem resolução espacial de 30 metros e resolução temporal de 16 dias. Nesse estudo utilizou-se imagens dos dias 09 de fevereiro de 2010, e 5 de fevereiro de 2011. Essas datas foram escolhidas para facilitar a classificação dos alvos, tendo em vista que o ciclo fenológico da soja e do arroz tem seu maior vigor vegetativo na região de estudo entre os meses de janeiro e março.

Após o georreferenciamento das imagens, foi projetado o limite da bacia hidrográfica. Por meio da ferramenta *Extract by Mask*, as imagens foram recortadas com o limite da bacia hidrográfica. As classes escolhidas para o mapeamento, levando em consideração a resolução da imagem, foram: soja, arroz, solo exposto, floresta, lamina d'água, campo/pastagem e área urbana, sendo essa última vetorizada manualmente para não interferir no cálculo das demais, devido à proximidade de resposta espectral com solo exposto.

Com a imagem recortada, foram escolhidas as áreas de treinamento, ou seja, as áreas onde se encontravam os pixels das classes definidas. Para a classificação da imagem, foi utilizado o método de classificação supervisionado, onde o usuário é quem defini as classes e não o software de forma automatizada. Ainda na fase de treinamento das amostras, fez-se uso do Classificador de Mínima Distância, método estatístico supervisionado que classifica de forma rápida e precisa cada pixel da imagem.

Para a geração da imagem resultante foi utilizada a ferramenta *Create Signatures* do *ArcToolBox*. Essa ferramenta cria um arquivo de assinaturas espectrais dos alvos pré-definidos, no formato ASCII.

Com o arquivo de assinatura gerado, fez-se uso da ferramenta *Maximum Likelihood*, também dentro do *ArcToolBox*. Nessa ferramenta entramos com a imagem a ser classificada e o arquivo de assinaturas gerado anteriormente, processamos a classificação da imagem.

A imagem resultante foi o mapa propriamente dito em formato vetorial *shapefile*. Com esses vetores foram calculadas as áreas dos polígonos de cada classe e os seus respectivos percentuais, com o auxílio da ferramenta *calculate geometry*. Após foi feito o *layout* do mapa e a exportação em formato *img*. Todos os procedimentos foram efetuados em ambas as imagens (2010 e 2011).

Os usos do solo mapeados foram classificados de acordo com uma adaptação de Oliveira; Ferreira (2002). Para a geração do mapa de uso e ocupação do solo e informações sobre a profundidade das raízes na bacia hidrográfica, foram utilizadas cenas do satélite Landsat TM 5 (órbita ponto 223/81 e 222/81), disponíveis no catálogo de imagens do INPE – Instituto Nacional de pesquisas Espaciais. Com o auxílio do software ArcGIS versão 9.3, as imagens foram processadas e georreferenciadas no sistema de coordenadas UTM, e adotado como referência o datum SIRGAS2000.

O satélite Landsat TM 5, tem resolução espacial de 30 metros e resolução temporal de 16 dias. Nesse estudo utilizou-se imagens dos dias 09 de fevereiro de 2010, e 5 de fevereiro de 2011. Essas datas foram escolhidas para facilitar a classificação dos alvos, tendo em vista que o ciclo fenológico da soja e do arroz tem seu maior vigor vegetativo entre janeiro e março, na região de estudo.

Após o georreferenciamento das imagens, foi projetado o limite da bacia conforme. Através da ferramenta *Extract by Mask*, as imagens foram recortadas com o limite da bacia hidrográfica. As classes escolhidas para o mapeamento, levando em consideração a resolução da imagem, foram: soja, arroz, solo exposto, floresta, lamina d'água, campo/pastagem e área urbana, sendo essa última vetorizada manualmente para não interferir no cálculo das demais, devido à proximidade de resposta espectral com solo exposto.

Com a imagem recortada, foram escolhidas as áreas de treinamento, ou seja, as áreas onde se encontravam os pixels das classes definidas. Para a classificação da imagem, foi utilizado o método de classificação supervisionado, onde o usuário é quem defini as classes e não o software de forma automatizada. Ainda na fase de treinamento das amostras, fez-se uso do Classificador de Mínima Distância, método

estatístico supervisionado que classifica de forma rápida e precisa cada pixel da imagem.

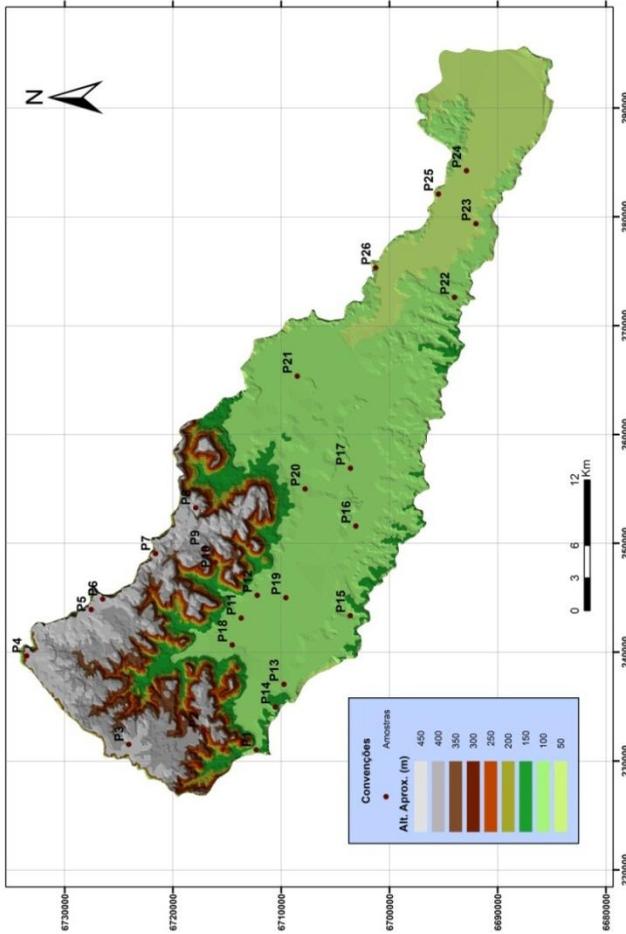
Para a geração da imagem resultante foi utilizada a ferramenta *Create Signatures* do *ArcToolBox*. Essa ferramenta cria um arquivo de assinaturas espectrais dos alvos pré-definidos, no formato ASCII.

Com o arquivo de assinatura gerado, fez-se uso da ferramenta *Maximum Likelihood*, também dentro do *ArcToolBox*. Nessa ferramenta entramos com a imagem a ser classificada e o arquivo de assinaturas gerado anteriormente, processou-se a classificação da imagem. A imagem resultante foi o mapa propriamente dito em formato vetorial *shapefile*. Com esses vetores calculamos as áreas dos polígonos de cada classe e os seus respectivos percentuais, com o auxílio da ferramenta *calculate geometry*. Finalmente foi feito o layout do mapa e a exportação em formato *img*. Todos os procedimentos foram efetuados em ambas as imagens (2010 e 2011).

### 3.6 PONTOS PARA A MEDIÇÃO DA INFILTRAÇÃO

Para a realização dos testes de infiltração de água, os pontos de medição foram escolhidos visando uma distribuição espacial uniforme na bacia hidrográfica, abrangendo os diferentes tipos de solos existentes, bem como os seus usos predominantes na região em estudo. Dessa maneira, tendo em vista o tamanho da bacia hidrográfica e suas características no que diz respeito aos tipos de solo, seus usos e formações geológicas foram amostrados 26 pontos, sendo que estes receberam a nomenclatura variando de P1 a P26 (Figura 8).

Figura 8: Mapa planialtimétrico com a localização dos 26 pontos amostrados na Bacia Hidrográfica Vacacai-Mirim-RS



Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados o tipo de uso do solo e o tipo de solo em cada um dos pontos de amostragem, respectivamente.

Tabela 4: Uso e ocupação do solo Bacia Hidrográfica Vacacai-Mirim-RS.

<b>Usos do Solo</b>	<b>Pontos de Amostragem</b>
<b>Mata Nativa</b>	1,2,3,10,26
<b>Campo Nativo</b>	5,12,22,23
<b>Pastagem</b>	11,15,20
<b>Soja</b>	4,6,7,8,9
<b>Arroz</b>	16,17,18,19,21,24,25
<b>Área Urbana</b>	13,14

Tabela 5: Tipos de solo Bacia Hidrográfica Vacacai-Mirim-RS.

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Pontos de Amostragem</b>
<b>Argissolo Bruno-Acinzentado álico ou alumínico</b>	20,21
<b>Argissolo Bruno-Acinzentado álico</b>	8
<b>Neossolos Litólicos eutróficos e distróficos</b>	2,7,9,10
<b>Argissolo Vermelho álico e distrófico</b>	1,3,4,5,6,13,14,15,22,23
<b>Planossolo Háptico Eutrófico</b>	11,12,16,17,18,19,24,25,26

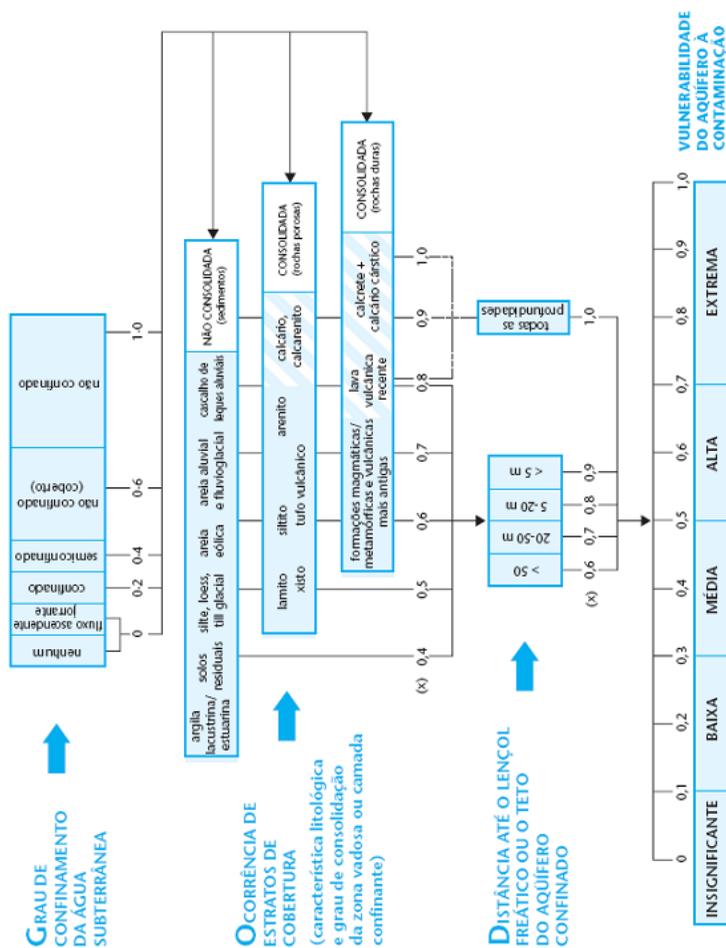
### 3.7 DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO À CONTAMINAÇÃO

A metodologia “GOD” (G – groundwater hydraulic confinement; O – overlaying strata; D – depth to groundwater table), elaborada por Foster et al. (2006), correspondente a: G – Grau de confinamento hidráulico da água subterrânea/aquífero; O – Ocorrência de extratos de cobertura; D – Distância/Profundidade até o lençol freático, foi utilizada para a definição dos índices de vulnerabilidade das diferentes áreas. A estimativa do índice de vulnerabilidade “GOD” seguiu as etapas ilustradas conforme a Figura 9.

Inicialmente identificou-se o grau de confinamento hidráulico do aquífero, atribuindo-lhe um índice entre 0,0 a 1,0. Foram considerados confinados obtendo nota 0,2, e aqueles semiconfinados nota 0,4.

Especificaram-se as características do substrato que recobre a zona saturada do aquífero em termos de: (a) grau de consolidação e (b) litologia, assinalando um índice a este parâmetro em uma escala de 0,4 a 1,0.

Figura 9: Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero



Fonte: Foster et al. (2006).

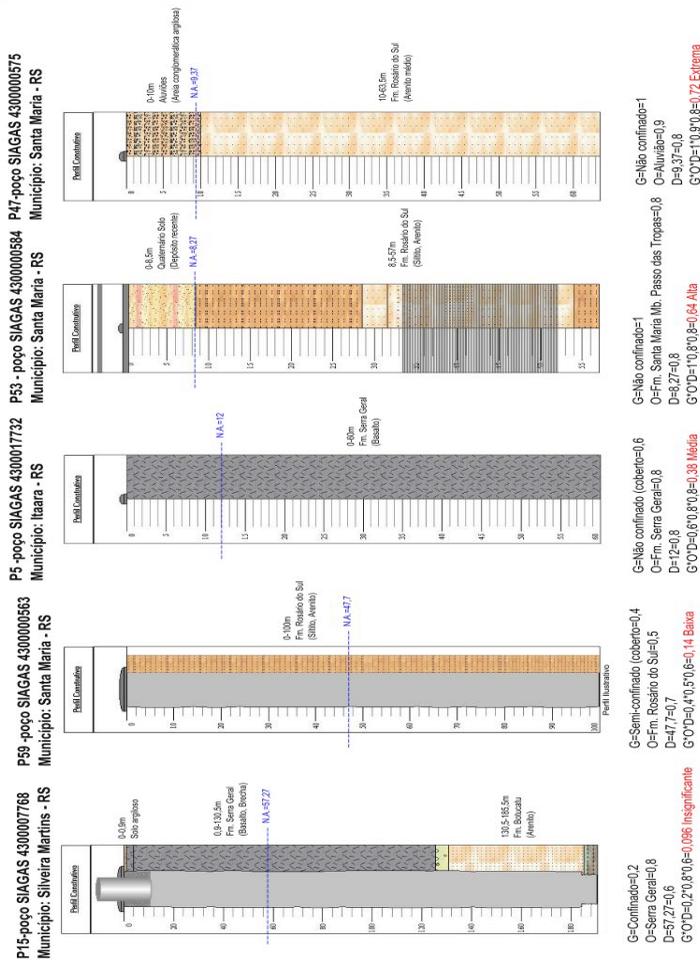
Considerou-se distância ou profundidade ao nível da água (em aquíferos não confinados) ou profundidade do teto da camada do

primeiro aquífero confinado, assinalando um índice a este parâmetro em uma escala de 0,6 a 1,0.

O índice final integrado da avaliação de vulnerabilidade do aquífero à contaminação “GOD” é o produto dos valores obtidos para cada um dos parâmetros, variando de 0,0 (insignificante) até 1,0 (extrema).

Na Figura 10, são demonstrados exemplos dos cálculos para diferentes índices de vulnerabilidade do aquífero a contaminação através do método GOD referente às captações em estudo. Sendo que P15, correspondente ao poço SIAGAS número 4300007768 apresentou vulnerabilidade insignificante (nota GOD = 0,096), por outro lado, o P47 corresponde ao poço SIAGAS número 4300000575 obteve índice de vulnerabilidade extrema, com nota GOD = 0,72.

Figura 10: Exemplos de aplicação do Sistema GOD Foster et al. (2006) em poços com diferentes índices de vulnerabilidades.



Para espacialização dos dados e construção dos mapas de vulnerabilidade, utilizou-se o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), e o como referencial horizontal e vertical, respectivamente o Datum SIRGAS 2000 e o Mareógrafo de Imbituba-SC. O programa utilizado foi o Surfer 9, onde inseriu-se o

meridiano central do fuso UTM local, a 51° a oeste do Meridiano de Greenwich. Para a interpolação matemática dos dados, foi utilizado o método geostatístico Krigagem, que melhor representou a modelagem espacial dos dados.

### 3.8 ÍNDICE DE RISCO

O risco é uma função da vulnerabilidade e do perigo. A vulnerabilidade foi determinada na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim através da metodologia GOD (FOSTER; HIRATA; ROCHA, 2003). O perigo foi determinado a partir do Perigo Estimado. A partir da relação entre estes dois parâmetros obtiveram-se, conforme a expressão abaixo:

$$IR = PE.IV \quad (4)$$

Onde: IR é o Índice de Risco; PE é o perigo estimado e o IV é o índice de vulnerabilidade.

Para uniformizar as unidades, todas as variáveis foram escalonadas de 0 a 1, sendo 0 o valor mínimo de cada variável e 1 o valor máximo, o mesmo utilizado por Marcelino; Nunes; Kobiyama (2006), conforme expressão abaixo:

$$V_{escalonado} = \frac{V_{observado} - V_{mínimo}}{V_{máximo} - V_{mínimo}} \quad (5)$$

Onde:  $V_{escalonado}$ ;  $V_{observado}$  é o valor observado;  $V_{mínimo}$  é o valor mínimo e  $V_{máximo}$  é o valor máximo.

Depois de escalonado, o Risco foi agrupado em quatro classes, da mesma forma que Goerl; Kobiyama; Pellein (2012): sendo elas classificadas como baixo, médio, alto e muito alto, definidas pelo desvio quartílico, que segundo Ramos; Sanchez (2000) divide a série de dados em quatro grupos, com igual número de ocorrências, cada um compreendendo 25% do total de valores. Desta forma, o fatiamento é definido quantitativamente, excluindo a subjetividade no processo de definição do limiar de corte. Esta etapa de escalonamento e classificação pelo desvio quartílico foi baseada em Marcelino, Nunes e Kobiyama (2006).

### 3.9 INDICADOR DE PERIGO

O perigo estimado (PE) foi calculado para cada município através da expressão:

$$PE = \frac{Inpp-I}{IDESE} \quad (6)$$

Onde: Inpp-I é o Índice de Potencial Poluidor da Indústria e IDESE é o Índice de Desenvolvimento Sócio Econômico.

### 3.10 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE POTENCIAL POLUIDOR DA INDÚSTRIA - INPP-I

Para a determinação dos parâmetros abaixo foi utilizado à base de dados disponíveis no site da Fundação de Economia e Estatística (FEE) do estado do Rio Grande do Sul, descrita por Martins; Oliveira (2005). Sendo assim, fez-se necessária a mensuração do tamanho da indústria, através do Índice do Valor Adicionado Bruto da Indústria (IVAB-Indústria), o qual é calculado como um número-índice tradicional com base igual ao valor do VAB do estado do Rio Grande do Sul em 2002, como mostra a expressão abaixo:

$$IVAB - Indústria_{i,t} = \frac{VAB-Indústria_{i,t}}{VAB-Indústria_{RS,2002}} \quad (7)$$

Onde: IVAB – Indústria  $i,t$  é o índice do valor adicionado bruto da indústria da unidade geográfica  $i$  no tempo  $t$ ; VAB - Indústria  $i,t$  é o valor adicionado bruto da indústria da unidade geográfica  $i$  no tempo  $t$ ; VAB – Indústria RS,2001 é o valor adicionado bruto da indústria do estado do Rio Grande do Sul no ano de 2002.

Assim, o Inpp-I foi obtido combinando-se o Indapp-Indústria com o IVAB-Indústria. Ou seja, construiu-se um índice que computasse, de forma conjunta, o tamanho da indústria com o nível de dependência das atividades industriais potencialmente poluidoras de uma determinada unidade geográfica. Esse cômputo consistiu no produto dos

dois índices mencionados acima, da mesma forma utilizada por Gullo (2010) demonstrado na equação a seguir:

$$\text{Inpp-Indústria}_{i,t} = \text{Indapp-Indústria}_{i,t} \times \text{IVAB-Indústria}_{i,t} \quad (8)$$

Onde:

$\text{Inpp-Indústria}_{i,t}$  é o Índice de Potencial Poluidor da Indústria da unidade geográfica  $i$  no Tempo  $t$ ;  $\text{Indapp-Indústria}_{i,t}$  é o Índice de Dependência do Potencial Poluidor da Indústria da unidade geográfica  $i$  no tempo  $t$ ; e  $\text{IVAB-Indústria}_{i,t}$  é o índice do Valor Adicionado Bruto da Indústria da unidade geográfica  $i$  no tempo  $t$ .

Assim, obteve-se de fato, uma medida do “tamanho” do potencial poluidor das atividades econômicas da indústria por unidade geográfica.

### 3.11 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO SÓCIO ECONÔMICO – IDESE

O Idese é calculado a partir de quatro blocos: Renda, Saneamento e Domicílios, Saúde e Educação. O bloco Saneamento e Domicílios é a novidade do Idese em relação ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). Ao todo, são 12 indicadores que compõem o Índice. Esses indicadores são divididos em seus respectivos blocos. Na Tabela 6 são apresentados os pesos de cada indicador nos respectivos blocos, os limites usados para transformar cada indicador em índice e, por fim, a fonte dos indicadores.

A transformação dos indicadores que compõem o Idese em índice é dada através da expressão abaixo, utilizada por Wink Júnior et al. (2012):

$$I_{x,j,t} = \frac{y_{x,j,t} - LI_x}{LS_x - LI_x} \quad (9)$$

Onde:

$I_{x,j,t}$  é o índice do indicador  $x$  da unidade geográfica  $j$  no tempo  $t$ ;  $y_{x,j,t}$  é o indicador  $x$  da unidade geográfica  $j$  no tempo  $t$ ;  $LI_x$  é o limite inferior do indicador  $x$ ; e  $LS_x$  é o limite superior do indicador  $x$ .

Zuanazzi; Wink Júnior (2011) dizem que uma unidade geográfica que apresente um determinado indicador igual ou maior que

o limite superior terá, portanto, índice 1 para esse indicador. O mesmo raciocínio vale para uma unidade geográfica com indicador igual ou menor que o limite inferior, atribuindo-lhe índice 0. O mesmo autor afirma que o peso de cada indicador dentro de cada bloco é predeterminado, e o índice final é calculado a partir de uma média aritmética entre os blocos. Utilizando padrões internacionais do IDH, define-se a classificação da unidade geográfica em três níveis:

- a) 0 - 0,499 representa baixo nível de desenvolvimento;
- b) 0,5 - 0,799 representa nível de desenvolvimento mediano; e,
- c) 0,8 – 1 representa alto nível de desenvolvimento.



Tabela 6: Pesos e blocos de indicadores constituintes do Idese.

BLOCOS	INDICADORES	PESO NO BLOCO	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	FONTE DOS DADOS BRUTOS
Educação	Taxa de abandono do ensino fundamental	0,25	100%	0%	Edudata do INEP, Ministério da Educação
	Taxa de reprovação no ensino fundamental	0,20	100%	0%	Edudata do INEP, Ministério da Educação
	Taxa de atendimento ao ensino médio	0,20	0	100%	Censo Demográfico 2000 do IBGE; Edudata do INEP, Ministério da Educação; FEE
	Taxa de analfabetismo de pessoas de 15 anos ou mais	0,35	100%	0%	Censo Demográfico 2000 e PNAD do IBGE
Renda	Produto Interno Bruto <i>per capita</i> (PIB <sub>pc</sub> )	0,50	100 (\$ ppp)	40000 (\$ ppp)	FEE
	Valor Adicionado Bruto <i>per capita</i> (VAB <sub>pc</sub> ) do comércio, alojamento e alimentação	0,50	11,22 (\$ ppp)	4486,64 (\$ ppp)	FEE
Saneamento e Domicílios	Percentual de domicílios abastecidos com água: rede geral de esgoto ou pluvial	0,50	0%	100%	Censo Demográfico 2000
	Percentual de domicílios atendidos com esgoto sanitário: rede geral de esgoto ou pluvial	0,40	0%	100%	Censo Demográfico 2000
	Média de moradores por domicílios	0,10	6 moradores	1 morador	Censo Demográfico 2000 e PNAD do IBGE; FEE
Saúde	Percentual de Crianças com baixo peso ao nascer	0,33	30%	4%	DATASUS do Ministério da Educação
	Taxa de mortalidade de menores de cinco anos	0,33	316 por mil	4 por mil	DATASUS do Ministério da Educação
	Esperança de vida ao nascer	0,33	25 anos	85 anos	IDHM 2000 do PNDU, IPEA e Fundação João Pinheiro

Fonte: FEE (2005).

### 3.12 DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO À CONTAMINAÇÃO

A vulnerabilidade natural a contaminação foi determinada utilizando-se a metodologia GOD como descrito no item 3.7.

### 3.13 CADASTRAMENTO DOS POÇOS E MONTAGEM DO BANCO DE DADOS

Para o cadastramento e obtenção de informações dos poços, foram utilizadas as informações disponibilizadas na página eletrônica <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/> que possui um cadastro de usuários de poços subterrâneos - SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas).

Desse modo, foi elaborado um banco de dados, com o uso do programa Excel 2007, constando as seguintes informações: o código do poço, município, latitude e longitude (no Sistema de Coordenadas Geográficas e Sistema Universal Transversa de Mercator-UTM), nível

estático.

### 3.14 DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO

Foram coletadas amostras indeformadas de solo por meio de anéis, com dimensões de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura, a 3 cm de profundidade. Com estas amostras foram determinados os valores de densidade do solo seco (Dens), porosidade total (Pt), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), as umidades volumétricas na condição de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), e condutividade hidráulica saturada (Ksat).

A porosidade foi determinada pelo método da mesa de tensão, onde as amostras depois de saturadas, foram submetidas a uma tensão de 6 kPa, onde permaneceram por 24 horas, tempo necessário para a retirada de água dos macroporos (EMBRAPA, 1997). Em seguida para determinação da capacidade de campo, as amostras foram submetidas à tensão de 10 kPa, em câmara de Richard (KLEIN, 2008). Logo após as pesagens as amostras foram resaturadas, e em permeametro de carga constante foi determinada a condutividade hidráulica saturada. Após determinação da condutividade as amostras foram levadas a estufa a 105°C para determinação do peso seco. Com os pesos obtidos nas tensões de 6, 10 kPa, e peso seco foram obtidos os valores referentes a densidade microporosidade, porosidade total, macroporosidade e capacidade de campo, expressos as respectivas expressões:

$$\text{Densidade do Solo} = \frac{\text{Peso do solo seco}}{\text{Volume do Cilindro}} \quad (10)$$

$$\text{Microporosidade} = \frac{\text{Peso 6 kPa} - \text{Peso seco}}{\text{Volume do Cilindro}} \quad (11)$$

$$\text{Porosidade Total } l = \left( \frac{\text{Densidade do solo}}{\text{Densidade de Partícula}} \right) - 1$$

(12)

$$\text{Macroporosidade} = \text{Porosidade Total} - \text{Microporosidade} \quad (13)$$

$$\text{Capacida de Campo} = \frac{\text{Peso 10 kPa} - \text{Peso seco}}{\text{Volume do Cilindro}} \quad (14)$$

### 3.15 MÉTODOS ANALÍTICOS

O experimento foi conduzido em laboratório, a partir de amostras de solo coletadas na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. A coleta das amostras foi realizada no período de dezembro de 2010. Para realizar a análise das amostras, foram utilizados equipamentos laboratoriais e também algumas técnicas instrumentais, que permitiram a caracterização química do solo.

De cada amostra composta foram retiradas porções de aproximadamente 200 gramas, para avaliação das características químicas do solo. Dentre as características químicas, foram feitas as seguintes avaliações, utilizando-se protocolos descritos por Tedesco (1995): teor de fósforo, potássio, cálcio e magnésio no solo.

Para a determinação do teor de Fósforo e Potássio foram utilizadas as seguintes soluções:

Ácido clorídrico e sulfúrico concentrado (p.a.):

HCl concentrado (d=1,191; 37,7%; 12,1M);

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado (d=1,840; 96,7%; 18,02M);

Foram Preparados 18 L de solução P – A (HCl 0,05M + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,125M): Foi colocado 1 L de água destilada em um balão de 2 L.

Adicionou-se 73,1 mL de HCl concentrado e 12,5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado; Completou-se de água destilada e agitando-se; Transferiu-se para recipiente de 20 L, adicionando-se 16 L de água destilada.

Para o preparo de 10 L de solução P-B (HCl 0,87M e (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>4H<sub>2</sub>O 0,38%) seguiram-se as etapas abaixo descritas:

Foi dissolvido 38 g de molibdato de amônio ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) em 1500 mL de água destilada em copo de 2000 mL, deixou-se esfriar e transferiu-se para um copo de 2000 mL e completar com água destilada. A Solução foi transferida para um tambor de 10 L, adicionando-se 800 mL de água destilada em um balão de 2000 mL e 707 mL de HCl concentrado ( $d=1,191$ ; 37,7%; 12,1M) e agitou-se. Foi completado o volume com água destilada e agitou-se. Transferiu-se para o tambor plástico de 10 L onde já encontra-se a solução de molibdato de amônio e agitou-se, sendo então adicionado 6 L de água destilada e agitado novamente.

Para o preparo da solução P-C (ácido 1-amino-2-naftol-4-sulfônico, sulfito de sódio e matabissulfato de sódio) seguiram-se as seguintes etapas:

Foi preparado um estoque de pó redutor, misturando o triturando em um almofariz os seguintes reagentes: ácido 1-amino-2-naftol-4-sulfônico: 2,50 g, sulfito de sódio ( $\text{NaSO}_3$ ): 5 g, matabissulfato de sódio: 146 g. O pó redutor foi guardado em vidro fosco, sendo dissolvido 32 g do pó redutor em 200 mL de água destilada morna. A solução foi transferida para um vidro escuro e permaneceu em repouso por 4 dias.

Para obter o padrão misto concentrado ( $1 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{K}^+$ ;  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{Na}^+$  e  $500 \text{ mg L}^{-1}$  de P) seguiram-se os seguintes procedimentos: Foi pesado 0,704 g de KCl, 2,542 de NaCl e 2,196 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , após foi dissolvido em 1 L com solução P-A

O padrão misto diluído ( $200 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  e  $100 \text{ mg L}^{-1}$ ) foi obtido: Diluindo-se 100 mL do padrão misto concentrado a 500 mL em balão volumétrico com solução P-A. Os padrões de trabalho foram obtidos: pipetando-se alíquotas de 0,0 – 10 – 20 – 35 – 50 – 75 e 100 mL do padrão misto diluído para balões volumétricos de 1000 mL. Foi completado com solução P-A. Estes padrões contem 0,0 – 2 – 4 – 7 – 10 – 15 – e  $20 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  e 0,0 – 1 – 2 – 3,5 – 5 – 7,5 e  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de P.

Adotaram-se ainda os seguintes procedimentos: Foram medidos 3 mL de solo e colocado em frasco de 5 mL; Foram adicionados 30 mL da solução P – A; Agitou-se por 5 minutos em agitador horizontal; As amostras permaneceram de repouso até o dia seguinte; Foram coletado 3 mL do sobrenadante e 6 mL para os copos.

Para a determinação do P foram adicionados 3,0 mL da solução P-B à alíquota do extrato, adicionaram-se três gotas da solução P-C e

agitou-se a mistura. A absorvância foi determinada após 15 minutos em 660 nm.

Para a determinação do  $K^+$  foi determinada a intensidade da emissão de  $K^+$  da alíquota no fotômetro de chama.

Após os procedimentos descritos acima, utilizaram-se os seguintes cálculos:

### 3.15.1 Fósforo

A curva padrão utilizada foi de  $y = 0,18913X$

$$r^2 = 0,9993$$

O fator de concentração foi de  $f_c: 0,00529 \text{ mg L}^{-1}$  por mil abs, já o fator de diluição, foi de  $f_d: 30$ .

Para o cálculo de P no solo deu-se pela expressão abaixo:

$$P \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = \text{leitura} \times f_c \times f_d \quad (15)$$

Onde: P é a concentração de Fósforo;  $f_c$  é o fator de concentração e  $f_d$  é o Fator de diluição.

### 3.15.2 Potássio

A concentração na solução de leitura ( $c_s$ ) foi obtida pela curva de calibração

O fator de diluição,  $f_d$  foi de 10.

Para o cálculo de  $K^+$  no solo deu-se pela Equação:

$$K^+ \text{ (mg dm}^{-3}\text{)} = c_s \times f_d \quad (16)$$

Onde:  $K^+$  é a concentração de Potássio;  $c_s$  é a concentração da solução e  $f_d$  o Fator de diluição;

### 3.15.3 Cálcio e Magnésio

Para a determinação dos elementos Cálcio e Magnésio seguiu-se a seguinte rotina:

**Soluções (Diluições):** a) KCl 1M: 76,4 g de KCl a 1 L de água destilada; b) Estrôncio a 0,3 % em HCl 0,2 M: 5,42 g de  $\text{SrCl}_2$  e 16,7 mL de HCl concentrado a 1 L de água destilada; c) Azul de Bromotimol: Foi feita uma pasta com 0,1 g de azul Bromotimol a 1,6 mL de NaOH 0,1 M (em gral de ágata), misturando até a coloração ficar verde, adicionando mais NaOH se necessário. Foi diluído em 100 mL de água destilada; d) Fenolftaleína 1%: Dissolvido 1,0 g em 50 mL de etanol 95 %. Diluído a 100 mL; e) NaOH 0,0125M: foi pesando 0,50 g r dissolvido a 1 L com água destilada, sendo este titulado com ácido padronizado e ajustado a concentração; f) Padrão primário de Ca e Mg ( $1200 \text{ mg L}^{-1}$  de Ca e  $360 \text{ mg L}^{-1}$  de Mg): Foi pesado 0,360 g de Mg metálico e dissolvido com 20 mL de HCl 50% em copo de Becker de 100 mL. Transferiu-se quantitativamente para balão volumétrico 1000 mL. Foi adicionado 2,997 g de  $\text{CaCO}_3$  e dissolvido, onde foi completado o volume; g) Padrão secundário de Ca e Mg: foi diluído 100 mL de padrão primário a 1 L com a solução de Sr 0,3 % em HCl 0,2 M. Esta solução continha  $120 \text{ mg L}^{-1}$  de Ca e  $36 \text{ mg L}^{-1}$  de Mg respectivamente; h) Padrões de trabalho (Ca e Mg): Diluiu-se 0 – 2,5 – 5 – 10 – 20 e 30 mL do padrão secundário a 100 mL, com a solução de Sr 0,3 % em HCl 0,2 M. Estes padrões terão 0,0 – 3,0 – 6,0 – 12,0 – 24,0 e  $36 \text{ mg L}^{-1}$  de Ca e 0,0 – 0,9 – 1,8 – 3,6 – 7,2 e 10,8  $\text{mg L}^{-1}$  de Mg respectivamente;

Para a extração mediu-se 2,5 mL de solo, sendo os frascos tapados e agitados por 30 minutos, permanecendo em decantação até o dia seguinte. Retirou-se 5 mL do sobrenadante para determinação do Ca e Mg

Foi adicionado 25 mL de água destilada aos componentes do item anterior, retirou-se 5 mL, sendo adicionado 5 mL da solução de Sr 0,3 % em HCl 0,2 M. Foi determinada absorvância do Ca no fotômetro de absorção. Retirou-se 5 mL e descartou-se o restante, Retornando-se ao copo os 5 mL do extrato e adicionando-se 10 mL de água destilada Determinou-se a absorvância do Mg no fotômetro de absorção.

A seguir são descritos os procedimentos de cálculo para a determinação da concentração de cálcio e magnésio.

Cálcio:

Curva padrão do cálcio:

$$Y = 0,049037X - 0,0004573X^2$$

$$R^2 = 0,9992$$

Fator de concentração calculado para o ponto de 3 mg L<sup>-1</sup> : fc 0,0213 mg L<sup>-1</sup> por ml abs.

Fator de diluição: fd = 240

Para a determinação do teor de cálcio no solo utilizou-se a expressão:

$$\text{Ca (Cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \frac{\text{Leitura} \times \text{fc} \times \text{fd}}{200} \quad (17)$$

Onde: Ca é a oncentração de Cálsio; Fc é o Fator de Concentração; Fd: Fator de diluição;

Magnésio:

Curva de padrão do Magnésio:

$$y = 0,429X$$

$$R^2 = 0,998$$

O fator de concentração para o ponto 0,3 mg L<sup>-1</sup> foi de 0,00229 mg L<sup>-1</sup> e o fator de diluição foi de 720. Para o cálculo do teor de Mg no solo foi utilizada a expressão:

$$\text{Mg (cmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \frac{\text{Leitura} \times \text{fc} \times \text{fd}}{121,5} \quad (18)$$

Onde Mg é a concentração de Magnésio; Fc é o Fator de Concentração e o fd é o Fator de diluição;

As determinações do conteúdo de alumínio no solo e da capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva do solo foram realizadas de acordo com a metodologia descrita em EMBRAPA (1997), sendo:

CTC – Extração:

Foram pesados 7,5 g de solo, colocado em erlenmeyer de 250 mL, adicionou-se 150 mL de solução de KCl N. Fechou-se com rolha de

borracha e agitou-se com movimentos circulares, evitando molhar a rolha. Foi pipetado para erlenmeyer de 200 mL duas alíquotas de 50 mL da parte sobrenadante da solução, para determinação do alumínio extraível, cálcio + magnésio e cálcio trocáveis.

### 3.15.3.1 Alumínio Trocável

Em uma das duas alíquotas de 50 mL obtidas na extração com KCl N, adiciono-se 3 gotas do indicador azul de bromotimol e foi titulado com solução de NaOH 0,025 N, até a coloração verde azulada persistente. Para a determinação da concentração de alumínio trocável, utilizou-se a expressão:

$$\text{Al trocável (cmol}_c\text{/kg)} = \text{mL NaOH Equação (19)}$$

Onde: Al trocável é a concentração de Alumínio trocável e mL NaOH é o volume de Hidróxido de Sódio.

A análise da quantidade de matéria orgânica no solo foi feita de acordo com os protocolos descritos em EMBRAPA (1999).

Para o cálculo da matéria orgânica, foi calculado primeiramente o carbono total. Com isso, foram peneirados aproximadamente 20g de solo, triturado em gral e passar em peneira de 80 mesh. Pesou-se 0,5 g do solo triturado e colocou-se em erlenmeyer de 250 mL. Posteriormente foi adicionar 10 mL (pipetados) da solução de dicromato de potássio 0,4N. Incluiu-se um branco com 10 mL da solução de dicromato de potássio e anotou-se o volume de sulfato ferroso amoniacal gasto. Colocou-se um tubo de ensaio de 25mm de diâmetro e 250mm de altura cheio de água na boca do erlenmeyer, funcionando este como condensador.

Foi aquecido em placa elétrica até a fervura branda, durante 5 minutos. Após esfriar, juntou-se 80 mL de água destilada, medida com uma proveta, 2 mL de ácido ortofosfórico e 3 gotas do indicador difenilamina. Titulou-se com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,1N até que a cor azul desaparecesse, cedendo lugar à verde. Anotou-se o volume gasto. Para o cálculo utilizou-se:

$$C \text{ (g/kg)} = (40 - \text{volume gasto}) \times f \times 0,6 \quad (20)$$

Onde C é a concentração de Carbono Total e  $f = 40/\text{volume}$  sulfato ferroso gasto na prova em branco.

A percentagem de matéria orgânica foi calculada multiplicando-se o resultado do carbono orgânico por 1,724 conforme demonstrado expressão abaixo. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média do húmus, o carbono participa com 58%.

$$\text{Matéria orgânica (g/kg)} = C \text{ (g/kg)} \times 1,724 \quad (21)$$

A determinação do pH do solo foi feita mediante a utilização de um pHmetro, sendo o aparelho da marca Tekna, modelo T-1000.

### 3.16 PREPARO DAS AMOSTRAS E DETERMINAÇÃO DOS METAIS

Foram pesadas 20 g de solo e encaminhadas para a secagem em estufa à temperatura de 105°C por duas horas utilizando-se vidraria básica de laboratório (Becker 50 mL) para sua deposição. Após o quartamento e a secagem em estufa as amostras foram moídas manualmente em gral com pistilo, objetivando reduzir ao máximo a granulometria da amostra reduzindo os desvios do feixe de Raios-X e assim não influenciando na eficiência das determinações.

