



AQUÍFERO GUARANI

DETERMINAÇÃO DE PERÍMETROS
DE PROTEÇÃO DE POÇOS E
VULNERABILIDADE E RISCO
DE CONTAMINAÇÃO
DE AQUÍFEROS

ACUÍFERO GUARANÍ

DETERMINACIÓN DE PERÍMETROS
DE PROTECCIÓN DE POZOS Y
VULNERABILIDAD Y RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS



Série Manuais e Documentos Técnicos do
Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento
Sustentável do Sistema Aquífero Guarani
Serie Manuales y Documentos Técnicos del
Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo
Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní



**Projeto para a Proteção Ambiental
e Desenvolvimento Sustentável
do Sistema Aquífero Guaraní**
**Proyecto para la Protección
Ambiental y Desarrollo Sostenible
del Sistema Acuífero Guaraní**



Projeto para a Proteção Ambiental
e Desenvolvimento Sustentável
do Sistema Aquífero Guarani

Proyecto para la Protección
Ambiental y Desarrollo Sostenible
del Sistema Acuífero Guarani



Determinação de Perímetros de Proteção de Poços e Vulnerabilidade e Risco de Contaminação de Aquíferos

Determinación de Perímetros de Protección de Pozos y Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Acuíferos



**Série "Manuais e Documentos Técnicos do Projeto de Proteção Ambiental
e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani"**

**Serie "Manuales y Documentos Técnicos del Proyecto para la Protección Ambiental
y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guarani"**

Autores:

- **Eng. Alejandro Oleaga, Eng. Fernando Pacheco e Moshe Feller¹**

¹Consórcio Guarani: Tahal Consulting Engineers Ltd., Seinco S. R. L., Hidroestructuras S. A., Hidrocontrol S. A., Hidroambiente S. A.

Consórcio Guarani:

- Coordenação Técnica: **Dr. Gerardo Veroslavsky**

Secretaria-Geral do Projeto SAG:

- Supervisão Técnica Geral: **Dr. Jorge N. Santa Cruz**
- Revisão Final: **Lic. Alberto Manganelli**
- Plano de Obra e Responsabilidade por Desenho e Publicação: **Lic. Roberto Montes**

Os resultados, interpretações, conclusões, denominações e opiniões presentes neste relatório e a forma como aparecem são de responsabilidade exclusiva do autor. Não representam juízos de valor sobre as condições jurídicas de países, territórios, cidades ou áreas, nem sobre as atividades diversas e a delimitação de fronteiras e limites estabelecidos pelos países. Tampouco representa a opinião da Secretaria Geral da Organização dos Estados Americanos (SG/OEA) ou da Secretaria Geral do Projeto SAG.

Fica autorizada a reprodução e a difusão do conteúdo deste livro para fins educativos e não comerciais e sem prévia autorização escrita, desde que haja referência expressa à fonte.

Autores:

- **Ing. Alejandro Oleaga, Ing. Fernando Pacheco y Moshe Feller¹**

¹Consórcio Guarani: Tahal Consulting Engineers Ltd., Seinco S.R.L., Hidroestructuras S.A., Hidrocontrol S.A., Hidroambiente S.A

Por el Consorcio Guarani:

- Coordinación Técnica: **Dr. Gerardo Veroslavsky**

Por la Secretaría General del Proyecto SAG:

- Supervisión Técnica General: **Dr. Jorge N. Santa Cruz**
- Revisión Final: **Lic. Alberto Manganelli**
- Plan de Obra y Responsabilidad Diseño y Publicación: **Lic. Roberto Montes**

Los resultados, interpretaciones, conclusiones, denominaciones y opiniones presentes en este informe y la forma como aparecen son una contribución técnica para la difusión de los conocimientos del Sistema Acuífero Guarani. No representan juicios de valor sobre las condiciones jurídicas de países, territorios, ciudades o áreas, ni sobre las actividades diversas y la delimitación de fronteras y límites establecidos por los países. Tampoco representa la opinión de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (SG/OEA).

Queda autorizada la reproducción y difusión del contenido de este libro para fines educativos y no comerciales y sin previa autorización por escrito, siempre y cuando se cite claramente la fuente.

PREFÁCIO

O Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní é uma iniciativa da Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai para aumentar o conhecimento referente ao aquífero e propor medidas de caráter técnico, legal e institucional para sua gestão sustentável. O projeto contou com o apoio de fundos de doação provenientes do Fundo para o Meio Ambiente Mundial (GEF por sua sigla em inglês), que foram implementados pelo Banco Mundial e executados pela Organização dos Estados Americanos (OEA). Foi executado no período 2003-2009 segundo componentes e atividades previamente definidos.

O mesmo foi organizado em sete componentes com atividades inter-relacionadas que permitiram caracterizar o sistema Aquífero Guaraní em função de suas particularidades e comportamento hidrogeológico, seu aproveitamento e preservação, seu relacionamento com comunidades e instituições, em particular pelas necessidades de planejamento e ordenamento territorial para melhorar a gestão sustentável de suas águas.

No componente do conhecimento, foi prevista a execução da Série “Manuais e Documentos Técnicos”, com a consequente iniciativa de que todos os produtos obtidos em forma de dados e conhecimento devem ser traduzidos e compatibilizados com termos práticos e concretos, que sirvam ou orientem convenientemente aos gestores, legisladores e políticos para poder preparar e aplicar com bases técnicas sólidas, as regulamentações necessárias para o gerenciamento, regulação e proteção do Sistema Aquífero Guaraní.

Agradeço a contribuição dos técnicos e autores do Consórcio Aquífero Guaraní, em especial de Alberto Manganelli pelo trabalho de compilação da Síntese Hidrogeológica e de Jorge Santa Cruz pelo trabalho de supervisão dos documentos da presente Série.

PRÓLOGO

El Proyecto de Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní es una iniciativa de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay para aumentar el conocimiento referente al acuífero y proponer medidas de carácter técnico, legal e institucional para su gestión sostenible. El proyecto contó con el apoyo de los fondos de donación del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por su sigla en inglés), que fueron implementados por el Banco Mundial y ejecutados por la Organización de los Estados Americanos (OEA). Fue ejecutado en el período 2003-2009 siguiendo componentes y actividades previamente definidas.

Fue organizado en siete componentes con actividades interrelacionadas que permitieron caracterizar el sistema Acuífero Guaraní en función de sus particularidades y comportamiento, hidrogeológico, su aprovechamiento y preservación, su relación con comunidades e instituciones, en particular las necesidades de planificación y ordenamiento del territorio para mejorar la gestión sostenible de sus aguas.

En el componente del conocimiento se inscribe la ejecución de la Serie “Manuales y Documentos Técnicos”, consecuentemente con la iniciativa de que todos los productos obtenidos en forma de datos y conocimiento deben ser traducidos y compatibilizados con términos prácticos y concretos que sirvan u orienten convenientemente a los gestores, legisladores y políticos para poder aplicar técnicamente, con bases técnicas sólidas, las normas necesarias para el manejo, regulación y protección del Sistema Acuífero Guaraní.

Agradezco la contribución de los técnicos y autores del Consorcio Acuífero Guaraní, en especial de Alberto Manganelli por el trabajo de recopilación de la Síntesis Hidrogeológica y de Jorge Santa Cruz por el trabajo de supervisión de los documentos de la presente Serie.

Luiz Amore
Secretário Geral do Projeto
Secretario General del Proyecto

PREFÁCIO

A maior parte do Sistema Aquífero Guarani (SAG) encontra-se sob confinamento. Seus setores de afloramento são principalmente de recarga, havendo alguns casos de descarga subterrânea. Os setores mais profundos apresentam artesianismo e temperaturas de origem geotérmica de 60 °C ou mais.

O estudo do SAG foi feito de forma interdisciplinar. Foram aplicadas metodologias e tecnologias geológicas, petrológicas, petrofísicas, geofísicas, hidrogeológicas, hidroquímicas e isotópicas. Além disso, foram realizados estudos complementares de hidrometeorologia, hidrologia superficial e modelação matemática, entre outros. Esse complexo sistema aquífero exige um conhecimento detalhado e concreto das características de cada um de seus setores.

A gestão sustentável das águas subterrâneas requer conhecimento atualizado sobre esse recurso. O conhecimento deve ser transmitido à sociedade, incentivando sua participação e melhorando sua relação com a ciência e a tecnologia. Esse é o propósito destes manuais e guias de procedimentos, elaborados por profissionais especializados e de prestígio.