As amostras de solo foram então comprimidas em prensa manual em matriz apropriada formando uma pastilha sólida e compacta que foi encaminhada para a análise. A pastilha foi formada usando 10 toneladas de pressão por 10 minutos. Este procedimento aglomera as partículas tornando-as um aglomerado cerâmico cujo resultado analítico reflete-se num padrão ideal para análise por EDXRF.

As análises foram realizadas utilizando um Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva, do modelo Shimadzu EDX-720. As seguintes condições de operação do equipamento foram selecionadas: tensão do tubo de 15 keV (Na a Sc) e 50 keV (Ti a U) com corrente no tubo 184  $\mu\text{A}$  e 25  $\mu\text{A}$  respectivamente, colimador de 10 mm, tempo morto do detector de 40% e 39%, sob vácuo e detector de Si (Li) refrigerado com nitrogênio líquido (PATACA; BORTOLETO; BUENO, 2005), tempo real de integração de 200 segundos, diferentemente do utilizado por Wastowski et al. (2010) que utilizou 300 s. O método analítico usado é denominado método dos Parâmetros Fundamentais

(FP), este método permite a obtenção da curva de sensibilidade do equipamento para cada elemento de interesse, quando uma amostra de composição química conhecida é submetida a parâmetros instrumentais bem definidos, a curva de sensibilidade do equipamento relaciona a intensidade fluorescente teórica calculada e a medida para cada elemento (BONA et al. 2007; WASTOWSKI et al. 2010).

No presente trabalho foram analisados os valores totais de Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Magnésio (Mg), Potássio (K), Bário (Ba), Fósforo (P), Manganês (Mn), Silício (Si) e Zinco (Zn).

### 3.17 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Para a determinação desses parâmetros foi utilizado o método “Cornell Sprinkle Infiltrometer”, descrito por Van Es; Schindelbeck (2003), posteriormente utilizado por Santi et al. (2007) e Santi et al. (2012). Trata-se de um simulador portátil de precipitação com volume de 20,6 L, com 69 tubos gotejadores (Figura 11) na sua parte inferior, e de diâmetro de 0,063 cm e 19 cm de comprimento cada um. Esse simulador é fixado sobre um cilindro de 24 cm de diâmetro e conta com um sistema de regulação de entrada de ar o qual permite simular diferentes intensidades de precipitação.

Figura 11: Método Cornell Sprinkle Infiltrometer em uma área de pastagem na bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim



O “Cornell Sprinkle Infiltrometer” permite trabalhar com diferentes intensidades de precipitação a partir da alteração para mais ou para menos da altura da extremidade inferior do cano de entrada de ar (parte em contato com a água), em relação ao fundo do recipiente que condiciona a água. Essa estratégia força uma entrada maior ou menor de ar ampliando ou diminuindo, conseqüentemente, a intensidade do gotejamento. Esse método permite calcular além da taxa de infiltração o escoamento superficial (SANTI, 2007).

A intensidade da precipitação foi obtida a partir da expressão utilizada por Santi (2007):

$$IC = (H1 - H2) / T_f \quad (22)$$

Onde: IC é a intensidade da precipitação; H1 é a leitura inicial do volume de água na régua do infiltrômetro; H2 é a leitura final do volume de água na régua do infiltrômetro e Tf é o intervalo de tempo entre uma leitura e outra, de três em três minutos.

O escoamento superficial foi determinado pela expressão abaixo:

$$Es = Vt/(457,30 * t) \quad (23)$$

Onde: Es é o escoamento superficial; t é o intervalo de tempo entre as coletas da água escoada (três minutos nesse trabalho) e Vt o volume de água coletada, sendo a área do anel de 457,30 cm<sup>2</sup>.

Então, a infiltração de água foi determinada da seguinte maneira:

$$Ia = IC - Es \quad (24)$$

Onde: Ia é a infiltração de água; Ic é a intensidade da chuva e Es é o escoamento superficial.

### 3.18 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

A resistência a penetração foi determinada por um penetrômetro de campo da marca FALKER, modelo PenetroLOG-PLG1020, o cone utilizado possui diâmetro de 12,83 mm, a aquisição dos dados foi realizada a cada centímetro, sendo avaliada a resistência a penetração até 20 centímetros de profundidade, no momento da avaliação buscou-se manter a velocidade de inserção abaixo de 50 mm/s. Foram realizadas cinco repetições por ponto avaliado. Em conjunto com a resistência a penetração foi coletada amostras para determinação da umidade do solo. A Figura 12 ilustra a utilização do PenetroLOG em uma área de mata nativa da bacia hidrográfica em estudo.

Figura 12: Utilização do PenetroLOG em uma área de mata nativa na bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim, 2011.



### 3.19 EFETIVIDADE DO COMITÊ DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS VACACAÍ E VACACAÍ-MIRIM

As ações do CGBHRV, as quais foram objeto da avaliação, foram selecionadas a partir da leitura e sistematização das discussões, deliberações e projetos aprovados dispostos nas respectivas Atas de Reuniões Ordinárias e Extraordinárias. As atas avaliadas foram obtidas junto à presidência e correspondem ao período de 14 de dezembro de 1999 a 04 de novembro de 2011, totalizando 57 atas, sendo a Ata nº 57 não encontrada/fornecida.

Com base nas atas do Comitê foi efetuado um levantamento dos recursos financeiros do órgão, além de uma avaliação referente ao atendimento das demandas dos municípios que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim pelo comitê.

A fim de mensurar as demandas dos municípios, estas foram classificadas de acordo com os critérios descritos na Tabela 7.

Tabela 7: Critérios de classificação das demandas dos municípios

Indicador	Descrição
Ação	Relacionam-se a implementação de sistemas de gestão
Apresentação de projeto	Refere-se a apresentação dos resultados do projeto e dos estudos decorrentes do mesmo
Encaminhamento de projeto	Refere-se ao desenvolvimento de projetos e o seu encaminhamento ao órgão financiador
Impacto Ambiental	Refere-se a ocorrência de impactos ambientais na bacia
Liberação de recursos para projeto	Refere-se a aprovação e liberação de recursos para projetos aprovados pelo órgão financiador
Obras	Refere-se a aprovação de medidas estruturais na bacia
Possibilidade de desastre ambiental	Refere-se a possibilidade de ocorrência de desastre ambiental na bacia
Realização de evento	Refere-se a realização de eventos de gestão ambiental e recursos hídricos na bacia, por parte do comitê

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 ÁREAS DE INFILTRAÇÃO MÁXIMA DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ MIRIM – RS**

#### **4.1.1 Mapas de uso e ocupação do solo – Profundidade das raízes**

##### **4.1.1.1. Ênfase no Cultivo da Soja**

No mês fevereiro de 2010, a principal época do cultivo da soja, foi determinado o uso e ocupação do solo (Figura 13). Na Tabela 8 são apresentadas as áreas referentes a cada uso no ano de 2010

Figura 13: Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2010 na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, RS, 2010.

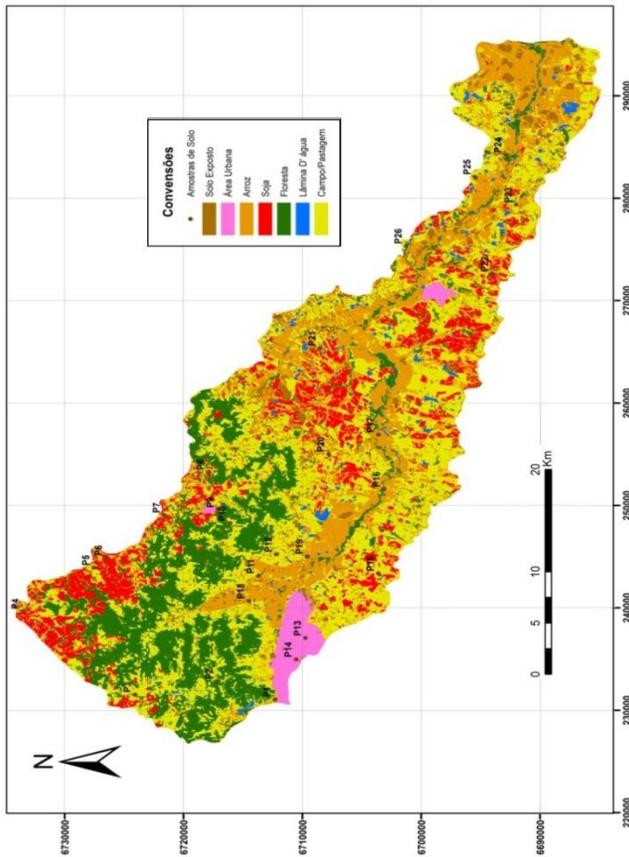


Tabela 8: Descrição das áreas de uso do solo para o ano de 2010.

<b>Classe</b>	<b>Area (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Solo exposto</b>	<b>13704,34</b>	<b>11,28</b>
<b>Área urbana</b>	<b>2953,56</b>	<b>2,43</b>
<b>Arroz</b>	<b>28858,24</b>	<b>23,76</b>
<b>Soja</b>	<b>10102,62</b>	<b>8,31</b>
<b>Floresta</b>	<b>1966,82</b>	<b>1,62</b>
<b>Campo/Pastagem</b>	<b>52255,98</b>	<b>43,03</b>

#### 4.1.1.2 Ênfase no Cultivo do Arroz

A classificação do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim no mês de fevereiro de 2011 é ilustrada na Figura 14. Já a Tabela 9 ilustra as áreas referentes a cada uso do solo para o ano de 2011.

Figura 14: Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2011 na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, RS, 2011.

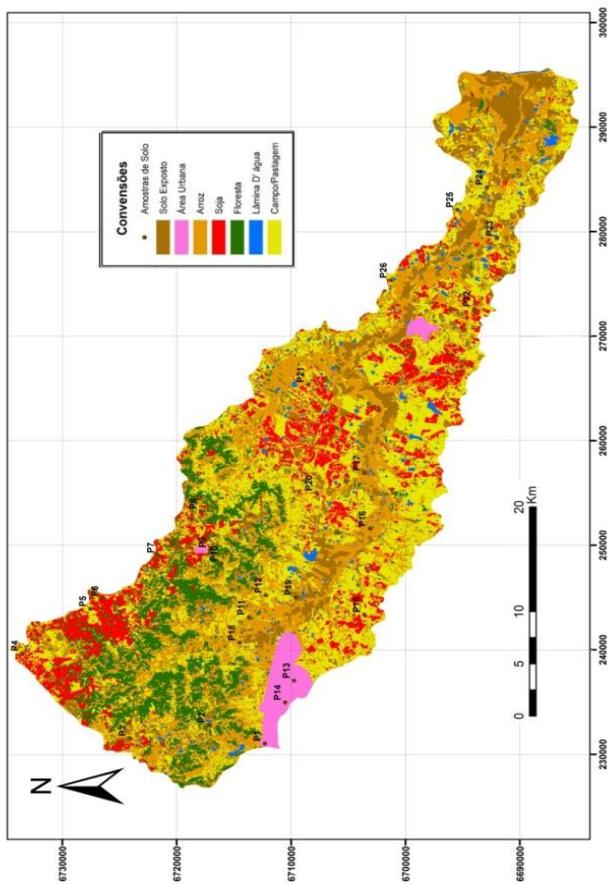


Tabela 9: Áreas de uso do solo para o ano de 2011

<b>Classe</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Solo Exposto</b>	16149,25	13,65
<b>Área Urbana</b>	2974,73	2,51
<b>Arroz</b>	33916,32	28,67
<b>Soja</b>	13076,29	11,05
<b>Floresta</b>	14811,09	12,52
<b>Lâmina D' Água</b>	2147,16	1,81
<b>Campo/Pastagem</b>	35242,21	29,79

Nos dois anos onde foi realizada a determinação do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, o único uso que teve diminuição no seu percentual foi campo/pastagem que caiu de 43,03% para 29,79%. Todos os demais usos apresentaram aumento nos seus percentuais, solo exposto passou de 11,28% para 13,65%, a área urbana passou de 2,43% para 2,51%, as áreas cultivadas com arroz tiveram o maior aumento, sendo que passou de 23,76 para 28,67%, a área cultivada com soja passou de 8,31% para 11,05% e a ocupação por lâmina de água foi de 1,62% para 1,81%.

#### **4.1.2 Profundidade das raízes nas diferentes classes de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim**

Em função da resolução das imagens, determinaram-se as seguintes classes de uso e ocupação do solo: solo exposto, área urbana, cultivo de arroz, cultivo de soja, floresta, lâmina de água, campo/pastagem. Cada classe assumiu um valor para a profundidade das raízes (mm), conforme apresentado na Tabela 10 (OLIVEIRA; FERREIRA, 2002).

Tabela 10: Valor utilizado para profundidade média das raízes

Uso e ocupação do Solo	Profundidade da raiz – $r_p$ (mm)
Solo Exposto	250
Área Urbana	0
Cultivo de Arroz	600
Cultivo de Soja	600
Floresta	2750
Lâmina de água	0
Campo/Pastagem	800

No que se refere à profundidade das raízes, cabe destacar o aumento das áreas ocupadas por florestas que possuem dentre todas as classes trabalhadas a maior profundidade das raízes (2750 mm), podendo ocasionar aumento no potencial de infiltração de água no solo.

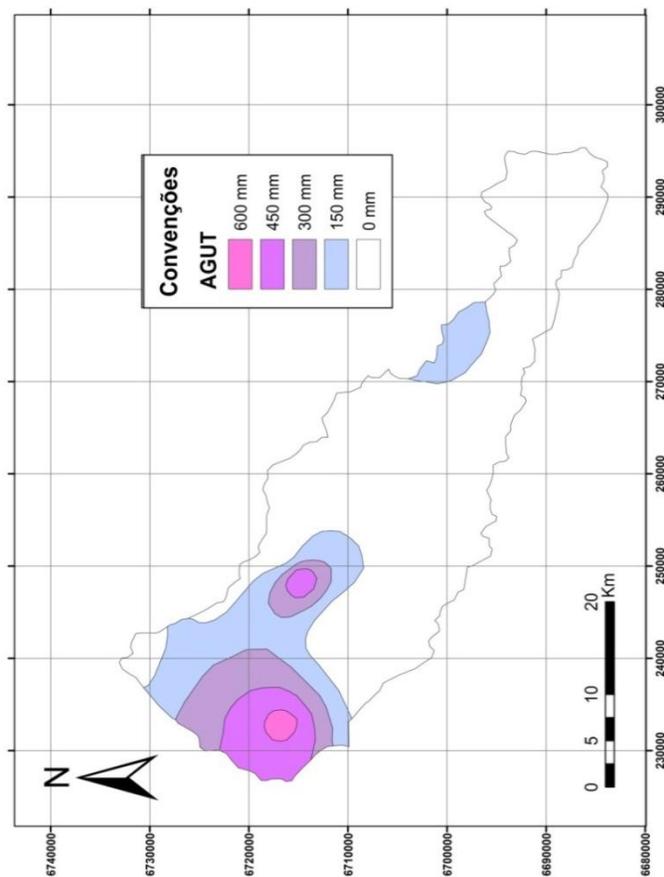
Porém, a diminuição da área ocupada pela classe campo/pastagem representa um decréscimo de áreas onde as raízes atingem em média 800 mm, acarretando consequentemente na diminuição do potencial de infiltração dessas áreas.

#### 4.1.3. Quantidade máxima de água no solo disponível para evapotranspiração - AGUT

Os valores de AGUT na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, variaram de 0 a 600 mm, sendo que os maiores valores foram observados na região oeste, onde predominam as regiões mais altas e solo ocupado por áreas de mata nativa na bacia hidrográfica (Figura 15). Já os menores valores foram observados nas demais regiões.

Os maiores valores de AGUT foram observados nos solos classificados como Argissolo Vermelho e Neossolo Litólico sob uso de mata nativa. Esse fato pode ser explicado pela baixa densidade do solo sob o presente uso, o que facilita a infiltração de água ao longo do perfil. Zwirter et al. (2011) em estudo sobre infiltração de água no solo sob diferentes usos, afirmaram que as áreas de mata nativa apresentam uma maior velocidade de infiltração de água, diferente do que ocorre em áreas de agricultura ou ainda de pastagens, onde ocorre a modificação das propriedades físicas do solo.

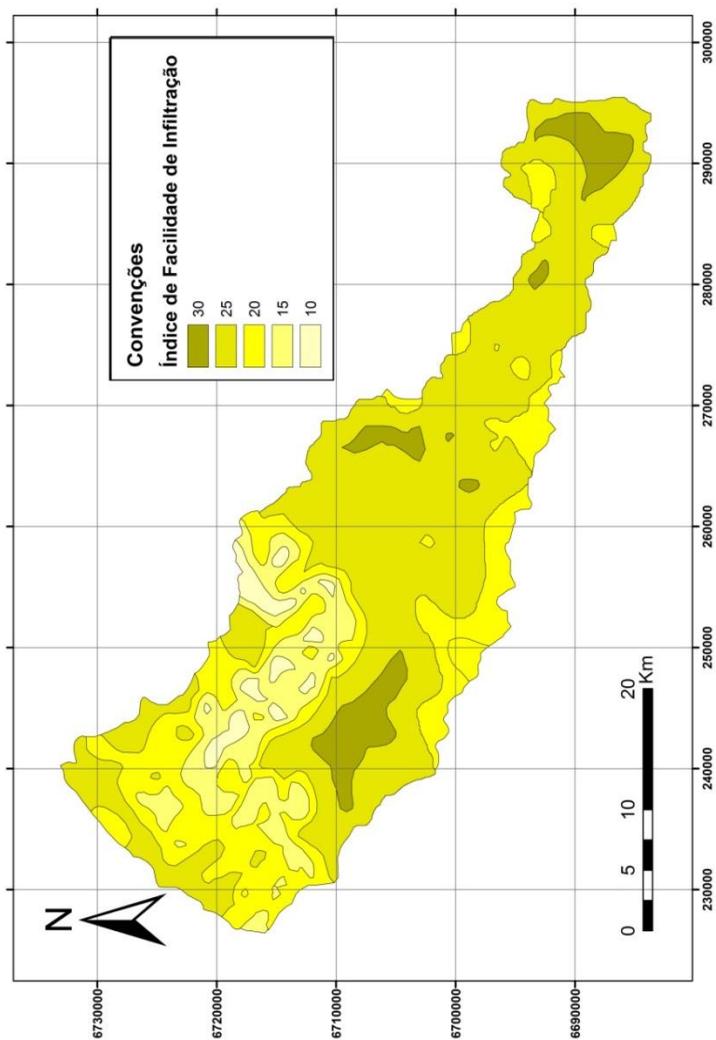
Figura 15: Variação do AGUT na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim-RS, 2011.



#### 4.1.4. Índice de facilidade de infiltração - $I_{FI}$ (2010 - 2011)

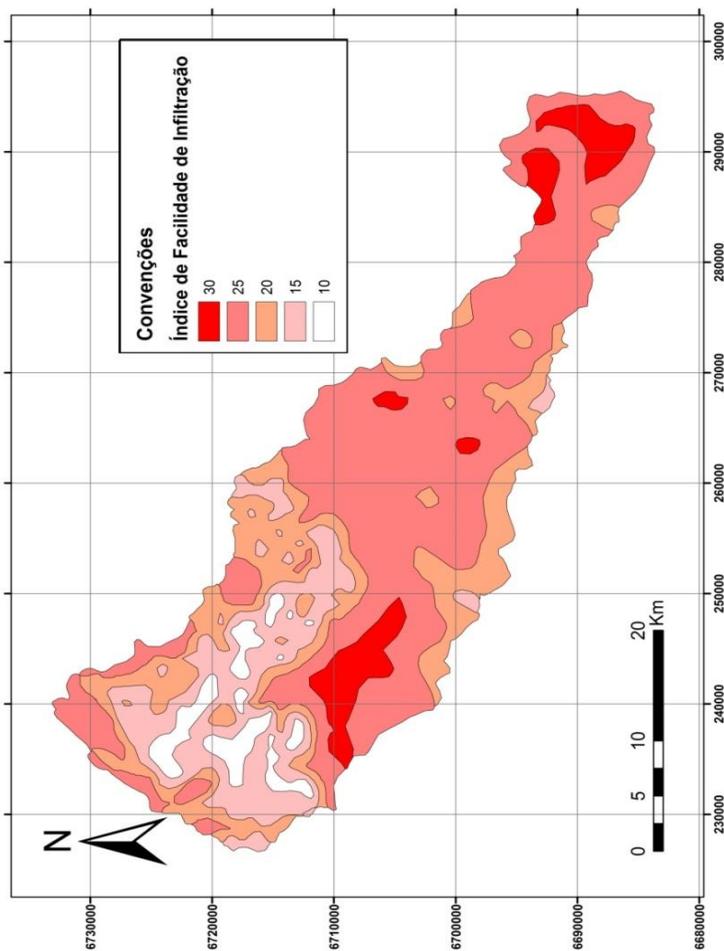
O  $I_{FI}$  teve seus maiores valores no solo classificado como Argissolo Vermelho e Planossolo Háptico (Figura 16), o que pode ser relacionado ao baixo teor de argila apresentado nesses solos, o que

facilita a infiltração da água ao longo do perfil. Esse parâmetro leva em consideração as condições apresentadas na Tabela 1, onde é muito dependente da topografia, declividade e tipo de solo. No caso do Planossolo, vários autores, como Bamberg et al. (2009), por exemplo, afirmam que o mesmo possui baixa taxa de infiltração de água, segundo Rosa et al. (2011) esses solos apresentam característica bastante peculiar, o hidromorfismo, que é motivado pelo relevo predominantemente plano, associado à presença de um horizonte B de textura argilosa que impermeabiliza o solo, impedindo a infiltração da água. Porém, ao verificar que essas áreas estão localizadas geralmente nas áreas de menor declividade (áreas de várzea do Vacacaí-Mirim) e apresentam um alto AGUT, no peso da equação, obteve-se uma grande taxa de infiltração no presente estudo.

Figura 16:  $I_{FI}$  na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim em 2010.

A Figura 17 apresenta a variação do  $I_{FI}$  para o ano de 2011 obtida pelo método DRASTIC para a bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim-RS.

Figura 17:  $I_{FI}$  na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim em 2011.

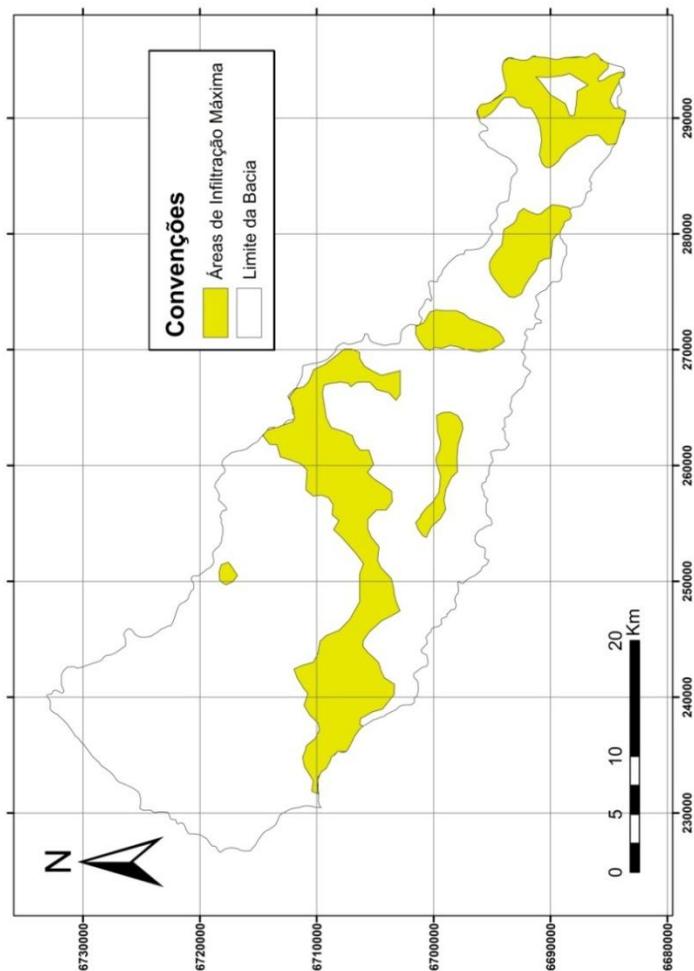


Como podem ser observados, os valores variaram de 10 a 30, onde os menores valores foram observados nas regiões mais altas da bacia, onde predominam áreas de mata nativa, enquanto os maiores valores estiveram presentes na região central, oeste e nas regiões mais baixas onde predominam as áreas de várzea de cultivo de arroz.

Os maiores valores de infiltração são em consequência principalmente da ocorrência do solo tipo A, classificado pela Soil Conservation Service, onde esses tipos de solos apresentam baixo potencial de escoamento direto e elevadas intensidades de infiltração, mesmo quando completamente umedecidos. Incluem principalmente areias profundas com drenagem boa ou excessiva. Esses solos possuem uma elevada permeabilidade (DAVES, 1976; OLIVEIRA; FERREIRA, 2009). Outro fator importante é o relevo do terreno apresentar declive menor que 2% e apresentar um AGUT menor que 50 mm, esses três fatores em conjunto proporcionam condições em que ocorra uma maior taxa de infiltração de água no solo.

No que diz respeito às áreas de infiltração máxima, a Figura 18 ilustra quais áreas da bacia hidrográfica apresentaram tal condição. As áreas de infiltração máxima correspondem a 28.219,75 ha, ou seja, 24 % da área total da bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim.

Figura 18: Variação das áreas de infiltração máxima na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, RS, 2010.

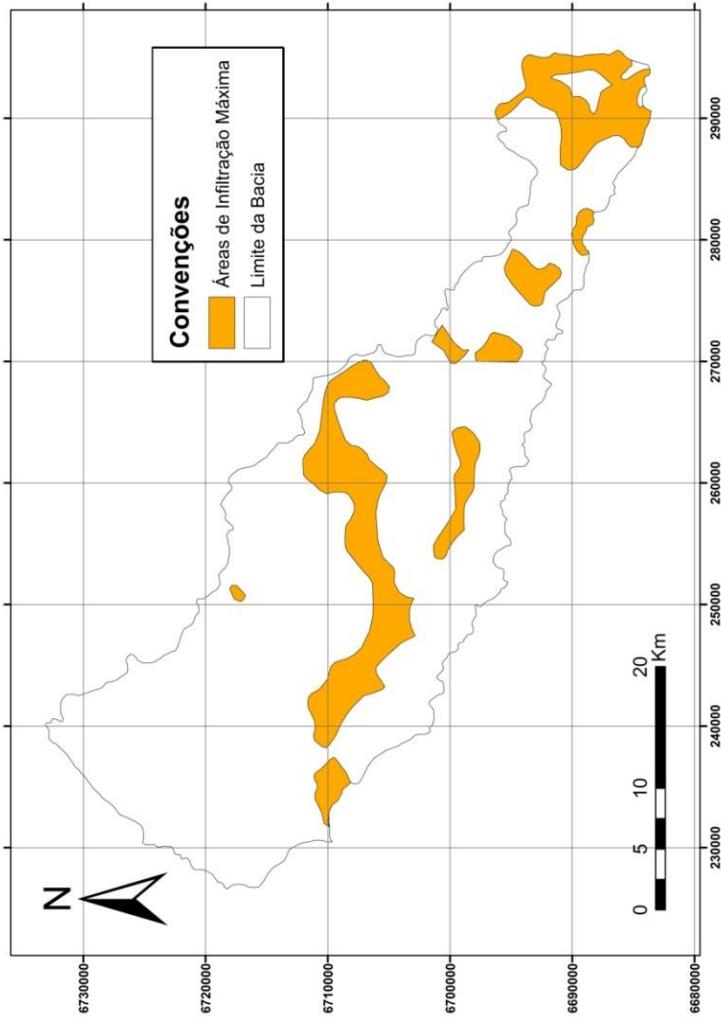


Os valores de infiltração máxima foram identificados nas áreas ocupadas por campo nativo, pastagem, cultivo de arroz e área urbana. A existência dessas áreas pode estar relacionada com o sistema de

conservação e manejo do solo, onde não ocorrem alterações nas propriedades físicas, ocasionando uma maior infiltração de água ao longo do perfil. Nesse contexto Silva; Andrade; Silva. (2006) diz que um solo com boa qualidade estrutural determina, além de uma maior infiltração ao longo do seu perfil, uma redução do escoamento superficial e, em consequência, um melhor controle da erosão e carreamento de sedimentos.

Com relação ao ano de 2011, na Figura 19 pode-se verificar a variação da infiltração máxima na bacia em estudo. Pode-se identificar que ocorreu a infiltração máxima em 28.823,50 ha da área da bacia o que corresponde a cerca de 18,55% do total da área. Com relação ao ano de 2011, com o uso da metodologia DRASTIC, verificou-se que a infiltração máxima ocorreu em pontos de cultivo de arroz, pastagem e campo nativo. Com relação a 2010, o que pode ser observado é que área urbana não apresentou valores de infiltração máxima, podendo ser devido ao crescimento área parcialmente ou totalmente impermeabilizada, causando degradação nas propriedades do solo e aumentando o escoamento superficial, também houve uma diminuição em relação a área total (redução de 5,45%). Melo et al. (2005) afirmam que o processo de impermeabilização das áreas, característico de uma área urbana, reduz a parcela de infiltração de água no solo, aumentando o escoamento superficial, alterando os parâmetros de rugosidade e retenção de água pelo meio.

Figura 19: Variação das áreas de infiltração máxima na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim em 2011

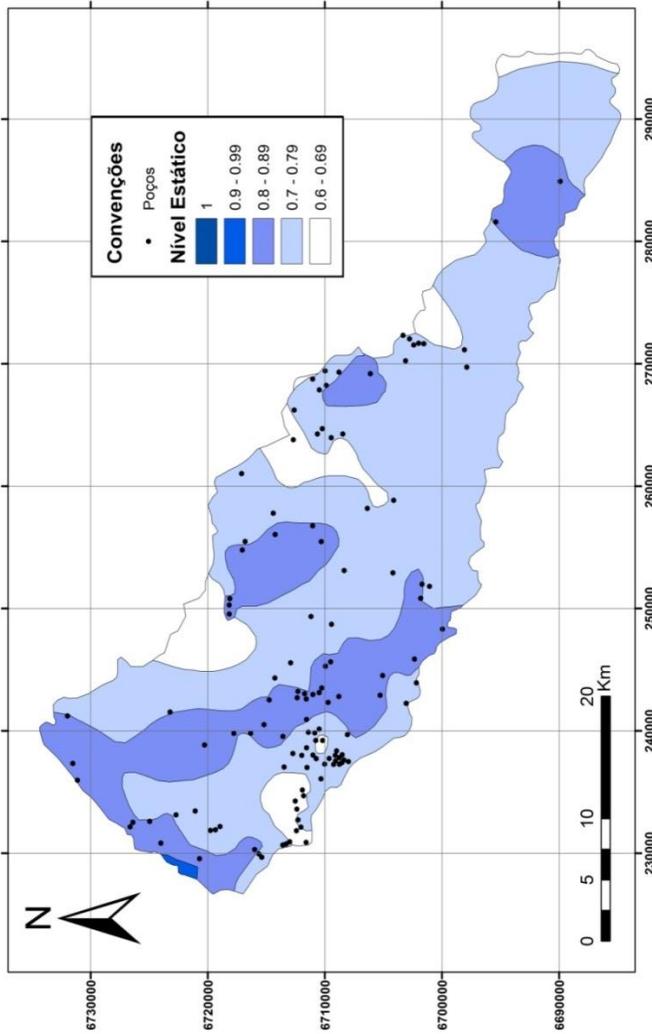


## 4.2 VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM

### 4.2.1 Nível estático

Os menores níveis estáticos estão sobre o afloramento da Formação Passo das Tropas, a sudoeste da bacia hidrográfica, em alguns locais da Formação Serra Geral ao noroeste, nas Formações Aluviais, principalmente na planície logo após a encosta e na parte sudeste próximo ao exutório, e nas partes mais declivosas próximo ao município de São João do Polêsine. As maiores profundidades do nível estático estão sobre a Formação Serra Geral a nordeste da bacia e, principalmente, sobre os afloramentos da Formação Santa Maria Membro Alemoa, nas proximidades da zona urbana de Santa Maria a oeste da bacia, e na parte central da bacia hidrográfica. O nível estático variou entre 0 a 87 m com média  $19,95 \pm 18,07$  m, sendo que dessa forma assumiram valores de D variando de 0,6 a 0,9 com média de  $0,77 \pm 0,08$  conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20: Variação do índice nível estático na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim

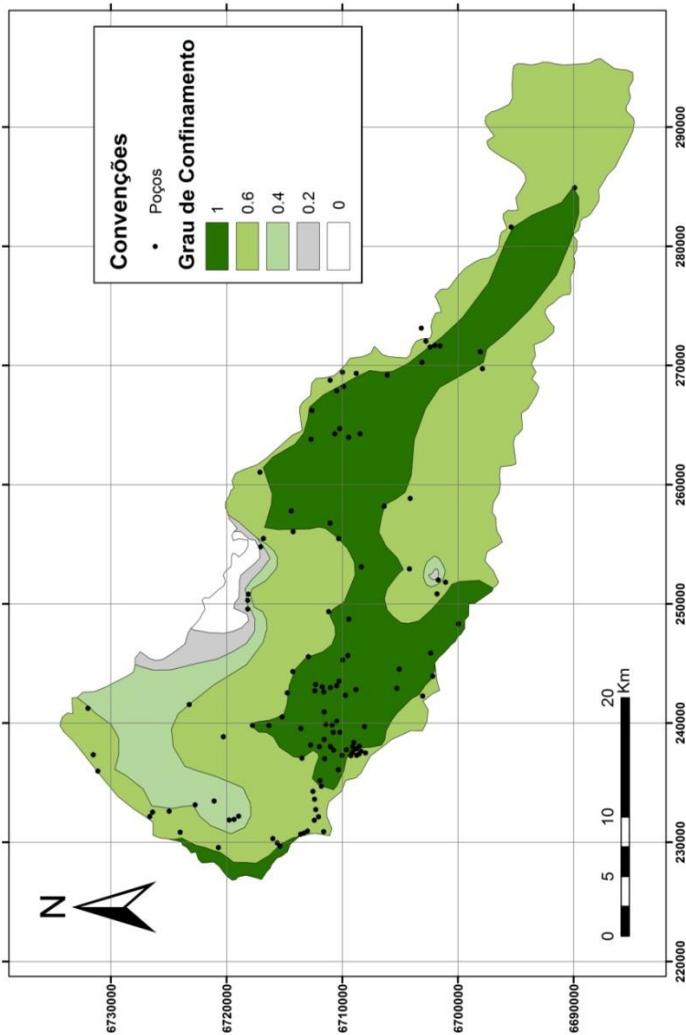


#### **4.2.2 Grau de confinamento da água subterrânea**

O grau de confinamento do aquífero na Bacia Hidrográfica apresentou-se como não confinado (nota  $G=1$ ), não confinado coberto (nota  $G$  entre 0,6 e 1), semiconfinado (nota  $G = 0,4$ ), confinado (nota  $G=0,2$ ) e surgência (nota  $G=0$ ).

Com base nos dados os valores do Grau de Confinamento variaram de 0 a 1, com média de  $0,91 \pm 0,23$ . Na Figura 21 são apresentadas as diferentes notas atribuídas a  $G$  na bacia hidrográfica.

Figura 21: Variação do índice Grau de Confinamento do Aquífero na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.



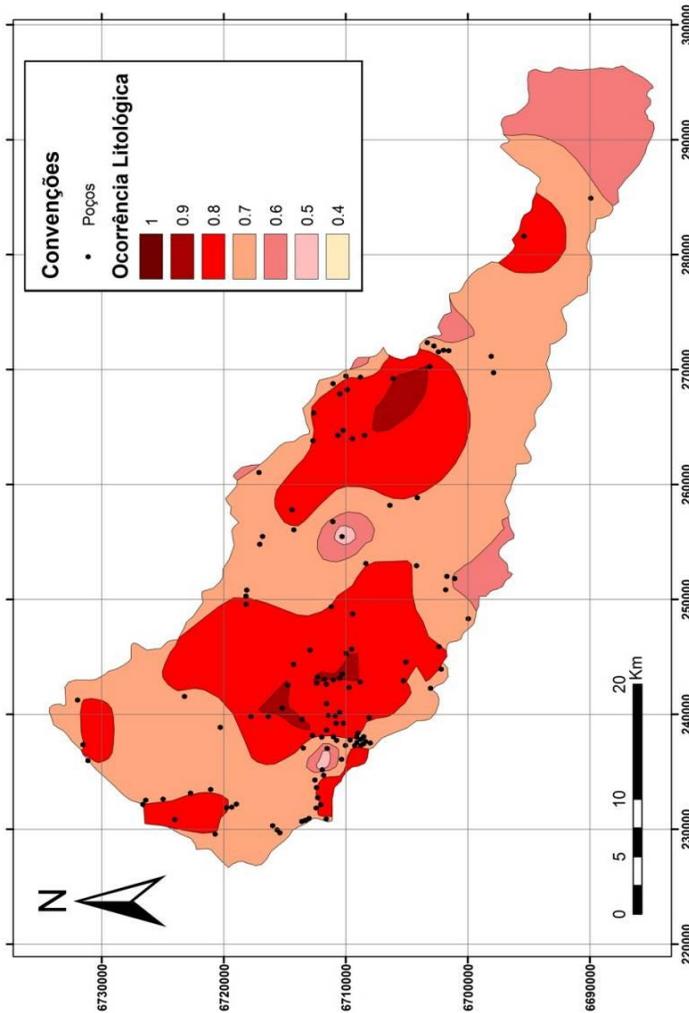
A partir do cartograma ilustrado nas Figuras 20 e 21 e com base no conhecimento geológico da área em questão, observou-se uma forte

correlação da variável (G=grau de confinamento hidráulico) com as áreas de ocorrência de rochas vulcânicas da Formação Geológica Serra Geral.

#### **4.2.3. Ocorrência Litológica**

As ocorrências litológicas encontradas na Bacia Hidrográfica foram: Serra Geral (Nota O = 0,8), Aluvião (Nota O = 0,9), Terraços Fluviais (Nota O = 0,9), Passo das Tropas (Nota O = 0,8), Caturrita (Nota O = 0,7), Sanga do Cabral (Nota O = 0,7), Membro Alemoa (Nota O = 0,5). Considerando-se todas as ocorrências litológicas os valores variaram de 0 a 0,9 com média de  $0,79 \pm 0,10$ , conforme apresentado na Figura 28:

Figura 22: Variação do índice ocorrência litológica na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.



A Formação Serra Geral, encontra-se no mapa hidrogeológico da CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - (1995) subdividida entre os derrames ácidos compostos por riolitos e riolitos

com disjunção tabular e os derrames básicos, compostos por basaltos e andesitos toleíticos, que formam aquíferos locais restritos às zonas fraturadas e contatos interderrames.

Salienta-se que a Formação Botucatu e os Depósitos Aluvionares apresentam fator porosidade/permeabilidade elevado, o que se reflete em uma facilidade maior de circulação de contaminantes.

A Formação Sanga do Cabral, definida por Sommer e Scherer (2002), é constituída por rochas sedimentares de origem fluvial e aparece no extremo Sul da Bacia Hidrográfica, esta camada é permeável e possui aquífero livre e confinado.

A formação Membro Alemoa é praticamente impermeável, na parte superior apresenta-se impermeável enquanto os siltitos e arenitos argilosos da base caracterizam-se como semipermeáveis.

#### **4.2.4 Vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos**

O Índice de Vulnerabilidade na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim variou entre 0 e 0,81, sendo o valor médio de  $0,56 \pm 0,17$  e a vulnerabilidade variou de Insignificante a Extrema.

Sete fontes (7/121) foram consideradas pertencentes a áreas com vulnerabilidade insignificante, onde o índice GOD variou de 0 a 0,10, sendo que o Grau de confinamento (Confinado e Surgência) contribuíram para os baixos valores (Tabela 11).

Tabela 11: Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Insignificante.

Nº	Cadastro SIAGAS	Município	UTM (N/S)	UTM (L/O)	Grau de confinamento	G	Ocorrência Litológica	O	Nível da Água (m)	D	Índice GOD	Classe GOD
13	4300008468	Itaara	6719657	231745	Confinado	0.2	Serra Geral	0.8	87	0.6	0.10	Insignificante
15	4300007768	Silveira Martins	6718357	250626	Confinado	0.2	Serra Geral	0.8	57.27	0.6	0.10	Insignificante
16	4300007769	Silveira Martins	6718131	249521	Confinado	0.2	Serra Geral	0.8	57	0.6	0.10	Insignificante
19	4300000766	Silveira Martins	6718000	249400	Confinado	0.2	Serra Geral	0.8	51	0.6	0.10	Insignificante
21	4300000762	Silveira Martins	6717900	250200	Confinado	0.2	Serra Geral	0.8	57.27	0.6	0.10	Insignificante
25	4300000726	S.J.do Polêsine	6717100	254800	Surgência	0	Serra Geral	0.8	0	0.9	0.00	Insignificante
111	4300000650	Santa Maria	6701800	252100	Surgência	0	Sanga do Cabral	0.7	0	0.9	0.00	Insignificante

Kemerich (2007) em estudo sobre vulnerabilidade natural a contaminação da água subterrânea no bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro de Santa Maria – RS encontrou valores de vulnerabilidade aplicando a metodologia *GOD* variando entre média a alta. Vogel (2008) na região da Quarta Colônia de Imigração Italiana do Rio Grande do Sul na classe desprezível, encontrou 26 poços, 5 em Ivorá, 10 em Nova Palma, 3 em Pinhal Grande, 1 em Dona Francisca, 1 em Faxinal do Soturno, 2 em São João do Polêsine e 4 em Silveira Martins.

Todos os poços inseridos na classe de vulnerabilidade desprezível estão localizados em áreas da Formação Serra Geral. Marion (2007) na cidade de Itaara – RS encontrou quatro poços com o índice de vulnerabilidade insignificante.

Kemerich (2010) em estudo sobre a vulnerabilidade natural a contaminação da água subterrânea em áreas ocupadas por cemitérios no município de Santa Maria – RS determinou a vulnerabilidade utilizando-

se a metodologia GOD, sendo que esta variou entre insignificante e baixa.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim apenas quatro fontes (4/121) estão situadas em regiões com a vulnerabilidade considerada baixa, sendo que o Índice GOD variou entre 0,12 e 0,22, conforme demonstra a Tabela 12.

Tabela 12: Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Baixa.

Nº	Cadastro SIAGAS	Município	UTM (N/S)	UTM (L/O)	Grau de confinamento	G	Ocorrência Litológica	O	Nível da Água (m)	D	Índice GOD	Classe GOD
10	4300000796	Santa Maria	6721000	233300	Semi-confinado	0,4	Serra Geral	0,8	43	0,7	0,22	Baixa
14	4300008464	Itaara	6718990	231961	Semi-confinado	0,4	Serra Geral	0,8	24,3	0,7	0,22	Baixa
52	4300000586	Santa Maria	6711901	235100	Semi-confinado	0,4	Membro Alemoa	0,5	56,25	0,6	0,12	Baixa
59	4300000563	Santa Maria	6711400	236800	Semi-confinado	0,4	Membro Alemoa	0,5	47,7	0,7	0,14	Baixa

Vogel (2008) na região da Quarta Colônia de Imigração Italiana do Rio Grande do Sul nas proximidades de Santa Maria, aplicando a metodologia GOD encontrou vulnerabilidade considerada baixa na área onde se localizam 16 poços, 3 em Ivorá, 6 em Nova Palma, 1 em Pinhal Grande e 6 em Silveira Martins. Esses poços estão localizados em áreas da Formação Serra Geral, formando aquíferos confinados, que impedem a infiltração de contaminantes. Marion (2007) na cidade de Itaara – RS encontrou 14 poços com vulnerabilidade baixa.

Do total de 121 poços cadastrados, 23 tiveram a vulnerabilidade considerada média, uma vez que diversas fontes estão situadas em áreas

onde o aquífero foi considerado Não Confinado, recebendo nota  $G = 1$ , conforme demonstrado na Tabela 13.

Tabela 13: Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Média.

Nº	Cadastro SLAGAS	Município	UTM (N/S)	UTM (L/O)	Grau de confinamento	G	Ocorrência Litológica	O	Nível da Água (m)	D	Índice GOD	Classe GOD
2	4300017733	Itaara	6731878	241140	Não Confinado (coberto)	0.6	Serra Geral	0.8	8	0.8	0.38	Média
3	4300008454	Itaara	6731209	235805	Não Confinado (coberto)	0.6	Serra Geral	0.8	6	0.8	0.38	Média
5	4300017732	Itaara	6726405	232430	Não Confinado (coberto)	0.6	Serra Geral	0.8	12	0.8	0.38	Média
6	4300008453	Itaara	6724931	232390	Não Confinado (coberto)	0.6	Serra Geral	0.8	12	0.8	0.38	Média
8	4300017731	Itaara	6723228	241528	Não Confinado (coberto)	0.6	Serra Geral	0.8	8	0.8	0.38	Média
9	4300000772	Santa Maria	6722700	233000	Não Confinado (coberto)	0.6	Serra Geral	0.8	9	0.8	0.38	Média
27	4300000728	S.J.do Polésine	6716800	255500	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	25	0.7	0.49	Média
30	4300000654	Santa Maria	6715600	229700	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	28	0.7	0.49	Média
43	4300017137	Santa Maria	6712570	229403	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	80.8	0.6	0.48	Média
44	4300008871	Restinga Seca	6712543	263783	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	50.43	0.6	0.48	Média
45	4300000557	Santa Maria	6712400	234200	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	59	0.6	0.48	Média
46	4300000564	Santa Maria	6712400	233500	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	60	0.6	0.48	Média
48	4300000583	Santa Maria	6712200	231700	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	50.45	0.6	0.48	Média
62	4300008865	Restinga Seca	6711092	268737	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	44	0.7	0.49	Média
70	4300000569	Santa Maria	6710501	239100	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	58.8	0.6	0.48	Média
76	4300000730	Santa Maria	6710200	255500	Não Confinado	1	Membro Alemoa	0.5	3	0.9	0.45	Média
79	4300008845	Restinga Seca	6709893	269378	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	26.24	0.7	0.49	Média
105	4300008855	Restinga Seca	6703242	272867	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	29	0.7	0.49	Média
108	4300008854	Restinga Seca	6702715	272188	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	24	0.7	0.49	Média
113	4300008858	Restinga Seca	6701732	271649	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	30	0.7	0.49	Média
115	4300000652	Santa Maria	6701100	251900	Não Confinado	1	Sanga do Cabral	0.7	13	0.7	0.49	Média
117	4300008887	Restinga Seca	6698111	271108	Não Confinado	1	Sanga do Cabral	0.7	23.4	0.7	0.49	Média
118	4300008889	Restinga Seca	6697921	269703	Não Confinado	1	Sanga do Cabral	0.7	30	0.7	0.49	Média

Das 121 fontes cadastradas, 53 encontra-se em área considerada de alta vulnerabilidade natural à contaminação, com o Índice GOD variando entre 0,56 e 0,64, sendo que o aquífero foi considerado não confinado nas áreas de todas as fontes de captação (Tabela 14).

Vogel (2008) na região da Quarta Colônia de Imigração Italiana do Rio Grande do Sul, encontrou na classe média oito poços, sendo um em Ivorá, dois em Dona Francisca, um em Faxinal do Soturno e quatro em São João do Polêsine. Esses poços estão localizados em áreas das formações geológicas Botucatu, Depósitos Aluvionares e Grupo Rosário do Sul. Na classe de vulnerabilidade alta em foram encontrados 16 poços, sendo estes cinco em Ivorá, sete em Faxinal do Soturno e quatro em São João do Polêsine.

Tabela 14: Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Alta.

Nº	Cadastro SIAGAS	Município	UTM (N/S)	UTM (L/O)	Grau de confinamento	G	Ocorrência Litológica	O	Nível da Água (m)	D	Índice GOD	Classe GOD
12	430000712	Santa Maria	6720100	238700	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	0.2	0.9	0.63	Alta
26	4300007671	S. J. do Polêsine	6717007	261108	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	12	0.8	0.56	Alta
29	430000653	Santa Maria	6715900	230000	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	0.5	0.9	0.63	Alta
33	430000729	S.J.do Polêsine	6714400	257800	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	30	0.7	0.63	Alta
36	430000558	Santa Maria	6713400	236700	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	23.07	0.7	0.56	Alta
38	4300008869	Restinga Seca	6713060	266757	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	45	0.7	0.56	Alta
39	430000717	Santa Maria	6712800	245400	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	32	0.7	0.56	Alta
40	430000578	Santa Maria	6712700	229600	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	12	0.8	0.56	Alta
41	430000629	Santa Maria	6712700	230700	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	29	0.7	0.56	Alta
50	430000588	Santa Maria	6712100	232600	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	20	0.8	0.64	Alta
53	430000584	Santa Maria	6711900	237800	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	8.27	0.8	0.64	Alta
54	430000587	Santa Maria	6711700	234600	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	31.7	0.7	0.56	Alta
55	430000626	Santa Maria	6711600	230600	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	22	0.7	0.56	Alta
56	430000711	Santa Maria	6711500	240900	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	10	0.8	0.64	Alta
57	430000559	Santa Maria	6711400	238300	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	12.5	0.8	0.64	Alta
58	430000562	Santa Maria	6711400	239900	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	14.38	0.7	0.56	Alta

61	4300000560	Santa Maria	6711100	249209	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	40	0.7	0.56	Alta
63	4300008852	Restinga Seca	6710881	256733	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	12	0.8	0.56	Alta
64	4300000574	Santa Maria	6710800	237900	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	36	0.7	0.56	Alta
65	4300000582	Santa Maria	6710800	237600	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	39.71	0.7	0.56	Alta
66	4300001785	Santa Maria	6710675	239250	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	25.3	0.7	0.56	Alta
69	4300001784	Santa Maria	6710600	239275	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	25	0.7	0.56	Alta
71	4300000567	Santa Maria	6710500	239925	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	31	0.7	0.56	Alta
72	4300000581	Santa Maria	6710400	235900	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	10	0.8	0.64	Alta
75	4300008850	Restinga Seca	6710263	264681	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	10	0.8	0.64	Alta
78	4300000603	Santa Maria	6709900	237100	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	14	0.8	0.64	Alta
81	4300001253	Santa Maria	6709800	237425	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	9.1	0.8	0.64	Alta
84	4300001252	Santa Maria	6709450	237350	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	17.54	0.8	0.64	Alta
85	4300008851	Restinga Seca	6709431	264048	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	18	0.7	0.63	Alta
87	4300000556	Santa Maria	6709200	237100	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	40	0.7	0.56	Alta
88	4300001254	Santa Maria	6709125	237500	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	9	0.8	0.64	Alta
89	4300000601	Santa Maria	6709050	238025	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	17	0.8	0.64	Alta
90	4300000602	Santa Maria	6709000	237400	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	8	0.8	0.64	Alta
92	4300008844	Restinga Seca	6708627	269346	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	11	0.8	0.56	Alta
93	4300001037	Santa Maria	6708500	237600	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	12	0.8	0.64	Alta
94	4300008848	Restinga Seca	6708430	264278	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	27	0.7	0.63	Alta
95	4300000719	Santa Maria	6708400	253000	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	35	0.7	0.56	Alta
96	4300000577	Santa Maria	6708300	236700	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	21	0.7	0.56	Alta
97	4300000608	Santa Maria	6708100	239600	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	5.3	0.8	0.64	Alta
98	4300000688	Restinga Seca	6706400	258200	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	44	0.7	0.56	Alta
101	4300000731	Santa Maria	6705400	242900	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	14.7	0.8	0.64	Alta
102	4300000683	Santa Maria	6705100	244500	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	12	0.8	0.64	Alta
103	4300000741	Restinga Seca	6704300	258900	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	35	0.7	0.56	Alta
104	4300000648	Santa Maria	6704200	252900	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	22	0.7	0.56	Alta
107	4300000676	Santa Maria	6703100	242200	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	9.6	0.8	0.64	Alta
109	4300008853	Restinga Seca	6702535	271652	Não Confinado	1	Caturrita	0.7	17.63	0.8	0.56	Alta
110	4300000679	Santa Maria	6702200	243900	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	19.6	0.8	0.64	Alta

112	430000651	Santa Maria	6701800	250800	Não Confinado	1	Sanga do Cabral	0,7	10,4	0,8	0,56	Alta
114	430000674	Santa Maria	6701500	245600	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0,8	13	0,8	0,64	Alta
116	430000671	Santa Maria	6699100	248000	Não Confinado	1	Sanga do Cabral	0,7	0,5	0,9	0,63	Alta
120	430008879	Restinga Seca	6690105	284795	Não Confinado	1	Sanga do Cabral	0,7	1	0,9	0,63	Alta
121	430008881	Restinga Seca	6689798	284952	Não Confinado	1	Sanga do Cabral	0,7	7,37	0,8	0,56	Alta

Na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, 35 das 121 fontes foram consideradas localizadas em áreas de vulnerabilidade extrema. O índice GOD variou entre 0,72 e 0,81, com média de  $0,73 \pm 0,03$ , conforme pode ser visualizado na Tabela 15. Dentre os fatores que contribuíram para a vulnerabilidade ser considerada extrema estão o grau de confinamento da água subterrânea, nas áreas onde se localizam todos os poços foi considerada não confinada e o nível da água que se apresentou próximo à superfície em todos os poços, o que facilita a entrada de contaminantes caso estes existam, recebendo assim nota “G” variando entre 0,8 e 0,9.

Tabela 15: Fontes de captação de água com Classificação GOD considerada Extrema.

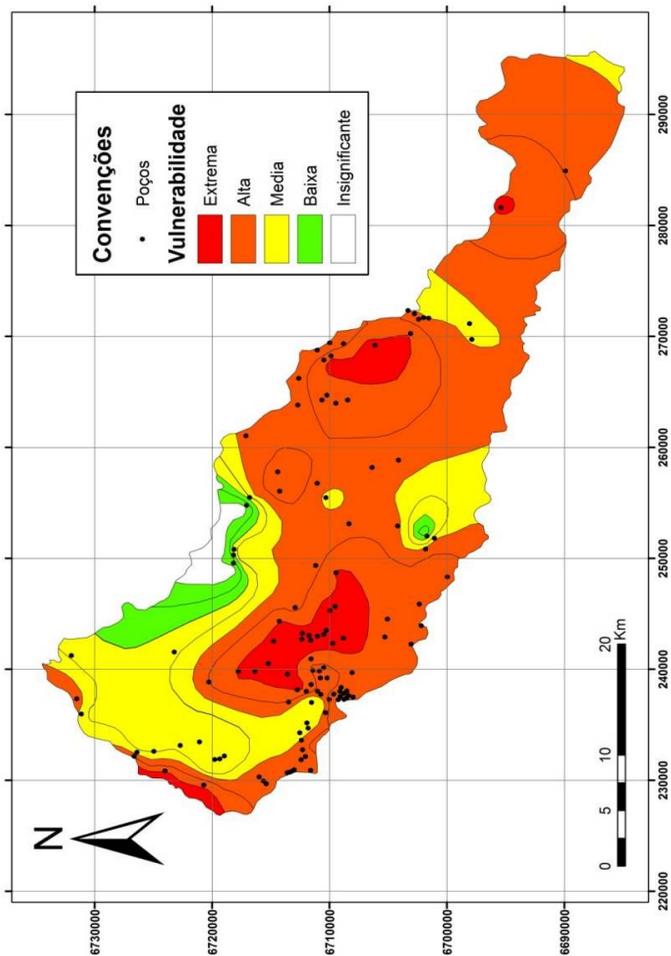
Nº	Cadastro SIAGAS	Município	UTM (N/S)	UTM (L/O)	Grau de confinamento	G	Ocorrência Litológica	O	Nível da Água (m)	D	Índice GOD	Classe GOD
1	430000774	Santa Maria	6732200	236400	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	4	0,9	0,72	Extrema
4	430000776	Santa Maria	6726800	231800	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	0	0,9	0,72	Extrema
7	430000795	Santa Maria	6723900	230600	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	0	0,9	0,72	Extrema
11	430008462	Itaara	6720601	229396	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	4,44	0,9	0,72	Extrema
17	430000764	Silveira Martins	6718100	250200	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	4,42	0,9	0,72	Extrema
18	4300007654	Silveira Martins	6718013	249703	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	2,37	0,9	0,72	Extrema
20	4300007767	Silveira Martins	6717903	250380	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	4,42	0,9	0,72	Extrema
22	430000763	Silveira Martins	6717900	250600	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	4	0,9	0,72	Extrema
23	430000765	Silveira Martins	6717900	249700	Não Confinado	1	Serra Geral	0,8	2,37	0,9	0,72	Extrema
24	430000713	Santa Maria	6717700	239700	Não Confinado	1	Aluvião	0,9	13	0,8	0,72	Extrema
28	430000714	Santa Maria	6716200	239700	Não Confinado	1	Aluvião	0,9	8	0,8	0,72	Extrema

31	430000715	Santa Maria	6715100	240400	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	2	0.9	0.81	Extrema
32	430000716	Santa Maria	6714600	242500	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	9	0.8	0.72	Extrema
34	430000724	Santa Maria	6714300	244300	Não Confinado	1	Terraços Fluviais	0.9	17.5	0.8	0.72	Extrema
35	430000868	Restinga Seca	6714108	256107	Não Confinado	1	Passo das Tropas	0.8	4	0.9	0.72	Extrema
37	430000725	Santa Maria	6713400	239500	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	13	0.8	0.72	Extrema
42	430000576	Santa Maria	6712600	237900	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	14.65	0.8	0.72	Extrema
47	430000575	Santa Maria	6712200	237900	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	9.37	0.8	0.72	Extrema
49	430000707	Santa Maria	6712200	242700	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	3	0.9	0.81	Extrema
51	430000708	Santa Maria	6712100	243100	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	5	0.8	0.72	Extrema
60	430000720	Santa Maria	6711400	242900	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	5	0.8	0.72	Extrema
67	430000849	Restinga Seca	6710646	264273	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	15	0.8	0.72	Extrema
68	430000721	Santa Maria	6710600	242900	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	4	0.9	0.81	Extrema
73	430000722	Santa Maria	6710400	243200	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	5.5	0.8	0.72	Extrem
74	430002022	Restinga Seca	6710360	267965	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	11	0.8	0.72	Extrema
77	430000718	Santa Maria	6710000	245200	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	2	0.9	0.81	Extrema
80	4300008847	Restinga Seca	6709812	268299	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	8	0.8	0.72	Extrema
82	430000677	Santa Maria	6709700	242300	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	9	0.8	0.72	Extrema
83	430000740	Santa Maria	6709600	245600	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	7	0.8	0.72	Extrema
86	430000723	Santa Maria	6709400	248700	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	20	0.8	0.72	Extrema
91	430000678	Santa Maria	6708900	242700	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	2	0.9	0.81	Extrema
99	4300008873	Restinga Seca	6706183	269134	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	1	0.9	0.81	Extrema
100	4300008872	Restinga Seca	6706047	269162	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	12	0.8	0.72	Extrema
106	4300008846	Restinga Seca	6703222	270332	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	14.93	0.8	0.72	Extrema
119	4300008876	Restinga Seca	6695491	281659	Não Confinado	1	Aluvião	0.9	20	0.8	0.72	Extrema

Vogel (2008) na região da Quarta Colônia de Imigração Italiana do Rio Grande do Sul, encontrou na classe de maior vulnerabilidade, denominada extrema, seis poços, cinco em Nova Palma e um em Faxinal do Soturno. Esses poços estão localizados em áreas da formação Botucatu, com aquíferos livres.

Marion (2007) na cidade de Itaara – RS encontrou três poços em área com vulnerabilidade classificada como extrema. Na Figura 23 é apresentada a espacialização da vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.

Figura 23: Variação da Vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea.



Da área total da Bacia Hidrográfica (1153,77 km<sup>2</sup>), 14,245 km<sup>2</sup> (1,23%) foram classificados como área de vulnerabilidade insignificante, 58,099 km<sup>2</sup> (5,03%) situam-se em área de vulnerabilidade baixa, 284,16 km<sup>2</sup> (24,62%) encontram-se em área com vulnerabilidade

considerada média, 718,50 km<sup>2</sup> (62,24%) situam-se em áreas com alta vulnerabilidade e 78,76 km<sup>2</sup> (6,82%) foram classificados como de vulnerabilidade extrema.

#### **4.2.5. O cadastramento de fontes alternativas de abastecimento e as pressões sobre os recursos hídricos subterrâneos**

Kemerich e Saucedo (2011) em cadastramento realizado no Bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro na Cidade de Santa Maria, cadastraram 54 fontes alternativas, sendo que 19 são poços escavados, 23 são poços tubulares, duas são fontes nascentes e 10 poços estão desativados.

Dos poços em atividade, 30 utilizam bombas submersas ou compressores e em 12, a água é retirada manualmente (poços com balde). Tais resultados demonstram a necessidade da ampliação do cadastro de fontes alternativas de água na Bacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim que apresenta apenas 121 fontes distribuídas em seus municípios constituintes (Itaara, Restinga Seca, São João do Polêsine, Santa Maria e Silveira Martins).

Outro fator preocupante são as condições das fontes de abastecimento e o conhecimento da importância da manutenção e riscos a saúde em virtude da utilização de água fora dos padrões de qualidade, destacando-se principalmente o consumo humano. Kemerich; Saucedo (2011) relatam que foram observados diversos poços, conforme a Figura 31, os quais não apresentaram conformidades de construção e/ou conservação conforme a NBR 12224/2006. Dentre estas inconformidades estava o selo de vedação ou sanitário inadequado ou insuficiente, inexistência de laje de proteção, falta de tampa ou tampa inadequada, ausência de tubo guia, detectando-se também que em alguns locais havia presença de fezes de animais nos arredores, acumulação de lixo, embalagens de produtos químicos, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24: Falta de manutenção e ocorrência irregularidades na disposição de resíduos especiais.



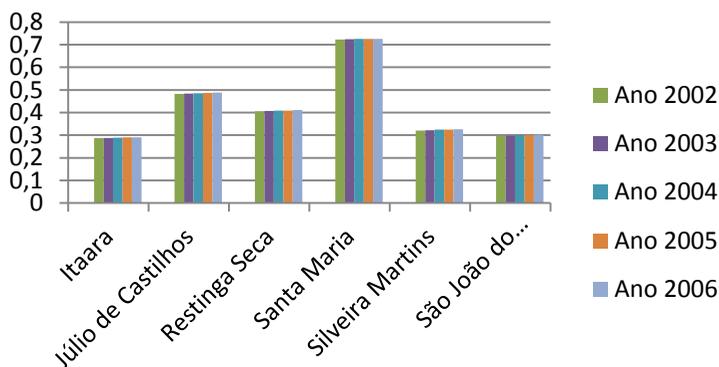
Todos esses fatores isolados ou em conjunto representam risco à saúde das pessoas que utilizam a água dessas fontes alternativas para consumo humano. Tais condições construtivas, aliadas à falta de limpeza e conservação do entorno dos poços e fontes nascentes, são fatores preocupantes que podem gerar a contaminação da água subterrânea, especialmente em poços escavados com valores baixos de nível estático, os quais podem sofrer influência da água oriunda do escoamento superficial e posterior infiltração no subsolo.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE RISCO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM COM O USO DE INDICADORES DE PERIGO E VULNERABILIDADE

##### 4.3.1. Índice condições de domicílio e Saneamento

A Figura 25 ilustra o Índice Condições de Domicílio e Saneamento nos municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.

Figura 25: Índice Condições de Domicílio e Saneamento entre os anos de 2000 a 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.



Para o índice condições de domicílios e saneamento, os valores variaram de 0,286 (município de Itaara no ano de 2002) a 0,725 (município de Santa Maria no ano de 2006) com média de  $0,422 \pm 0,001$ . Os municípios de Itaara, Júlio de Castilhos, Restinga Seca, Silveira Martins e São João do Polêsine apresentaram níveis classificados como baixo índice condições de domicílio e saneamento (valores entre 0 e 0,499), já o município de Santa Maria apresentou um mediano nível de desenvolvimento (valores entre 0,5 e 0,799).

Corvalán (2004) define saúde ambiental como sendo os aspectos da saúde humana e das enfermidades que são determinados por fatores ambientais. De acordo com a Funasa (2006), a Organização Mundial da Saúde (OMS) conceitua saúde ambiental como a parte da saúde pública que se ocupa das formas de vida, das substâncias e das condições em torno do homem que podem exercer alguma influência sobre a saúde e o bem-estar. Desta forma, a conservação e a proteção do meio ambiente assumem papel decisório nas medidas relativas à promoção da saúde nas populações.

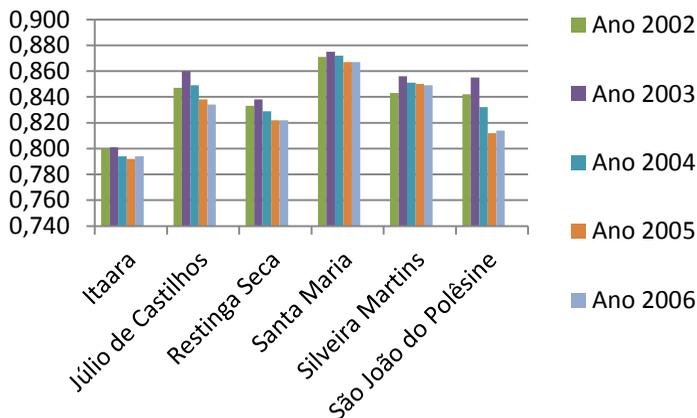
A infraestrutura sanitária deficiente desempenha uma nítida interface com a situação de saúde e com as condições de vida das populações dos países em desenvolvimento, nos quais as doenças infecciosas continuam sendo uma importante causa de morbidade e mortalidade (DANIEL, 2001). A prevalência dessas doenças constitui um forte indicativo da fragilidade dos sistemas públicos de saneamento.

Prüss et al. (2002) estimaram que a diarreia é responsável por 4,3% dos anos de vida perdidos ou com incapacitação (DALY) no mundo e que 88% desta carga de doenças é atribuída ao abastecimento de água, esgotamento sanitário e higiene inadequados. A maior concentração dessa carga recai em crianças dos países em desenvolvimento com condições impróprias de saneamento.

### 4.3.2. Índice educação

A Figura 26 ilustra o Índice Educação nos municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.

Figura 26: Índice Educação entre os anos de 2000 a 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.



Os índices de Educação variaram de 0,792 (município de Itaara em 2005) a 0,875 (município de Santa Maria em 2003), com média de  $0,837 \pm 0,007$ . Na área em estudo, o município de Itaara apresentou índices de educação tidos como medianos, nos anos de 2004, 2005 e 2006, onde os valores ficaram entre 0,5-0,799. Nos demais municípios o índice foi classificado como de alto nível (valores entre 0,8 e 1).

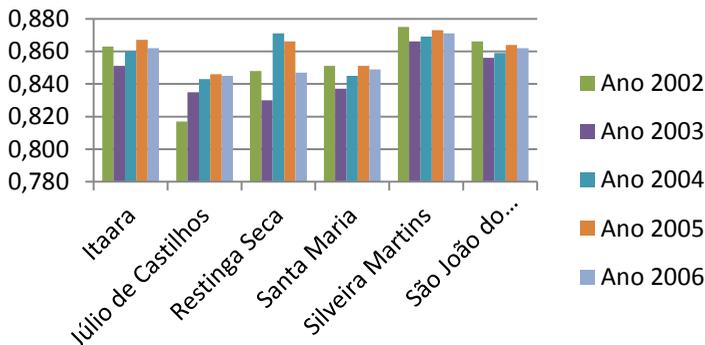
Para Kornhauser (2001), a educação é o cimento da construção do desenvolvimento humano sustentável. É preciso elaborar estratégias e programas de educação relacionados com o ambiente, no qual haja uma abrangência, tanto no ensino escolar como na educação informal, que adote a perspectiva da educação permanente a ser desenvolvida pelos poderes públicos, pelo setor produtivo, pelo comércio e pelas comunidades locais.

Percebe-se cada vez mais que os professores são as peças fundamentais no processo de conscientização da sociedade sobre os problemas ambientais, pois buscam desenvolver em seus alunos hábitos e atitudes sadias de conservação ambiental e respeito à natureza, transformando-os em cidadãos conscientes e comprometidos com o futuro do país.

#### **4.3.2. Índice saúde**

Na Figura 27 é apresentado o Índice Saúde nos municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.

Figura 27: Índice Saúde entre os anos 2000 a 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.



Os valores do índice Saúde variaram de 0,817 (município de Júlio de Castilhos em 2002) a 0,846 (município de Júlio de Castilhos em 2005), com média de  $0,855 \pm 0,008$ . Nesse índice, todos os municípios apresentaram valores classificados como altos (valores entre 0,8 e 1) no período analisado.

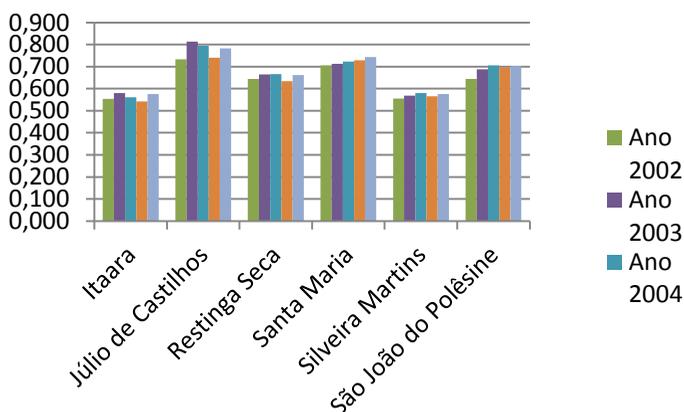
Todos os municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim apresentam o índice saúde considerados alto no período de 2000 a 2006, destacando-se como um ponto positivo, uma vez que as condições de saúde dos aglomerados humanos vêm sendo cada vez mais analisadas em função de progressão ou redução do desenvolvimento.

Sabe-se, já há muitos anos, que as populações mais pobres têm maior probabilidade de adoecer, perpetuando-se assim as condições de subdesenvolvimento. Há algumas evidências de que as manutenções de indicadores de saúde desfavoráveis e de iniquidades nas condições de vida podem comprometer o desenvolvimento, e que os benefícios na área da saúde podem favorecer o desenvolvimento, assim como uma melhor distribuição dos benefícios de um processo de desenvolvimento, que também podem acarretar na diminuição da pobreza e melhorar a saúde das populações (WHO, 2002).

### 4.3.3. Índice Renda

Na Figura 28 é apresentada a variação no Índice Renda entre os anos 2000 e 2006 nos municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.

Figura 28: Índice Renda entre os anos 2000 a 2006 na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.



O índice de Renda variou de 0,542 (município de Itaara em 2005) a 0,814 (município de Júlio de Castilhos em 2003), com média de  $0,661 \pm 0,019$ . Entre os anos de 2002 a 2006, os municípios de Itaara, Restinga Seca, Silveira Martins, São João do Polêsine e Júlio de Castilhos, apresentaram um nível mediano no quesito renda (valores variando de 0,5 a 0,799), já o município de Santa Maria apresentou valores altos de renda (valores entre 0,8 e 1), o mesmo ocorreu com na cidade de Júlio de Castilhos no ano de 2003.

Muitos problemas ambientais vêm da pobreza, contribuindo para uma espiral descendente em que a pobreza exacerba a degradação ambiental e a degradação ambiental exacerba a pobreza. Nas áreas rurais pobres, por exemplo, há ligações entre elevada mortalidade infantil, elevada fertilidade, elevado crescimento populacional e extensa devastação das florestas, na medida em que os produtores rurais

derrubam florestas para lenha e nova terra arável (SINCOMCAM, 2011).

Dada esta cadeia de causalidade, as políticas que reduzem a mortalidade infantil podem ajudar o ambiente, reduzindo o crescimento populacional e as pressões demográficas sobre ecossistemas frágeis. Abundam outros exemplos de pobreza que contribuem para a degradação ambiental. Assim, reduzir a pobreza pode desempenhar um papel central na proteção ambiental (SINCOMCAM, 2011).

Agravar as condições ambientais, incluindo o esgotamento de recursos naturais e a degradação de ecossistemas e dos seus serviços, atinge mais diretamente a classe de menor poder aquisitivo, que em alguns casos são obrigadas a migrarem para terras marginais mais propensas à degradação (SINCOMCAM, 2011).

Existem diversas razões para que os pobres rurais estejam localizados em áreas degradadas, além da causada pela pressão do crescimento populacional (LEONARD, 1989). Contudo, o fato de que uma proporção substancial da população pobre viva em ambientes degradados não demonstra por si só, que a pobreza causa degradação ambiental (PRAKASH, 1997).

Nos aglomerados urbanos as ocupações informais pelas famílias de baixa renda constituem atualmente o nicho da pobreza na ecologia da cidade, e grande parte dos pobres urbanos nos países do Terceiro Mundo não tem outra opção senão a de conviver com os riscos. O autor afirma, ainda, que o crescimento da urbanização informal nas últimas décadas multiplicou por dez ou mais vezes a probabilidade inerente de desastres nos ambientes urbanos, ampliando assim os riscos a que estão sujeitos à população residente (DAVIS, 2006).

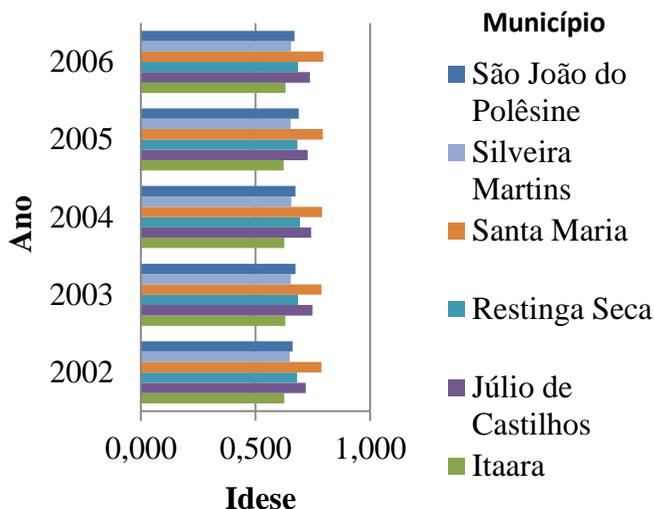
#### **4.3.4. Índice de desenvolvimento sócio econômico – Idese**

Segundo a FEE (2005), o Idese é um índice sintético, inspirado no IDH (índice de desenvolvimento humano), que abrange um conjunto amplo de indicadores sociais e econômicos, classificados em quatro blocos temáticos: educação, renda, saneamento e domicílios e saúde. Tem por objetivo mensurar e acompanhar o nível de desenvolvimento do Estado, de seus municípios e dos Coredes, informando a sociedade e orientando os governos (municipais e estaduais) nas suas políticas socioeconômicas. Este índice varia de 0 a 1 e, assim como o IDH, permite que se classifique o Estado, os municípios ou os Coredes em

três níveis de desenvolvimento: baixo (índices até 0,499), médio (entre 0,500 e 0,799) ou alto (maiores ou iguais a 0,800).

A Figura 29 apresenta o Índice de Desenvolvimento Sócio Econômico – IDESE para os municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.

Figura 29: Variação do Idese no período entre os anos de 2002 a 2006.



O parâmetro IDESE no ano 2002 apresenta o município de Santa Maria com o maior valor (0,788) e Itaara como o município com menor índice de desenvolvimento na Bacia Hidrográfica (0,626). Dessa maneira, todos os municípios apresentaram níveis de desenvolvimento considerados médios. Itaara, Santa Maria e Restinga Seca apresentaram o menor aumento no índice de desenvolvimento (0,001) já Silveira Martins teve o maior aumento no índice entre os seis municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim (0,005).

Júlio de Castilhos teve o maior aumento (0,029) no IDESE entre os seis municípios da Bacia Hidrográfica para o ano de 2003. Santa Maria apresentou regressão de 0,001 no IDESE passando para 0,787. Já Itaara e Júlio de Castilhos tiveram redução no índice de desenvolvimento no ano de 2004 (-0,004 e -0,005), São João do

Polêsine não apresentou aumento no IDESE e Restinga Seca teve o maior aumento (0,009).

O IDESE para o ano de 2005 aponta um decréscimo em relação ao ano anterior nos municípios de Júlio de Castilhos (-0,015), Restinga Seca (-0,011), São João do Polesine (-0,006) e Silveira Martins (-0,002), para o referido ano apenas Santa Maria apresenta um aumento de 0,002 no índice.

No ano de 2006 todos os municípios apresentaram aumento no índice de desenvolvimento comparado com o ano de 2005, sendo o menor aumento registrado para o município de Silveira Martins (0,001) e o maior aumento em Júlio de Castilhos (0,009).

A variação nos seis municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim nos seis anos de avaliação do IDESE (2000 a 2006) e a média nesse mesmo período é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16: Variação do Idese e média no período de 2000 a 2006.

<b>Município</b>	<b>Variação do Idese</b>	<b>Média Idese</b>
<b>Itaara</b>	0,008	0,627
<b>Júlio de</b>	0,029	0,735
<b>Restinga Seca</b>	0,012	0,686
<b>Santa</b>	0,009	0,791
<b>Silveira</b>	0,007	0,653
<b>São João do</b>	0,026	0,674

No período de 2002 a 2006 todos os municípios apresentaram aumento nos índices de desenvolvimento, o município com maior aumento foi Júlio de Castilhos com 0,029 e o menor aumento ocorreu no município de Silveira Martins (0,007).

Os valores médios do Idese na Bacia Hidrográfica variaram entre 0,627 (Itaara) e 0,791 (Santa Maria). Desse modo, todos os municípios nos seis anos de avaliação do IDESE apresentaram índices de desenvolvimento classificados como médio (entre 0,500 e 0,799).