A realização de estudos detalhados sobre os elementos do ciclo hidrológico nas áreas florestadas, especialmente sobre os afloramentos de materiais geológicos arenosos do SAG (possíveis áreas de recarga), resolve o *deficit* metodológico existente nos campos da hidrogeologia e da hidrologia. A percolação, a infiltração, o movimento da água em zonas não saturadas (ZNS), a interceptação da chuva pela folhagem, a qualidade da água infiltrada, as modificações no escoamento superficial e subsuperficial, as mudanças provocadas pelo desenvolvimento do ciclo vegetativo são alguns dos temas pesquisados e desenvolvidos neste Documento Técnico.

PRÓLOGO

El SAG presenta su mayor parte de cobertura territorial bajo confinamiento. Sus sectores aflorante pueden ser de recarga o en algunos casos de descarga subterránea. Los sectores más profundos presentan artesianismo y temperaturas de origen geotérmico de 60°C y aún más.

Su estudio fue encarado interdisciplinariamente aplicándose metodologías y tecnologías geológicas, petrológicas-petrofísicas, geofísicas, hidrogeológicas, hidroquímicas e isotópicas, habiéndose encarado también estudios complementarios de hidrometeorología, hidrología superficial y modelación matemática, entre otros. Se resalta la complejidad del Sistema y la necesidad del conocimiento a escalas de más detalle y aspectos concretos de las distintas problemáticas existentes a nivel más sectorial.

Desde el momento que la Gestión Sustentable del Agua Subterránea implica también un conocimiento actualizado del Recurso y una transferencia a la sociedad para participar en la mejora de la relación: C y T / Sociedad, es que se encaró la realización de estos Manuales y Guías de procedimientos por prestigiosos profesionales especializados.

La aplicación de métodos de estudios detallados del comportamiento de los elementos del ciclo hidrológico en áreas forestadas, especialmente sobre los materiales geológicos arenosos aflorantes del SAG (posibles áreas de recarga), cubre un déficit metodológico existente en las áreas del conocimiento hidrogeológico e hidrológico en ese sentido. Elementos como percolación e infiltración, movimiento del agua en la zona no saturada (ZNS), efecto de la interceptación de la lluvia por el follaje, calidad del agua infiltrada, modificaciones en el escurrimiento superficial y subsuperficial, cambios a través del desarrollo del ciclo vegetativo, y otros, son los aspectos a ser investigados en este tipo de tecnologías y desarrollados en este Documento Técnico.

Jorge Néstor Santa Cruz
Coordenador técnico 1 e 6 do Projeto SAG
Coordinador Técnico 1 y 6 del Proyecto SAG

Equipe do Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní em 2009

Responsáveis Nacionais:

Por Argentina: Fabián López
Por Brasil: Vicente Andreu Guillo
Por Paraguai: José Luis Casaccia
Por Uruguai: José Luis Genta

Coordenadores Nacionais:

Por Argentina: Miguel Ángel Giraut
Maria Josefa Fioriti (Coordenadora Adjunta)
Maria Santi (Coordenadora Adjunta)
Por Brasil: João Bosco Senra
Adriana Niemeyer Pires Ferreira (Suplente)
Por Paraguai: Amado Insfrán Ortíz
Por Uruguai: Lourdes Batista
Juan Ledesma (Suplente)

Representantes da OEA:

Cletus Springer
Jorge Rucks
Enrique Bello
Beatriz Santos
Lydia Ugas

Representantes do Banco Mundial:

Douglas Olson
Abel Mejía
Karin Kemper
Samuel Taffesse

Membros da Secretaria Geral:

Secretário-Geral: Luiz Amore
Coord. Técnico: Jorge N. Santa Cruz
Coord. Técnico: Daniel H. García Segredo
Coord. de Comunicação: Roberto Montes
Coord. de Administração: Luis Reolón
Assistente Técnico: Alberto Manganelli
Auxiliar Administrativa: Virginia Vila
Auxiliar Administrativo: Mathias González
Informática: Diego Lupinacci
Secretaria Técnica Administrativa: Rossana Obispo
Secretaria Bilingue: Patricia Guianze

Facilitadores dos Projetos Piloto:

Concordia – Salto: Enrique Massa Segui
Rivera – Santana: Achylles Bassedas
Itapúa: Alicia Eisenkölbl
Ribeirão Preto: Mauricio dos Santos

Organismos e Entidades de Apoio:

Agência Internacional de Energia Atômica
Serviço Geológico Alemão

Equipe Técnica de Editoração e Produção Gráfica:

TDA Comunicação

Equipo del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en 2009

Responsables Nacionales:

Por Argentina: Fabián López
Por Brasil: Vicente Andreu Guillo
Por Paraguai: José Luis Casaccia
Por Uruguai: José Luis Genta

Coordinadores Nacionales:

Por Argentina: Miguel Ángel Giraut
Maria Josefa Fioriti (Co-coordinadora)
Maria Santi (Co-coordinadora)
Por Brasil: João Bosco Senra
Adriana Niemeyer Pires Ferreira (Alternativa)
Por Paraguai: Amado Insfrán Ortíz
Por Uruguai: Lourdes Batista
Juan Ledesma (Alternativo)

Representantes de OEA:

Cletus Springer
Jorge Rucks
Enrique Bello
Beatriz Santos
Lydia Ugas

Representantes Banco Mundial:

Douglas Olson
Abel Mejía
Karin Kemper
Samuel Taffesse

Integrantes de la Secretaría General:

Secretario General: Luiz Amore
Coord. Técnico: Jorge N. Santa Cruz
Coord. Técnico: Daniel H. García Segredo
Coord. Comunicación: Roberto Montes
Coord. de Administración: Luis Reolón
Asistente técnico: Alberto Manganelli
Auxiliar Administrativa: Virginia Vila
Auxiliar Administrativo: Mathias González
Informática: Diego Lupinacci
Secretaria Técnica Administrativa: Rossana Obispo
Secretaria Bilingüe: Patricia Guianze

Facilitadores proyectos piloto:

Concordia – Salto: Enrique Massa Segui
Rivera – Santana: Achylles Bassedas
Itapúa: Alicia Eisenkölbl
Ribeirão Preto: Mauricio dos Santos

Organismos y Entidades de Apoyo:

Organismo Internacional de Energía Atómica
Servicio Geológico Alemán

Equipo Técnico de Editoración y Producción Gráfica:

TDA Comunicação

ÍNDICE GERAL

1 INTRODUÇÃO	13
2 CONCEITOS GERAIS	13
2.1 Tipos de aquíferos	13
2.2 Contaminação	15
2.2.1 Aspectos gerais	15
2.2.2 Proteção	18
3 DETERMINAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE PERFURAÇÕES	21
3.1 Conceitos prévios	21
3.1.1 Zona de influência	21
3.1.2 Zona de captação	22
3.2 Conceitos gerais	22
3.3 Delimitação de áreas/zonas de proteção	23
3.3.1 Área de captura total da fonte	24
3.3.2 Área de proteção microbiológica	24
3.3.3 Área de operações	25
3.4 Subdivisão posterior	26
3.5 Métodos relevantes disponíveis para a determinação de Áreas de Proteção de Poços de Abastecimento de Água	29
3.5.1 Raio Fixo Arbitrário (AFR)	30
3.5.2 Raio Fixo Calculado (CFR)	30
3.5.3 Formações Variáveis Simplificadas (SVS) ..	34
3.5.4 Modelos Analíticos (AM)	37
3.5.5 Mapeamento Hidrogeológico (HM)	39
3.5.6 Modelos numéricos (NM)	40
3.6 Considerações especiais	42
3.7 Relatório de delimitação de Áreas de Proteção de poços (WHPA)	46
4 VULNERABILIDADE	47
4.1 Métodos mais comuns	48
4.2 Aplicabilidade dos métodos e limitações gerais	54
4.3 Limitações gerais	55
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
6 ANEXO I: MAPA GOD DE VULNERABILIDADE NAS CIDADES DE RIVERA (URUGUAI) E SANTANA DO LIVRAMENTO (BRASIL). EXEMPLO DE CÁLCULO DE VULNERABILIDADE NO AQUIFERO GUARANI	59
6.1 Introdução	59
6.2 Marco hidrogeológico	59
6.3 Metodologia	63
6.4 Cálculo da vulnerabilidade	64
6.4.1 Aquífero Superficial	64
6.4.1.1 Fator G – grau de confinamento hidráulico da água subterrânea.....	64
6.4.1.2 Fator O – ocorrência de estratos de cobertura (litologia e consolidação) ..	65
6.4.1.3 Fator D – distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado	66
6.4.1.4 Índice GOD de vulnerabilidade	67
6.4.2 Aquífero profundo	68

INDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN	13
2 CONCEPTOS GENERALES	13
2.1 Tipos de acuíferos	13
2.2 Contaminación	15
2.2.1 Aspectos generales	15
2.2.2 Protección	18
3 DETERMINACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE PERFORACIONES	21
3.1 Conceptos previos	21
3.1.1 Zona de influencia	21
3.1.2 Zona de captación	22
3.2 Conceptos generales	22
3.3 Delineamiento de áreas/zonas de protección	23
3.3.1 Área de captura total de la fuente	24
3.3.2 Área de protección microbiológica	24
3.3.3 Área de operaciones	25
3.4 Subdivisión ulterior	26
3.5 Métodos relevantes disponibles para la determinación de áreas de protección de pozos de suministro de agua	29
3.5.1 Radio Fijo Arbitrario (AFR)	30
3.5.2 Radio Fijo Calculado (CFR)	30
3.5.3 Conformaciones variables simplificadas (SVS) ...	34
3.5.4 Modelos Analíticos (AM)	37
3.5.5 Mapeo hidrogeológico (HM)	39
3.5.6 Modelos Numéricos (NM)	40
3.6 Consideraciones especiales	42
3.7 Reporte de delineamiento de áreas de protección de cabezales de pozos (WHPA)	46
4 VULNERABILIDAD	47
4.1 Métodos más comunes	48
4.2 Aplicabilidad de los métodos y limitaciones generales ...	54
4.3 Limitaciones generales	55
5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	56
6 ANEXO I: MAPA DE VULNERABILIDAD GOD EN LAS CIUDADES RIVERA (URUGUAY) Y SANT'ANA DO LIVRAMENTO (BRASIL). EJEMPLO DE CÁLCULO DE VULNERABILIDAD EN EL AQUIFERO GUARANÍ	59
6.1 Introducción	59
6.2 Marco hidrogeológico	59
6.3 Metodología	63
6.4 Cálculo de la vulnerabilidad	64
6.4.1 Acuífero Somero	64
6.4.1.1 Factor G – Grado de confinamiento	64
6.4.1.2 Factor O – Ocurrencia del sustrato suprayacente	65
6.4.1.3 Distancia al agua o al techo del acuífero	66
6.4.1.4 Índice de vulnerabilidad GOD	67
6.4.2 Acuífero Profundo	68

6.4.2.1	Fator G – Grau de confinamento hidráulico de água subterrânea	68
6.4.2.2	Fator O – ocorrência de estratos de cobertura	69
6.4.2.3	Fator D – distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado	70
6.4.2.4	Índice GOD de vulnerabilidade	71
6.4.3	Índice GOD de vulnerabilidade do Aquífero Guarani na área de estudo	72
7	ANEXO II: ZONAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA. EXEMPLO DO AQUÍFERO FREÁTICO DO GRUPO BAURU (SIMILAR AO AQUÍFERO GUARANI)	75
7.1	Zonas de proteção de poços e proteção da qualidade da água	75
7.2	Medidas de proteção da qualidade da água	78
7.2.1	Participação dos Setores Interessados	79
7.2.2	Desenvolvimento e implementação de um Plano de Proteção	79
7.2.3	Monitoramento/atualização do Plano de Proteção	80
8	ANEXO III - EXEMPLOS DE PLANOS DE PROTEÇÃO	80
8.1	Plano do projeto integral de avaliação e proteção de fontes hídricas do Estado do Colorado (ISWAP)	81
8.1.1	Fase de avaliação	83
8.1.2	Fase de proteção	84
8.2	Documento Técnico do usuário para proteção de fontes de água subterrânea do Estado de Utah	86

6.4.2.1	<i>Factor G – Grado de confinamiento</i>	<i>68</i>
6.4.2.2	<i>Factor O – Ocurrencia del sustrato suprayacente</i>	<i>69</i>
6.4.2.3	<i>Factor D – Distancia al agua o al techo del acuífero</i>	<i>70</i>
6.4.2.4	<i>Índice de vulnerabilidad GOD</i>	<i>71</i>
6.4.3	<i>Índice de vulnerabilidad GOD del acuífero Guaraní en el área de estudio</i>	<i>72</i>
7	ANEXO II: ZONAS DE PROTECCIÓN DE POZOS DE SUMINISTRO DE AGUA. EJEMPLO EN UN ACUÍFERO SEDIMENTARIO FREÁTICO DEL GRUPO BAURU (SIMILAR AL DEL ACUÍFERO GUARANÍ)	75
7.1	Zonas de protección de cabezales de pozos y protección de la calidad del agua	75
7.2	Medidas de protección de la calidad del agua	78
7.2.1	Participación de los Sectores Interesados ...	79
7.2.2	Desarrollo e implementación de un Plan de Protección	79
7.2.3	Monitoreo/Actualización del Plan de Protección	80
8	ANEXO III - EJEMPLOS DE PLANES DE PROTECCION	80
8.1	Plan del proyecto integral de evaluación y protección de fuentes hídricas del estado de colorado (ISWAP)	81
8.1.1	Fase de Evaluación	83
8.1.2	Fase de Protección	84
8.2	Guía de usuarios para la protección de fuentes de agua subterránea del Estado de Utah	86

1 INTRODUÇÃO

Ao contrário dos recursos hídricos superficiais, o **fluxo da água subterrânea é muito lento**. Nos primeiros, as velocidades costumam expressar-se em metros por segundo, ao passo que, nos aquíferos, a velocidade normalmente é medida **em metros por ano**. Isso tem muitas implicações, especialmente no que se refere à proteção, ao monitoramento e à contaminação.

Nesse sentido, as mudanças na disponibilidade e na qualidade da água subterrânea são processos lentos. Não obstante, em períodos de tempo relativamente extensos, alterações pontuais sem um controle adequado podem afetar áreas significativas sem que se detecte qualquer impacto no aquífero, por causa da ausência de pontos de controle (poços de monitoramento ou de extração). **Daí a enorme importância da proteção do aquífero em geral e de perfurações de fornecimento de água potável em particular**. Isso é ainda mais relevante quando se tem presente que a reparação de águas subterrâneas tem – na maioria dos casos – sérias limitações econômicas, podendo em alguns casos ser praticamente inviável. Portanto, agir de forma pró-ativa e **trabalhar de maneira preventiva deve ser a orientação em toda atividade destinada à conservação e à gestão de recursos hídricos subterrâneos**.

1 INTRODUCCIÓN

*A diferencia de los recursos hídricos superficiales, **el flujo del agua subterránea es muy lento**. En los primeros las velocidades se suelen expresar en metros por segundo, mientras que en los acuíferos la velocidad se suele medir **en metros por año**. Esto tiene muchas implicancias, especialmente en lo que refiere a protección, monitoreo y contaminación.*

*Concordantemente, los cambios de la disponibilidad y calidad del agua subterránea son procesos lentos. No obstante, en períodos de tiempos más o menos extensos, alteraciones puntuales, carentes de adecuado control, pueden alcanzar áreas significativas sin que se detecte algún impacto sobre el acuífero debido a la ausencia de puntos de control (pozos de monitoreo o de extracción). **Por ello, la protección del acuífero en general y de perforaciones de suministro de agua potable en particular es de gran importancia**. Esto es aún más relevante cuando se tiene en consideración que la remediación de aguas subterráneas es –en la mayoría de las situaciones– económicamente inabarcable, pudiendo inclusive en algún caso resultar prácticamente inviable. Por tanto, el accionar de forma proactiva, **trabajando en forma preventiva debe ser la guía en toda actividad destinada a la conservación y gestión de los recursos hídricos subterráneos**.*

2 CONCEITOS GERAIS

2.1 Tipos de aquíferos

As características do meio por onde a água circula determinam as condições de fluxo, suas características hidroquímicas naturais e os processos relacionados.