Cabe destacar os baixos valores dos indicadores: Condições de Domicílio e Saneamento e Renda foram responsáveis pelos resultados do Idese nos municípios de Itaara, Júlio de Castilhos, Restinga Seca,

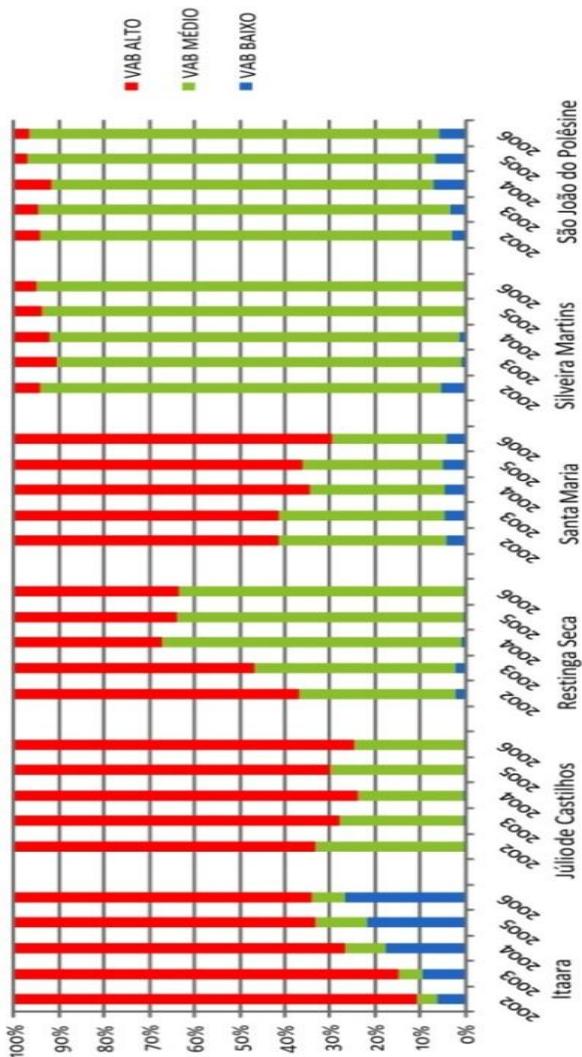
Silveira Martins e São João do Polêsine. Santa Maria apresentou valores considerados baixos apenas no indicador Renda.

#### **4.3.5. Perigo e Risco**

##### **4.3.5.1. Variação do potencial poluidor nas atividades nos Municípios constituintes da bacia hidrográfica**

A variação do potencial poluidor das atividades econômicas desenvolvidas na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, pode ser visualizado na Figura 30.

Figura 30: Variação do percentual de atividades com potencial poluidor baixo, médio e alto nos municípios da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim no período de 2002 a 2006.



Itaara apresentou acréscimo no percentual de atividades consideradas de baixo potencial poluidor no período de 2002 a 2006, variando entre 6,02 e 26,46%, também ocorreu acréscimo das atividades consideradas de médio potencial poluidor no período de 2002 (4,45%) a 2005 (11,32%), com leve queda no ano de 2006 (7,76%). Em decorrência de um aumento nas atividades com potencial poluidor considerado baixo ou médio. As atividades com potencial poluidor alto apresentaram um decréscimo de 2002 a 2006, passando de 89,53% para 65,78%.

Júlio de Castilhos apresenta a maioria de suas atividades classificadas como de alto potencial poluidor, sendo que entre 2002 e 2006, estas atividades apresentaram valores variando entre 66,67 e 76,25%. Destacam-se também para o município as atividades de médio potencial poluidor, estas variando entre 23,4 e 33,15% no período de 2002 a 2006. As atividades consideradas menos impactantes do ponto de vista ambiental apresentam no mesmo período uma variação entre 0,14 e 0,35%.

O município de Restinga Seca apresenta significativa redução no percentual de atividades classificadas como de alto potencial poluidor, sendo que no período de 2002 a 2006 os valores variaram entre 63,15 e 32,75%. Com relação às atividades de médio potencial poluidor, estas passaram de 34,78% em 2002 para 63,54% em 2006. A existência de atividades classificadas como de baixo potencial poluidor também apresentaram decréscimo, variando de 2,07 em 2002 para 0,17 em 2006.

No período de 2002 a 2006 Santa Maria, apresentou predominância na existência de atividades com potencial poluidor considerado alto, variando entre 58,52% e 70,37%. No mesmo período as atividades com potencial poluidor médio decaíram de 37,3% para 25,53%. Já a existência de atividades consideradas de baixo potencial poluidor manteve-se praticamente constantes registrando a maior ocorrência em 2005 (4,91%) e a menor no ano de 2006 (4,10%).

Silveira Martins destaca-se por apresentar a maioria das atividades classificadas como de médio potencial poluidor, variando entre 88,98% em 2006 e 95,20% em 2006. As atividades de baixo potencial poluidor, apresentaram queda no período de 2002 a 2006, passando de 5,14% (2002) para 0% em 2006. O município apresentou queda na representatividade de atividades consideradas de alto potencial poluidor, variando entre 9,47% (2003) para 4,8% (2006).

As atividades desenvolvidas no município de São João do Polêsine apresentam-se em maior proporção classificadas como de

médio potencial poluidor, embora tenham sofrido redução no período em estudo, variando de 91,71% em 2002 e 91,03% em 2006.

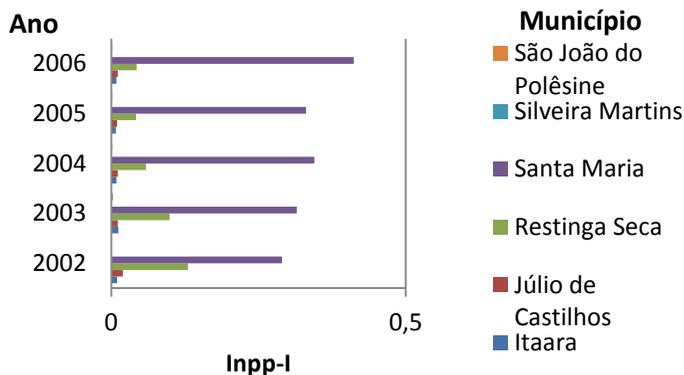
Outra redução foi apresentada pelas atividades de alto potencial poluidor que passaram de 8,29% (2004) para 3,36% (2006). Em contrapartida houve um acréscimo no período de 2002 a 2006 nas atividades de baixo potencial poluidor, de 2,7% para 5,61%.

#### 4.3.5.2. Índice de Potencial Poluidor da Indústria - Inpp-I

Martins e Oliveira (2005) dizem que o Inpp-I surgiu para suprir algumas lacunas deixadas por outros parâmetros. Dessa forma, fez-se necessário a mensuração do tamanho da indústria, através do Índice do Valor Adicionado Bruto da Indústria (IVAB-I). Assim, o Inpp-I foi obtido combinando-se o Indapp-I com o IVAB-I. Ou seja, construiu-se um índice que computasse, de forma conjunta, o tamanho da indústria com o nível de dependência das atividades industriais potencialmente poluidoras de uma determinada unidade geográfica, obtendo-se de fato, uma medida do “tamanho” do potencial poluidor das atividades econômicas da indústria por unidade geográfica.

A Figura 31 ilustra o Índice de Potencial Poluidor da Indústria nos municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí – Mirim.

Figura 31: Variação do Inpp-I no período entre os anos de 2002 a 2006



Em Itaara o Inpp-I variou de 0,008 a 0,012, sendo que nesse período o valor médio foi de  $0,009 \pm 0,001$ . Júlio de Castilhos apresentou média de  $0,012 \pm 0,004$  no período de 2002 a 2006, variando entre 0,01 e 0,02.

O Inpp-I em Restinga Seca variou de 0,042 a 0,130 sendo o valor médio  $0,070 \pm 0,030$ . Santa Maria apresenta nos anos de 2002 a 2006 os valores de Inpp-I variando entre 0,29 e 0,412, o valor médio foi de  $0,338 \pm 0,045$ .

O Inpp-I em Silveira Martins variou entre 0 e 0,001 sendo o valor médio  $0,0008 \pm 0,0004$ . São João apresentou o Inpp-I variando entre 0 a 0,003 com valor médio de  $0,001 \pm 0,001$ .

Santa Maria apresentou o maior valor médio no período de 2002 a 2006 para o Inpp-I de 0,338 demonstrando assim ser o município da Bacia Hidrográfica com o maior nível de dependência das atividades industriais potencialmente poluidoras.

Nesses indicadores, ressalta-se que não ocorre a medição da carga poluidora de fato, mas sim de uma adoção da classificação utilizadas pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS (FEPAM), para fins de licenciamento ambiental, classificando quanto ao potencial de risco ambiental, as 281 classes da indústria de

transformação e extrativa que constam da Classificação Nacional das Atividades Econômicas (CNAE) da Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (2007). A classificação do potencial poluidor das atividades reflete o comportamento mediano quanto ao risco de comprometimento com a preservação do ambiente.

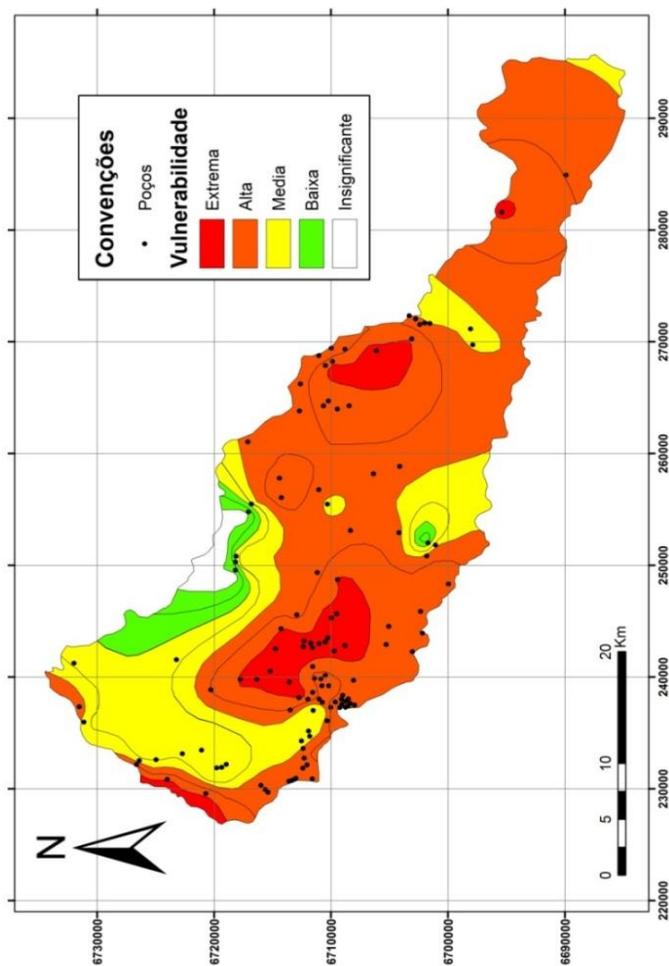
A classificação do potencial poluidor usada no licenciamento das atividades industriais tem origem em estudo de Perrit (1981), que fornece, de forma qualitativa, a potencialidade poluidora segundo cinco parâmetros de poluição hídrica e de poluição atmosférica relativos às diferentes tipologias industriais do IBGE, pressupondo-se que cada tipo apresenta uma produção média e tecnologia convencional. Para cada parâmetro, foram atribuídos pesos, de acordo com seus efeitos nocivos ao meio ambiente, e, a seguir, valores em função das características do ramo industrial, obtendo-se, ao final, as classificações qualitativas de potencial poluidor hídrico e atmosférico (MARTINS; OLIVEIRA, 2008).

Posteriormente, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM, uniu essas duas classificações, inserindo também um terceiro elemento, relativo aos efeitos dos resíduos sólidos, e associando, a cada atividade econômica, um grau de potencial poluidor (alto, médio ou baixo). Essa junção foi feita tomando-se, predominantemente, uma posição conservadora, ao se agregar, em apenas uma potencialidade, as potencialidades poluidoras hídrica, atmosférica e de resíduos sólidos (MARTINS; OLIVEIRA, 2008).

#### 4.3.6. Vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos

O Índice de Vulnerabilidade na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim variou entre 0 e 0,81, sendo o valor médio de  $0,56 \pm 0,17$ , sendo que a vulnerabilidade variou de Insignificante a Extrema, conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32: Vulnerabilidade natural à contaminação na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.



Da área total da Bacia Hidrográfica (1153,77 km<sup>2</sup>), 14,245 km<sup>2</sup> (1,23%) foram classificados como área de vulnerabilidade insignificante, 58,099 km<sup>2</sup> (5,03%) situam-se em área de vulnerabilidade baixa, 284,16 km<sup>2</sup> (24,62%) encontram-se em área com vulnerabilidade considerada média, 718,50 km<sup>2</sup> (62,24%) situam-se em áreas com alta

vulnerabilidade e 78,76 km<sup>2</sup> (6,82%) foram classificados como de vulnerabilidade extrema.

De um modo geral, o termo vulnerabilidade é compreendido como sendo a suscetibilidade do aquífero à contaminação. Segundo Ribeira (2004) a vulnerabilidade natural se costuma calcular e expressar em termos hidrogeológicos, como por exemplo, a profundidade do nível freático, a permeabilidade, etc. Entretanto a vulnerabilidade específica da água subterrânea costuma-se expressar em termos de riscos frente a um determinado impacto.

A avaliação da vulnerabilidade tem sido reconhecida por sua capacidade de delinear áreas mais susceptíveis que outras de se tornarem contaminadas, como resultado de atividades antrópicas na superfície do solo. O mapeamento da avaliação da vulnerabilidade mostra as parcelas de uma área geográfica e as características determinantes que são mais ou menos vulneráveis a um tipo particular de estressor que frequentemente ainda não começou a ser exercido (LAHR; KOOISREA, 2010; GONÇALVES; KOPPE, 2011).

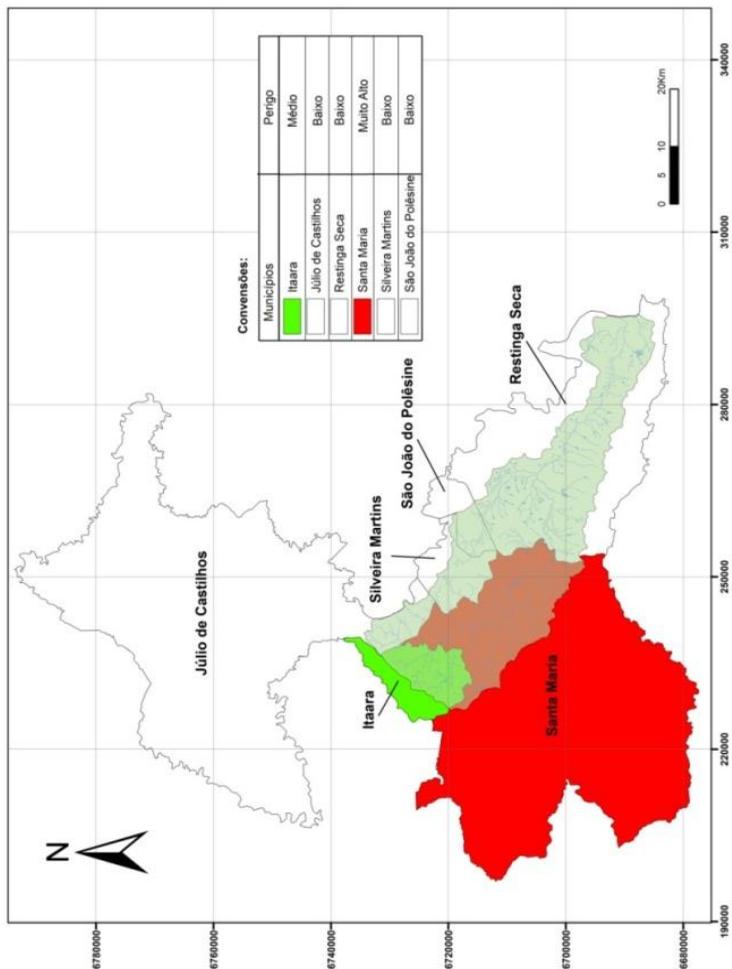
Segundo Foster, Hirata e Rocha (1988), uma caracterização aproximada da ideia de risco de poluição das águas subterrâneas consiste na associação e interação da vulnerabilidade natural do aquífero com a carga poluidora aplicada no solo ou em subsuperfície. Isso significa que se pode ter uma situação de alta vulnerabilidade, porém, sem risco de contaminação se não existir carga poluidora significativa, ou vice-versa. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada; mas o mesmo não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma propriedade intrínseca do aquífero. Sendo assim, a vulnerabilidade significa a maior suscetibilidade de um aquífero de ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta.

#### **4.3.7. Perigo**

No período de 2002 a 2006, o perigo nos municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim variou entre 0 (Silveira Martins) e 1 (Santa Maria), sendo que o valor médio foi  $0,220 \pm 0,393$ . A Figura 33 ilustra o perigo nos municípios constituintes da Bacia Hidrográfica, sendo que os maiores valores encontram-se nas regiões Sudoeste e Central (Município de Santa Maria) e a Noroeste (Itaara) onde o perigo foi considerado Muito Alto e Médio respectivamente. Os municípios de Júlio de Castilhos, Restinga Seca,

Silveira Martins e São João do Polêsine apresentaram o Perigo considerado Baixo.

Figura 33: Classificação do Perigo na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.



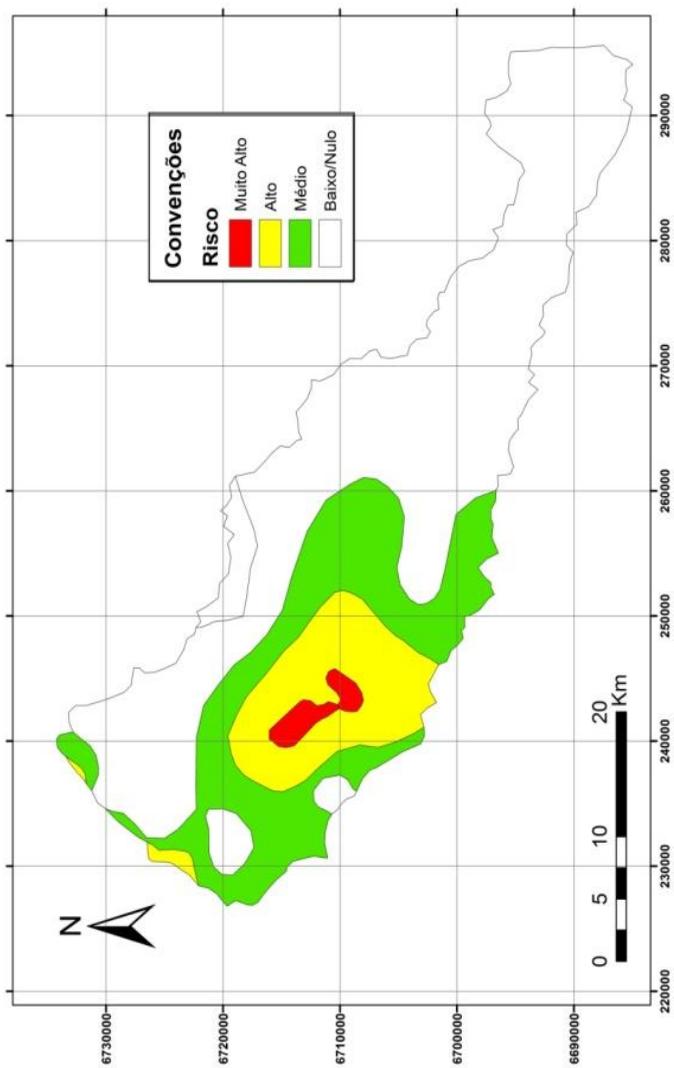
O perigo de contaminação, segundo Milek (2011), pode ser relacionado com o uso do solo. Assim, dentro deste contexto, áreas com pouca interferência das ações antrópicas apresentam um potencial baixo de contaminação. Da mesma forma, atividades intensas e com grandes impactos representam um alto perigo de contaminação.

Pode-se constatar que mesmo Santa Maria apresentando o maior Idese, seu risco é o maior dos municípios constituintes da Bacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim, isto se deve ao fato de seu Inpp-I ser elevado, quando comparado às outras cidades. No que diz respeito à Itaara que apresenta o Perigo considerado médio, esta apresenta o Inpp-I baixo, porém apresenta a pior Idese entre todos os municípios o que causou um aumento no perigo.

#### **4.3.8. Risco**

Na Figura 34 é apresentado o Risco na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.

Figura 34: Risco na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim.



O Risco existente na Bacia Hidrográfica concentra-se nas porções Oeste, Noroeste e Central (Municípios de Santa Maria e Itaara), enquanto que a classificação Baixo/Nulo encontra-se distribuída nas regiões Norte, Leste e Sudeste, compreendendo os municípios de Júlio de Castilhos, Restinga Seca, Silveira Martins e São João do Polêsine.

Os valores do risco variaram entre 0 e 0,810 e a média foi de  $0,340 \pm 0,290$  caracterizando uma variação do risco entre Baixo/Nulo a Muito Alto. O município de Santa Maria apresentou o risco variando entre 0 e 0,810 (Risco variando de Baixo/Nulo a Muito Alto) e média de  $0,578 \pm 0,224$ . Em Itaara o índice variou entre 0,035 a 0,135 (Risco Baixo/Nulo), apresentando o valor médio de  $0,106 \pm 0,040$ . Restinga Seca apresentou os valores entre 0,120 a 0,490 (Risco variando de Baixo/Nulo a Médio) com média de  $0,187 \pm 0,087$ .

Júlio de Castilhos apresentou o risco 0,010 (Baixo/Nulo) enquanto que São João do Polêsine e Silveira Martins apresentaram valores de risco classificados como Baixo/Nulo uma vez que o valor encontrado para os municípios foi 0 (zero).

O risco de poluição pode ser descrito como a soma de variáveis relacionadas ao perigo com situações de vulnerabilidade. No contexto da água subterrânea, o risco é uma situação que determina o potencial de poluição do lençol freático. Assim, podem existir cenários onde existe um alto grau de perigo, mas com um risco de poluição mínimo devido às condições de baixa vulnerabilidade (MILEK, 2011). Segundo esse mesmo autor, a determinação do risco de contaminação pode ser estratégica, uma vez que pode ser útil no sentido de se tomar ações necessárias que evitem a contaminação de fato. Dessa forma a obtenção do grau de risco é determinante no conceito de gestão territorial no que concerne ao bom uso dos recursos hídricos.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM

##### 4.4.1. Argila

Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de argila variaram de 8 a 51%, com média de  $28,84 \pm 12,18\%$ . Os maiores valores encontram-se na região noroeste do cartograma a uma concentração de 51%, já os menores valores encontram-se nas demais regiões a concentrações que variam de 8 a 40%. Com base média na

concentração de argila nos pontos de amostragem, Siqueira et al. (1987) classifica o solo como classe 3 (26 – 40% argila).

A menor porcentagem de argila ocorreu no ponto 11 (área de pastagem) com 8%, já as maiores ocorreram nos pontos 3 (área de mata nativa) e 5 (área de campo nativo) com concentrações de 51%.

Alvarez (2004) em um Argissolo Vermelho sob sistema plantio direto há 14 anos os valores encontrados na camada de 0 – 10 cm foram de 14%, Osório Filho et al. (2007) em um Argissolo Vermelho Distrófico em solo sob cultivo de plantio direto os valores foram de 14%, valores esses inferiores aos encontrados nesse solo no presente trabalho nos pontos 1 (21%) e 3 (51%) em área de mata nativa, 4 (50%) e 6 (40%) cultivo de soja, 5 (51%), 22 (35%) e 23 (19%) área de campo nativo, 13 (14%) e 14 (21%) área urbana e 15 (16%) área de pastagem.

Teores diferentes foram encontrados na cidade de Santa Maria por Sutili (2007) na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, na camada de 0 – 20 cm 6% de argila, Poersch (2010) em um Argissolo Bruno a porcentagem média encontrada foi de 2%, valor inferior ao encontrado no ponto 8 (16%), também localizado em um Argissolo Bruno ocupado pelo cultivo da soja.

Stürmer (2007) em um Planossolo Eutrófico na camada entre 0 – 40 cm sob uso da agricultura os valores foram de 21 a 81%, valores semelhantes em Planossolo Eutrófico ocorreram nos pontos 18 (19%), 25 (19%) área de cultivo de arroz e ponto 23 (18%) em área de campo nativo. Lima (2007) na cidade gaúcha de Itapoã, a porcentagem encontrada entre 0 – 15 cm foram de 7%.

#### **4.4.2. Fósforo (P)**

Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de P variaram de 0,7 a 6 mg kg<sup>-1</sup> com média de 2,36 ± 1,52 mg kg<sup>-1</sup>. Os maiores valores encontram-se na região central, com concentrações variando de 3,7 a 6 mg kg<sup>-1</sup>, já as menores encontram-se nas demais regiões com valores variando de 0,7 a 3,2 mg kg<sup>-1</sup>.

Valores para Fósforo na cidade de Santa Maria – RS são citados por Wink (2009) em um solo sob o uso de florestas, as concentrações foram de 2,02 mg kg<sup>-1</sup>, valores semelhantes ocorreram em solo com mesmo uso no ponto 1 (2,2 mg kg<sup>-1</sup>). Poersch (2010) em um Argissolo Bruno os valores encontrados foram de 14,4 mg kg<sup>-1</sup>, sendo estes bem inferiores aos encontrados para mesmo tipo de solo nos pontos 8 (2,2 mg kg<sup>-1</sup>) em solo sob cultivo de soja, 20 (2,2 mg kg<sup>-1</sup>) pastagem e 21

(1,5 mg kg<sup>-1</sup>) cultivo de arroz. Alvarez (2004) em um Argissolo Vermelho sob sistema plantio direto há 14 anos na camada de 0 – 10 cm a concentração foi de 18,8 mg kg<sup>-1</sup>, sendo esta bem inferior a encontrada no mesmo tipo de solo.

Sutuli (2007) na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim avaliou a concentração de fósforo em um Neossolo Litólico com pastagem natural (0 – 20 cm), onde os valores foram de 76 mg kg<sup>-1</sup>, sendo esta bem superior ao encontrado nesse mesmo tipo e ocupação de solo, onde as concentrações variaram de 2,2 a 3,7 mg kg<sup>-1</sup>.

#### 4.4.3. Matéria Orgânica (M.O.)

Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de M.O. variaram de 0,6 a 2,9%, com média de  $1,50 \pm 0,63\%$ . Os maiores valores estão nas regiões noroeste e norte, variando de 2,3 a 2,9 %, já os menores valores encontram-se nas demais regiões, variando de 0,6 a 2,1%. Com base nas médias de matéria orgânica encontradas, Siqueira et al. (1987) classifica a concentração como baixa ( $\leq 2,5\%$ ).

O menor valor de matéria orgânica ocorreu no ponto 22 (0,6%) em solo sob uso de Campo nativo, já o maior valor ocorreu no ponto 7 (2,9%) em solo sob cultivo de soja.

Valores de mesma ordem foram encontrados na cidade de Santa Maria – RS por Sutuli (2007) na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, na camada de 0 a 20 cm os valores foram de 1,6%. Lima (2007) na cidade gaúcha de Itapoã, a porcentagem entre a camada de 0 – 15 cm foi de 1,2 %. Alvarez (2004) em um Argissolo Vermelho na camada de 0 a 10 cm, sob sistema plantio direto há 14 anos, os valores foram de 2,9%, sendo estes semelhantes aos encontrados no mesmo tipo de solo nos pontos 3 (2,3%), 4, 5, 6 (2%) e 14 (2,1%) sob uso de mata nativa, cultivo de soja, campo nativo, cultivo de soja e área urbana, respectivamente. Osório Filho et al. (2007) em um Argissolo Vermelho Distrófico sob cultivo de plantio direto, na camada de 0 – 10 cm, os valores foram de 1,28%, valores de mesma magnitude foram encontrados no mesmo tipo solo nos pontos 1 (0,9%) em solo de mata nativa, 13 (0,8%) em solo de mata nativa, 15 (0,9%) em solo de pastagem e 23 (1,3%) em solo de campo natural. Stürmer (2007) em um Planossolo Eutrófico sob uso da agricultura a porcentagem na camada de 0 – 40 cm, os valores encontrados foram de 1,7 %, valores semelhantes para o mesmo tipo de solo ocorreram nos pontos 12 (1,7%)

em solo de campo nativo, 16 e 18 (1,2%), 25 e 25 (1%) em solo de cultivo de arroz e 26 (1,7%) em solo de mata nativa.

#### 4.4.4. pH

Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de pH variaram de 4,2 a 5,8 com média de  $4,76 \pm 0,39$ . Os maiores valores encontram-se nas regiões oeste e sudeste com variação de 5,3 a 5,8, já os menores estão localizados nas demais regiões com variação de 4,2 a 5,1.

O menor valor de pH ocorreu no ponto 8 (4,2) em solo sob cultivo de soja, já o maior valor foi encontrado no ponto 18 (5,8) em solo de cultivo de arroz.

Lima (2007) na cidade gaúcha de Itapoã, o pH encontrado entre 0 – 15 cm de solo foi de 5,6. Sutili (2007) na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, encontrou pH 6,4 em uma camada de 0 – 20 cm de solo.

Na cidade de Santa Maria – RS valores de pH são citados por Miguel (2010) em um Argissolo Bruno - Acinzentado (camada de 0 e 50 cm) foi de 5,1, sendo que o mesmo valor foi encontrado nesse tipo de solo no ponto 8, utilizado para cultivo da soja. Já em Neossolo Litólico, o autor encontrou pH de 5,5 sendo esse valor inferior ao encontrado para este solo nos pontos 2 (4,8) e 10 (4,6) mata nativa, 7 (4,5) e 9 (4,4) cultivo de soja. Em um Argissolo Vermelho o mesmo autor encontrou pH 4,8, valores semelhantes encontrados para esse mesmo tipo de solo nos pontos 6 (4,6) cultivo de soja, 15 (4,9) solo de pastagem e campo nativo respectivamente. Já Alvarez (2004) encontrou em um Argissolo Vermelho sob sistema plantio direto há 14 anos (camada de 0 – 10 cm) um pH de 5,3 sendo esse o mesmo valor encontrado no ponto 22, em área de campo nativo, o mesmo ocorre com Osório Filho et al. (2007) nesse mesmo tipo de solo o pH encontrado foi de 5,2, semelhante ao encontrado no ponto 22. Stürmer (2007) em um Planossolo Eutrófico sob uso da agricultura (camada de 0 – 40 cm) o pH foi de 4,5, valor este semelhante ao encontrado para este tipo de solo nos pontos 11, 12 e 26 (4,7) área de pastagem, campo nativo e mata nativa respectivamente, 16 (4,7), 17 e 25 (4,8) áreas de cultivo de arroz. Poersch (2010) em um Argissolo Bruno o pH médio foi de 6,5, valor este bem superior ao mesmo tipo de solo nos pontos 8 (4,5) área de cultivo de soja, 20 (5,1) área de pastagem e 21 (4,3) área de cultivo de arroz.

#### 4.4.5. Potássio (K)

Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, a concentração de K variou de 0,8 a 208 mg kg<sup>-1</sup>, com média de 54,56 ± 47,16 mg kg<sup>-1</sup>. Os maiores valores estão presentes na região oeste a uma concentração de 208 mg kg<sup>-1</sup>, já os menores valores encontram-se nas demais regiões a uma concentração que varia de 0,8 a 92 mg kg<sup>-1</sup>. Com base nas médias de potássio encontradas, Siqueira et al. (1987) classifica a concentração como baixa (41 – 60 mg kg<sup>-1</sup>).

A menor concentração de Potássio ocorreu no ponto 4 (0,8 mg kg<sup>-1</sup>) área de cultivo de soja, já a maior ocorreu no ponto 1 (208 mg kg<sup>-1</sup>) área de mata nativa.

Valores de Potássio foram descritos na cidade de Santa Maria-RS por Poersch (2010) em um Argissolo Bruno as concentrações foram de 40 mg kg<sup>-1</sup>, valores superiores aos encontrados para esse solo no ponto 8 (16 mg kg<sup>-1</sup>) em uma área de cultivo de soja. Sutili (2007) na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim em um solo de pastagem natural na camada de 0 a 20 cm a concentração foi de 56 mg kg<sup>-1</sup>, valores iguais ocorreram nos pontos 11 e 20, ambos usados para pastagem, porém no ponto 15 (área de pastagem) a concentração foi bem inferior (12 mg kg<sup>-1</sup>). Wink (2009) em um Argissolo Vermelho, sob uso de florestas, encontrou valores na ordem de 42 mg kg<sup>-1</sup>, valores semelhantes foram encontrados em solo sob mesmo uso no ponto 13 (40 mg kg<sup>-1</sup>). Valores de ordens diferentes foram encontrados por Stürmer (2007) na cidade de Santa Maria – RS, em área utilizada para agricultura, onde a concentração foi de 0,234 mg kg<sup>-1</sup>.

#### 4.4.6. Alumínio (Al)

Na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de Alumínio total variaram de 52.952,11 a 27.1077 mg kg<sup>-1</sup> com média de 152.454,86 ± 54.073,52 mg kg<sup>-1</sup>. Os maiores valores de Al<sup>+3</sup> estão localizados na região Oeste da Bacia Hidrográfica. Nessa região encontram-se áreas de mata nativa nos pontos 1 (226.041,80 mg kg<sup>-1</sup>) e 3 (215.566,20 mg kg<sup>-1</sup>), área de produção de soja nos pontos 4 (215.355,40 mg kg<sup>-1</sup>), 6 (216.499,70 mg kg<sup>-1</sup>), 7 (192.028,70 mg kg<sup>-1</sup>) e 8 (214485,30 mg kg<sup>-1</sup>) e de campo nativo no ponto 5 (271077,00 mg kg<sup>-1</sup>).

<sup>1</sup>). Os menores valores estão na região Leste da bacia hidrográfica em área ocupada por lavoura de arroz irrigado (Ponto 21).

Koz; Cevik; Akbulut (2012) usando a técnica de EDXRF encontraram valores de Al no solo de 8840 mg kg<sup>-1</sup>, Wastowski et al. (2010) obtiveram média de 85700 mg kg<sup>-1</sup>, para a camada entre 0 – 10 cm, em um solo na cidade de Frederico Westphalen – RS.

Kabata-Pendias; Pendias (2001) dizem que o pH é a principal barreira geoquímica para esse elemento no solo, sendo que a sua mobilidade aumenta em solos com pH inferior a 5,5 e baixa com pH entre 6 e 9. (SHUQAIR, 2002). Em solos tropicais, sua concentração é maior que 15%. Com base nisso, pode-se dizer que o teor de Al em solos é variável com o pH do mesmo. Os teores de Al em solos estão estritamente ligados com a mineralização da matéria orgânica, que pode acarretar em grande liberação de Al, principalmente na camada superficial (MIRANDA et al. 2006). Na área em estudo, os maiores valores ocorreram nos usos que possuem uma maior camada de matéria orgânica sobre a camada superficial do solo (soja, campo nativo e mata nativa) na superfície, evidenciando o explicado anteriormente. A toxicidade do alumínio constitui-se num dos principais fatores limitantes no que se refere ao crescimento das plantas e acidificação dos solos, sendo absorvido pelas raízes e translocado para a parte aérea das plantas, prejudicando seu desenvolvimento (RUFYIKIRI et al. 2004).

#### 4.4.7. Cálcio (Ca)

Na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de Cálcio total variaram do Limite de Detecção (L.D.) a 7677,376 mg kg<sup>-1</sup>, com média de 1888,19 ± 2130,37 mg kg<sup>-1</sup>. As maiores concentrações de Cálcio estão na região Oeste da Bacia Hidrográfica, já os menores valores encontram-se nas regiões Leste e Sudoeste.

Os maiores valores ocorreram nas áreas ocupadas por mata nativa, destacando-se os pontos 1 (7677,37 mg kg<sup>-1</sup>) e 2 (5492,16 mg kg<sup>-1</sup>), pastagem no ponto 11 (3896,13 mg kg<sup>-1</sup>) e plantações de arroz nos pontos 16 (4281,24 mg kg<sup>-1</sup>) e 19 (6514,36 mg kg<sup>-1</sup>).

Destacam-se como os menores valores os pontos 8 utilizado para produção de soja, ponto 13 localizado em área urbanizada, os pontos 17, 21, 24, e 25 utilizados para plantações de arroz e o ponto 23 onde havia campo nativo, no qual os valores de cálcio foram menores que o L.D. da técnica de EDXRF.

Cojocarú et al. (2006) encontraram concentração de Ca de 42600 mg kg<sup>-1</sup>, Yu et al. (2006) encontraram valores médios de 199000 ± 6000 mg kg<sup>-1</sup>. Wastowski et al. (2010) utilizando a técnica do EDX, verificaram a concentração média de 4450 mg kg<sup>-1</sup> de cálcio, na camada de 0 – 10 cm, em solo da cidade de Frederico Westphalen – RS. O conteúdo de cálcio no solo é função do material de origem (rocha), sendo influenciado pela sua textura, teor de matéria orgânica e pela remoção das culturas. A principal fonte desse elemento adicionada ao solo é na forma de CaCO<sub>3</sub>, muito utilizado no controle da acidez no solo. Na área em estudo, os pontos que estão sob ação antrópica direta, áreas de cultivo de soja e arroz principalmente, destacam-se com maiores concentrações os cultivos com arroz possivelmente causado pelo efeito da calagem do solo.

#### 4.4.8. Ferro (Fe)

Na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, as concentrações de Ferro total variaram de 14118,56 a 156695,50 mg kg<sup>-1</sup> com média de 57437,876 ± 40937,85 mg kg<sup>-1</sup>. Os maiores valores de ferro estão localizados na região nordeste do cartograma, já os menores valores estão nas regiões Sul e Sudeste.

As ocupações do solo com mata nativa no ponto 2 (153380,60 mg kg<sup>-1</sup>) e 3 (156695,50 mg kg<sup>-1</sup>) e com plantações de soja no ponto 4 (156694,55 mg kg<sup>-1</sup>) e no ponto 9 (102435,70 mg kg<sup>-1</sup>), apresentam os maiores valores.

Koz; Cevik; Akbulut (2012) usando a técnica de EDXRF encontraram valores de Fe<sup>3+</sup> em solo de 5410 mg kg<sup>-1</sup>, Yu et al. (2006) encontraram valores médios de 14100 ± 50 mg kg<sup>-1</sup>, valores estes bem abaixo, se comparado aos encontrados no presente estudo.

O ferro é um nutriente essencial à saúde humana e está presente em diversos alimentos. Estima-se que de 60 a 70% do ferro total presente nos seres humanos encontra-se associado à hemoglobina (OMS, 1998). Em condições de alagamento, pode ocorrer toxidez desse elemento nas plantas (BATAGLIA, 1991), como no caso da cultura do arroz, realizada nas áreas dos pontos de amostragem 16, 17, 18, 19, 21, 24 e 25.

O elemento Fe aparece no solo principalmente na forma de óxidos, que possuem grande poder de pigmentação, determinando assim a coloração de muitos solos (COSTA et al. 2002), pois esse material é de difícil lixiviação por estar fortemente aderido na solução do solo.

#### 4.4.9. Magnésio (Mg)

Observa-se que os valores de Magnésio total variaram do L.D. a 31944,05 mg kg<sup>-1</sup> com média de 7155,33 ± 6724,42 mg kg<sup>-1</sup>, sendo que os maiores valores estão presentes na região Oeste, enquanto os menores valores estão na região Sudoeste do cartograma.

As áreas que apresentaram maiores concentrações de magnésio foram as ocupadas por mata nativa nos pontos 1 (31944,05 mg kg<sup>-1</sup>), 10 (11366,06 mg kg<sup>-1</sup>), campo nativo nos pontos 5 (13279,05 mg kg<sup>-1</sup>), 12 (10393,95 mg kg<sup>-1</sup>), pastagem nos pontos 11 (15417,85 mg kg<sup>-1</sup>) e 14 (10969,74 mg kg<sup>-1</sup>), o ponto 16 que é ocupado por arroz destacou-se com uma concentração de 14169,68 mg kg<sup>-1</sup> já os pontos 23 e 24 também ocupados com arroz e o ponto 25 localizado em campo nativo tiveram as concentrações de magnésio no solo inferior ao L.D. da técnica de EDXRF.

#### 4.4.10. Potássio (K)

Na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de Potássio total variaram de 1256,236 a 60693,230 mg kg<sup>-1</sup> com média de 16255,912 ± 15887,7821 mg kg<sup>-1</sup>. Os maiores valores estão presentes na região central da Bacia Hidrográfica e na porção sudeste, já os menores valores encontram-se distribuídos na região norte e nordeste.

Os usos do solo que apresentaram os maiores valores foram mata nativa, destacando-se o ponto 1 (22502,27 mg kg<sup>-1</sup>), plantação de soja (ponto 9 60693,23 mg kg<sup>-1</sup>), plantação de arroz nos pontos 16 (22531,37 mg kg<sup>-1</sup>), 19 (49597,48 mg kg<sup>-1</sup>) e 24 (54201,86 mg kg<sup>-1</sup>) e campo nativo no ponto 22 (16787,27 mg kg<sup>-1</sup>). Essa relação das maiores concentrações em áreas de plantio direto (soja) pode ser explicada pelo fato do solo possuir uma grande concentração de argila, e pelo potássio apresentar uma tendência em acumular-se na superfície (FRAGONEZI; ESPINDOLA, 2008).

Valores semelhantes foram encontrados por Yu et al. (2003) onde as médias foram de 12700 ± 700 mg kg<sup>-1</sup>. Já Wastowski et al. (2010) encontraram valores médios de Potássio total de 1840 mg kg<sup>-1</sup> na cidade de Frederico Westphalen – RS. Alleoni; Borba; Camargo, (2005) afirma que a concentração de K<sup>+</sup> nas rochas basálticas é de 8,3 mg kg<sup>-1</sup>. Melo; Meurer; Pinto (2004) dizem que o K é encontrado em feldspatos e micas que, ao serem intemperizados, liberam-no para a solução do solo, onde será absorvido pelas plantas (FANNING; KERAMIDAS; EL-DESOKI,

1989; HUANG, 1989), sendo assim, as principais fontes naturais desse elemento para o solo são o material de origem.

#### 4.4.11. Bário (Ba)

Na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de Bário total variaram entre valores menores que o L.D. a  $7608,27 \text{ mg kg}^{-1}$  com média de  $1286,71 \pm 2295,18 \text{ mg kg}^{-1}$ . Os maiores valores estão presentes nas regiões leste e sudeste com uma concentração máxima no ponto 21 ( $7608,27 \text{ mg kg}^{-1}$ ) já os menores valores encontram-se na região norte e oeste (pontos P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P12, P13, P14, P15, P17, P20 e P26) com concentrações menores que o L.D. Conforme a Resolução nº 420/2009 do CONAMA, que considera o limite de prevenção de Bário no solo de  $150 \text{ mg kg}^{-1}$ , os pontos P11 (área de pastagem), P16, P18, P19, P21, P24 e P25 (cultivo de arroz) pontos P22 e P23 (campo nativo) encontram-se acima do valor médio permitido (VMP) por essa resolução.

Kemerich et al. (2012) usando a técnica de EDXRF, estudando um solo da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, encontrou valores de Ba variando de 2730 a  $15132 \text{ mg kg}^{-1}$ , valores este acima dos encontrados nesse estudo.

Os problemas ambientais gerados pela agricultura, relativos à contaminação de solo por metais pesados, por exemplo, decorrem do uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes, daí a relevância da determinação e do monitoramento destes metais como um indicador de sustentabilidade (BACELLAR et al. 2003). A concentração de Ba no solo, em escala mundial, varia de 19 a  $2368 \text{ mg kg}^{-1}$ , podendo ser mobilizado em diferentes condições (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1992), no estudo estes valores encontram-se acima do descrito anteriormente por levar em consideração as concentrações totais do elemento no solo.

O Ba ocorre naturalmente somente na forma combinada, sendo que as duas principais são a barita (sulfato de bário natural) e a witherita (carbonato de bário natural), esse elemento também é encontrado em quantidades-traço em rochas ígneas e sedimentares. A barita é a principal fonte de obtenção de bário metálico que, juntamente com seus compostos, são usados na fabricação de diversos produtos industriais, como plásticos, vidros, cerâmicas, eletrônicos, têxteis, lubrificantes, ligas metálicas, sabão e borracha. Com relação às emissões antropogênicas, essas podem ocorrer a partir da mineração, refino e

tratamento de minérios de bário e da fabricação de produtos de bário (CETESB, 2012). Na área de estudo, os maiores valores desse elemento podem estar relacionados com a ação antropogênica nos usos que demandam produtos químicos ou até mesmo fertilizantes que contêm esse elemento em sua composição.

#### 4.4.12. Fósforo (P)

Na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, os valores de Fósforo total variaram entre L.D. a  $2327,02 \text{ mg kg}^{-1}$  com média de  $676,45 \pm 700,05 \text{ mg kg}^{-1}$ . Os maiores valores estão na região oeste com concentração máxima ocorrendo no P11, sob uso de pastagem ( $2327,02 \text{ mg kg}^{-1}$ ) já os menores valores encontram-se nas regiões sudeste e sudoeste, com valores inferiores ao L.D. sendo representado pelos pontos P1 (mata nativa), P13 (área urbana), P15 (pastagem), P17, P19, P23, P24, P25 (cultivo de arroz) e P22 (campo nativo). Com relação a esse elemento, destaca-se como a principal entrada do mesmo no solo através de fertilizantes, explicando o fato das maiores concentrações estarem presentes em solo de pastagem.

As concentrações médias para os usos de campo nativo, mata nativa e soja encontradas na área de estudo, foram de  $277 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $978 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $1194 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente, valores estes foram semelhantes aos encontrados por Wastowski et al. (2010) usando a técnica de EDXRF na cidade de Frederico Westphalen-RS, para os usos de mata nativa e cultivo de soja, onde as concentrações médias foram de  $810 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $1085 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. Já para o uso de campo nativo, os valores descritos pelo mesmo autor ( $835 \text{ mg kg}^{-1}$ ) apresentam-se acima dos presentes na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim. O fósforo pode ser adicionado ao solo como adubo comercial (químico), esterco de curral ou de galinha, lodo de esgoto, restos de colheita ou outros subprodutos. Essas práticas, porém, não são suficientes, havendo necessidade de usar outras fontes (MINEROPAR, 2004). Com a adesão destas fontes secundárias de P, muitas vezes acarretam em um aumento prejudicial ao solo e aos recursos hídricos, pois com ação da chuva são carregados até os rios ou infiltram até o lençol freático.

Marcolan (2006) afirma que na prática do plantio direto, esse elemento fica acumulado na superfície do solo decorrente da aplicação dos adubos na camada superficial, sendo assim fica mais vulnerável ao carregamento pela ação da água. O aumento das concentrações de P e Nitrogênio nos corpos d'água acarretam em um processo chamado

eutrofização, onde prejudica não só a qualidade da água, mas também os organismos que habitam o meio aquático.

#### **4.4.13. Manganês (Mn)**

Os valores de Mn total variaram do L.D. a 5533,51 mg kg<sup>-1</sup> com média de 1057,34 ± 1380,81 mg kg<sup>-1</sup>. Os maiores valores estão presentes nas regiões oeste e noroeste, onde o valor máximo encontrado foi no P9 (cultivo de soja) com concentração de 5533,51 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto que os menores valores estão nas regiões norte e sudeste, onde os valores foram menores que o L.D. (nos pontos P22 (campo nativo), P24 e P25 (cultivo de arroz)).

Valores semelhantes foram encontrados em Seberi-RS por Kemerich et al. (2011) utilizando a técnica de EDXRF, onde a concentração de Mn variou de 882,49 a 4163,44 mg kg<sup>-1</sup> em 9 pontos de amostragem. Para os usos de campo nativo, mata nativa e área de cultivo de arroz, a concentração média foi de 1000 mg kg<sup>-1</sup>, 1727 mg kg<sup>-1</sup> e 1550 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Wastowski et al. (2010) usando a técnica de EDXRF encontraram para os mesmos usos de solo na cidade de Frederico Westphalen – RS, valores médios bem acima dos descritos no presente trabalho (3950 mg kg<sup>-1</sup>, 4620 mg kg<sup>-1</sup> e 3720 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente).

O Manganês possui densidade de 7,40 g cm<sup>-3</sup> e peso atômico 25 g. As principais fontes são Pirosulita ou Manganês Mole, Psilomelana ou Manganês Duro e Rodocrosita. O Manganês é um micronutriente essencial para todos os organismos e raramente ocorre em concentrações perigosas, pois é essencial na produção da clorofila, e tem papel como ativador enzimático (MINEROPAR, 2005). Esse elemento químico é muito usado na manufatura do aço, de compostos químicos, pilhas, eletrodos para solda em ligas com o Níquel e o Cobre, bem como na indústria de fertilizantes e fungicidas (PAES, 2003), isto explica a alta concentração desse elemento na área de cultivo de soja.

#### **4.4.14. Silício (Si)**

As concentrações de Silício total das 26 amostras variaram de 229114,70 a 832568,70 mg kg<sup>-1</sup> com média de 696134,25 ± 144950,56 mg kg<sup>-1</sup>. As maiores valores estão presentes nas regiões sudeste e norte, incluindo o valor máximo no ponto P24 (cultivo de arroz). Os menores

valores estão nas regiões sudeste e noroeste com valor mínimo no ponto 21 (cultivo de arroz) com concentração de 229114,70 mg kg<sup>-1</sup>.

O Si, depois do O<sub>2</sub>, é o elemento mais abundante da crosta terrestre, mesmo não sendo considerado elemento essencial para o desenvolvimento das plantas, sua absorção pode ocasionar benefícios, para culturas acumuladoras desse elemento, como o arroz. (MENGEL; KIRKBY, 1987).

O óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) é o mineral primário mais abundante nos solos, constituindo a base da estrutura da maioria dos argilominerais. Todavia, em razão do avançado grau de intemperização em que se encontram os solos das regiões tropicais, o Si é encontrado basicamente na forma de quartzo, opala (SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O) (BARBOSA FILHO et al. 2001).

Desse modo, os solos tropicais são, de modo geral, altamente intemperizados, onde os minerais primários facilmente intemperizáveis que contêm Si são quase inexistentes. Esses solos apresentam, em alguns casos, teores menores do que 2 mg kg<sup>-1</sup> no extrato saturado (FONSECA, 1999).

Para a cultura do arroz, Mauad et al. (2003) explicam que esse elemento é essencial, sendo de fundamental importância para a estrutura da planta, melhores rendimentos produtivos e resistência a doenças.

#### **4.4.15. Zinco (Zn)**

Os valores de Zn total variaram do L.D. a 429,98 mg kg<sup>-1</sup> com média de 145,72 ± 123,78 mg kg<sup>-1</sup>. Os maiores valores estão presentes na região noroeste cuja concentração máxima é de 429,97 mg kg<sup>-1</sup>, os menores valores estão nas regiões nordeste, sul e oeste, a uma concentração menor que o L.D.

O menor valor para Zn ocorreu no ponto P13 (área urbana) onde a concentração foi menor que o L.D., enquanto o maior foi no ponto P2 (429,97 mg kg<sup>-1</sup>), em uma área de mata nativa. Conforme a Resolução nº 420/2009 do CONAMA, que estabelece limite de prevenção de Zinco no solo de 300 mg kg<sup>-1</sup>, os pontos P2 e P3 (mata nativa), P4 e P9 (soja) apresentaram valores superiores ao VMP.

Os valores médios para os usos de mata nativa e cultivo de soja foram de 250 mg kg<sup>-1</sup> e 198 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, valores semelhantes foram descritos por Wastowski et al. (2010) para estes mesmos usos (245 mg kg<sup>-1</sup> e 210 mg kg<sup>-1</sup>), porém para a área de campo nativo, o valor médio descrito pelo mesmo autor (180 mg kg<sup>-1</sup>)

apresentou-se acima do encontrado área de estudo ( $88 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Tito et al. (2011) diz que a maioria da incorporação de zinco no solo é através da ação antrópica (fertilizantes e pesticidas) que se agrava ainda mais quando são utilizados em produtos que serão utilizados diretamente na alimentação humana (grãos e hortaliças).

O elemento químico Zinco tem densidade  $7,10 \text{ g cm}^{-3}$  e peso atômico 30, ocorre na Esfarelita (ou Blenda de Zinco) encontrada associada ao sulfeto de Chumbo e à Smithsonita. O Zinco é um elemento-traço essencial em todos os sistemas vivos, desempenhando um papel importante nas atividades enzimáticas, no metabolismo dos ácidos nucleicos, na síntese de proteínas, manutenção da estrutura e função das membranas, atividade hormonal, reprodução e maturidade sexual. Animais com deficiência de Zn necessitam de 50% mais alimentos para adquirir o mesmo que peso que os animais com suplemento adequado do metal (MINEROPAR, 2005).

Grande parte do Zn presente no solo encontra-se ligado, sendo assim não se dissolve na água. Entretanto, dependendo das características do solo, parte do metal pode alcançar águas subterrâneas. A contaminação destas águas a partir de sítios de descarte tem sido relatada na literatura (AZEVEDO; CHASIN, 2003). Segundo Pelozato (2008), o Zn pode ser encontrado no ar, no solo, na água e está naturalmente presente nos alimentos. Produtos marinhos, grãos, carnes, laticínios, legumes e nozes apresentam altos teores de zinco.

## 4.5 ÍNDICES FÍSICOS DO SOLO SOB DIFERENTES USOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VACACAÍ-MIRIM

### 4.5.1 Resistência à penetração

O maior valor de resistência à penetração (RP) ocorreu em um solo sob uso de mata nativa, tal fator pode estar relacionado com a presença de material rochoso em decomposição ao longo do perfil. Mota et al. (2011) em um solo ocupado por mata nativa encontrou valores médios para a camada de 0 a 30 cm de 1880 kPa, valores estes inferiores aos encontrados no presente estudo, o que evidencia que o mesmo pode conter material rochoso, que pode ter interferido no resultado, pois o solo onde se encontra o ponto é um Neossolo Litólico, com grande presença de material rochoso em decomposição.

Em áreas de pastagem, Palma et al. (2010) e Mota et al. (2011) encontraram valores de RP de 2500 e 4370 kPa, respectivamente, valores estes superiores aos encontrados no presente trabalho. Isso pode ser explicado pela prática de criação de gado extensiva desenvolvida na região da bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim. Brasil (2011) no estado do Rio Grande do Sul encontrou valores de RP, na camada de 0 a 10 cm, próximo de 2000 kPa, valores estes inferiores aos encontrados no presente estudo. Esse fato pode ser explicado talvez pela densidade de animais na área ou ainda pelo tipo de solo. Trein et al. (1991), que observaram que o pastejo intensivo de bovinos em uma pastagem causaram o aumento da RP de 840 para 4030 kPa, na camada de 0,0 a 0,07 m de profundidade, Rodrigues Júnior encontrou valores semelhantes a esse na camada de 0 a 10 cm (4460 kPa).

Diversos fatores influenciam na compactação do solo, nas áreas de cultivo de soja o tráfego de máquinas agrícolas é um dos principais agentes causadores de compactação. No presente estudo, destaca-se o ponto P7 que apresentou 6956 kPa de resistência a penetração, valor este superior aos demais sob mesmo uso. Esse fato pode estar ligado com um grande tráfego de máquinas no local, o qual aumenta a RP do solo. Santi et al. (2006) em estudos realizados em áreas de cultivo de soja na região norte do RS, encontraram valores de máximos de RP de 4200 kPa, o mesmo ocorreu com estudo desenvolvido por Stürmer (2012) que encontrou uma taxa de RP próxima a 4000 kPa, estes valores estão bem inferiores aos encontrados no presente estudo, o mesmo foi identificado por Xavier (2005) onde ocorreu variação de 1469 a 2039 kPa.

As Tabelas 17 e 18 demonstram os parâmetros de PMP, CC, Arg, Ksat, Dens, Micro, Macro, RP para os usos área urbana, arroz, campo nativo, mata nativa, soja e pastagem, médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Nota-se que houve a influencia do uso do solo sobre PMP, sendo que os solos ocupados por cultivo de arroz, área urbana, pastagem e campo nativo apresentaram uma maior influência no PMP (maiores valores médios), já os solos ocupados por cultivos de soja e área nativa não apresentaram diferença para esse parâmetro. Os demais parâmetros não apresentaram diferença significativa entre diferentes usos do solo.

Tabela 17: Comparação estatística dos parâmetros PMP, Arg, Ksat e CC entre diferentes usos do solo.

<b>Uso</b>	<b>PMP (%)</b>	<b>Arg. (%)</b>	<b>Ksat (%)</b>	<b>CC (%)</b>
<b>Soja</b>	17,1a*	33,2 <sup>ns</sup>	2,4 <sup>ns</sup>	24,9 <sup>ns</sup>
<b>Campo Nativo</b>	7,6b	30,5	9,0	19,5
<b>Mata Nativa</b>	17,0a	25,0	4,2	34,5
<b>Arroz</b>	8,0b	19,0	1,4	23,9
<b>Área Urbana</b>	7,8b	17,5	0,6	23,5
<b>Pastagem</b>	7,7b	13,6	4,7	16,0

\*médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. <sup>ns</sup> não significativo.

Paiva et al. (2003) em uma área de campo nativo na mesma bacia em estudo, encontrou valor de PMP de 11,1%, valor este diferente do encontrado no presente trabalho (7,6%), na mesma bacia hidrográfica, Dias (2003), em um solo de mata nativa encontrou valores de PMP de 9,3 %, valor este diferente do encontrado (17%).

Estudando a bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, Rizzardi (2010) em nove pontos de amostragem na mesma bacia hidrográfica, encontraram valores médios de argila do solo variando entre 3 a 60% (ambos em solos ocupados por mata nativa), valores estes de ordens diferentes aos encontrados no presente estudo, visto que o solo ocupado pelo cultivo de soja apresentou o maior valor médio (33,2 %) e o menor valor (13,6%) foi encontrado em um solo campo nativo. Com relação aos teores de argila, Primel et al. (2005) encontrou valores médios de 15 a 25 % em um solo de cultivo de arroz, valores estes próximos aos encontrados (19%).

Tabela 18: Comparação estatística dos parâmetros Dens, Micro, Macro e RP entre diferentes usos do solo.

Uso	Dens. (g cm <sup>-3</sup> )	Micro (%)	Macro (%)	RP
<b>Soja</b>	1,3 <sup>ns</sup>	35 <sup>ns</sup>	13 <sup>ns</sup>	7135 <sup>ns</sup>
<b>Campo Nativo</b>	1,2	24	28	3456
<b>Mata Nativa</b>	1,1	38	18	3012
<b>Arroz</b>	1,4	33	12	5963
<b>Área Urbana</b>	1,3	31	16	3849
<b>Pastagem</b>	1,3	22	25	2762

<sup>ns</sup> não significativo.

Rizzardi (2010) em nove pontos de amostragem na mesma bacia hidrográfica encontraram valores médios de densidade do solo variando entre 1,12 (solo ocupado por mata nativa) a 1,8g cm<sup>-3</sup> (solo ocupado por pastagem), valores estes semelhantes aos encontrados no presente estudo, visto que o solo de mata nativa apresentou o menor valor médio (1,1 g cm<sup>-3</sup>), porém o maior valor (1,4g cm<sup>-3</sup>) foi encontrado em um solo de cultivo de arroz. Santos et al. (2009) em solo de mata nativa, encontrou para densidade do solo 1,28 g cm<sup>-3</sup>, valor este bem semelhante ao encontrado no presente estudo. Já valores de ordens diferentes foram encontrados no estado do Tocantins, por Rachwal et al. (2007) onde o valor de densidade foi 1,54 g cm<sup>-3</sup>, Soares (2011) e Bortoluzzi; Pernes e Tessier (2008) na cidade de Santa Maria-RS encontraram valores na ordem de 1,54 e 1,31 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente.

Para o uso de campo nativo, valores de ordens diferentes foram encontrados por Potes (2009) e Bortoluzzi; Pernes e Tessier (2008), onde os valores foram de 0,81 e 1,82 g cm<sup>-3</sup>, em campos de cima de serra e Santa Maria-RS, respectivamente. Para o solo ocupado por pastagem, Uhde (2009) na cidade de Santa Maria-RS encontrou valores semelhantes com os do presente estudo (1,39 g cm<sup>-3</sup>), já Silva Neto (2010) e Pizzani (2008), encontraram valores de ordens diferentes para o mesmo uso (1,5 g cm<sup>-3</sup>) nas regiões de Porto Alegre e Mata-RS, respectivamente. Para as áreas de cultivo de arroz, Roth et al. (2009)

encontrou valores bem abaixo ( $0,88 \text{ g cm}^{-3}$ ) dos encontrados no presente estudo ( $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ ).

Para a variável microporosidade, Rizzardi (2010) encontraram valores semelhantes para os usos de mata nativa (valores variando entre 37 e 45%), o mesmo aconteceu com estudo de Ceconi (2010) e Rachwal et al. (2007), onde os valores foram de 35%. Para o uso de soja Rizzardi (2010) encontraram Microporosidade de 39%, já para os usos de campo nativo, área urbana e pastagem foram encontradas valores de ordens diferentes (41%, valores entre 32 e 38% e entre 19 e 24%, respectivamente). Para o uso de soja, Wink (2009) também encontrou valores de ordens diferentes, onde variaram de 19 a 38%.

Para o parâmetro macroporosidade, Rizzardi (2010), Ceconi (2010) e Wink (2009) encontraram valores semelhantes para o uso de pastagem (19%, 13% e 6 a 24%, respectivamente. Já para os usos de mata nativa, campo nativo, soja e área urbana, Rizzardi (2010) encontraram valores médios de ordens diferentes (7%, 3%, 8% e 8,3%, respectivamente).

Como pode ser observado na Tabela 14, o sistema de uso que apresentou maior valor para o variável ponto de murcha permanente foi o uso com a cultura da soja, sendo seguida pela mata nativa. Estas duas não diferenciando estatisticamente entre si. O menor valor encontrado para ponto de murcha permanente foi o campo nativo, que apresentou conteúdo de água de 7,6 %, sendo que este uso não diferiu estatisticamente dos usos lavoura de arroz, pastagem cultivada e área urbana.

Com relação aos teores de argila a área que apresentou maiores valores foi da soja, embora numericamente maior a mesma não obtivesse diferença significativa entre os tratamentos. Para a resistência a penetração o sistema de uso que apresentou valores mais elevados também foi o sistema com soja, embora mais elevado este não tivesse diferença estatística dos demais.

Ao avaliarmos a capacidade de campo embora não tenha havido diferença estatística entre os sistemas de uso do solo, numericamente a mata nativa apresentou maior quantidade de água retida em capacidade de campo. Já a pastagem cultivada foi a que numericamente apresentou os menores valores.

A Tabela 19 apresenta a correlação estatística entre os parâmetros analisados na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim-RS.

Tabela 19: Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis PMP, Arg, RP, CC, Dens., Micro, Macro e Ksat.

	PMP	Argila	RP	CC	Dens.	Micro	Macro
PMP							
Argila	0,49*						
RP	0,10*	0,28*					
CC	0,62*	0,20*	ns				
Dens.	-0,43*	Ns	ns	-0,68*			
Micro	0,60*	0,27*	ns	0,90*	-0,35*		
Macro	-0,23*	-0,21*	ns	-0,22*	-0,51*	-0,59*	
Ksat	Ns	Ns	ns	Ns	-0,31*	-0,25*	0,51*

\*: significativo a 5% de probabilidade; ns: não significativo.

Com base na Tabela 19, pode-se afirmar que a variável PMP apresentou correlação positiva com Argila, Resistência a Penetração, Capacidade de Campo e Microporosidade, isso evidencia a influencia dos parâmetros físicos, como densidade e porosidade, no armazenamento de água. Já parâmetros como Densidade e Macroporosidade, apresentam correlação inversa, o que indica que com o aumento da densidade dos solos há um menor armazenamento de água, consequentemente uma menor quantidade de água retida no PMP.

Segundo Mesquita; Moraes (2004) quanto maior o diâmetro dos poros menor sua capacidade de reter água, com isso confirma os resultados obtidos na correlação, que mostram que com o aumento da Macroporosidade há uma redução nos valores de umidade no PMP. Com relação à Argila, a mesma apresentou correlação direta com a RP, CC e Micro, porém apresentou correlação inversa com a Macroporosidade. O parâmetro CC apresentou correlação inversa com a Densidade e Macroporosidade, já com a Microporosidade, apresentou correlação direta, isso devido ao fato de a retenção principal pelos microporos.

Os valores de Densidade apresentaram correlação inversa com a variável Microporosidade, Macroporosidade e Ksat. O parâmetro Microporosidade apresentou correlação inversa com a Macroporosidade e Ksat, já a Macroporosidade apresentou correlação direta com o Ksat. Schaffrath et al (2008) encontrou correlação direta entre Capacidade de

Campo e Microporosidade e entre Capacidade de Campo e Densidade, este diferente do presente estudo, em que foi encontrada correlação inversa. Já Alvarenga et al. (2010), encontrou correlação inversa para as variáveis: Capacidade de Campo e Densidade.

A correlação direta entre Ksat e Macroporosidade, pode apresentar que os poros com diâmetros (macroporos) maiores permitem maiores valores da condutividade hidráulica do solo saturado (MESQUITA; MORAES, 2004). Para Hurtado (2004), várias propriedades físicas do solo são responsáveis pela variabilidade da condutividade hidráulica, uma vez que esta é influenciada por todas as propriedades que afetam a distribuição, o tamanho e a forma dos poros da matriz do solo, tais como densidade, textura, estrutura e porosidade.

#### **4.5.2 Análise de componentes principais dos dados dos índices físicos e químicos do solo - ACP**

A análise de componentes principais (ACP) é um método multivariado simples, que pode permitir a redução do número de variáveis avaliadas (MANLY, 2008) e pode ser usado para julgar a importância das próprias variáveis originais escolhidas, ou seja, aquelas que apresentam maior peso e são mais importantes do ponto de vista estatístico (MOITA NETO; MOITA, 1998). Essa ferramenta tem sido utilizada para auxiliar investigações de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos (GOMES et al. 2004; LIMA et al. 2008; FREDDI et al. 2008; SILVA et al. 2010; CHERUBIN et al. 2011; SANTI et al. 2012).

Na tabela 20 é apresentada a análise de componentes principais dos atributos químicos e físicos do solo na Bacia Hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim.

Os itens físicos do solo podem ser observados no item 4.6.

Tabela 20: Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo em diferentes usos e manejos do solo na Bacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim.

Componentes da variância	Componentes Principais					
	CP1	CP2	PC3	CP4	PC5	PC6
Autovalores	7,74	3,68	2,67	2,06	1,82	1,47
Proporção (%)	32,25	15,35	11,12	8,59	7,60	6,12
Proporção acumulada (%)	32,35	47,60	58,72	67,30	74,91	81,03
Variáveis	Correlação com os componentes principais					
pH <sub>água</sub>	-0,115	<b>0,263</b>	0,134	<b>0,288</b>	0,266	0,040
Matéria Orgânica	<b>0,249</b>	-0,233	0,022	0,186	0,051	0,041
Fósforo <sup>(1)</sup>	0,190	0,106	0,253	<b>0,403</b>	0,220	0,010
Potássio <sup>(1)</sup>	-0,050	<b>0,462</b>	0,059	0,039	0,151	0,182
Cálcio <sup>(1)</sup>	0,102	<b>0,314</b>	0,233	0,267	0,048	0,203
Magnésio <sup>(1)</sup>	0,009	<b>0,452</b>	0,015	0,218	0,135	0,168
Alumínio <sup>(1)</sup>	0,182	<b>-0,236</b>	0,154	0,269	0,341	0,100
Silício <sup>(1)</sup>	-0,119	0,038	0,042	0,116	<b>0,558</b>	0,289
Ferro <sup>(1)</sup>	0,202	0,032	<b>0,384</b>	0,033	0,057	0,015
Manganês <sup>(1)</sup>	0,158	<b>0,111</b>	<b>0,294</b>	0,141	0,089	0,078
Zinco <sup>(1)</sup>	0,197	0,148	<b>0,319</b>	0,020	0,208	0,178
Bário <sup>(1)</sup>	-0,208	0,132	0,149	0,098	0,113	0,076
Teor de argila	0,160	0,193	0,234	<b>0,360</b>	0,033	0,255
Resistência à	0,215	0,124	-	0,189	-	-

penetração			0,073		0,045	<b>0,456</b>
Infiltração de			-		-	-
água	-0,148	0,089	0,119	<b>0,210</b>	0,222	<b>0,425</b>
Escoamento			-	-		
superficial	-0,071	0,099	0,045	0,045	0,081	<b>0,374</b>
Capacidade			-	-	-	-
de campo	<b>0,292</b>	0,066	0,065	0,018	0,284	0,058
Ponto de						
murcha						
permanente	<b>0,332</b>	-0,014	0,029	0,049	0,170	<b>0,633</b>
			-		-	-
<b>AGUT</b>	<b>0,244</b>	0,153	0,093	0,056	0,128	<b>0,461</b>

<sup>(1)</sup>Teores totais, determinados por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva. Em negrito, variáveis que apresentaram os maiores escores em cada componente principal.

A análise de componentes principais permitiu agrupar as 19 variáveis originais (atributos químicos e físicos do solo) em seis fatores e o ajuste do modelo foi capaz de explicar 81,03% das variâncias das variáveis com autovalores maiores que 1 (Tabela 1). O primeiro componente (CP1) explicou 32,35% da variância dos dados, e foi identificado como “*armazenamento de água no solo e MOS*”. As variáveis que apresentaram maiores cargas fatoriais (escores) no CP1 foram: ponto de murcha permanente (0,332), capacidade de campo (0,292), matéria orgânica do solo (0,249) e quantidade máxima de água armazenável no solo (0,244).

Sendo assim, identifica-se que as variáveis descritas acima, indicam que o solo, necessita de melhores condições de manejo, onde as variáveis PMP, CC e quantidade máxima de água armazenável no solo, apresentaram os maiores valores. Com isso, o solo nessas condições, apresenta maiores teores de escoamento superficial, e consequentemente menores teores de armazenamento de água no solo.

Segundo Rotondano e Melo (2004) a diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente resulta na água disponível para a planta. Com isso, no presente estudo tem-se a significância entre os parâmetros do presente estudo. Situação semelhante foi encontrada por diversos autores como Peraza (2003), Oliveira et al. (2002) e Arruda; Zullo Junior; Oliveira (1997), conforme afirma Alvarenga et al.

(2010), onde os mesmos encontraram estreita relação entre a CC e a PMP no solo estudado.

O segundo componente (CP2) explicou 15,35% da variância dos dados, sendo identificado como “*acidez do solo e bases relacionadas*”. As variáveis que apresentaram maiores escores no CP2 foram: K (0,462), Mg (0,452), Ca (0,314),  $\text{pH}_{\text{água}}$  (0,263) e Al (-0,236). Com análise do CP2, identifica-se que os parâmetros que podem ser prejudiciais ao solo é o  $\text{pH}_{\text{água}}$  e Al, onde em altas concentrações trazem prejuízos ao solo e ao meio ambiente. Alguns autores tais como Veloso et al. (2001), encontraram correlação positiva entre os parâmetros K, Mg e Ca na produção de massa seca, o que indica que tais parâmetros, provavelmente não causam danos significativos ao meio ambiente.

O terceiro componente (CP3) explicou mais 11,12% da variância dos dados, sendo identificado de “*micronutrientes*”. No CP3 os maiores escores foram observados para o Fe (0,384), Zn (0,319) e Mn (0,294). Em solos de várzeas, especialmente quando cultivados com arroz, a compreensão da dinâmica desses elementos no solo é essencial, visto que nesse ambiente de anaerobiose, os microrganismos utilizam o  $\text{Fe}^{+3}$  e o  $\text{Mn}^{+4}$  como aceptores finais de elétrons da oxidação do carbono orgânico. Desta forma, os teores de  $\text{Mn}^{+2}$  e  $\text{Fe}^{+2}$  solúveis no solo aumentam, podendo melhorar a produtividade da cultura do arroz (LIMA et al. 2008) ou até, atingir níveis fitotóxicos a cultura (CAMARGO et al. 1999).

A área de estudo apresenta grandes áreas de várzea utilizada na produção de arroz, onde provavelmente é a causa de tais condições, onde em alguns casos podem causar danos ao solo e os recursos hídricos. Carvalho et al. (2010) afirma que os teores de Fe e de Mn possuem um comportamento diferenciado na presença de plantas, sendo, em média, maiores nos tratamentos sem plantas. Com a presença de plantas de arroz tem-se a formação de uma região diferenciada no solo conhecida por rizosfera, onde várias mudanças químicas ocorrem em virtude da interação das raízes das plantas e o solo. Vendrame et al. (2007) em um estudo semelhante, afirmam que há uma grande proximidade entre os autovetores dos metais totais com os da fração fina do solo, principalmente o Fe, o que condiz com dados apresentados por outros autores, como por Singh; Gilkes (1992), que constataram que a maior parte dos microelementos avaliados, entre eles Mn e Zn, estava associada aos óxidos de Fe, resultante da adsorção específica com a hematita e a goethita.

O quarto componente (CP4) explicou mais 8,59% da variância dos dados, e foi identificado de “disponibilidade de fósforo”, pois as três variáveis que apresentaram maior escore nesse componente foi o P (0,403), o teor de argila (-0,360) e  $\text{pH}_{\text{água}}$  (-0,288). Esses dois últimos são os principais fatores condicionantes da disponibilidade de fósforo no solo. Conforme aumenta o teor de argila do solo e reduz o valor de  $\text{pH}_{\text{água}}$ , menor é a fração lábil do P, prontamente disponível às plantas. Nessas situações praticamente todo o P presente no solo, encontra-se adsorvido fortemente (adsorção específica) aos coloides do solo, especialmente aos óxidos de Fe e Al, fazendo parte da estrutura cristalina desses minerais, e, portanto, tornando-se pouco ou não lábil.

No presente estudo, as maiores concentrações de Fósforo ocorreram em solos de arroz, isso se deve por que no solo, o fósforo é pouco móvel, pois é firmemente retido não sendo um nutriente facilmente sujeito a perdas por percolação, entretanto, a erosão é a responsável pelas maiores perdas de fósforo, quando ocorrem perdas de matéria orgânica e partículas coloidais com fósforo.

O quinto componente (CP5) relaciona-se basicamente ao “silício” e explica 7,60% da variação dos dados. O Si, está relacionado diretamente com a mineralogia do solo, visto que é constituinte da unidade básica (tetraedro de Si) dos minerais silicatos do solo, e, portanto, um dos elementos mais abundante no solo.

O sexto componente (CP6) foi identificado como “compactação do solo” e explica mais 6,12% da variação dos dados. As principais variáveis mais fortemente correlacionadas são: ponto de murcha permanente (0,633), água disponível (-0,461), resistência do solo a penetração (-0,456), infiltração de água (-0,425) e escoamento superficial (0,374). Esse componente tem relação inversa ao CP1. Quando um solo é submetido a usos ou práticas de manejo que promovam alterações intensas na estrutura do solo, elevando seu estado de compactação, reduz a capacidade de armazenamento de água.

O parâmetro resistência à penetração está estritamente ligado com as questões de infiltração de água no solo e escoamento superficial, pois um solo que apresenta uma alta compactação, conseqüentemente tem-se maiores valores de escoamento superficial e menores taxas de infiltração. Conforme Panachuki (2003) a magnitude da infiltração é severamente reduzida pela formação ou presença do selamento superficial, fenômeno motivado pela pequena porosidade desta camada e à dominância de poros de pequeno diâmetro.

Existe variabilidade espacial na taxa de infiltração de água na bacia do Rio Vacacaí-Mirim, e os pontos que apresentaram maior infiltração de água, encontram-se sob o uso de campo nativo, pastagem e soja, respectivamente. As menores taxas de infiltração foram obtidas nos pontos sobre o uso de arroz.

O escoamento superficial mostrou comportamento distinto em função do uso, ocupação e tipo de solo sugerindo que a distribuição espacial dessa variável deva ser levada em conta no entendimento dos processos hidrológicos e projetos ambientais.

Quanto aos valores de resistência à penetração do solo, diagnosticada na profundidade de 0,20 m, verificou-se que os locais ocupados com pastagem apresentaram menor resistência a penetração e os locais que apresentaram maior resistência foram os ocupados por soja.

É possível identificar que as propriedades físicas do solo sofrem influências com relação ao uso as quais são submetidos. Ocorreram alterações nas propriedades tais como densidade e resistência a penetração, onde os solos sob cultivo de arroz apresentaram maiores valores médios, sendo assim influenciando diretamente a dinâmica de infiltração de água no solo. Com relação à análise estatística, a variável PMP apresentou correlação positiva com Argila, Resistência a Penetração, Capacidade de Campo e Microporosidade, isso evidencia a influência dos parâmetros físicos, como densidade e porosidade, no armazenamento de água. Já parâmetros como Densidade e Macroporosidade, apresentam correlação inversa, o que indica que com o aumento da densidade dos solos há um menor armazenamento de água, conseqüentemente uma menor quantidade de água retida no PMP.

Destacam-se os valores elevados de argila e matéria orgânica encontrados nos solos que estão sob o uso de mata nativa e campo nativo, sendo possível afirmar que a preservação do solo contribui para manutenção destes parâmetros. Dentre os atributos químicos, os maiores valores relacionam-se com solos que sofreram ação antrópica, como cultivados com arroz e soja ou de pastagem.

Os tipos e usos do solo influenciam nas concentrações dos metais através da ação antrópica a qual o solo está sujeito. Na análise dos elementos estudados, os principais metais estão presentes nas áreas de cultivo de arroz e soja onde o uso de fertilizantes e agrotóxicos são maiores. Alguns elementos estão naturalmente disponíveis em concentrações elevadas e não são prejudiciais as plantas como o caso do potássio, e ainda foi possível perceber que alguns elementos estão

estritamente correlacionados com os demais analisados, como o caso do elemento Mg. No presente estudo foi possível identificar que os usos de solo campo nativo, soja, pastagem, arroz e mata nativa tiveram uma maior influência nas concentrações dos elementos alumínio, potássio e magnésio.

Os usos do solo envolvendo o cultivo de soja e arroz além dos ocupados por pastagem alteraram as concentrações de Ba e Zn, apresentando em alguns casos valores acima do máximo permitido pela legislação nacional, podendo esse aumento nas concentrações estar relacionado ao uso de agrotóxicos que essas atividades necessitam. Sendo assim pode-se observar que os solos sob os usos de arroz, soja e pastagem apresentaram maior influência na concentração do elemento bário, já o fósforo teve maior influência dos solos sob o uso de pastagem e soja.

#### 4.6 INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL SOB DIFERENTES USOS E OCUPAÇÃO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

Na Tabela 21 é apresentada a variação do tempo de escoamento, a média de infiltração e a taxa de infiltração de água no solo da bacia hidrográfica em estudo.

Tabela 21: Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo determinado pelo método “Cornell Sprinkle Infiltrometer” em locais utilizados por arroz na bacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim.