Apresentaremos a seguir uma breve resenha sobre os tipos de aquíferos, a qual será desenvolvida posteriormente com maiores detalhes. Os aquíferos são de três tipos:

2 CONCEPTOS GENERALES

2.1 Tipos de acuíferos

Las características del medio por donde circula el agua marcan las condiciones de flujo, sus características hidroquímicas naturales y los procesos relacionados.

Se expone a continuación una breve reseña de los tipos de acuíferos, lo cual será utilizado como base para el desarrollo posterior. Los acuíferos son de tres tipos:

- Granulares (ou porosos), nos quais a água circula entre os poros ou espaços intergranulares (figura 1), existentes em geral em rochas sedimentares (ex.: Guarani).
- Fissurais (ou fraturados), desenvolvem-se em rochas ígneas ou metamórficas (ex.: aquíferos na Formação Serra Geral), onde a água circula através de fraturas existentes na rocha sadia (figura 2).
- Cársticos, em calcários ou dolomitas, que se formam após a dissolução da rocha, o que acontece por causa da circulação contínua da água, com formação de tubos ou condutos por onde a água circula (embora no Uruguai haja esse tipo de rocha, essas formações não se desenvolveram de maneira relevante) (figura 3).

- *Granulares (o porosos), usualmente contenidos en rocas sedimentarias (Ej. Guaraní), en los cuales el agua circula entre los poros o espacios intergranulares (Figura 1);*
- *Fisurados, desarrollados en rocas ígneas o metamórficas (Ej. aquíferos en formación Serra Geral), donde el agua circula a través de fracturas o fisuras desarrolladas en la roca sana (Figura 2);*
- *Kársticos, en calizas o dolomitas, los cuales se generan tras la disolución de la roca por el continuo circular del agua, desarrollándose tubos u oquedades por las cuales circula el agua (A pesar que hay ese tipo de rocas en Uruguay, no se ha dado el desarrollo de Karst de importancia) (Figura 3).*

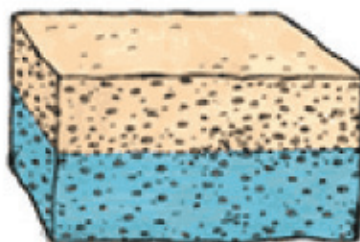


Figura 1.-

Esquema de um aquífero granular ou poroso.

Figura 1.-

Esquema de aquífero granular o poroso.

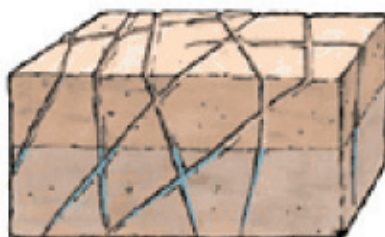


Figura 2.-

Esquema de um aquífero fissural.

Figura 2.-

Esquema de un aquífero fisurado.

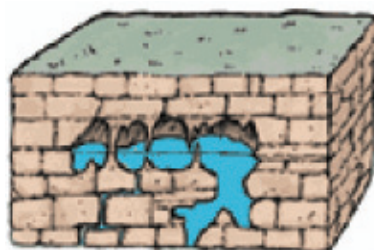


Figura 3.-

Esquema de um aquífero cársticos.

Os aquíferos granulares são normalmente mais extensos, mais espessos e têm maior potencial. Os fissurais apresentam maior velocidade de fluxo, são locais, mais vulneráveis e sensíveis a períodos de escassez de chuva.

2.2 Contaminação

2.2.1 Aspectos gerais

No mundo inteiro, os aquíferos vêm sofrendo crescentes ameaças de contaminação em decorrência de fatores como a urbanização, o desenvolvimento industrial, as atividades agrícolas, a mineração etc.

A contaminação de aquíferos acontece quando as cargas de substâncias aplicadas ou as energias derivadas de atividades humanas excedem a capacidade natural de atenuação do solo e dos estratos subjacentes, alterando a composição natural,^{1,2} da água. Em alguns casos, tais alterações podem impossibilitar o uso que se pretende fazer do manancial.

¹ A composição natural da água subterrânea em um aquífero não é única. A água precipitada ou infiltrada sofre consideráveis alterações em sua composição ao passar pelo solo, pela zona não saturada e à medida que circula através das rochas.

² Definida normalmente como composição de base, de fundo ou fundo natural. O projeto europeu BaSeLiNe (Natural BaSeLiNe Quality in European Aquifers, EVK1-CT1999-0006) adotou a seguinte definição: "O fundo natural da qualidade da água subterrânea é a categoria de concentrações na água de determinado elemento, espécie ou substância presente, derivado de fontes geológicas, biológicas ou atmosféricas naturais".

Figura 3.-

Esquema de un acuífero Karstico.

Los acuíferos granulares son usualmente de mayor extensión, espesor y potencial. Los fisurados presentan mayor velocidad de flujo, son locales, más vulnerables y sensibles a períodos de escasez de lluvia.

2.2 Contaminación

2.2.1 Aspectos generales

En todo el mundo, los acuíferos están experimentando una creciente amenaza de contaminación debido a factores tales como la urbanización, el desarrollo industrial, actividades agrícolas, emprendimientos mineros, etc.

La contaminación de acuíferos sucede cuando las cargas aplicadas de las sustancias o energía derivadas de las actividades humanas exceden la capacidad natural de atenuación del suelo y de los estratos subyacentes, alterando su composición natural^{1, 2} del agua. En algunos casos, dichas alteraciones pueden imposibilitar el uso pretendido o deseado del recurso.

¹ La composición natural del agua subterrânea en un acuífero no es única. El agua que precipita o infiltra cambia considerablemente su composición cuando pasa a través del suelo, la zona no saturada y a medida que circula a través de las rocas.

² Referida usualmente como composición de base, de fondo o fundo natural. El proyecto europeo "BaSeLiNe" (Natural BaSeLiNe Quality in European Aquifers, EVK1-CT1999-0006) adoptó la siguiente definición: "El fondo natural de la calidad del agua subterrânea es el rango de concentraciones en el agua de un cierto elemento, especie o sustancia presente, y derivado de fuentes geológicas, biológicas o atmosféricas naturales".

Na tabela 1, pode-se observar uma descrição das atividades mais comuns que representam riscos importantes de contaminação da água subterrânea.

Una descripción de los tipos más comunes de actividades capaces de provocar riesgos significativos de contaminación del agua subterránea puede observarse en la Tabla 1.

Atividade	Principais poluentes
Atividade agrícola	Nitratos, amônia, pesticidas, micro-organismos fecais.
Falta de saneamento e/ou redes de esgoto <i>in situ</i>	Nitratos, micro-organismos fecais, vestígios de hidrocarbonetos halogenados.
Postos de gasolina e oficinas mecânicas	Benzenos, hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, éter metil-terciário butílico (MTBE), alguns hidrocarbonetos halogenados.
Disposição de resíduos sólidos	Amônia, salinidade, alguns hidrocarbonetos halogenados, metais pesados.
Indústrias metalúrgicas	Tricloroetileno, tetracloroetileno, hidrocarbonetos halogenados, metais pesados, fenóis, cianureto.
Fábricas de tintas e porcelana	Alquilbenzenos, tetracloroetileno, hidrocarbonetos halogenados, metais, alguns hidrocarbonetos aromáticos.
Indústrias madeireiras	Pentaclorofenol, hidrocarbonetos aromáticos.
Oficinas de lavagem a seco	Tricloroetileno, tetracloroetileno.
Indústrias de pesticidas	Hidrocarbonetos halogenados, fenóis, arsênico.
Disposição de lodos de esgoto	Nitratos, hidrocarbonetos halogenados, chumbo, zinco.
Curtumes	Cromo, hidrocarbonetos halogenados, fenóis.
Exploração/extração de petróleo e gás	Salinidade (cloreto de sódio), hidrocarbonetos aromáticos.
Mineração metalífera e carbonífera	Acidificação, metais pesados, sulfatos.

Tabela 1.-

Poluentes comuns das águas subterrâneas e suas fontes associadas de contaminação (adaptada de FOSTER et al., 2002).