Pontos	Uso do solo	Tempo de início do Esc. superficial (min)	Média escoamento Superficial ( $\text{mm min}^{-1}$ )	Média taxa de infiltração ( $\text{mm min}^{-1}$ )
<b>P1</b>	Mata Nativa	3	0,175	0,302
<b>P2</b>	Mata Nativa	10	0,332	0,191
<b>P3</b>	Mata Nativa	2	0,442	0,050
<b>P4</b>	Soja	3	0,306	0,193
<b>P5</b>	Campo Nativo	1	0,032	0,434
<b>P6</b>	Soja	3	0,420	0,181
<b>P7</b>	Soja	2	0,436	0,096
<b>P8</b>	Soja	3	0,152	0,382
<b>P9</b>	Soja	10	0,397	0,169
<b>P10</b>	Mata Nativa	*	*	*
<b>P11</b>	Pastagem	6	0,257	0,314
<b>P12</b>	Campo Nativo	6	0,301	0,230
<b>P13</b>	Área Urbana	*	*	*
<b>P14</b>	Área Urbana	3	0,440	0,195
<b>P15</b>	Pastagem	1	0,458	0,172
<b>P16</b>	Arroz	1	0,143	0,018
<b>P17</b>	Arroz	5	0,345	0,048
<b>P18</b>	Arroz	3	0,146	0,022
<b>P19</b>	Arroz	1	0,451	0,030
<b>P20</b>	Arroz	3	0,454	0,184
<b>P21</b>	Arroz	5	0,453	0,033
<b>P22</b>	Campo Nativo	6	0,533	0,088

<b>P23</b>	Campo Nativo	3	0,297	0,248
<b>P24</b>	Arroz	2	0,585	0,052
<b>P25</b>	Arroz	11	0,250	0,244
<b>P26</b>	Mata Nativa	3	0,568	0,061

\*Não ocorreu escoamento superficial.

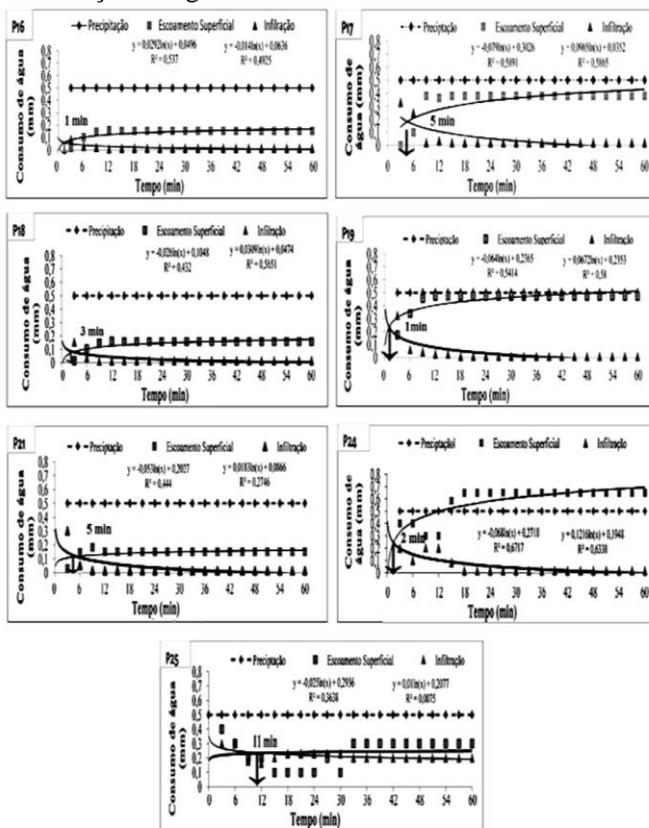
O ponto P10 não apresentou escoamento pelo solo ser um neossolo com uma grande quantidade de rocha ainda em processo de intemperismo, já no P13 o fato pode ser em decorrência de ser uma área de transição entre uma área rural e urbana e o mesmo apresentar baixas taxas de compactação.

#### 4.6.1 Áreas de cultivo de arroz

Na área de cultivo de arroz, nos pontos P16, 17, 18, 19, 21 e 24, o início do escoamento superficial aconteceu antes dos seis primeiros minutos de precipitação, com o aumento da infiltração no início do ensaio, tornando-se constante com o passar do tempo, isto ocorreu, pois, os pontos estavam localizados em Planossolo Háptico Eutrófico e Argissolo Bruno-Acinzentado álico ou alumínico. Para Streck et al. (2008) no RS planossolos são solos imperfeitamente ou mal drenados encontrados em áreas de várzea com relevo plano e suavemente ondulado, que apresentam alta saturação por base. Já Argissolo Bruno-Acinzentado álico ou alumínico, originado de siltito e arenito que ocorrem em duas situações de paisagem, relevos suavemente ondulado e ocupando coxilhas em cotas intermediárias entre Argissolo Vermelho, na unidade de São Pedro, em cotas mais altas.

Apenas no último ponto observado (P25) na área de cultivo de arroz, o escoamento superficial ocorreu a partir do décimo primeiro minuto, possuindo uma média de  $0,250 \text{ mm h}^{-1}$ , enquanto que a taxa de infiltração de água no solo possui uma média de  $0,244 \text{ mm h}^{-1}$  tornando-se constante no décimo oitavo minuto (Tabela 21). Na Figura 20 é ilustrado o escoamento e a infiltração nos pontos de cultivo de arroz.

Figura 35: Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em áreas de cultivo de arroz.



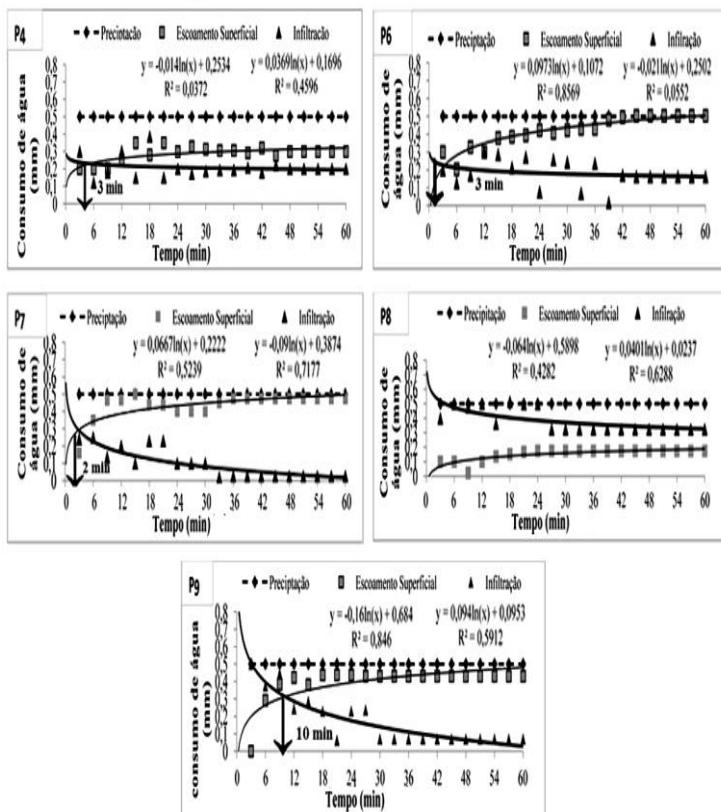
#### 4.6.2 Áreas de cultivo da Soja

Na área de cultivo da soja com plantio direto, no primeiro ponto analisado (P4), tanto o escoamento superficial quanto a infiltração no início dos testes eram de ordem crescente, com escoamento superficial médio de  $0,306 \text{ mm h}^{-1}$  e  $0,193 \text{ mm h}^{-1}$  de infiltração de água no solo. A partir dos 20 minutos a taxa de infiltração no solo passou a ser constante. Segundo Vezzani; Mielniczuk (2009) áreas de plantio direto tendem a apresentar melhores taxas de infiltração de água no solo e, consequentemente, retardam o início do escoamento superficial. Isso se

deve ao melhor grau de estruturação do solo, devido às práticas de manejo preconizadas nesse sistema, como aporte de resíduos orgânicos constantes, rotação de culturas e não revolvimento do solo, as quais condicionam melhorias ou ao menos manutenção da qualidade física do solo, a partir do aumento dos teores de matéria orgânica, agregação, continuidade de poros, equilíbrio entre macro e microporosidade, e melhorias na condutividade hidráulica do solo.

Já nos pontos P6, P7 e P9 o escoamento superficial ocorreu antes dos 10 minutos iniciais sendo o ponto P6 em Argissolo Vermelho álico e distrófico e ponto P7 Neossolo Litólico eutrófico e distrófico. Nos três pontos a infiltração obteve o mesmo comportamento com alta taxa no início do processo, mantendo-se constante com o decorrer do tempo. No ponto P8, o escoamento superficial ocorreu a partir dos 3 minutos iniciais, com média de  $0,152 \text{ mm h}^{-1}$ , e a infiltração apresentou um alto índice no início do ensaio, mas no decorrer do tempo a sua taxa manteve-se constante, com uma média de  $0,382 \text{ mm h}^{-1}$ . A Tabela 21 apresenta o escoamento e a infiltração média nos pontos de estudados. A Figura 21 ilustra as taxas de escoamento e infiltração de água no solo nas áreas de cultivo de soja.

Figura 36: Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em áreas de cultivo de soja.



Bertol (2001) em três pontos onde era predominante o cultivo de soja, até 10 min, o solo absorveu toda a água distribuída pelo infiltrômetro, a partir deste tempo iniciou o escoamento superficial. Santi (2007) em uma zona de alta produtividade a simulação de uma precipitação de  $300 \text{ mm h}^{-1}$  provocou a ocorrência de escoamento após 27 min e 16 min de teste, enquanto que zona de baixa produtividade esse tempo foi de 11 e 9 min, respectivamente, para uma área de lavoura com plantio direto estabelecido em Palmeira das Missões e de Não-Me-

Toque, respectivamente, onde o solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico.

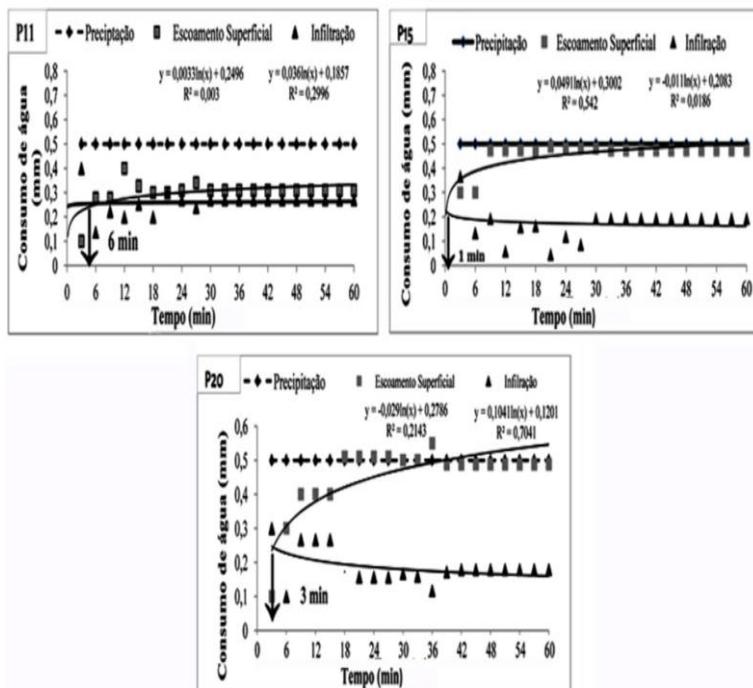
Já para Borges et al. (2009), que promoveram simulações de precipitação, em local desprovido de cobertura vegetal, obtiveram taxa de infiltração estável variando de 51,6 a 78 mm h<sup>-1</sup>, proporcionando um valor médio de 61,3 mm h<sup>-1</sup>. Panachuki et al. (2011) citam valores de taxa de infiltração estável média de 61,3 mm h<sup>-1</sup> em solo desprovido de cobertura vegetal e 76,3 mm h<sup>-1</sup> em solo com cobertura morta.

#### 4.6.3 Áreas de pastagem

Para áreas de pastagem foram realizados seis testes de infiltração, onde no ponto P11 o escoamento superficial ocorreu no sexto minuto com média de 0,257 mm h<sup>-1</sup> enquanto que a taxa de infiltração teve um leve aumento no início, mas tornou-se constante a partir do trigésimo minuto, com uma média de 0,314 mm h<sup>-1</sup>, infiltrando mais do que escoar, confirmando um solo com boa drenagem e não compactado.

No P15 o escoamento superficial ocorreu no primeiro minuto, com 0,458 mm h<sup>-1</sup> e variações na taxa de infiltração possuindo uma média de 0,172 mm h<sup>-1</sup> tornando-se constante apenas no trigésimo minuto. No ponto P20 o escoamento superficial ocorreu no terceiro minuto com média de 0,454 mm h<sup>-1</sup>, tendo uma alta taxa de infiltração no início do teste, com média total de 0,184 mm h<sup>-1</sup> tornando-se constante a partir do terceiro minuto conforme indica Figura 37. A Tabela 21 apresenta o escoamento e infiltração média nos pontos de estudo. Nos dois pontos citados acima P15 e P20 as taxas de infiltração foram baixas, acarretando um alto escoamento superficial, devido à compactação do solo, pela presença de animais.

Figura 37: Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em áreas de pastagem.



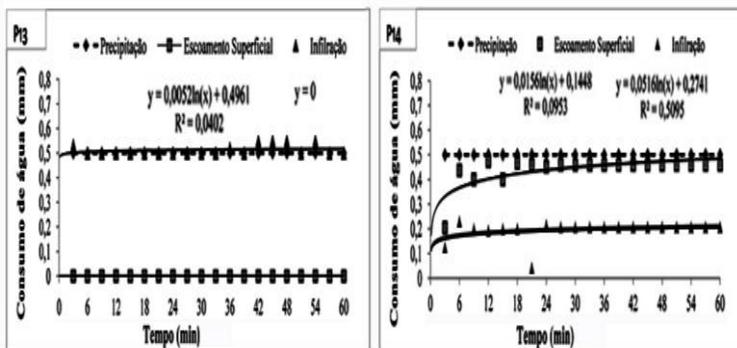
Rodrigues Júnior (2007) relata que no município de Taubaté, no Vale do Paraíba, Estado de São Paulo, apresenta menor infiltração de água em solos onde havia predomínio de pastagem com  $19 \text{ mm h}^{-1}$ . Trein et al. (1991) avaliaram a taxa de infiltração e a infiltração acumulada de água antes e depois da realização de um pastejo de curta duração com alta lotação animal (40 horas e 200 animais  $\text{ha}^{-1}$ ), e encontraram redução de 68% na taxa de infiltração e de 60,76% para a infiltração acumulada, após o pastoreio.

#### 4.6.4 Área urbana

Os dois pontos estudados na área urbana (P13 e P14) apresentaram comportamento similares. O ponto P13, localizado em Argissolo Vermelho álico e distrófico, não ocorreu escoamento

superficial e, conseqüentemente, a água infiltrou no solo. O fato de não ocorrer escoamento superficial no ponto P13, foi de estar localizado sobre um Argissolo Vermelho álico e distrófico, onde o solo apresentava características de alta infiltração de água, com uma grande quantidade de arenito, para Streck et al. (2008) Argissolos são solos profundos a muito profundos variando de bem a mal drenados, originando-se de diversos tipos de materiais tais como basaltos, granitos, argilitos e siltitos. Os valores de escoamento e infiltração de água podem ser observados na Figura 38.

Figura 38: Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em área urbana.



Já no segundo ponto (P14) o escoamento superficial acontece lentamente no início do teste aumentando até o terceiro minuto com uma média de  $0,440 \text{ mm h}^{-1}$  a partir deste tempo o escoamento tornou-se constante, enquanto que a infiltração tornou-se constante no nono minuto com média de  $0,195 \text{ mm h}^{-1}$  de água infiltrada no solo.

O impacto da urbanização é mais significativo para precipitações de maior frequência onde o efeito da infiltração é mais importante. Para precipitações de baixa frequência (alto tempo de retorno) a relação entre as condições naturais e com urbanização é relativamente menor. A tendência é de que à medida que aumenta o risco diminua a diferença relativa entre as vazões máximas pré-urbana e urbana. Para uma enchente de risco alto a proporção da precipitação que infiltra sobre o total precipitado diminui, pois a infiltração tende a ser a mesma,

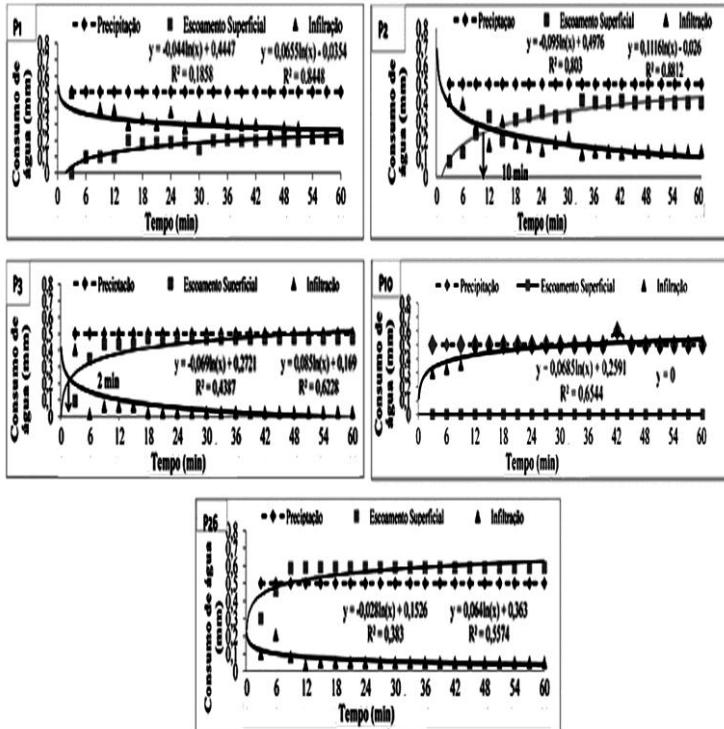
independentemente da precipitação, já que esta é maior que a capacidade de infiltração.

Pizella e Sousa (2007) dizem que as águas receptoras do meio urbano sofrem com os impactos advindos da ausência de considerações ambientais na ocupação do espaço. Dentre seus agentes impactantes mais significativos, encontra-se o escoamento superficial, produzido em grandes quantidades nos ambientes urbanos, em razão do alto grau de impermeabilização de suas superfícies, por meio das ruas, avenidas, telhados e construções.

#### **4.6.5 Áreas de mata nativa**

Foram realizados cinco testes em pontos predominantemente ocupados com mata nativa. No P1 o escoamento superficial aconteceu no terceiro minuto possuindo uma média total de  $0,175 \text{ mm h}^{-1}$  com a taxa de infiltração possuindo uma média de  $0,302 \text{ mm h}^{-1}$ , sofrendo altas e baixas até o trigésimo terceiro minuto tornando-se constante. No ponto P2 o escoamento superficial ocorreu a partir do décimo minuto, com uma média total de  $0,332 \text{ mm h}^{-1}$  enquanto que a taxa de infiltração teve uma média de  $0,191 \text{ mm h}^{-1}$ , no início da análise a infiltração era alta diminuindo gradativamente com o decorrer do tempo e apenas no trigésimo terceiro minuto passou a ser constante. No ponto P3 o escoamento ocorreu há dois minutos após o início com uma média de  $0,442 \text{ mm h}^{-1}$ , possuindo uma alta taxa de infiltração no início com média de  $0,050 \text{ mm h}^{-1}$  e a partir do décimo oitavo minuto a infiltração no solo passou a ser constante (Figura 39).

Figura 39: Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em área de mata nativa.



No ponto P10 não ocorreu escoamento superficial, onde toda a água precipitada infiltrou no solo. No ponto P26 o escoamento superficial teve início no terceiro minuto tornando-se constante a partir do nono minuto obtendo uma média total de  $0,568 \text{ mm h}^{-1}$  um leve aumento da infiltração no início do teste foi observado tornando-se constante no décimo quinto minuto com uma média de  $0,061 \text{ mm h}^{-1}$ .

Fazendo comparações com a capacidade de infiltração da mata nativa com áreas de plantio direto e pastagem nota-se que a mata nativa apresenta capacidade superior em relação à infiltração de água aos demais usos do solo, pois o ponto P10 o escoamento superficial foi de  $300 \text{ mm h}^{-1}$ . Sbardelotto et al. (2011) relatam que através dos resultados observados em Frederico Westphalen-RS na área de mata nativa, não

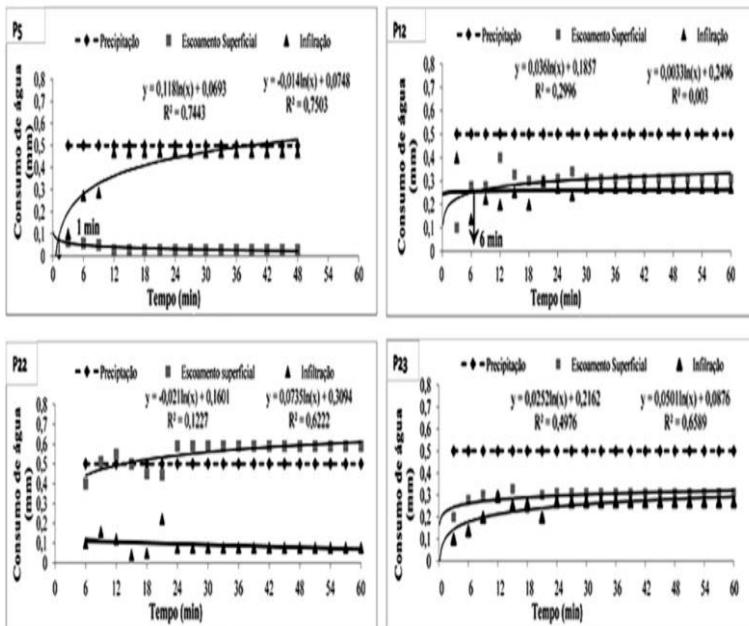
houve escoamento superficial, sendo que a infiltração média ficou acima dos 300 mm h<sup>-1</sup>.

Para Muschler (1999), a presença de árvores aumenta o aporte de matéria orgânica dos solos, conservando a umidade, aumentando a capacidade de absorção e infiltração de água, reduzindo o risco de erosão e estimulando a atividade biológica.

#### **4.6.6 Áreas de campo nativo**

Na área de campo nativo foram realizados quatro testes. No ponto P5, o escoamento superficial ocorreu no primeiro minuto com uma média total de 0,032 mm h<sup>-1</sup>, sendo que a taxa de infiltração permaneceu constante a partir do décimo segundo minuto com média total de 0,434 mm h<sup>-1</sup>. No ponto P12 o escoamento superficial ocorreu no sexto minuto, possuindo uma média de 0,301 mm h<sup>-1</sup> enquanto que a taxa de infiltração tornou-se constante a partir do vigésimo quarto minuto com uma média de 0,230 mm h<sup>-1</sup>, sofrendo leves oscilações (Figura 40).

Figura 40: Intensidade de precipitação simulada, escoamento superficial e infiltração de água no solo em área de em campo nativo.



Segundo USDA (1999) as taxas no solo descoberto e no campo nativo (7,3 e 6,4 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente) são consideradas lentas (de 1,5 a 15 mm h<sup>-1</sup>), enquanto nos demais tratamentos, incluindo o pousio, são considerados moderados (de 15 a 51 mm h<sup>-1</sup>). Baixas taxas de infiltração de água em campo nativo podem ocorrer devido à densidade do solo nessas áreas, principalmente na camada de 0,0–0,05 m de profundidade naturalmente, em razão do pisoteio animal, com destaque para os casos em que ocorre superpastejo e queimada.

No ponto P22 apenas no sexto minuto ocorreu escoamento superficial com uma média total de 0,533 mm h<sup>-1</sup>, sendo a taxa de infiltração constante apenas no décimo segundo minuto com média de 0,088 mm h<sup>-1</sup>. No quarto ponto P23 o escoamento superficial ocorreu no terceiro minuto com uma média total de 0,297 mm h<sup>-1</sup> e a taxa de infiltração encontra-se constante no vigésimo quarto minuto com 0,248

mm h<sup>-1</sup> conforme indica a Tabela 21 com as taxas médias de infiltração e escoamento superficial nos pontos de campo nativo.

Sbardelotto et al. (2011) relatam que através dos resultados observados em Frederico Westphalen na área de campo nativo, a taxa média de infiltração foi de 14,42 mm/h1, e o início do escoamento superficial ocorreu aos 1min21s.

Para Bertol et al. (2011) áreas de campo nativo no sul do Brasil, especialmente nos campos de elevada altitude, são tradicionalmente utilizadas para pastejo animal, especialmente com bovinos e ovinos. Lanzanova et al. (2010) afirmam que em áreas de campo nativo a água tem mais dificuldade de infiltrar, pelo fato de que boa parte de seus macroporos está preenchida por raízes, porém, ao mesmo tempo, essa água tem maior dificuldade em escoar na superfície, em razão da elevada e permanente cobertura do solo.

#### **4.6.7 Resistência à penetração**

Em relação à resistência da penetração (RP), na camada de 0 a 0,20 m. Os maiores valores observados nas cinco repetições realizadas por ponto foram localizados no ponto P3 sobre o uso de mata nativa, onde a resistência média observada foi de 3556 kPa em um Argissolo Vermelho álico e distrófico, observada no mapa acima na cor verde. Enquanto que os pontos P5, P6, P8, P9, P10, P13 e P22 após as cinco repetições a cada ponto, apresentou uma resistência média de 1726 kPa com maiores concentrações localizadas no ponto 8 em solo ocupado pelo cultivo da soja em um Argisolo Bruno-Acinzentado álico. Os valores de menor resistência foram localizados nos pontos P11, P12, P15, P16, P18, P19 e P20 apresentaram uma resistência média de 126 kPa com o ponto P16 apresentando o menor valor (121 kPa) em área de cultivo da soja em um Planossolo Háplico Eutrófico.

#### **4.6.8 Taxas médias de infiltração e escoamento superficial**

Os maiores valores de escoamento superficial foram apresentados nas áreas de cultivo de arroz, indicados na região sudeste da bacia hidrográfica, já os menores valores estão representados na região nordeste da bacia. Com relação às taxas de infiltração de água no solo, os maiores valores de infiltração de água no solo estão apresentados nas áreas de arroz e campo nativo, apresentados na região central e leste da

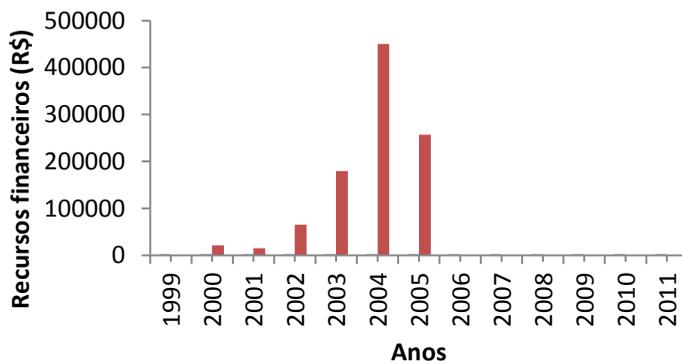
bacia hidrográfica, já as menores taxas foram observadas na região leste e sul em áreas de mata nativa e arroz.

#### 4.7 EFETIVIDADE DO COMITÊ DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DOS RIOS VACACAÍ E VACACAÍ-MIRIM

##### **4.7.1. Recursos financeiros do Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim**

No período compreendido entre os anos de 1999 e 2011, foram destinados ao CGBHRV, recursos destinados a projetos, organização de eventos e a própria manutenção do comitê, totalizando R\$ 988.900,00, distribuídos da seguinte forma, conforme a figura 41.

Figura 41: Distribuição anual de recursos ao Comitê da Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim



Nota-se o crescimento da verba destinada ao CGBHRV para o período de 2002 a 2004, entretanto desde 2005 o Comitê não tem recebido recursos financeiros.

O ano de 2004 é marcado por uma intensa atividade no comitê, com reestruturação do mesmo, grande participação em eventos, e muitos recursos provenientes de projetos aprovados. O mesmo é o ano com maior disponibilidade de recursos financeiros, com R\$ 450.000,00, sendo estes provenientes em grande parte de projetos aprovados.

Ao longo do período avaliado, foram aprovados e liberados recursos para os projetos apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Projetos desenvolvidos pelo comitê

Projeto	Descrição do projeto
Efeito da urbanização sobre os recursos hídricos em Santa Maria	objetiva estudos nas bacias hidrográficas do Alto Da Colina, do rio Vacacaí-Mirim a montagem da barragem do DNOS e do arroio Cancela
Projeto Habitantes do Rio	projeto que visa a efetivação da Romaria das Águas, o lançamento de uma rede de educação ambiental e a definição de um bioindicador
A Piava, <i>Leporinus obtusidens</i> , como bioindicador das bacias dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim	definição do peixe Piava ( <i>Leporinus obtusidens</i> ) como bioindicador das bacias dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, e a realização de estudos que demonstram a importância do mesmo no monitoramento da qualidade da água da bacia
Melhoria e adequação do modelo de outorga elaborado para a bacia hidrográfica do rio Santa Maria na bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim	projeto de fomento a pesquisa, visando a melhoria do modelo de outorga já elaborado
Processo de sensibilização, produção de mudas de plantas nativas destinadas à recuperação de encostas e mata ciliar na microbacia hidrográfica do Arroio Grande e Arroio do Meio, em Santa Maria	projeto de recuperação de áreas degradadas a ser utilizado na implantação e recuperação de mata ciliar, na Bacia Hidrográfica do Arroio Grande e Arroio do Meio

---

Criação e apoio aos Núcleos de Educação Ambiental e programa permanente de capacitação, formal e informal, nos municípios integrantes da bacia hidrográfica dos rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim	projeto que visa o lançamento de uma rede de educação ambiental e a capacitação nos municípios
--	--

---

Os projetos desenvolvidos pelo comitê demonstram que o mesmo apresenta-se atuante na gestão da bacia, participando das proposições da Secretaria Estadual do Meio Ambiente – SEMA, como o Projeto Habitantes do Rio, além de promover o monitoramento e ações de melhoria da qualidade da água da bacia, aliados a capacitação nos municípios da bacia.

Os projetos aprovados no âmbito do comitê, são encaminhados para análise no Conselho de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul – CRH-RS, ou demandados pelo Estado e/ou União e tem sua implementação discutida no âmbito do comitê. Os projetos recebem recursos financeiros, principalmente do Fundo de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul - FRH-RS, para sua implementação, e podem ser considerados como uma das ações mais efetivas dessas instâncias, pois os projetos ali aprovados é que poderão auxiliar a manutenção da quantidade e qualidade dos recursos hídricos aliada ao desenvolvimento.

Já os recursos destinados à manutenção do comitê são provenientes de convênios firmados entre o comitê e instituições governamentais ou privadas, possibilitando por exemplo, a participação de membros do comitê em eventos e a aquisição de bens necessários ao funcionamento do mesmo.

A falta de recursos financeiros tem sido considerada o principal problema enfrentado pelo comitê (HAASE, 2005), pois nos períodos de renovação de convênios, o comitê permanece sem recursos para a sua manutenção. Além disso, a liberação destes recursos está condicionada ao seu desempenho, devendo o mesmo estar ativo, desenvolvendo ações

e políticas de proteção e remediação dos mananciais a fim de receber recursos.

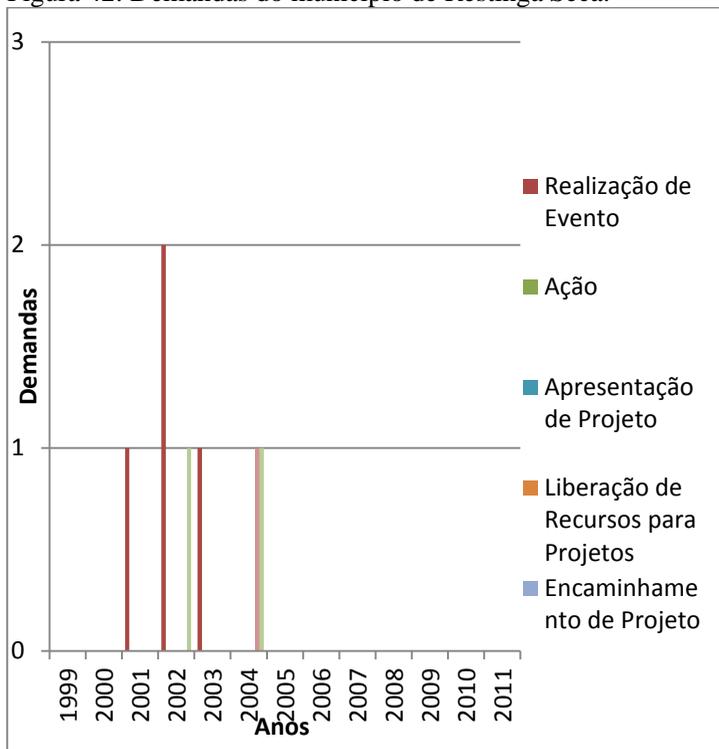
#### **4.7.2. Atendimento das demandas dos municípios que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim no Comitê de Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim**

Através da análise das atas do comitê verificou-se que durante o período de avaliação, alguns municípios que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim tiveram pouca ou nenhuma mensuração a seu respeito dentro do comitê.

Por exemplo, o município de Itaára teve entre suas demandas apenas uma realização de evento, sendo este a apresentação do Painel “Conhecendo a Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim – Licenciamento Ambiental”, por parte de representantes da FEPAM e dos municípios de Cachoeira do Sul, Dilermando de Aguiar, Itaára, Júlio de Castilhos, Restinga Seca, Santa Maria, São Gabriel, São João do Polêsine, São Sepé e Silveira Martins, realizada no ano de 2002.

Já o município de Restinga Seca, teve entre suas demandas ações como a implantação do aterro sanitário em 2004, também houve relato da possibilidade de desastre ambiental na ponte de Restinga Seca em caso de cheia, além da realização de eventos, conforme Figura 42.

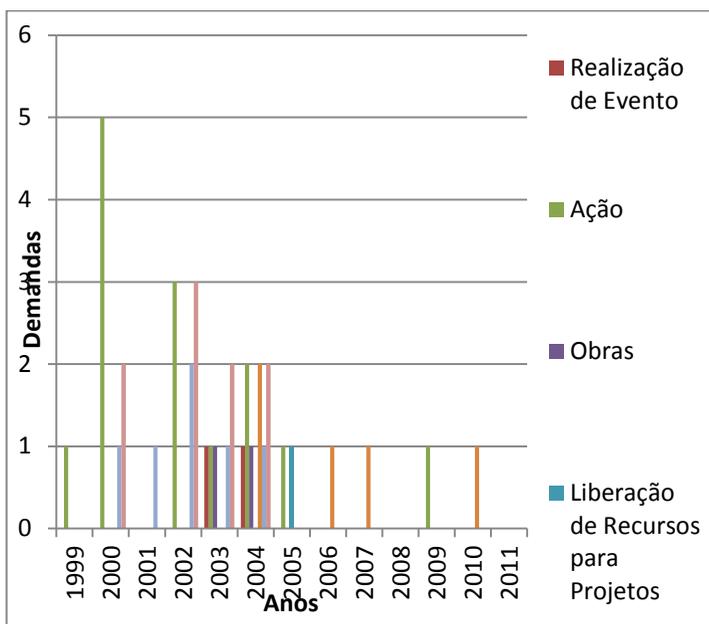
Figura 42: Demandas do município de Restinga Seca.



O município de Restinga Seca mantinha-se num índice constante de demandas até o ano de 2004, sendo que a partir do mesmo, este município não apresentou mais demandas no comitê. A partir de 2004, o município passou a enfrentar uma crise nas fábricas do município, o que causou a desestruturação do mesmo, podendo esta ser associada à ausência de apresentação de demandas no comitê.

O município de Santa Maria foi o que apresentou um maior número de demandas, de acordo com a Figura 43, merecendo destaque o desenvolvimento de ações voltadas ao município e a bacia, os impactos ambientais ocorridos na bacia e o desenvolvimento de projetos referentes a esses impactos, buscando também formas de remediá-los.

Figura 43: Demandas do município de Santa Maria



O fato de o município de Santa Maria estar a frente na quantidade de demandas deve-se possivelmente a existência de entidades de maior influência no município, como a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a qual desenvolve projetos de pesquisa no âmbito da bacia e do comitê.

Os demais municípios que compõem a bacia não tiveram nenhuma mensuração a seu respeito no período avaliado. Uma hipótese para explicar este fato, é que o processo de municipalização levou à criação de tantas instâncias de participação que, no caso de municípios pequenos, particularmente, acaba esgotando os recursos humanos disponíveis e a possibilidade de representação das organizações existentes. Isso pode levar ao fortalecimento de determinados atores, por participarem de diversas instâncias colegiadas, ou ao simples esvaziamento do comitê dada a sobrecarga dessas pessoas (CARDOSO, 2003).

Analisando os dados referentes às demandas de cada município pode-se perceber também que não há nenhuma relação direta dos mesmos com o tamanho da população ou com PIB do município. No entanto, quanto à participação no comitê, a categoria agrosilvopastoril se destaca, com maior nível de participação, sendo também a categoria amplamente citada como mais influente, destacando-se o cultivo de arroz irrigado. Já o legislativo municipal apresenta a menor participação no comitê. Assim uma hipótese é que exista uma excessiva representatividade dos setores ligados a esta categoria em detrimento aos outros segmentos sociais, sendo estes os mais influentes (HAASE, 2005).

As demandas encaminhadas pelos municípios da bacia receberam tentativas de solução por parte do comitê, como por exemplo na questão da seca, onde o comitê buscou medidas que reduzissem o consumo de água. Quanto aos projetos encaminhados ao comitê, estes foram avaliados e, em caso de aprovação, encaminhados ao CRH-RS em busca da aprovação e liberação de recursos pelo FRH-RS.

Os projetos aprovados pelo comitê comprovam sua efetividade, demonstrando a constante atuação do comitê para a manutenção da qualidade dos recursos hídricos, e também a busca pela remediação dos impactos ocorridos na bacia. Entretanto, com a redução dos recursos disponíveis ao comitê, verifica-se a diminuição das ações do mesmo.

#### **4.7.3. Impactos ambientais ocorridos na Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim e a Resposta via Comitê de Gerenciamento**

No decorrer do período avaliado, vários impactos e potenciais impactos ambientais, além de conflitos pelo uso da água ocorreram na Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim, os quais foram citados e/ou comentados em Reuniões Ordinárias do Comitê e são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Potenciais Impactos ambientais e conflitos ocorridos na Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim

<b>Ata</b>	<b>Data</b>	<b>Assunto</b>
02	18/01/2000	Solicitação do Comitê ao CRH-RS no sentido de liberar água da barragem do DNOS para atender a demanda para irrigação da lavoura de arroz, face a negativa da CORSAN.
04	16/05/2000	A lavoura de arroz ocupa 80% da água da Bacia, e foi classificada pela FEPAM como altamente poluidora.
06	12/09/2000	Assoreamento do rio Vacacaí.
06	12/09/2000	Trecho do rio Vacacaí-Mirim, de 6-7 Km, que foi dragado, onde a largura do rio triplicou e com mudança de curso. A mata ciliar não foi cortada, mas o rio terminou.
07	14/11/2000	23% do volume da barragem do DNOS está assoreado.
14	11/01/2002	Liberação de uma descarga de água de fundo da Barragem do DNOS, pela CORSAN, para suprir as necessidades emergenciais dos orizicultores da região do Distrito de Arroio Grande de Santa Maria.
15	08/03/2002	Ocupação irregular na Barragem do DNOS.
17	12/07/2002	Degradação ambiental, devido ao desvio do leito do Rio Vacacaí-Mirim, nas proximidades da Olaria Kipper, Camobi – Santa Maria.