Actividad	Contaminantes principales
Actividad agrícola	Nitratos, amoníaco, plaguicidas, microorganismos fecales
Falta de saneamiento y/o alcantarillados in-situ	Nitratos, microorganismos fecales, trazas de hidrocarburos sintéticos
Gasolineras y talleres de automóviles	Bencenos, otros hidrocarburos aromáticos, fenoles, Metil tert-butil éter (MTBE), algunos hidrocarburos halógenos
Eliminación de residuos sólidos	Amoníaco, salinidad, algunos hidrocarburos halógenos, metales pesados
Industrias metalúrgicas	Tricloroetileno, tetracloroetileno, otros hidrocarburos halógenos, metales pesados, fenoles, cianuro.
Fábricas de pinturas y porcelana	Bencenos alquílicos, tetracloroetileno, otros hidrocarburos halógenos, metales, algunos hidrocarburos aromáticos.
Industrias madereras	Pentaclorofenol, algunos hidrocarburos aromáticos.
Talleres de limpieza a seco	Tricloroetileno, tetracloroetileno
Fábricas de plaguicidas	Diversos hidrocarburos halógenos, fenoles, arsénico
Disposición de lodos de alcantarillado	Nitratos, diversos hidrocarburos halógenos, plomo, zinc
Talleres de curtido de cuero	Cromo, diversos hidrocarburos halógenos, fenoles
Exploración/extracción de petróleo y gas	Salinidad (cloruro de sodio), hidrocarburos aromáticos
Minería metalífera y carbonera	Acidificación, diversos metales pesados, sulfatos

Tabla 1.-

Contaminantes comunes de las aguas subterráneas y sus fuentes asociadas de contaminación (modificada de Foster et al., 2002).

Os poluentes presentes na superfície (ou em subsuperfície) são transportados pela água até o aquífero. Quando atravessam a zona vadosa (ou não saturada), sofrem processos de atenuação natural em decorrência de degradação bioquímica, reações químicas ou absorção (na superfície de minerais argilosos e/ou matéria orgânica).

A lenta circulação da água subterrânea, a degradação natural e as características próprias

Los contaminantes presentes en la superficie (o en sub-superficie) son transportados por el agua hasta el acuífero. Cuando atraviesan la zona vadosa (o zona no saturada) sufren procesos de atenuación natural debido a la degradación bioquímica, reacciones químicas o absorción (en la superficie de minerales arcillosos y/o materia orgánica).

La lenta circulación del agua subterrânea, la degradación natural y las características propias

As zonas de proteção, normalmente denominadas perímetros de proteção de poços de abastecimento de água (*Well Head Protection Areas* — WHPA), podem ser delimitadas com vários métodos, os quais exigem diferentes graus de conhecimento hidrogeológico do sistema que está sendo explotado. Ações desse tipo são orientadas a preservar a qualidade da água do aquífero em zonas de captação próximas a perfurações para abastecimento.

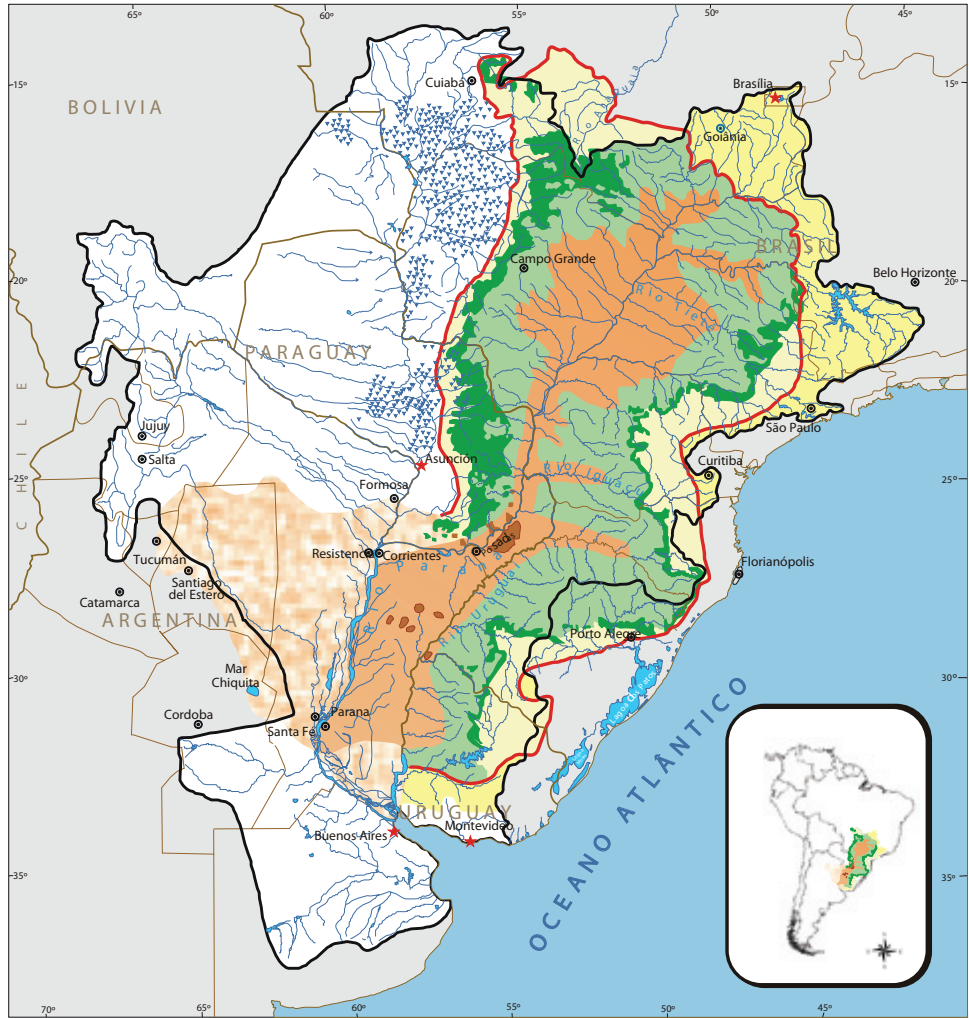
Há outras ações regionais ou globais que podem ser tomadas para proteger o manancial subterrâneo. Elas levam em consideração — entre outras coisas — o tipo de aquífero (poroso, fissural ou cárstico), suas características hidráulicas (livre, confinado, semiconfinado), características da zona não saturada (vadosa), zonas de recarga e descarga, níveis piezométricos, parâmetros hidráulicos (transmissividade), o tipo de poluente, as zonas mais ou menos sensíveis à entrada de poluentes a partir da superfície do terreno. Estas zonas são traçadas em mapas de fácil visualização, denominados cartas de vulnerabilidade, em que aparecem, em várias cores, áreas com diferentes graus de sensibilidade do aquífero à contaminação por poluentes. Nesse caso, tal como no anterior, podem ser usadas diversas metodologias amplamente testadas, que requerem diferentes níveis de conhecimento do aquífero e trabalhos em escala adequada. A partir delas pode-se chegar a uma ferramenta de gestão de atividades (de acordo com possíveis impactos dos poluentes) para cada uma das áreas.

As seções 3 e 4 deste documento concentram-se na determinação de perímetros de proteção de perfurações para fornecimento de água (WHPA) e na elaboração de avaliações de vulnerabilidade de aquíferos. Deu-se especial atenção aos métodos normalmente usados para o cálculo destes perímetros e para a avaliação da vulnerabilidade, à informação requerida para sua realização e às aplicações de cada um dos métodos.

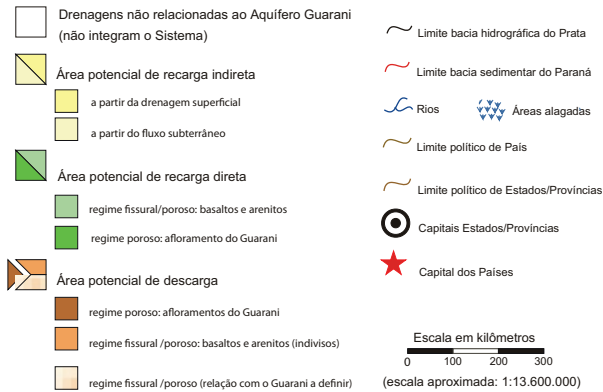
Los zonas de protección, usualmente denominados perímetros de protección de pozos de suministro de agua (o Well Head Protection Areas, WHPA, en inglés) pueden delimitarse utilizando varios métodos, los cuales requieren distinto grado de conocimiento hidrogeológico del sistema que se está explotando. Este tipo de acciones están orientadas a preservar la calidad del agua del acuífero en zonas de captación o cercanas a las perforaciones de suministro.