21	13/03/2003	Instalação de uma balsa flutuante no rio Vacacaí, até a recuperação da Ponte do Verde, entre Santa Maria e São Sepé, sendo necessária a construção de um aterro nas duas extremidades da mesma.
28	13/04/2004	Obras de contenção junto ao Arroio do Meio.
34	20/12/2004	Extravasamento de água na Estação de Tratamento de Santa Maria.
35	10/03/2005	Realização de três barramentos no Rio Vacacaí, no município de Formigueiro, no período da seca.
35	10/03/2005	Seca.
37	26/07/2005	Aprovação da capina química em perímetro urbano.
46	28/02/2008	Expansão da base florestal na área da Bacia Hidrográfica.
56	17/12/2010	Deterioração progressiva, drenagem e avaliação do volume de perda de solo em Estradas Vicinais.
58	04/11/2011	Lançamento de efluentes sem tratamento nos rios da bacia.

Observa-se nas pautas do comitê, que a situação da Bacia Hidrográfica é um assunto ao qual tem se dado uma determinada importância, verificando-se, nas reuniões um discurso predominante que destaca que: apesar do meio ambiente ser muito importante para a manutenção da vida, vêm sofrendo, através das ações humanas, um processo acelerado de deterioração das características físicas, químicas e biológicas da Bacia.

As áreas urbanas e agrícolas são responsáveis pela existência desta série de potenciais impactos ambientais acima citados, pois o leito dos rios encontra-se assoreado devido à presença de esgoto e lixo na água e também da prática inadequada da agricultura.

O nível do rio também sofre com a retirada de água efetuada pela prática da irrigação, notadamente a cultura orizícola, pois ao longo de seu leito são encontradas bombas para a captação de água para irrigação, principalmente nos meses de verão, época em que o volume de água se encontra baixo devido às estiagens. Esse uso intensivo de terras nas margens do rio Vacacá-Mirim, além de ocasionar erosão e assoreamento, também contribui para a deposição de sólidos no fundo do vale (FERREIRA et al. 2009).

Com o crescente uso da água na bacia para diversos fins, tais como irrigação, dessedentação de animais e abastecimento público, e o estado de degradação em que se encontram os mananciais, é necessário administrar sua disponibilidade e uso, além do conhecimento atualizado do quadro degradante quando houver e criar processos de gerenciamento para sua recuperação e conservação, assegurando desta maneira a qualidade e quantidade dos recursos que esta pode oferecer (BORSATO; MARTONI, 2004).

São as necessidades da população que tem impulsionado o processo de gerenciamento de bacias, como ocorre na China, um país que apresenta mais similaridade com a realidade brasileira, onde as forças que impulsionam o gerenciamento de bacias são primeiramente associadas a conflitos sobre o uso da água e à intensificação do uso da terra, a perdas financeiras e agitação social decorrentes de inundações devastadoras, à poluição e à degradação dos solos (EGLER, 2012).

No Brasil, também observam-se Comitês criados em associação aos objetivos do Governo, principalmente como requisito de órgãos de fomento para alocação de recursos financeiros. Sendo que, tal como a dinâmica de aprovação das leis, os ritmos de implantação dos sistemas de gestão são fortemente diferenciados no cenário nacional brasileiro, sendo, de modo geral, bastante lentos e descontínuos (PROJETO MARCA D'ÁGUA, 2003).

Esta assertiva aplica-se ao Estado do Rio Grande do Sul, em que observa-se diferenças regionais, tanto no nível de implantação dos instrumentos como no tempo e o modo com que as ações de implementação ocorrem. As regiões mais operacionalizadas naturalmente consistem naquelas onde ou ocorrem problemas de

escassez (ex: bacia do Santa Maria) ou de qualidade da água (ex: bacia do Sinos, Guaíba e Gravataí).

A GIBH, em seus pressupostos teóricos, constitui-se em um processo e não em um objetivo (ALLAN; CLARKE, 2010), desta forma a verificar como o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim vem implementando este processo, a luz do confronto entre impactos relacionados aos recursos hídricos e as ações deste conselho nos possibilita detectar que: muito embora sejam levantadas discussões em Reuniões, pode haver uma possível falta de efetiva articulação política do Comitê junto ao governo para implantação dos instrumentos de gestão do SERH.

Por outro lado o Sistema de Gestão dos Recursos Hídricos dispõe de instrumentos, dentre eles os Planos de bacia – nos quais medidas estruturais e/ou não estruturais devem ser determinadas de forma negociada e a garantir os múltiplos usos. Os Planos de bacia e o enquadramento estão finalizados ou em fase de licitação em, respectivamente 60 e 76% das bacias do Estado.

Neste contexto espera-se que, com os Planos se possa aprimorar o sistema de outorgas bem como tornar mais favorável a situação para implantação da cobrança pelo uso da água uma vez que a destinação dos recursos da cobrança (para investimentos em medidas estruturais ou não estruturais para beneficiar os múltiplos usos da água) estão vinculadas às prioridades definidas no Plano de bacia.

Assim, cria-se também uma situação mais propícia para a implantação das agências de bacia as quais, em pesquisa realizada por Meier (2011) tem sua ausência ressaltada como uma importante lacuna no SERH. O preenchimento de tal lacuna resultará em acréscimo de apoio técnico, operacional e administrativo para o Sistema.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Durante o período de quatro anos e meio de envolvimento com este estudo na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, desenvolvendo uma ampla revisão bibliográfica e atividades de pesquisa e campo e laboratório, utilizando softwares computacionais para ajudar a espacializar os resultados facilitando suas interpretações, e a aplicação do modelo PSR/PER como um instrumento para a análise ambiental integrada pode-se concluir:

- Com a aplicação do modelo PSR/PER foi possível agrupar informações distintas como dados de qualidade física e química do solo, com questões sociais como o perigo, risco, vulnerabilidade de municípios envolvendo a interpretação de dados como educação, renda, saneamento e saúde. Também foi possível verificar o andamento de ações corretivas (respostas) por parte da sociedade via Comitê de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

- A bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim segundo os resultados obtidos com aplicação da metodologia DRASTIC possui áreas de grande potencial de infiltração, sendo que as mais se destacaram são ocupadas por pastagem e cultivo de arroz. As áreas de infiltração máxima muitas vezes coincidiram com áreas de vulnerabilidade natural a contaminação consideráveis, o que demanda de maior cuidado com o uso e ocupação do solo nestas regiões.

- Todos os municípios que compõem a bacia apresentaram baixo potencial poluidor, porém as condições de domicílio e saneamento, com a exceção de Santa Maria não se apresentaram em condições satisfatórias em todo o período de avaliação. No período de avaliação, todos os municípios apresentam valores medianos e altos no que se refere ao índice educação e saúde.

- O Índice de Desenvolvimento Socioeconômico entre os anos de 2002 a 2006 apresenta aumento em todos os municípios constituintes da bacia hidrográfica, porém todos os municípios foram classificados como médios (entre 0,500 e 0,799).

- O perigo na área da Bacia Hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, variou entre baixo (municípios de Julio de Castilhos, Restinga Seca, Silveira Martins e São João do Polêsine), médio (município de Itaara) e muito alto (cidade de Santa Maria), nas regiões central e oeste da bacia.

- A Bacia Hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, apresentou o risco variando entre baixo/nulo e muito alto, sendo que os maiores valores encontram-se nas porções Oeste, Noroeste e Central (municípios de Júlio de Castilhos, Restinga Seca, Silveira Martins e São João do Polêsine).

- As propriedades físicas do solo sofreram influência de seu uso e ocupação, sendo que as áreas cultivadas com arroz apresentaram os maiores valores médios para densidade do solo e resistência a penetração, diminuindo o potencial de infiltração.

- Os tipos de uso e ocupação do solo existentes na região da bacia hidrográfica influenciam nas concentrações de metais, especialmente nas áreas de cultivo de arroz e soja ultrapassando em alguns casos os valores máximos permitidos pela legislação nacional, podendo haver relação com a utilização de fertilizantes e agrotóxicos. As áreas ocupadas por campo nativo, soja, pastagem, arroz e mata nativa apresentaram as maiores concentrações dos elementos alumínio, potássio e magnésio.

- Observou-se que o Comitê apresenta problemas relacionados à falta de recursos financeiros, pouca participação do governo, tanto da esfera estadual como federal, a baixa mobilização social e poder de decisão insuficiente para resolver as questões que cabem ao comitê, enfraquecendo assim seu poder de resposta a sociedade.

- Percebe-se que as demandas (refletidas nas deliberações e projetos) predominantemente referem-se a impactos e conflitos ambientais relacionados indiretamente com os recursos hídricos (Ex: uso e cobertura do solo, assoreamento, licenciamento ambiental da atividade irrigante, educação ambiental, etc.).

- A análise das deliberações totais demonstrou que as deliberações relacionadas a eventos predominam, seguida das administrativas. Já em relação aos projetos aprovados observou-se a predominância dos que tratam sobre planos/estudos e projetos. Dessa forma fica evidenciado que suas ações/respostas ainda não são totalmente capazes de diminuir as pressões ambientais existentes no território da bacia hidrográfica, porém em função de algumas ações pontuais, bem como a realização de projetos que estão em andamento há uma pequena melhoria do estado ambiental.

- Os maiores conflitos que o Comitê enfrentou não foram pelo uso da água, mas sim de natureza administrativa, além disso, observou-se um baixo índice de deliberações e projetos acerca da implantação dos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos na Bacia, o que pode

caracterizar um desvio de objetivos/atribuições do comitê expressos no art. 19 da Lei 10 350/94, que se relacionam com: deliberar acerca da implementação dos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos e dirimir conflitos pelo uso da água, demonstrando assim pouca efetividade.

- Enfim, o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí - Mirim apresentou dois momentos distintos, sendo o primeiro no início das suas atividades, em 1999, pelas expectativas acerca de suas possibilidades frente à gestão das águas e mais tarde por ocasião da discussão e elaboração do termo de Referência para a elaboração do Plano de Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim. Sendo que o Plano de Bacia, apesar de ainda não apresentar todas as fases concluídas, tem por finalidade fundamentar e orientar a implementação da Política Estadual de Recursos Hídricos, compatibilizando os aspectos quantitativos e qualitativos do uso das águas, de modo a assegurar as metas e os usos neles previstos, na área da bacia.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Por meio do estudo desenvolvido e dos resultados obtidos durante esta pesquisa recomenda-se:

No que se refere à realização da determinação das áreas de infiltração sugere-se a realização de um estudo com uma abrangência temporal maior, utilizando-se imagens de satélite de diferentes épocas do ano, com resolução espacial capaz de distinguir um maior número de cultivos desenvolvidos na área em estudo e suas implicações nas áreas de infiltração máxima de água.

É recomendável a utilização de um índice integrador, capaz de facilitar a compreensão dos processos distintos que ocorrem na Bacia Hidrográfica e auxiliar os tomadores de decisão nos processos gerenciais dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; BERTON, R. S. **Análise química de solo para metais pesados**. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, v.2, p.645-692, 2002.

ALLAN, A., RIEU-CLARKE, A. - **Good governance and IWRM: A legal perspective**. *Irrigation and Drainage Systems*, 24, p. 239–248. 2010.

ALLEONI, L. R. F.; BORBA, R. P. & CAMARGO, O. A. **Metais Pesados: Da Cosmogênese Aos Solos Brasileiros**. Tópicos Ciência do Solo, 4:1- 42. 2005.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H. & PETTY, R. J. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potencial using hydrogeologic settings**. (U.S. EPA Report 600/2-85/018). 1987.

ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils**. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1990.

ALVARENGA, C. C.; et al. Determinação Da Umidade Do Solo Na Capacidade De Campo E No Ponto De Murcha Permanente Com Base Em Atributos Físicos Do Solo. *In: XIX Congresso De Pós-Graduação da UFLA. Anais...*, Lavras, UFLA. 2010.

ALVAREZ, J. W. R. **Disponibilidade e Resposta de Culturas Ao Enxofre em Solos do Rio Grande do Sul**. Tese de Mestrado em Ciência do Solo – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

ALVES, M. C. **Recuperação do subsolo de um Latossolo Vermelho usado para terrapleno e fundação da usina hidrelétrica de Ilha Solteira, SP**. Ilha Solteira. Ilha Solteira: UNESP, 83p. Tese Livre Docente. 2001.

ANDERSON, L. O. et al. Utilização de dados multitemporais do sensor MODIS para o mapeamento da cobertura e uso da terra. *In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. Anais...* Goiânia, 2005.

ANDRADE, M. G. et al. Metais Pesados Em Solos De Área De Mineração E Metalurgia De Chumbo. I – Fitoextração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33: 1879-1888. 2009.

ANKENY, M. D.; KASPAR, T. C.; HORTON, R. Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurement. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, p. 837-840, 1990.

ARAÚJO, A. O.; et al. Avaliação da Capacidade de Infiltração de Solos Submetidos a Manejo Florestal de Vegetação Nativa na Chapada do Araripe. *In*: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, Natal, 2010. **Resumo expandido**, Natal, Abas. 2010.

ARRUDA, F. B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. de. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p.11-15, 1987.

AUSTRALIAN AND NEW ZEALAND ENVIRONMENT CONSERVATION COUNCIL. ANZECC. **Core Environmental Indicators for Reporting on the State of the Environment**. State of the Environment Reporting Task Force, 2000. Disponível em [www.deh.gov.au/soe/publications/coreindicators.html](http://www.deh.gov.au/soe/publications/coreindicators.html). Acesso em 15 de nov 2013.

AZEVEDO, F. A. De; CHASIN, A. A. Da M. **Metais: Gerenciamento da toxicidade**. São Paulo: Atheneu. 554 p. 2003.

BACELLAR, A. A. A.; et al. **Indicadores de Sustentabilidade em Agrossistemas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 281 p. 2003.

BACHMAT, Y., COLLIN, M. Mapping to Assess Groundwater Vulnerability to Pollution. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants (W. van Duijvenbooden and H.G. van Waeningen, eds.), **TNO Committee on Hydrological Research**, The Hague, Proceeding and Information, n. 38, p. 297-307, 1987.

BAMBERG, A. L. et al. **Densidade de um Planossolo Sob Sistemas de Cultivo Avaliada por meio da Tomografia Computadorizada De Raios Gama**. Revista Brasileira Ciência do Solo. 5: 1079-1086. 2009.

BARBOSA FILHO, M. P.; et al. **Silicato de Cálcio como Fonte de Silício para o Arroz de Sequeiro**. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v. 25, p. 325-330, 2001.

BARRIGOSI, J. A. F.; Lanna, A. C. & Ferreira, E. **Agrotóxicos no Cultivo do Arroz no Brasil: análise do consumo e medidas para reduzir o impacto ambiental negativo**. Goiás: EMBRAPA. 8 p. 2004.

BASILE, R.O.N.C.; NEGREIROS, A.B.; MIGUEL, F.L.C.G. A estrutura da Floresta Atlântica de encosta e arquitetura de raízes arbóreas: maciço da Tijuca – RJ. In: Simpósio Brasileiro De Geografia Física Aplicada, 10 ed. 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: v.1. 2003.

BATAGLIA, O. C. **Micronutrientes na Agricultura**. Piracicaba, POTAFOS/CNPq. 734 p. 1991.

BENBROOK, C.; MALLINCKODT, F. **Indicators os Sustainability in the Food and Fiber Sector**, 1994. Disponível em: <[http://tdg.uoguelph.ca/www/fsr/collection/indicators/food\\_fiber.txt](http://tdg.uoguelph.ca/www/fsr/collection/indicators/food_fiber.txt)>.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação**. Florianópolis: UFSC, 1994.

BENBROOK, C.M.; GROTH III, E. **Indicators of the Sustainability and Impacts of Pest Managements Systems**. 1996. Disponível em: <<http://www.pmac.net/aaas.htm>>.

BERTOL, I. Propriedades Físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de Manejo do Solo. **Revista Scientia Agrícola**, 58: 555-560. 2001.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4. Ed. São Paulo: Ícone. 1999. 355p.

BERTOL, I.; et al. Erosão Hídrica em Campo Nativo Sob Diversos Manejos: Perdas de Água e Solo e de Fósforo, Potássio e Amônio Na

Água de Enxurrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35: 1421-1430. 2011.

BIONDI, C. M. **Teores Naturais de Metais Pesados nos Solos de Referência do Estado de Pernambuco**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Pernambuco, Tese de Doutorado, 58 p. 2010.

BONA, I. A. T.; SARKIS, J. E. S. & SALVADOR, V. L. R. Análise arqueométrica de cerâmica Tupiguarani da região central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, usando fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF). **Revista Química Nova**, 30: 785-790. 2007.

BONUMÁ, N. B. Determinação de propriedades físicas do solo com base para a modelagem da dinâmica da água no solo. *In*: VIII Reunião Sul-Brasileira De Ciência Do Solo. **Anais...**, Santa Maria, SBCS. 2010.

BORGES; T. A.; et al. Avaliação de parâmetros físico-hídricos de Latossolo Vermelho sob pastejo e sob cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p.13. 2009.

BORGES, M. H.; PFEIFER, R. M. ; DEMATTÊ, J. A. M. Evolução e mapeamento do uso do terra, através de imagens aerofotográficas e orbitais em Santa Bárbara D'Oeste (SP). **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, p. 365-371, 1993.

BORSATO, F. H.; MARTONI, A. M. - **Estudo da fisiologia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná**. Acta Scientiarum. Human and Social Sciences. Maringá, v. 26, n. 2, p. 273 – 285. 2004.

BORTOLUZZI, E. C.; PERNES, M. TESSIER, D. Mineralogia de Partículas envolvidas na Formação de Gradiente Textural em um Argissolo Subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32: 997-1007. 2008.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

BOUNI, C. **Indicateurs de développement durable**: l'enjeu d'organiser une information hétérogène pour préparer une décision multicritère. Paris: AScA. In: Colloque International. Abbay de Fontevraud - Indicateurs de développement durable. 1996.

BLUME, H. P.; BRÜMMER, G. Predictions of Heavy Metals Behavior in Soil by Means of Simple Field Test. **Ecotoxicol. Environ. Saf.**, v. 22, p. 164-174, 1991

BRAGA, T.; GIVISIEZ, G. N.; OLIVEIRA, E. L. **Avaliação de metodologias de mensuração de risco e vulnerabilidade social a desastres naturais associados à mudança climática**. In: São Paulo em Perspectiva. São Paulo, v.20, 2006.

BRADY, N.C. **Natureza e Propriedades dos Solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BRASIL, H.K; et al. Desempenho de Bovinos de Corte em Planossolo Háplico, com e sem Irrigação em Terras Baixas no Bioma Pampa. IN: III Siepe – Salão Internacional De Ensino, Pesquisa E Extensão UNIPAMPA. **Anais...**, Uruguaiana, Unipampa, 39. 2011.

BRASIL. SERVIÇO DE INFORMAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA – SIAGAS. 2011. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>> Acesso em: 10 dez. 2011.

BRIASSOULIS, Helen. **Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches**. In: Regional Research Institute Of West Virginia University. The Web Book of Regional Science. Morgantown: Scott Loveridge, 2000.

BROWN JR., K. S. Insetos como rápidos e sensíveis indicadores de uso sustentável de recursos naturais. In: MARTOS, H. L.; MAIA, N. B. (Coord.). **Indicadores ambientais**. Sorocaba: ESALQ/PUC, 1997.

CABRAL, L. et al. Retenção de metais pesados em micélio de fungos micorrízicos arbusculares. **Revista Química Nova**. 2010). Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422010000100005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422010000100005&script=sci_arttext)>

CARDOSO, M.L. de M. **Desafios e potencialidades dos comitês de bacias hidrográficas**. Cienc. Cult. vol.55, nº 4, São Paulo. 2003.

CAMARGO, O. A. & ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ. 137 p. 1999.

CARVALHO, M. P. TAKEDA, E. Y. FREDDI, O. S. **Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP)**. Revista Brasileira Ciência do Solo. Viçosa – MG. n.27. 2003.

CARVALHO, P. G. M. de; BARCELLOS, F. C; MOREIRA, C. G. políticas públicas para meio ambiente na visão do gestor ambiental– **Uma aplicação do modelo PER para o Semi-Árido**. “VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica” – Fortaleza, 28 a 30 de novembro de 2007.

CAMARGO, F.A. de O.; SANTOS, G.A.; ZONTA, E. **Alterações eletroquímicas em solos inundados**. Ciência Rural, v. 29, n. 1, p. 171-180, 1999.

CAMINO, R.; MÜLLER, S. **Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales**: bases para establecer indicadores. San José: IICA. Série Documentos de Programas IICA, 38. 1993

CARVALHO, G. D. ; DE CAMPOS, A. B. ; FAGERIA, N. K. **Mudanças químicas na solução do solo de várzea inundado sob cultivo de arroz irrigado**. In: XXXIII Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo. Uberlândia. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas, 2011.

CARVALHO, J. R. M. de; et al. Proposta e validação de indicadores hidroambientais para bacias hidrográficas: estudo de caso na sub-bacia do alto curso do Rio Paraíba, PB. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 23, n. 2, agosto 2011.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. **Atributos Físicos da Qualidade de um Solo sob Sistema Agroflorestal**. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, v.39, p.1153-1155, 2004.

CASAGRANDE, L. **Avaliação do parâmetro da propagação de sedimentos do modelo de Williams (1975) na Bacia do Rio Vacacaí-Mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

CASALINHO, H. B. **Qualidade do Solo Como Indicador de Sustentabilidade de Agroecossistemas**. Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Tese de Doutorado, 196 p. 2003.

CECONI, D. E. **Diagnóstico e Recuperação da Mata Ciliar da Sanga Lagoão do Ouro na Microbacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim, Santa Maria – RS**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Tese de Doutorado, 132 p. 2010.

CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V. & ROJAS, C. A. L. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27: 789-798. 2003.

CIOTTA, M. N. et al. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Revista Ciência Rural**. Santa Maria – RS. n. 6. 2003.

CIVITA, M.; et al. **Carta de la vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane**. Mem. explic. Monografia GNDCL. – CNR. n. 399, Firenze, 1990

CHERUBIN, M.R.; SANTI, A.L.; BASSO, C.J.; EITELWEIN, M.T.; VIAN, A.L. **Caracterização e estratégias de manejo da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo utilizando a análise dos componentes principais**. Enciclopédia Biosfera, v.7, p.196-210, 2011.

CHRISTOFOLETTI, **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CLAIN, N. **Les indicateurs de développement durable en agriculture, aspects écologiques et environnementaux.** Paris: Université de Paris 7. (Relatório de Estágio). 1997.

COELHO NETO, A.L. **O geocossistema da Floresta da Tijuca.** In: ABREU, M.A.A. Natureza e sociedade no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Biblioteca Carioca/IPLANRIO, 1985.

COELHO, M. G. **Variabilidade espacial de características físicas e químicas em um solo salino-sódico.** Ciência Agronômica. Fortaleza, v.14, p.149-156, 1983.

COJOCARU, V.; et al. *EDXRF versus INAA in a pollution control of soil.* **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 1:** 71–78. 2006.

COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, escala de 1:750.000,** 2008. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>> Acesso em: Jan. de 2013.

COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Mapa hidrogeológico da folha de Santa Maria.** SH.22-V-C-IV, escala 1:100.000. Porto Alegre: CPRM, 1994.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. **Mapa Hidrogeológico: folha de Santa Maria.** SH 22-V-C-IV. Escala 1:100.000. FTD: Porto Alegre, 1995.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Bário: Descrição e usos.** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/laboratorios/fit/bario.pdf>>. Acesso em: Jul. 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 420, de 28 de Dezembro de 2009.** Disponível em: <[http://homologa.ambiente.sp.gov.br/aquiferos/CONAMA%20Resolucao%202009\\_420.pdf](http://homologa.ambiente.sp.gov.br/aquiferos/CONAMA%20Resolucao%202009_420.pdf)>. Acesso em: Fev. 2011.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. CONAMA – **Resolução 01/1986**. Consultado em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. em 21 jan. 2013.

CORVALÁN, C. **Processos de toma de decisões em Saúde Ambiental**. Brasília: World Health Organization, 2004.

COSTA, A. C. S.; ALMEIDA, V. De. C. & NOZAKI, J. Determinação de Cobre, Alumínio e Ferro em solos derivados do basalto através de extrações sequenciais. **Revista Química Nova**, 4: 548-552. 2002.

COSTA, B. M. da. **Tipos de pastagens, sob o ponto de vista ecológico**. 2003. Disponível em: [agroline.com.br/agrociencia/artigo/472003](http://agroline.com.br/agrociencia/artigo/472003).

COSTA, C. F. G. Da. **Hidrogeoquímica do escoamento superficial em solos de uma mesobacia no nordeste Paraense**. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural da Amazônia, Dissertação de mestrado, 140 p. 2011.

CRUVINEL, D. F. C. **Avaliação da fitorremediação em solos submetidos à contaminação com metais**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto. 2009.

CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B. & MAGALHÃES, A. C. Resistência Mecânica do Solo à Penetração sob diferentes Densidades e Teores de Água. **Revista Engenharia na Agricultura**. 1: 1-7. 2002.

CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. Avaliação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos Métodos GOD e POSH. In: **Revista Geociências**, São Paulo v.29, 2010.

CURY, J. F. - **A Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas: A Abertura de uma oportunidade para o Desenvolvimento Sustentável do Alto Paranapanema (1994-2004)**. Tese de Doutorado em Estruturas Ambientais Urbanas, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

DANZ, N. P., et al. **Environmentally stratified sampling design for the development of great lakes environmental indicators.** Environmental Monitoring and Assessment, New York, n. 102, 2005.

DANIEL, L. A. **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável.** Rio de Janeiro: Rima/ABES, 2001.

DAS NEVES, C. M. N.; et al.. **Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do estado de Minas Gerais.** Scientia Forestalis, Piracicaba. n.74, p. 45-53, 2007.

DAVID, J. S. - **Drenagem de Estradas, Caminhos de Ferro e Aeródromos.** Estudos Hidrológicos, LNEC, Lisboa, Portugal. 1976.

DAVIS, M. **Planeta favela.** São Paulo: Boitempo, 2006.

DIAS, J. R. **Aplicação do Modelo Hidrológico Agnps2001 utilizando dados observados na Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado. 2003.

DIREÇÃO GERAL DO AMBIENTE – DGA. **Proposta para um sistema de indicadores de desenvolvimento sustentável.** Amadora, Portugal, 2000.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004.

DINIZ, H. N.; MICHALUATE, W. J. **Interpretação de testes de vazão em poços tubulares profundos, dimensionamento e especificações de bombas submersas.** São Paulo, 2001.

DOS SANTOS, L. C. **Efeito de Cobre na População de Bactérias e Fungos Do Solo, Associação Ectomicorrízica e no Desenvolvimento de Mudas de Eucalipto e Canafístula.** Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 88 p. 2006.

DOMINGUES, Eloísa. **Indicadores de Sustentabilidade para Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil**, Fundação Getulio Vargas. 2000.

DPIE. Australian Department of Primary Industries and Energy. **A Survey of Work on Sustainability Indicators**. DPIE, 1995. Disponível em: <[http://www.dpie.gov.au/dpie/cpd/survey\\_a.html](http://www.dpie.gov.au/dpie/cpd/survey_a.html)>.

DUMANSKI, J. **A Framework for Evaluation of Sustainable Land Management** (FESLM). 1994. Disponível em: <[http://tdg.uoguelph.ca/www/FSR/collection/indicator/sus\\_land\\_manage.txt](http://tdg.uoguelph.ca/www/FSR/collection/indicator/sus_land_manage.txt)>.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L. da; OLIVEIRA, M. S. de. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 242-246, 2002.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. EEA. **Environmental indicators: typology and overview**. Copenhagen: EEA. (Technical report, n.25). 1999.

ECHEVERRIA, R. M. **Avaliação dos Impactos Ambientais nos Tributários do Lago Paranoá, Brasília – DF**. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de Brasília. Brasília, Dissertação de Mestrado, 132 p. 2007.

EDNEI, E. G. *et al.* Poluição das Águas Por Herbicidas Utilizados no Cultivo do Arroz Irrigado na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil: Predição Teórica e Monitoramento. **Revista Química Nova**. São Paulo - SP. n. 4. 2005.

EGLER, M. - **Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos no Estado do Rio de Janeiro: Ensaio de Indicador para o Estabelecimento da Avaliação das Relações entre Qualidade da Água e Cobertura Vegetal**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2012.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro, Embrapa solos, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Brasília: Ministério de Agricultura e do Abastecimento, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA - EMBRAPA. **Tecnologia de Produção de Soja na Região Central do Brasil**. Londrina: Embrapa Soja. 2006.

FASSBENDER, H. W. **Química de suelos, con ênfasis en suelos de América Latina**. San Jose: IICA. 1982.

FANNING, D. S.; KERAMIDAS, V. Z. & EL-DESOKI, M. **Micas Minerals in soil environments**. Madison, Soil Science Society of America. 1989.

FAIRWEATHER, PETER G. E NAPIER, GILLIAN M. **Relatório de Indicadores Ambientais**. Estado do Meio Ambiente SoE. Relatório Nacional do Estado do Meio Ambiente, Austrália. 1998. Disponível em <<http://www.deh.gov.au/index.html>> Acesso em 15 nov 2011.

FEITOZA, M. Z. N. **Estimativa da porosidade drenável por diferentes metodologias**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Pernambuco, João Pessoa, 2006.

FERREIRA, A.B.; et al.. Análise do meio físico da sub-bacia do rio Vacacaí-Mirim RS/ Brasil. **Rev. Geogr. Acadêmica**. v.3, n.2. p. 28-34, 2009.

FERREIRA, A. B. et al. Avaliação do impacto ambiental do uso e ocupação da terra na sub-bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim/RS-Brasil. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **Anais...** INPE, Natal, p. 3769 - 3776. 2009.

FERREIRA, E. da S; LIRA, W. S; CÂNDIDO, G. A. **Sustentabilidade no setor de mineração: uma aplicação do Modelo Pressão-Estado-**

**Impacto-Resposta. Engenharia Ambiental** - Espírito Santo do Pinhal, v. 7, n. 3, p. 074 - 091, jul./set. 2010.

FIREBAUGH, F. M. "Sustainable Agricultural Systems: a Concludinmg View". In: EDWARDS, C. H. et al. (Eds.). **Sustainable Agricultural Systems**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1990.

FOLEY, Jonathan A. Global Consequences of Land Use. **Science**, Washington, v. 309, n. 5734, p. 570-573, July, 2005.

FONSECA, A. C. **Geoquímica dos Solos**. Rio de Janeiro: Bertrand. 194 p. 1999.

FOSTER, S. **Fundamental Concept in Aquifer Vulnerability Pollution Risk and Protection Strategy**. Proc. Intl. Conf. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Nordwijk: The Netherlands, 1987.

FOSTER, S. S. D. et al. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agencias ambientais**. São Paulo: SERVIMAR, 2006.

FOSTER, S. S. D. et al. **Protección de la calidad del agua subterrânea**. Guia para empresas de água, autoridades municipales y agencias ambientales. Madri: Ediciones Mundi - Prensa, 2003.

FOSTER, S.; HIRATA, R. C.; ROCHA, G. A. **Riscos de poluição de águas subterrâneas; uma proposta de avaliação regional**. São Paulo: ABAS, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinação de Riscos de Contaminação das Águas Subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. Boletim n.º 10. São Paulo: Instituto Geológico, 1993.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; DELIA, M.; PARIS, M. **Protección de la calidad del agua subterrânea. Guia para empresas de água, autoridades municipales y agencias ambientales**. Edición en español. 2003.

FRANÇA, D. de A.; FERREIRA, N. J. Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2005.

FRANK, R.; ISHIDA, K.; SUDA, P. Metals in Agricultural Soils of Ontario. **Can. J. Soil Sci.**, v. 56, p. 181-196, 1976.

FRASER BASIN COUNCIL. FBC. **Canada. Sustainability Indicators for the Fraser Basin Workbook**, October 2000. Disponível em: <[www.fraserbasin.bc.ca](http://www.fraserbasin.bc.ca)>. Acesso em 15 nov 2013.

FREDDI, O. da S.; FERRAUDO, A.S.; CENTURION, J.F. Análise multivariada na compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.953-961, 2008.

FREGONEZI, G. A. F. & ESPINDOLA, C. R. Perfil de manejo na identificação de modificações químicas do solo decorrentes do uso agrícola. **Semina: Ciências Agrárias**, 3: 485-498. 2008.

FREIRE, M. De F. I. **Metais pesados e plantas medicinais. Revista científica eletrônica de agronomia**. ano IV, número 08, dezembro DE 2005.

FREIRE, J. C. Condutividade hidráulica e capacidade de campo em um Latossolo Roxo distrófico não saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 73-77, 1979.

FREYENBERG, S.; JANKE, R.; NORMAN, D. Indicators of Sustainability in Whole- Farm Planning: literature review. **Kansas Sustainable Agriculture Series**, n. 2, 1996. Disponível em: <<http://www.oznet.ksu.edu/sustainableag/publications/ksas2.htm#PLANNING>>.

FREUDENBERG, M. **Composite indicators of country performance: a critical assessment**. Paris: OECD, 2003.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Programa de cooperação técnica**. Brasília: Funasa, 2006.

FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA – FEE. **Dados sobre os municípios**. 2005. Disponível em: <www.fee.tche.br>. Acesso em 7 Julh de 2012.

FURTADO, J. S.; Indicadores de Sustentabilidade e Governança. **Revista Intertox de Toxicologia**, Risco Ambiental e Sociedade, vol.2, nº1, fev, 2009.

GASTALDINI, M. do C. C.; et al. **Diagnóstico da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim**. In: AIDIS; Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Sección Uruguay. Rescatando antiguos principios para los nuevos desafíos del milenio. Montevideo, AIDIS, p.1-12, tab. 2011.

GASTALDINI, M. do C. C.; et al. **Diagnóstico da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim**. In: AIDIS; Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Sección Uruguay. Rescatando antiguos principios para los nuevos desafíos del milenio. Montevideo, AIDIS, p.1-12, tab. 2006.

GARCIA, S; & GUERRERO, M. Indicadores de sustentabilidad ambiental en La gestión de espacios verdes: Parque urbano Monte Calvário, Tandil, Argentina. **Rev. geogr. Norte Gd.**, jul. 2006.

GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis**. Part I. Agronomy Monograph Séries no 9, Madison, Winconsin, Cap. 21, p. 493-544. 1986.

GIMENO-GARCIA, E.; ANDREU, V.; BOLUDA, R. Heavy metals incidence in the application of organic fertilizers and pesticides to rice farming soils. **Environ. Poll.**, n. 92, p. 19-25, 1996.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M.; PELLEIN, J. R. G. M. **Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: Estudo de caso do município de Rio Negrinho - SC**. In: Boletim de Geografia, Maringá, v. 30, n. 1, 2012.

GOMES, J.B.V.; et al. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.137-153, 2004.

GOMES, P. R.; MALHEIROS, T. F. Proposta de análise de indicadores ambientais para apoio na discussão da sustentabilidade. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 8, n. 2, p. 151-169, mai-ago/2012.

GONÇALVES, L.; KOPPE, J. C. C. L. Vulnerabilidade natural e avaliação de risco de contaminação dos sistemas de aquíferos nas áreas degradadas pela extração de carvão no município de Siderópolis-SC. IN: III Congresso Brasileiro De Carvão Mineral, 2011, Gramado, **Anais...** Gramado, 2011.

GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e resposta espectral da cultura de feijão irrigado, em imagens aéreas digitais**. Tese (Doutorado). Piracicaba: ESALQ/USP. 1997.

GUBIANI, P. I. **Tempo Para A Ocorrência Da Resistência À Penetração Restritiva Ao Feijoeiro Em Solo Com Diferentes Estados De Compactação**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 108 p. 2008.

GULLO, M. C. R. **Valoração Econômica Dos Recursos Naturais: Uma Aplicação Para o Setor Industrial de Caxias do Sul**. Tese (Doutorado em Economia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Degradação Ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

GUIJT, I. **Monitoramento participativo: conceitos e ferramentas práticas para a agricultura sustentável**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1999.

GUIMARÃES, R.P.; FEICHAS, S. A.Q.; **Desafios na Construção de Indicadores de Sustentabilidade**. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v12n2/a07v12n2.pdf>>

GLOAGUEN, T. V.; et al. Composição química da solução do solo nas diferentes classes de poro do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**, v. 33, p. 1105-1113, 2009.

HAASE, J. **O Encontro Estado e Sociedade na Política Gaúcha das Águas**. Tese de Doutorado em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 315p. 2005.

HAMMOND, A.; et al. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting an environmental policy performance in the context of sustainable development**. Washington: World Resource Institute, 1995.

HATCHUEL, G. POQUET, G. **Indicateurs sur la qualité de vie urbaine et sur l'environnement**. Paris: Credoc. Document intermédiaire. 1992.

HENTGES, S. C. **Geologia da área da bacia hidrográfica do rio Vacacaí - Mirim, RS**. Trabalho Final de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário Franciscano. Santa Maria. 2009.

HORTON, R. E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Trans. Amer. Geoph. Union**, v. 14, p. 446-460

HUANG, P. M. **Feldspars, olivines, pyroxenes, and amphiboles**. Madison, Soil Science Society of America. 300 p. 1989.

HURTADO, A. L. B. **Variabilidade Da Condutividade Hidráulica Do Solo Em Valores Fixos De Umidade E De Potencial Matricial**. Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, Universidade de São Paulo, Tese de mestrado, 119 p. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Mapa Exploratório de Solos Do Estado do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <[ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/pedologia/unidades\\_federacao/rs\\_pedologia.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/pedologia/unidades_federacao/rs_pedologia.pdf)> Acesso em: 25 Mar. 2013.

IISD. International Institute for Sustainable Development. Bellagio Principles. 1997. Disponível em: <<http://iisd1.iisd.ca/measure/principles.htm>>.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. NY: Oxford University Press, Inc., 1989.

JORGENSEN, S.E. Introduction. In: JORGENSEN, S.E.; COSTANZA, R.; XU, F.L. (Eds.). **Handbook of ecological indicators for assessment of ecosystem health**. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.

LAL, R.; PIERCE, F. J. (Eds). **Soil Management for Sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1989.

LE GRAND, H. System for evaluating contamination potential for some waste sites. **American Water Work Association Journal**. v. 56, n. 8, p. 959-974, 1964.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3. ed. Campinas, 1996.

LIGHTFOOT, C. **Integrated Resource Management**. 1994. Disponível em: <[http://tdg.uoguelph.ca/www/FSR/collection/indicator/integrated\\_resource\\_management.txt](http://tdg.uoguelph.ca/www/FSR/collection/indicator/integrated_resource_management.txt)>

LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. **Fundamentos de Pedologia**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2000.

LINHARES, C. de A.; SOARES, JOÃO V.; BATISTA, GETÚLIO T.; Influência do desmatamento na dinâmica da resposta hidrológica na bacia do Ji-Paraná. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, Goiânia, **Anais...** INPE, 2005.

KEMERICH, P. D. C.; et al. Avaliação da sustentabilidade ambiental em bacias hidrográficas mediante a aplicação do modelo P-E-R. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 10, p. 2140-2150, 2013.

KEMERICH, P. D. C. et al. **Influência dos cemitérios na contaminação da água subterrânea em cidade do sul do país.** Águas Subterrâneas, São Paulo, v.24, n.1, p.129-141, 2010.

KEMERICH, P. D. C.; et al.; FLORES, C. E. B. **Valores anômalos de metais pesados em solo de cemitério.** Ambi-Agua. Taubaté, v. 7, p. 140-156. 2012.

KEMERICH, P. D. C.; et al. Características Químicas de Solo ocupado por Necrópole. In: XXXI Jornada Acadêmica Integrada. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2011.

KEMERICH, P. D. C. et al. Influência Dos Cemitérios Na Contaminação Da Água Subterrânea Em Santa Maria - RS. In: **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 24, 2010.

KEMERICH, P.D.C. **Qualidade da água subterrânea e a saúde da comunidade em bairro de Santa Maria/RS.** Santa Maria, RS. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

KEMERICH, P.D.C.; SAUCEDO, E. M. **Saúde e Condições Sócio-Ambientais de Usuários de Água Subterrânea no Bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro de Santa Maria – RS.** Engenharia Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 3, p. 038-050, jul./set. 2011.

KLEIN, V. A. **Física do solo.** Passo Fundo, Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008.

KONRAD, C. G. **Zoneamento Ambiental da Microbacia Hidrográfica do Reservatório do Dnos De Santa Maria – RS.** Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, 98 p. 2005.

KORNHAUSER, A. **Criar oportunidades. Educação, um tesouro a descobrir.** São Paulo: Cortez, 2001.

KOZ, B.; CEVIK, U. & AKBULUT, S. **Heavy metal analysis around Murgul (Artvin) copper mining area of Turkey using moss and soil.** *Ecological Indicators*, 20: 17–23. 2012.

LAHR, J.; KOOISTRA, L. **Environmental risk mapping of pollutants: State of the art and communication aspects.** In: *Science of the Total Environment*, v.408, 2010.

LANNA, A.E.; **A Inserção da Gestão das Águas na Gestão Ambiental, in Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos Desafios da Lei de Águas em 1997**, Ministério do Meio Ambiente – MMA, p. 77 – 109, Brasil, 2000.

LANDIM, P. M. B. & STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos.** Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP. 253 p. 2002.

LANZANOVA, M. E.; et al. **Atributos Físicos de um Argissolo em Sistemas de culturas de Longa Duração Sob Semeadura Direta.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34: 1333-1342. 2010.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia Geral.** São Paulo: Editora Nacional. 399p. 1989.

LEONARD, Jeffrey. ***Environment and the Poor: Development Strategies for a Common agenda.*** New Brunswick (USA) and Oxford (UK): Transaction Books, 1989.

LEPSCH, I. F. DA SILVA, M.N. ESPIRONELO, A. **Relação Entre Matéria Orgânica e Textura de Solos Sob Cultivo de Algodão e Cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo.** *Revista Bragantia*. Campinas – SP. n. 41. 1982.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo.** 2a edição. Piracicaba, 2000.

LIMA, C. V. S. De. **Bioacumulação de chumbo por girassol em argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico.** In: XXXI Congresso Brasileiro De Ciências Do Solo. Gramado: UFRGS, 2007.

LIMA, A.C.R.; HOOGMOED, W.; BRUSSAARD, L. **Soil quality assessment in rice production systems: establishing a minimum data set.** Journal Environmental Quality, v. 37, p. 623-630, 2008.

LIMA, R. P.; et al. Resistência a Penetração e Densidade do Solo como Indicativos de Compactação do Solo em Área de Cultivo da Cana-de-Açúcar. In: XXXII Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo. **Anais...**,Fortaleza-CE, SBCS. 2009.

LIMA, W. De P. **Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas.** Piracicaba: USP, 2008.

LIMA, W. P. **O Papel Hidrológico das Florestas na Proteção dos Recursos Hídricos.** Revista Silvicultura. 1986.

LIRA, W. S; CÂNDIDO, G. A. **Análise dos modelos de indicadores no contexto do desenvolvimento sustentável.** Revista Perspectivas Contemporâneas, Paraná, v. 3, n. 1, 2008.

MCCANN, S. **Agricultural Indicators: Indicator Program Descriptions.** 1995. Disponível em: <<http://tdg.uoguelph.ca/www/FSR/collection/indicator/program.txt>>.

MACDONALD, S. **Benchmarking and Sustainability Indicators.** Rushmoor Borough Council, 1996. Disponível em: <<http://www.rushmoor.gov.uk/gr916.htm>>.

MACEDO, R. K. **Equívocos e propostas para a avaliação ambiental.** In: TAUK, S. M. **Análise Ambiental: uma visão multidisciplinar.** 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista., 1995.

MANLY, B.F.J. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução.** 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. **Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina.** In: Caminhos da Geografia, Uberlândia, v.7, 2006.

MARQUES, J. D. de O. **Horizontes pedogenéticos e sua relação com camadas hidráulicas do solo.** Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

MARCHÃO, R. L.; et al. **Qualidade Física De Um Latossolo Vermelho Sob Sistemas De Integração Lavoura-Pecuária No Cerrado.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, 42: 873- 882. 2007.

MARCOLAN, A. L. **Suprimento e Absorção de Fósforo em Solos Submetidos a Diferentes Sistemas de Preparo.** Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

MARTINEZ, R. **Indicadores de Sostenibilidad Ambiental y de Desarrollo Sostenible: Estado del Arte y Perspectivas** Série Manuales nº16 2001 Santiago de Chile CEPAL 116 p. Disponível em: <[http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/9708/lcl1607e\\_ind.pdf](http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/9708/lcl1607e_ind.pdf)>. Acesso em 3 set. 2012.

MARGAT, J. **Ground water vulnerability to contamination (in French). Bases de al cartographie.** (Doc.) BRGM, 68 SGC 198 HYD. Orleans: Institute European de l'Eau, 1968.

MARION, F. A. **Levantamento da Situação Atual dos Recursos Hídricos Subterrâneos em Itaara – RS e Sua Vulnerabilidade Natural.** 2007. 47 f. Monografia (Graduação em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MARTINS, C. H. B.; OLIVEIRA, N. **Desenvolvimento sustentável e sistemas de informação: indicadores do potencial poluidor da indústria gaúcha.** In: Indicadores Econômicos FEE, Porto Alegre, v. 36, 2008.

MARTINS, C. H. B.; OLIVEIRA, N. **Indicadores de sustentabilidade: a necessária integração das dimensões social, econômica e ambiental.** In: VI Encontro Nacional Da Sociedade Brasileira De Economia Ecológica, 2005, Brasília, **Anais...** Brasília, 2005.

MASCARENHAS, A. C. **Comitê de Bacia Hidrográfica: O Que é, Como Funciona, e que Papel Desempenha na Gestão dos Recursos**

**Hídricos.** In: Plenarium, ano III, n. 3. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações. 2006.

MAUD, M.; et al. de Silício no Solo e na Planta de Arroz de Terras Altas com diferentes doses de Adubação Silicatada e Nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.27, p.867-873, 2003.

MAUS, V. W.; RIGHES, A. A. & BURIOL, G. A. Pavimentos permeáveis e escoamento superficial da água em áreas urbanas. *In: I Simpósio De Recursos Hídricos Do Norte E Centro-Oeste*, Cuiabá, 2007. **Resumos expandidos**, Cuiabá. 2007.

MARQUES, M.N.; COTRIM, M.B.; PIRES, M.A.F.; LEPSCH FILHO, O. **Avaliação do impacto da agricultura em áreas de proteção ambiental, pertencentes à bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape, São Paulo.** *Quim. Nova*, Vol. 30, No. 5, 1171-1178. 2007.

MARZALL, K.; ALMEIDA, J. Parâmetros e indicadores de sustentabilidade na agricultura: limites, potencialidades e significado no contexto do desenvolvimento rural. **Extensão Rural**, DEAER/CPGER-CCR-UFSM, n. 5, 1998.

MARZALL, K. **Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas.** Porto Alegre, Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

MARZALL, K.; ALMEIDA, J. Indicadores de sustentabilidade para agroecossistemas: estado da arte, limites e potencialidades de uma nova ferramenta para avaliar o desenvolvimento sustentável. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, v. 17, n.1, p. 41-59, 2000.

MATA, J. D. V. **Classificação brasileira de solos.** Apostila. Disponível em:

<<http://www.dag.uem.br/prof/jdvmata/material/grad/apostilaclassi.pdf>>. Acesso em: mar. 2009.

MAUAD, M., ET AL. Teores De Silício No Solo E Na Planta De Arroz De Terras Altas Com Diferentes Doses De Adubação Silicatada E

Nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**,27(5), 867-873. 2003.

MEIER, M.A. **A conjuntura dos instrumentos da política estadual de recursos hídricos do Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação. (Mestrado em Geografia e Geociências)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

MELO, G. W.; MEURER, E. J. & PINTO, L. F. S. Fontes de potássio em solos distroféricos caulíníticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. 28. 2004.

MELO, M. J. V.; CABRAL, J.; MONTENEGRO, S. **As Enchentes De Olinda Em Pernambuco E As Estruturas De Controle Do Escoamento Urbano**. In: Vi Encontro Nacional De Águas Urbanas, 2005, Belo Horizonte. VI Encontro Nacional de Águas Urbanas. Belo Horizonte-MG, 2005.

MELO, R. T. De. **Uso de Sistema de Integração Lavoura - Pecuária na Recuperação de Áreas Compactadas: Riacho dos Cavalos – PB**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Semi-Árido, Dissertação de Mestrado, 61 p. 2011.

MENDES, G.; MELLONI, E. G. P. & MELLONI, R. Aplicação de Atributos Físicos do Solo no Estudo da Qualidade de Áreas Impactadas, Em Itajubá/MG. **Revista Cerne**, 12: 211-220. 2006.

MENGEL, K. E.; KIRKBY, G. A. **Further elements of importance**. International Potash Institute: Worblaufen- Bern. 588 p. 1987.

MESQUITA, M. G. B. F. MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Revista Ciência Rural**. 2004.

MITCHELL, G. **Problems and Fundamentals of Sustainable Development Indicators**. 1997. Disponível em: <<http://www.lec.leeds.ac.uk/people/gordon.html>>.

MIGUEL, F. R. M.; Vieira, S. R. & Grego, C. R. Variabilidade Espacial Da infiltração de Água em Solo sob Pastagem em Função da Intensidade

de Pisoteio. **Revisa Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 44: 1513-1519. 2010.

MIGUEL, P. **Caracterização Pedológica, Uso da Terra e Modelagem da Perda de solo em Áreas de Encosta de Rebordo de Planalto do RS**. 2010. 112f. Tese (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MILEK, C. B. **Avaliação do Risco de Contaminação da Água Subterrânea em uma Área Urbana do Aquífero Carste em Almirante Tamandaré**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de recursos hídricos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

MINERAIS DO ESTADO DO PARANÁ S.A. **Geoquímica de solo – horizonte B: relatório Final de projeto**. Curitiba: MINEROPAR. 408 p. 2005.

MINERAIS DO ESTADO DO PARANÁ S.A. **Geoquímica do solo**. Curitiba: MINEROPAR. 75 p. 2004.

MIRANDA, J.; et al. Composição química da solução de solo sob diferentes coberturas vegetais e análise de carbono orgânico solúvel no deflúvio de pequenos cursos de água. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. 30: 633-647. 2006.

MONTEBELO, L. A.; et al. Relação entre uso e cobertura do solo e risco de erosão nas áreas de preservação permanente na bacia do ribeirão dos Marins, Piracicaba-SP. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto. Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2005.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. São José dos Campos/SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2003.

MOTA, S. **Preservação e conservação de recursos hídricos**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

MOITA NETO, J.M.; MOITA, G.C. **Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados**. Química Nova, v.21, p.467-469, 1998.

MOOJEN, E. L. & MARASCHIN, G. E. **Potencial Produtivo de uma Pastagem Nativa do Rio Grande do Sul Submetida a Níveis de Oferta de forragem.** Revista Ciência Rural, 32: 127-132. 2002.

MOREIRA, W. H.; et al.. Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico após oito anos de Integração Lavoura-Pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** 2012.

MOURA, L. G. V. **Indicadores para avaliação da sustentabilidade em sistemas de produção da agricultura familiar: o caso dos fumicultores de Agudo/RS.** Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural). Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento Rural, UFRGS. Porto Alegre. 2002.

MOTA, M. S.; et al. Qualidade E Atributos Físicos De Um Latossolo Vermelho Distroférico Típico Em Diferentes Sistemas De Manejo. **Revista Agrarian.** 2011.

MUSCHLER, R. G. **Árboles en Cafetales. Módulos de Enseñanse Agroflorestal.** Turrialba: CATIE/GTS. 1999.

OECD. **Core set of indicators for environmental performance reviews: a synthesis report by the Group on the State of the Environment.** Paris: OECD, 1993. Disponível em: <[www.oecd.org](http://www.oecd.org)>. Acesso em: 11 de agosto de 2012.

OLIVEIRA, L. F. et al.. Transporte de solutos no solo e no escoamento Superficial: i - desenvolvimento do modelo e simulação Do movimento de água e escoamento superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** 4: 63-69. 2000.

OLIVEIRA, M. M.; FERREIRA, J. P. C. L. **Proposta de uma metodologia para a definição de áreas de infiltração máxima.** 6º congresso da água, Lisboa 2002.

OLIVEIRA, L. B.; et al. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v.26, p. 315-323, 2002.

OLIVEIRA, S. M. B.; Pessenda, L. C. R.; Gouveia, S. E. M.; Fávares, D. I. T. & Babinski, M. **Evidência Geoquímica de Solos Formados pela Interação de Guanos com Rochas Vulcânicas, Ilha Rata, Fernando de Noronha (PE)**. Revista do Instituto de Geociências, 9: 3-12. 2009.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. **Elementos traço na nutrição e saúde humana**. São Paulo, Roca. 218 p. 1998.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT - OCDE, **Organization for economic cooperation and development: core set of indicators for environmental performance reviews; a synthesis report by the group on the state of the environment**. Paris: OCDE, 1993.

OR, D.; WRAITH, J. M. Soil water content and water potential relationships. In: SUMNER, M. E. (Ed.) **Handbook of Soil Science**. Boca Raton, Washington. 2000.

OSÓRIO FILHO, B. D. et al. Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviais e respostas de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto. **Revista Ciência Rural**. Santa Maria – RS. n. 37. 2007.

OSÓRIO, Q. da S. **Vulnerabilidade Natural de Aquíferos e Potencial de Poluição das Águas Subterrâneas**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

PACHECO, A. P., RIBAS, N. S., Sensoriamento Remoto aplicado ao Uso da Terra. GEODÉSIA online. **Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**. Recife, v. 4, 1998.

PAES, R. F. DE C. **Caracterização do Chorume Produzido no Aterro da Muribeca – PE**. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2003.

PAIVA, J. B. D. de. **Relatório Final Processo482124-2007-5.docx**. 2011. Disponível em:

<<http://jararaca.ufsm.br/websites/paiva/download/RelEditUniv2007.pdf>  
> Acesso em: 05 abr. 2013.

PAIVA, J. B. D. De; et al.. Demandas De Água Na Bacia Do Rio Vacacaí Mirim. *In: I Simpósio De Recursos Hídricos Do Sul-Sudeste. Anais..., Curitiba. ABRH. 2008.*

PAIVA, J. B. D. **Modelação Hidrossedimentométrica e da Qualidade da Água da Bacia Hidrográfica do Arroio Vacacaí Mirim. 2011.** Disponível em:  
<<http://jararaca.ufsm.br/websites/paiva/download/RelEditUniv2007.pdf>  
> Acesso em: 05 abr. 2013.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, 2006.  
PAIXÃO, F. J. R. Da; et al. Estimativa da Infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. **Revista Brasileira de Biologia e Ciências da Terra**, 5. 2004.

PALMA, M. A. Z.; et al. Efeito da Profundidade de Trabalho das Hastes Sulcadoras de uma Semeadora-Adubadora na Patinagem, na Força de Tração e no Consumo de Combustível de um Trator Agrícola. **Revista Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**. 2010.

PANACHUKI, E.; et al. Perdas de Solo e de Água e Infiltração de Água em Latossolo Vermelho sob Sistemas de Manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35: 1777-1785. 2011.

PANACHUKI, E.; et al. Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista Maringá**, 28: 129-137. 2006.

PANACHUKI, E. **Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistema de integração agricultura-pecuária.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Dourados, 2003.

PARDO, R.; et al. Determination and speciation of heavy metals in sediments of the Pisuerga river. **Water Res.**, n. 24, p. 373-379, 1990.

PASSOS, H. D. B. ; PIRES, M. de M. . Indicadores Ambientais para avaliação de Agroecossistemas. **Informe Gepec**, v. 12, p. 85-103, 2008.

PATACA, L. C. M.; BORTOLETO, G. G.; BUENO, M. I. M. S. Determinação de Arsênio em Águas Contaminadas Usando Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva. **Revista Química Nova**. São Paulo. v. 28, p. 579-582, 2005.

PAULISTA, G.; et al. Espaço emocional e indicadores de sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**. Campinas. v. XI, n. 1. p. 185-200. jan.-jun. 2008

PAZ GONZÁLEZ, A.; NEIRA SEIJO, X.; BENITO RUEDA, E. **Compacidad de los suelos desarrollados sobre sedimentos Terciario-Cuaternarios en Terra Cha (Lugo)**. Caderno Laboratorio Xeolóxico de Laxe, Sada, La Coruña, v. 22, p. 15-28, 1997.

PELOZATO, M. **Valores De Referência De Cádmio, Cobre, Manganês e Zinco Para Solos De Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages. 2008.

PERAZA, J. E. S. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2003.

PEREIRA, N. O. C. **Técnicas de geoprocessamento aplicadas ao estudo da adequação do uso do solo em bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 1994.

PERRITI, R. **Critérios ambientais para o zoneamento industrial**. Porto Alegre: FEE, 1981.

PINA, M. de F. R. P. **Potencialidades dos Sistemas de Informações Geográficas na Área de Saúde**. In: NAJAR, A. L. (Org.) Saúde e espaço: estudos metodológicos e técnicos de análise. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 1998.

PIZZANI, R. **Produção E Qualidade De Forragens E Atributos De Um Argissolo Vermelho**. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Biodinâmica e Manejo do Solo. 2008. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppgcs/disserta%E7%F5es%20e%20teses/disserta%E7%E3o%20Rodrigo%20Pizani.pdf>

PIZELLA, D. G. & Souza, M. P. As contribuições da Avaliação Ambiental Estratégica para a Estratégia Nacional de Biotecnologia. In: 24 Congressos Brasileiros De Engenharia Sanitária E Ambiental, 2, Belo Horizonte. **Resumo expandido**, Belo Horizonte, p. 238-238. 2007.

POCAY, V. G. **Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de Latossolo sob cultivo intensivo de cana-deaçúcar..** Dissertação (Mestrado) - UNESP. Jaboticabal: FCAV/UNESP. 2000.

POERSH, N. L. **Distribuição de Minerais e Genética dos Teores de Potássio e de Cobre Em Sementes de Feijão**. Tese (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

POMPERMAYER, R. S. **Aplicação da Análise Multi-critério em Gestão de Recursos Hídricos: Simulação para as bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**. (in portuguese). Dissertação de Mestrado da Universidade de Campinas, 2003.

POTES, M. da L. **Matéria Orgânica e sua Distribuição em Compartimentos Físicos em Neossolo Litólico sob Pastagem e Mata Nativa nos Campos de Cima da Serra No Rio Grande Do Sul**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado. 2009.

PRADO, H. VASCONCELOS, A. C. M. LANDELL, M. G. A. **Relação entre balanço de cargas elétricas, matéria orgânica e soma de bases em perfis de Latossolos ácricos do Brasil**. 2004. Disponível em: <[http://www.pedologiafacil.com.br/artig\\_8.php](http://www.pedologiafacil.com.br/artig_8.php)>. Acesso em 12 dezembro de 2011.

PRAKASC, S. **Poverty and Environment linkagens in Mountains and Uplands: Reflections on the “Poverty trap” thesis**. CREED: Working paper, 1997.

PROJETO MARCA D'ÁGUA. - **Seguindo as mudanças na gestão das bacias hidrográficas do Brasil: caderno 1: retratos 3x4 das bacias pesquisadas.** Formiga Johnsson, R. M. & Lopes, P. D. (orgs.) Brasília: FINATEC. 2003.

PRIMEL, E. G.; et al. **Poluição das Águas Por Herbicidas Utilizados no Cultivo do Arroz Irrigado na Região Central Do Estado do Rio Grande Do Sul, Brasil: Predição Teórica E Monitoramento.** Revista Química Nova, 28: 605-609.

PRÜSS, A.; KAY, D.; FEWTRELL, L.; BARTRAM, J.. **Estimating the burden of disease from water, sanitation, and hygiene at a global level.** In: Environmental Health Perspectives, v.110, 2002.

QUIROGA, R. **Indicadores De Sustentabilidad Y Desarrollo Sostenible: Estado Del Arte Y Perspectivas.** Santiago de Chile: División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos, 2001.

RACHWAL, M. F. G.; et al.. Manejo dos Resíduos de Acácia Negra (*Acaciamearnsii* De Wild) e a Sustentabilidade do Sítio. **Revista Ciência florestal.** 2. 2007.

RAMALHO, J. F. G. P. **Metais pesados em solos com diferentes usos agrícolas no Estado do Rio de Janeiro.** 145p. Tese (PhD) - UFRRJ, Rio de Janeiro: 1996.

RAMALHO, J.P.G.P; et al. **Acumulação de metais pesados pelo uso de insumos agrícolas na microbacia de Caetés, Paty do Alferes, RJ.** Embrapa. 2000. Disponível em:[http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/bp05\\_1998.pdf](http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/bp05_1998.pdf)

RAMOS, C. da S.; SANCHEZ, M. C. Estudo metodológico de classificação de dados para cartografia temática. In: **Revista Geografia,** v.5, 2000.

REDCLIFT, M. Sustainable Development and Popular Participation: a Framework for Analysis. In: GHAI, D. VIVIAN, J. M. (Eds.). **Grassroots-Environmental Action: People Participation in Sustainable Development.** London: Routledge, 1995.

RIBEIRA, F. **Calidad, contaminación y protección de cuíferos** In: Curso Hispanoamericano De Hidrología Subterránea, Montevideo. **Anais...** UY, 2004.

RIBEIRO, R. C. S. ; et al. **Metodologia para definir um sistema de indicadores de desempenho socioambientais**. In: CSEAR. Ribeirão Preto. Metodologia Para Definir Um Sistema De Indicadores De Desempenho Socioambientais, 2011.

RICHART, A.; et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina**, v. 26, p. 321-344, 2005.

RIZZARDI, A. S. **Atributos físicos e fluxo de água em solos da bacia hidrográfica do rio vacacaí-mirim** RS. Trabalho Final de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário Franciscano. Santa Maria. 2010.

ROCHA, A. A. **Controle da Qualidade de solo**. In: Philipp J. R. A. (Ed). Saneamento, Saúde e Ambiente: Fundamentos Para um Desenvolvimento Sustentável. Manole: São Paulo, 2005.

ROCHA, J. S. M. **Manual de projetos ambientais**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 1997.

RODRIGUES Júnior, D. J.; et al. *In*: A compactação do solo e o pisoteio bovino numa pastagem com e sem irrigação. In: IV Congresso De Forrgicultura E Pastagens. **Anais...**, Lavras, 1 vol. p. 1-1. 2011.

RODRIGUES Junior, S.; et al. Florestamento compensatório com vistas à retenção de água no solo da bacia hidrográfica do Ribeirão Itaim, Taubaté, SP. *In*: I Seminário De Recursos Hídricos Da Bacia Hidrográfica Do Paraíba Do Sul: O Eucalipto E O Ciclo Hidrológico, Taubaté, 2007. **Resumos expandidos**, Taubaté, p.67-73. 2007.

ROHNER, R. **Art and Sustainability**. 1994. Disponível em: <<http://tdg.uoguelph.ca/www/FSR/collection/indicator/artsustainable04.txt>>.

ROSA, C. M. da ; et al. **Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo Háptico sob sistemas de manejo do arroz irrigado**. Revista Brasileira de Ciência do Solo (Online), v. 35, p. 1769-1776, 2011.

ROSA, R. A. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 6. ed. Uberlândia: EDUFU, 2007.

ROSA, R. A. **Utilização de imagens TM/LANDSAT em levantamento de uso do solo**. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 6., Manaus, 1990, **Anais...** São José dos Campos, INPE, v.2. 1990.

ROSA, R.; et al. **Elaboração de uma base cartográfica e criação de um banco de dados georreferenciados da bacia do Rio Araguari – MG**. Brasília: CNPq. 2004.

ROTONDANO, A. K. F.; MELO, B. **Relações Água-Solo-PLANTA**. Disponível em: <<http://www.fruticultura.iciag.ufu.br/irriga3.html>>

ROTH, A.; et al. Desenvolvimento De Um Permeâmetro De Carga Constante E Condutividade Hidráulica Em Diferentes Camadas De Um Planossolo Háptico Eutrófico Gleissólico. *In: XVIII CIC. Anais...*, Pelotas, UFPEL. 2009.

RUFYKIRI, G.; et al. **Mobilization of aluminium and magnesium by roots of banana (*Musa spp.*) from kaolinite and smectite clay minerals**. Applied Geochemistry, 19: 20 -30. 2004.

SALDANHA, E.; **Modelo de Avaliação da Sustentabilidade Socioambiental**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 2007.

SALOMÃO, F. X. de; ANTUNES, F. dos S. Solos. In: OLIVEIRA, A. M. dos S. (Ed.). Geologia de engenharia. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

SANTI, A. L, Amado, et al. Infiltração de Água no Solo, Determinada por Diferentes Métodos, Como Indicador do Potencial Produtivo em dois Latossolos Manejados com Agricultura de Precisão. **Revista Interciência**, 37:204-208. 2012.

SANTI, A.L.; et al. **Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitante à produtividade de grãos.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, p. 1346-1357, 2012.

SANTI, A. L. **Relações Entre Indicadores de Qualidade do Solo e Produtividade das Culturas em Áreas Com Agricultura de Precisão.** Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 175 p. 2007.

SANTI, A. L.; et al. Monitoramento Da Compactação Do Solo Através Do Mapeamento Da Resistência Do Solo A Penetração. **Revista Plantio Direto.** 96: 15-20. 2006.

SANTOS, R. A.; CRUZ, M. J. M.; NASCIMENTO, S. A. M. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Cadernos de Geociências,** 2010.

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

SANTOS, J. **Ocupação do solo e comportamento hidrológico da sub-bacia do rio Luís Alves, bacia do Itajaí, Santa Catarina.** Curitiba, PR. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. UFPR. 2003

SAS INSTITUTE - **Statistical Analysis System.** *SAS/STAT User's Guide 8.0.* North Caroline: SAS Institute Inc. 1999.

SBARDELOTTO, D.; et al.. Caracterização Físico-Hídrica de Solos Submetidos a Diferentes Sistemas De Manejo Através do Infiltrômetro de Cornell na Região de Frederico Westphalen. In: 25 Jornada Acadêmica Integrada, Santa Maria, 2011. **Resumo expandido,** Santa Maria, UFSM. 2011.

SCANDAR NETO, W. J. Indicadores de desenvolvimento sustentável no Brasil. In: Seminário Fluminense De Indicadores, Rio de Janeiro, 2004. **Anais...** Rio de Janeiro: Fundação CIDE, 2004.

SCHAFFRATH, V.; et al.. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 4: 1369-1377. 2008.

SCHLINDWEIN, J. R.; et al. Mapeamento do uso e cobertura do solo do município de Caxias do Sul (RS) através de imagens do satélite CBERS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2007

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. SEPLAN **Levantamento dos recursos naturais**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – SEMA. **Relatório Anual Sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande Do Sul** Edição 2007/2008. Rio Grande do Sul. 2008.

SHUQAIR, S. M. S. **Estudo Da Contaminação Do Solo E Água Subterrânea Por Elementos Tóxicos Originados Dos Rejeitos Das Minas De Carvão De Figueira No Estado Do Paraná**. Programa de Pós-Graduação em em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Elétricas e Nucleares, Tese de Doutorado, 117 p. 2002.

SILVA JÚNIOR, M. C. **Composição florística, estrutura e parâmetros fitossociológicos do cerrado e sua relação com o solo na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba, MG**. Dissertação (Mestrado) Viçosa: UFV, 1984.

SILVA NETO, L. De F. Da. **Pedogênese e matéria orgânica de solos hidromórficos da região metropolitana de Porto Alegre**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 105 p. 2010.

SILVA, F.M.F. **Matéria Orgânica na Cefeicultura**. Trabalho Conclusão de Curso (Tecnologia em Cafeicultura) - Instituto Federal de

Educação Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Muzambinho, 2010.

SILVA, J. C. A.; ANDRADE, A. P. de; SILVA, D. S. da. **Avaliação da infiltração da água no solo como indicador de modificações edáficas em três sistemas de manejo.** Agropecuária Técnica (UFPB), v. 27, p. 85-91, 2006.

SILVA, L. S.; et al. **Dinâmica da Emissão de Metano em Solos sob Cultivo de Arroz Irrigado no Sul do Brasil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 35:473-481. 2011.

SILVA, V. R. REINERT, D. J. REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo.** Viçosa – MG. n. 24. 2000.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J. & REICHERT, J. M. Resistência Mecânica Do Solo À Penetração Influenciada Pelo Tráfego De Uma Colhedora Em Dois Sistemas De Manejo Do Solo. **Revista do Centro de Ciências Rurais.** 30: 795-801. 2000.

SILVA, S. de A.; et al. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.15-22, 2010.

SILVA, A. M.; CORREIA, A. M. M.; CÂNDIDO, G. A. Ecological Footprint Method: Avaliação da Sustentabilidade no Município de João Pessoa, PB. In: CÂNDIDO, G. A. (Org.). **Desenvolvimento Sustentável e Sistemas de Indicadores de Sustentabilidade: Formas de aplicações em contextos geográficos diversos e contingências específicas.** Campina Grande, PB: UFCG, 2010.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeitos do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, p. 593-597, 1997.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; MAZIERO, L.; SANTOS, E. F. dos. Impactos da atividade humana sobre o solo – Aquíferos. In: I Fórum Solos E Ambiente. Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2004.

SINDICATO DO COMÉRCIO PATRONAL DE CAMAÇARI E REGIÃO - SINCOM . **Políticas públicas para assegurar a sustentabilidade ambiental.** Disponível em: <[http://www.sincomcam.com.br/noticia\\_1er.php?id=68](http://www.sincomcam.com.br/noticia_1er.php?id=68)>. Acesso em 23 Julh de 2012.

SINGH, B.; GILKES, R.J. Properties and distribution of iron oxides and their association with minor elements in the soil of Southwestern. **Australian Journal of Soil Science**, v.43, p.77-98, 1992.

SIQUEIRA, O. J. F. de. *et al.* **Recomendações de Adubação e Calagem Para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** Passo Fundo: EMBRAPA – CNPT, 1987.

SMITH, K. **Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster.** London: Routledge, 1996.

SOARES, R. **Identificação e Avaliação dos Sistemas Motomecanizados de Preparo Periódico do Solo, Usados no Município de Rio Verde-GO.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 64 p. 1992.

SOARES, I. A.; et al. **Fungos na Biorremediação de Áreas Degradadas.** Arquivos Instituto Biológico, São Paulo. v.78, p.341-350, 2011.

SOARES, P.SM.; YOKOWAMA, L. FREIRE, D.D.C. **Transporte de Metais Pesados no Solo no Contexto da Disposição de Resíduos Sólidos.** Série Tecnologia Ambiental. 2008. Disponível em: <[http://www.cetem.gov.br/publicacao/series\\_sta/sta-33.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/series_sta/sta-33.pdf)>

SOARES, J. S. W. **Matéria Orgânica de um Argissolo Vermelho Distrófico Úmbrico após a Introdução de Fitofisionomias Antrópicas.** Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo,

Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 64 p. 2011.

**SOMMER, M. G.; SCHERER, C. M. S. Sítios Paleobotânicos do Arenito Mata (Mata e São Pedro), RS – Uma das Mais Importantes Florestas Petrificadas do Planeta.** Brasília: SIGEP, 2002.

SONTOS, A. C. dos; FERREIRA, E. M. & ARAÚJO, L. C. DE. Propriedades Químicas e Físicas de Solos em Áreas sob Pastagens em Cerrado do Norte do Tocantins. **Revista Acadêmica Ciência Agrária Ambiental. 1:** 55-63. 2009.

SOUZA, Z. M.; et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** Viçosa, v. 25, p. 669-707, 2001.

SOUZA, Z. M.; et al. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 309-319, 2004a.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 39, n. 5, p. 491- 499, 2004b.

SPOHR, R. B.; et al. Escoamento superficial e infiltração de água no solo sob chuva simulada no Rio Grande do Sul. *In:* XXXI Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo, Gramado, 2007. **Resumos expandidos,** Gramado, SBCS, p.1-6. 2007.

SPOHR, R. B.; et al. **Escoamento superficial e infiltração de água no solo sob chuva simulada no Rio Grande do Sul.** In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007, Gramado, RS. **Conquistas & Desafios da Ciência do Solo Brasileira,** 2007.

STEINER, D. Time Dimension for crop Surveys from Space. **Photogrammetric Enginnering.** Falls Church, v. 36, n. 2, p. 187-194, 1970.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos do sistema de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 835-841, 2000.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008.

STÜRMER, S. L. K. **Atributos Químicos, Físico-Mecânicos e Mineralógicos de um Argissolo Vermelho Submetido a Manejos de Solo Sob Plantio Direto**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 165 p. 2012.

STÜRMER, S. L. K. **Infiltração de Água em Neossolos Regolíticos do Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul**. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 104 p. 2008.

STÜRMER, S. L. K. **Mudança Textural Abrupta em dois Planossolos da Depressão Central Do RS**. In: XXXI Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo. Gramado: UFRGS, 2007.

SWINDALE, L. **Indicators for What?** 1994. Disponível em: <[http://tdg.uoguelph.ca/www/FSR/collection/indicator/indicat\\_what.txt](http://tdg.uoguelph.ca/www/FSR/collection/indicator/indicat_what.txt)>.

SUTILI, F. J. **Bioengenharia em Solos no Âmbito Fluvial do Sul do Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Rural de Viena, Viena, 2007.

TAVARES FILHO, J.; et al.. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Revista Ciência Rural**, 36: 996-999. 2006.

TEDESCO, M.J. **Análise de solo, plantas e outros minerais**. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

TIEZZI, E.; MARCHETTINI, N. **Sustainable Development: a Challenge Based on Renewable Energies and Appropriate Technologies**. In: International Congress: Energy, Environment-

Technological Innovations, 3., 1995, Caracas. Proceedings... Caracas: Univ. Central de Venezuela, v.3. 1995.

TILLER, K. G. **Heavy metals in soils and their environmental significance**. New York, Springer. 613 p. 1989.

TITO, G. A.; et al. Bentonita na Remediação de Solos Contaminados com Zinco: Efeito na Produção de Feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 5, p. 917-923, 2011.

TOGNON, A. A. **Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1991.

TREIN, C. R.; COGO, N. P. & LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo na rotação aveia+trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15: 105-111. 1991.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de Escoamento e Vazão Máxima de Bacias Urbanas. **Revista Brasileira de recursos Hídricos**, 5: 61-68. 2000.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS; ABRH, 2001.

UHDE, L. T. **Sistema Pedológico Em Um Ambiente Antropizado Da Depressão Central Do RS**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo, Universidade Federal de Santa Maria, Tese de Doutorado, 236 p. 2009.

UNDP – United Nations Development Program. **Reducing disaster risk: a challenge for development**. New York: UNDP, 2004.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM. **Agenda 21**. Conference on Environment and Development. Genebra: United Nations, 1992.

URACH, F. V. **Estimativa de Retenção de Água em Solos Para Fins de Irrigação**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 78 p. 2007.

USDA-ARS. **Soil quality test kit guide**. Washington: Soil Quality Institute. 82 p. 1999.  
VAN ES. 2003.

VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de Sustentabilidade: Uma Análise Comparativa**. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2006.

VAN ES. H.; SCHINDELBECK, R.; **Field procedures and data analysis for the Cornell Sprinkle Infiltrometer**. Cornell University, Department of Crop and Soil Sciences. Extension publication R 03-01. 8 pages. 2003.

VAN RAIJ, B. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação IAC, 1996.

VAN PUT, A.; et al. characterization of suspended matter and sediment samples from the Elbe river by EPXMA. **Water Res.**, n. 28, p. 643-655, 1994.

VANZELA, L. S.; et al. **Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14: 55–64. 2010.

VENEZUELA, T. C. **Determinação de Contaminantes Metálicos (Metal Tóxico) num Solo Adubado com Composto de Lixo em Área Olerícola no Município de Nova Friburgo**. 2001. 79 f. Tese (Mestrado em Saúde Pública) - Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2001.

VELOSO, C. A. C.; et al. **Relações cálcio, magnésio e potássio sobre a produção de matéria seca de milho**. Acta Amazonica, Manaus, AM, v. 31, n.2, p. 193-204, 2001.

VENDRAME, P. R. S.; **Disponibilidade de cobre, ferro, manganês e zinco em solos sob pastagens na Região do Cerrado**. Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Impressa), v. 42, p. 859-864, 2007.

VERONA, L.A.F.; et al. Rede Para Construção De Conhecimento Sobre Avaliação De Sustentabilidade De Agroecossistemas: Tornando Visível O Invisível. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 29, n. 1, p. 17-39, jan./abr. 2012

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, V.33, p. 743-755, 2009.

VIEIRA, S. R.; et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com leguminosas consorciada com a seringueira. **Revista Bragantia**, 69: 423-432. 2010.

VOGEL, M. M. **Avaliação da vulnerabilidade natural à Contaminação dos recursos hídricos Subterrâneos na região cultural da Quarta colônia de imigração italiana, RS**. .Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

VOMOCIL, J. A. **Porosity**. New York: Academic, 1965.

WARRICK, A. W. & NIELSEN, D. R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D. Applications of soil physics. New York: Academic Press. p. 319-344. 1980.

WASTOWSKI A. D.; et al.. Caracterização dos Níveis de Elementos Químicos em Solo, submetido a Diferentes Sistemas de Uso e Manejo, Utilizando Espectrometria de Fluorescência de Raios-X Por Energia Dispersiva (EDXRF). **Revista Química Nova**, São Paulo. v.33, 2010.

WHO. **Health and Sustainable development: addressing the issues and challenges**. Genebra: WHO, 2002.

WINK JUNIOR, M. V.; et al. Índice de Desenvolvimento Socioeconômico e pobreza extrema: um cenário para os municípios gaúchos. In: VI Encontro De Economia Gaúcha, 2012, Porto Alegre, **Anais...** Porto Alegre, 2012.

WINK, C.. **Estoque de Carbono em Plantações de Eucalyptus Sp. Implantados em Campo Nativo**. Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 130 p. 2009.

WREGGE, M.A. **Ética da água**. InformANDES, 96: 12. 2000.

XAVIER, A. **Comportamento da Cultura da Soja em Função de Resíduos Culturais, Mobilização do Solo e Irrigação, em Semeadura Direta**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, 99 p. 2005.

YU, K. N.; et al. **Determination of multi-element profiles of soil using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF)**. Applied Radiation and Isotopes. 57: 279–284. 2006.

ZAKIA, M.J.; **Identificação E Caracterização Da Zona Ripária Em Uma Microbacia Experimental: Implicações No Manejo De Bacias Hidrográficas E Na Recomposição De Florestas**. Tese apresentado ao programa de pós-graduação da Ciências da Engenharia Ambiental, EESC - USP, 1998.

ZUANAZZI, P. T.; WINK JUNIOR, M. V. **Desempenho do índice de desenvolvimento socioeconômico gaúcho em 2008**. In: Indicadores Econômicos FEE. Porto Alegre, v.39, 2011.

ZWIRTES, A. L.; et al. **Caracterização físico-hídrica de solos submetidos a diferentes manejos**. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, v. 4, p. 51-66, 2011.