Existe otro tipo acciones, regionales o globales, que pueden utilizarse para proteger el recurso subterráneo, que tienen en cuenta -entre otros- el tipo de acuífero (granular, fisurado o karstico), sus características hidráulicas (libre, confinado, semiconfinado), las características de la zona no saturada (vadosa), la zonas de recarga y descargas, sus niveles piezométricos, los parámetros hidráulicos (transmisividad), el tipo de contaminante, estableciendo zonas mas o menos sensibles al ingreso de contaminantes desde la superficie del terreno. Estas zonas se dibujan sobre mapas de fácil visualización, donde se exponen en colores las áreas con distinto grado de sensibilidad del acuífero al ingreso de contaminantes y se denominan cartas de vulnerabilidad. En este caso, al igual que el anterior, pueden utilizarse varias metodologías ampliamente probadas, que requieren distinto grado de conocimiento del sistema subterráneo y trabajos a escala adecuada. Con ellas, puede obtenerse una herramienta de ordenamiento de actividades (según los posibles impactos de los contaminantes) para cada una de las áreas.

Las Secciones 3 y 4 de este documento están enfocadas en la determinación de perímetros de protección de perforaciones de suministro de agua (WHPA) y la elaboración de evaluaciones de vulnerabilidad de acuíferos. Se ha prestado atención a los métodos utilizados comúnmente para el cálculo de dichos perímetros y evaluación de la vulnerabilidad, la información requerida para su desarrollo y las aplicaciones de cada uno de los métodos.



LEGENDA



LEYENDA

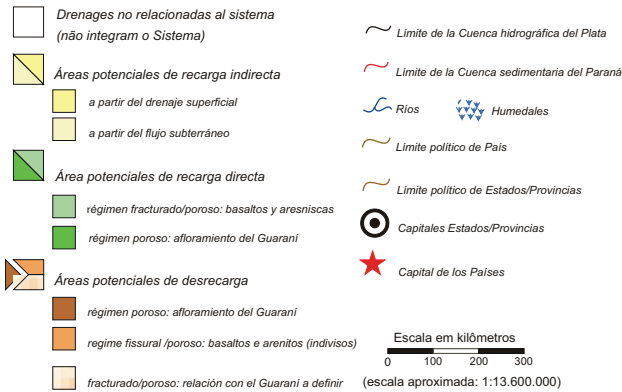


Figura 4.-
Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani (SAG).

Figura 4.-
Mapa esquemático del Sistema Acuífero Guarani (SAG).

3 DETERMINAÇÃO DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE PERFURAÇÕES

3.1 Conceitos prévios

3.1.1 Zona de influência

Quando se extrai de um poço uma vazão de água, durante um período de tempo, cria-se em torno dele um cone de rebaixamento que se estender até determinada distância em função da vazão bombeada, do tempo de bombeamento e das propriedades hidráulicas e físicas do aquífero. A distância na qual o rebaixamento provocado pelo bombeamento for igual a zero delimita a zona de influência do poço para esse regime de exploração.

3 DETERMINACIÓN DE PERÍMETROS DE PROTECCIÓN DE PERFORACIONES

3.1 Conceptos previos

3.1.1 Zona de influencia

Cuando se extrae de un pozo un caudal de agua durante un período de tiempo, se crea alrededor de él, un cono de descenso que se extiende hasta un distancia determinada, la cual es función del caudal bombeado, el tiempo desde el comienzo de la extracción y las propiedades hidráulicas y físicas del acuífero. La distancia a la cual los descensos provocados por el bombeo son cero delimita la zona de influencia de la perforación para ese régimen de extracción.

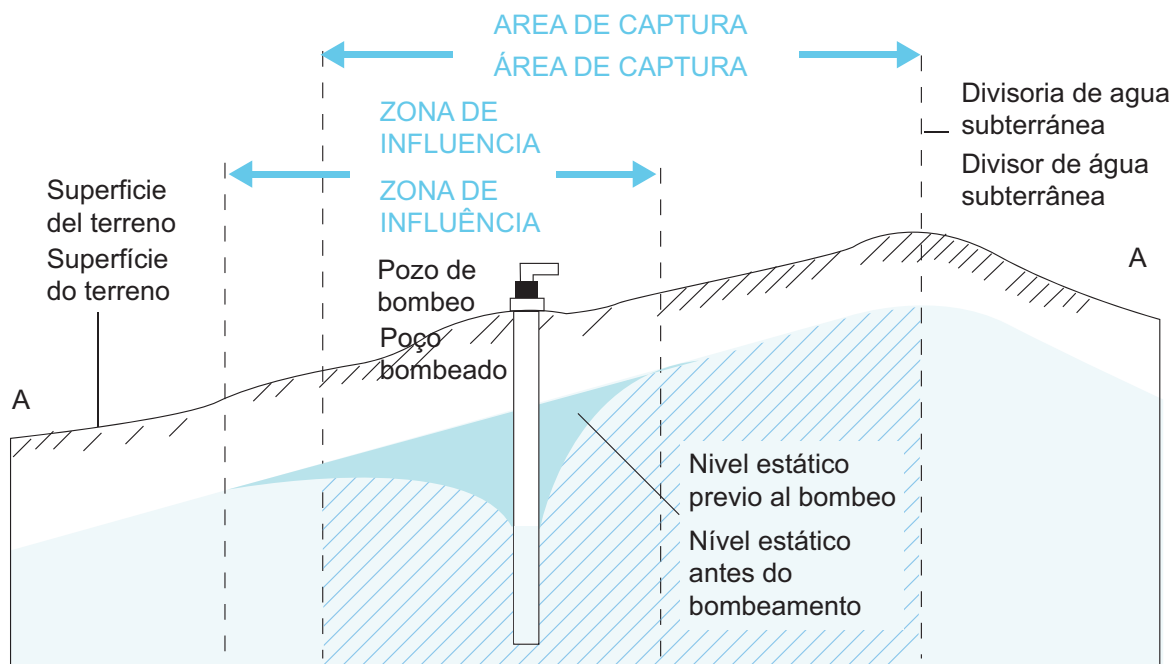


Figura 5.-

Vista de perfil da zona de influência e captação de uma perfuração (FOSTER et al., 2003).

Figura 5.-

Vista de perfil de zona de influencia y captación de una perforación (Foster S. et al, 2003).

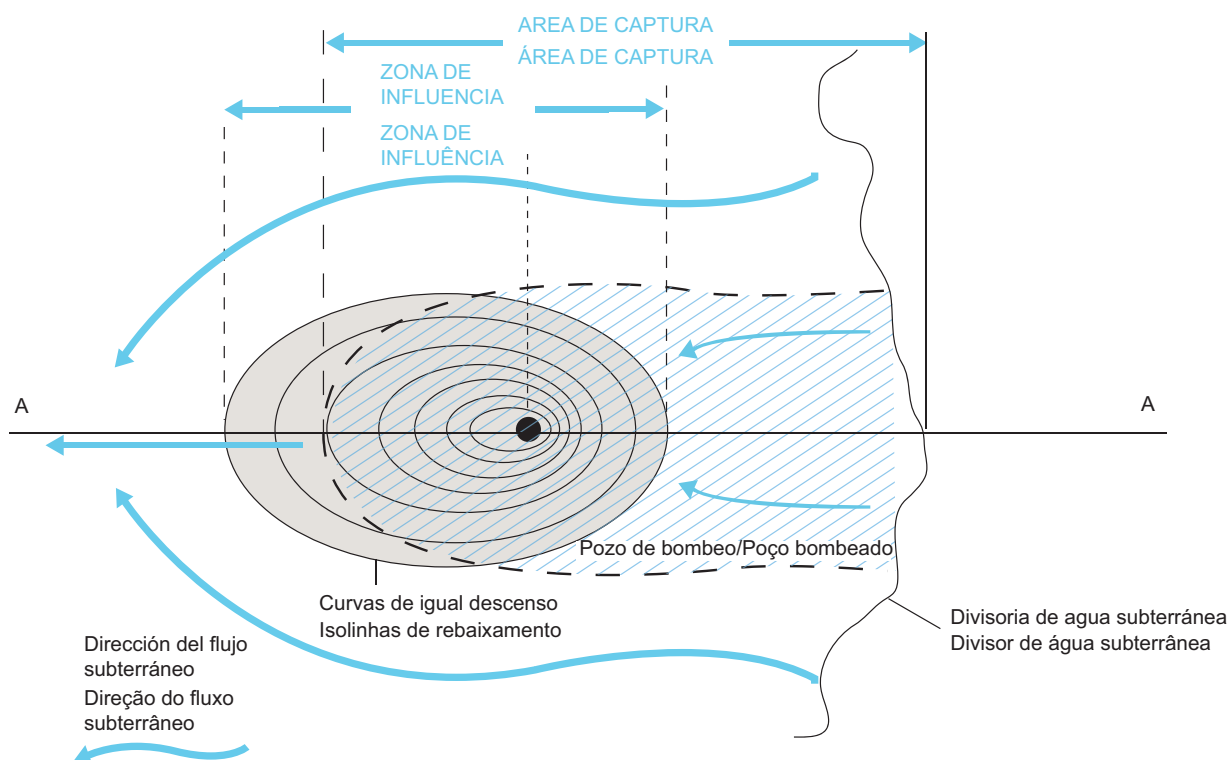


Figura 6.-

Vista de planta da zona de influência e captação de uma perfuração (FOSTER et al., 2003).

Figura 6.-

Vista en planta de zona de influencia y captación de una perforación (Foster S. et al, 2003).

3.1.2 Zona de captura ou captação

Pode-se definir a zona de captura de um poço de produção como a área de onde vem a água extraída através do poço, em longo prazo. Supõe-se então que depende, até certo ponto, do regime de bombeamento e da recarga natural, a partir da chuva, de outros aquíferos e corpos de água superficiais.

3.2 Conceitos gerais

Atividades humanas próximas a uma fonte de abastecimento de água podem – em um período de tempo relativamente curto – gerar impactos negativos na qualidade da água subterrânea, chegando até mesmo a impossibilitar o uso pretendido. Desse modo, a saúde da população pode ser prejudicada (caso não se detectem a tempo os problemas de

3.1.2 Zona de captación

El área de captación de una perforación puede definirse como la zona desde la cual proviene el agua que es extraída en la perforación a largo plazo. Se deduce entonces que depende en cierta medida del régimen de extracción y de la recarga por lluvia, desde otros acuíferos y cuerpos de agua superficiales.

3.2 Conceptos generales

Las actividades humanas cercanas a una perforación de suministro de agua pueden impactar -en tiempo mas o menos reducidos- negativamente sobre la calidad del agua subterránea, llegando inclusive a impossibilitar el uso pretendido. De esta manera, la salud de la población puede verse degradada (si no se detectan a tiempo los problemas

contaminação), a obra realizada ficará inutilizada, e a água subterrânea, contaminada.

A proteção da qualidade da água subterrânea obtida em um poço de abastecimento exige o conhecimento específico das características de fluxo do sistema e das vazões médias de exploração. Com isso, podem-se delimitar áreas adjacentes ao poço, cujos limites se restringiriam aos usos, conforme o potencial poluente. Essas áreas são em geral denominadas “Áreas de Proteção de Poços de Abastecimento de Água” (WHPA em inglês).

A maioria dos métodos disponíveis para determinação dessas zonas estima – com graus variáveis de precisão –, a partir do regime de extração e das propriedades físicas e hidráulicas do aquífero, o tempo ⁴ em que uma substância poluente depositada em algum ponto da zona de captação levaria até chegar à fonte de abastecimento. Com base nesse tempo e nas possibilidades de diluição, dispersão, advecção e degradação do poluente no meio, estabelecem-se zonas nas quais se recomenda não realizar, limitar ou condicionar certas atividades potencialmente poluentes.

3.3 Delimitação de áreas ou zonas de proteção

As Áreas de Proteção de Poços de Abastecimento de Água (WHPA) devem levar em consideração:

- poluentes degradáveis, isto é, as concentrações iniciais são atenuadas (por diferentes fenômenos físicos, químicos e biológicos) durante sua passagem por meio da zona não saturada e durante a circulação no aquífero. Nesse caso, o tempo de permanência no subsolo constitui um elemento fundamental a ser considerado (maior tempo de trânsito equivale – na maioria dos casos – a uma menor concentração na fonte de fornecimento);

de contaminación), la obra realizada quedará inutilizada y el agua subterránea contaminada.

La protección de la calidad del agua subterránea obtenida en un pozo de suministro, requiere un adecuado conocimiento de las características de flujo del sistema y los caudales promedios de extracción. Con ello, se podrán delinear áreas adyacentes al pozo dentro de la cual se limitarán usos, según su potencial contaminante. Dichas zonas son designadas usualmente como “áreas de protección de pozos de suministro de agua” (WHPA en inglés).

La mayoría de los métodos disponibles para la determinación de dichas zonas estiman -con distinto grado de precisión- a partir del régimen de extracción y las propiedades físicas e hidráulicas del acuífero, el tiempo ⁴ que tardaría en llegar hasta la fuente de suministro una sustancia contaminante depositada en algún punto de su zona de captación. En base a ese tiempo y las posibilidades de dilución, dispersión, advección y degradación del contaminante en el medio, se establecen zonas donde se recomienda no realizar, limitar o condicionar cierto tipo de actividades potencialmente contaminantes.

3.3 Delineamiento de áreas/zonas de protección

Las áreas de protección de pozo de suministro de agua (WHPA) deben tener en cuenta:

- contaminantes degradables, es decir, las concentraciones iniciais son atenuadas (por distintos fenómenos físicos, químicos y biológicos) durante su pasaje a través de la zona no saturado y durante la circulación en el acuífero. En este caso el tiempo de permanencia bajo la superficie del terreno constituye un elemento fundamental a tener en cuenta (mayor tiempo de tránsito equivale -en la mayoría de los casos- a menor concentración en la fuente de suministro);

⁴ Em geral, denominado “tempo de transporte”.

⁴ Denominado usualmente “tiempo de transporte”

- poluentes não biodegradáveis, para os quais é preciso garantir uma diluição adequada, associada ao fluxo principal, de modo que a água de abastecimento não exceda as concentrações máximas recomendadas.

Na prática, a delimitação das Áreas de Proteção de Poços de Fornecimento inclui a definição de uma zona ou uma série de zonas superficiais ao redor da fonte de água subterrânea (figura 4). As características das zonas dependem em grande parte do conhecimento (e das estimativas a respeito) das condições hidrogeológicas locais e características da fonte e do regime de bombeamento (STROBL AND ROBILLARD, 2006). Dentro dessas áreas ou zonas de proteção, as diferentes atividades são administradas em função do potencial poluente. Atualmente, há vários modelos empíricos, analíticos e numéricos disponíveis que facilitam essa delimitação.

As três áreas ou zonas de proteção (figura 5) mais importantes são descritas a seguir (ADAMS; FOSTER, 1992; FOSTER; SKINNER, 1995).

3.3.1 Área de captura total da fonte

A zona exterior de proteção que se pode definir para um poço de abastecimento de água é sua área de captura. Ela é constituída pelo perímetro dentro do qual toda recarga do aquífero (derivada de precipitação, de corpos de água superficiais e/ou outros meios porosos) será captada na fonte de abastecimento.

Em alguns casos, a isócrona de fluxo horizontal de dez anos ou mais é substituída pelo perímetro da zona total de captura da fonte em **aquíferos de grande armazenamento**, com condições de contorno e/ou regimes de exploração complexos, em que as primeiras apresentariam uma configuração menos complexa e estariam sujeitas a uma incerteza menos científica (FOSTER et al., 2002).

3.3.2 Área de proteção microbiológica

Impedir o consumo humano de águas subterrâneas contaminadas por bactérias patogênicas, vírus e/ou parasitas é de suma importância. Esses patógenos podem chegar ao aquífero vindos de fontes pontuais ou difusas

- contaminantes não-biodegradáveis, para los cuales debe asegurarse una dilución adecuada de manera tal que el agua de suministro no supere la concentraciones máximas recomendados.

Prácticamente, el delineamiento de las áreas de protección de pozos de suministro comprende la definición de una zona o de una serie de zonas superficiales alrededor de la fuente de agua subterránea (Figura 4). La características de las zonas depende en gran medida del conocimiento (y las estimaciones acerca) de las condiciones hidrogeológicas locales y las características de la fuente y el régimen de extracción (Strobl and Robillard, 2006). Dentro de estas áreas o zonas de protección, se gestionan los tipos de actividades en base a su potencial contaminante. En la actualidad, se dispone de varios modelos empíricos, analíticos y numéricos para facilitar dicho delineamiento.

Las tres áreas o zonas de protección (Figura 5) más importantes se describen a continuación (Adams y Foster, 1992; Foster y Skinner, 1995).

3.3.1 Área de captura total de la fuente

La zona exterior de protección que puede definirse para un pozo de suministro de agua es su área de captura. Ella está constituida por el perímetro dentro del cual toda la recarga al acuífero (derivada de la precipitación o de cuerpos de agua superficiales y/o subterráneos) será capturada por el sistema de abastecimiento.

*En algunos casos, la isócrona de flujo horizontal de 10 años o más es substituída por el perímetro del área total de captura **en acuíferos de alto almacenamiento** con condiciones complejas de límites y/o regímenes de abstracción, en las que las primeras serán de configuración menos compleja y estarán sujetas a una incertidumbre menos científica (Foster et al., 2002);*

3.3.2 Área de protección microbiológica

Impedir el consumo humano de aguas subterráneas contaminadas por bacterias patogênicas, virus y/o parásitos es de la mayor importancia. Estos patógenos pueden ingresar al acuífero desde fuentes puntuales o difusas

(sistemas de saneamento, tanques, cursos superficiais etc.).

Em geral, define-se a zona de proteção contra bactérias, vírus e parasitas patogênicos em função da distância equivalente a determinado tempo de fluxo horizontal no aquífero. O tempo selecionado varia entre 10 e 400 dias conforme o país e sua legislação. A distância horizontal do percurso dos organismos patogênicos na zona saturada é determinada principalmente pela velocidade do fluxo da água subterrânea. Em todos os incidentes de contaminação informados que resultaram em epidemias de doenças transportadas pela água, a separação horizontal entre a fonte de abastecimento de água e a origem, comprovada, da poluição patogênica era (no máximo) aquela percorrida pela água subterrânea num período de 20 dias. Isso sem contar que alguns patógenos resistentes são capazes de sobreviver sob a superfície durante 400 dias e até mais. Dessa maneira, a isócrona de 50 dias foi confirmada como uma base razoável por meio da qual se pode definir a zona, o que se adapta perfeitamente à prática usada em diversos países. Este perímetro de proteção talvez seja o mais importante de todos no que diz respeito à saúde pública, é dado que costuma ter um tamanho pequeno, sua implementação e aplicação podem ser feita de forma simples e rápida. A experiência demonstrou que em aquíferos fissurais (frequentemente muito heterogêneos no que se refere às propriedades hidráulicas) é prudente estabelecer um critério limite de 50 m de raio a partir da fonte de abastecimento (FOSTER et al., 2002). Além disso, ainda que os aquíferos sejam cobertos ou confinados sob camadas espessas de baixa permeabilidade, é recomendável, como medida de precaução, que haja uma zona de proteção de aproximadamente 50 m de raio, tendo em vista as incertezas do fluxo vertical e como proteção contra obras de engenharia no subsolo, que poderiam comprometer a proteção da fonte (idem, ibidem). A área de proteção microbiológica é classificada pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos como Zona 2 ou zona de atenuação.

3.3.3 Área de operações

O perímetro de proteção localizado mais internamente é a zona de operações do

(sistemas de saneamiento, tanques, cursos superficiales, etc.).

Usualmente, se define la zona de protección contra patógenos (bacterias y virus) en base a la distancia equivalente a un tiempo específico de flujo horizontal en el acuífero. El tiempo seleccionado varía en los distintos países y legislaciones desde los 10 hasta los 400 días. La distancia horizontal de recorrida de los organismos patógenos en la zona saturada es gobernada principalmente por la velocidad del flujo del agua subterránea. En todos los incidentes informados de contaminación resultantes en epidemias de enfermedades transportadas por el agua, la separación entre la fuente de abastecimiento subterráneo y la fuente comprobada de contaminación patógena fue (a lo sumo) la distancia recorrida por el agua subterránea en un lapso de 20 días. Ello a pesar de saberse que algunos patógenos resistentes son capaces de sobrevivir bajo la superficie durante 400 días o aún más. De esta manera, la isócrona de 50 días ha sido confirmada como una base razonable mediante la cual se puede definir la zona, y ello se adapta perfectamente a la práctica empleada en numerosos países. Este perímetro de protección es quizás el más importante de todos en términos de significación de la salud pública, y puesto que es usualmente pequeño en cuanto a tamaño, su implementación y aplicación se logran en forma rápida y sencilla. La experiencia ha demostrado que en acuíferos fisurados (que son muy a menudo muy heterogéneos en cuanto a propiedades hidráulicas), es prudente establecer un criterio limitante de un radio de 50 metros (Foster et al., 2002). Además, aún si los acuíferos son cubiertos o confinados por debajo de una gruesa capa de baja permeabilidad, una zona de protección de alrededor de 50 metros de radio es asimismo recomendada como medida precautoria en reconocimiento de las incertidumbres del flujo vertical, y a efectos de protegerla contra una construcción ingenieril subterránea, la cual podría comprometer la protección de la fuente (Foster et al., 2002). El área de protección microbiana es referida por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de los Estados Unidos como Zona-2 o zona de atenuación.

3.3.3 Área de operaciones

El perímetro de protección más interno es la zona de operaciones del pozo, el cual comprende una

poço, o qual compreende uma zona reduzida de terreno que circunda a própria fonte de abastecimento. É desejável que esta zona esteja sob controle e propriedade do órgão explorador da água subterrânea. Nessa área, **não devem ser permitidas outras atividades** que não estejam relacionadas à extração da água e, ainda assim, tais atividades devem ser cuidadosamente avaliadas e controladas a fim de evitar a eventual entrada de poluentes na fonte, seja diretamente ou como consequência da perturbação do terreno. Todas as seções da zona utilizadas para atividades de manutenção do poço devem ter pisos de concreto para impedir a infiltração de óleos, gorduras e produtos químicos usados na conservação das bombas. A instalação de cercas é também uma prática habitual para evitar a entrada de animais e atos de vandalismo.

Embora se recomende um raio de pelo menos 10 ou 20 m, as especificações referentes às dimensões dessa área são relativamente arbitrárias e dependem, até certo ponto, da natureza das formações geológicas locais. Contudo, faz-se necessário executar inspeções detalhadas de integridade sanitária em uma área maior, com raio de 200 m ou mais.

A Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA classifica a zona de operações como Zona 1. Esta zona de prevenção de incidentes ou de proteção sanitária circunscreve-se normalmente em um raio entre 15 e 30 metros (50–100 pés). Seu propósito é proteger o anel do poço.

3.4 Subdivisão posterior

Em alguns casos, com fins práticos, pode ser útil subdividir ainda mais a zona de captura total da fonte a fim de facilitar a aplicação de controles graduais do uso do solo, possibilitar um período razoável para a aplicação de sistemas de controle, de medidas corretivas para a busca de novas fontes de fornecimento em caso de detecção de problemas.

A EPA dos EUA (1987, 1993) faz referência à zona definida por uma área **isócrona de 500 dias** de fluxo horizontal ao redor de uma fonte subterrânea ou superficial como **Zona 3 – zona de ação corretiva**. A finalidade desta zona

*zona reducida de terreno que rodea la fuente de abastecimiento en sí misma. Resulta deseable que esta zona esté bajo la propiedad y control del ente extractor del agua subterránea. En esta zona **no deberán permitirse otras actividades** que no estén relacionadas con la extracción del agua, y aún así dichas actividades deberán ser cuidadosamente evaluadas y controladas a efectos de evitar la posibilidad de ingreso de contaminantes a la fuente, ya sea directamente o a través de perturbación del terreno. Todas las secciones de la zona empleadas para las actividades de mantenimiento del pozo de deben tener pisos de concreto para impedir la infiltración de los aceites, grasas y productos químicos usados en el mantenimiento de las bombas. La colocación de cercas es también una práctica habitual para prevenir la invasión de animales y acciones de vandalismo.*

Las especificaciones en cuanto a las dimensiones de esta área son relativamente arbitrarias y dependen en algún grado de la naturaleza de las formaciones geológicas, aunque un radio de al menos 10-20 metros es recomendable. No obstante, se hace necesario conducir inspecciones detalladas de integridad sanitaria en un área mayor, de un radio de 200 o más metros.

La Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de los EE.UU. se refiere a la zona de operaciones como Zona-1, y esta zona de prevención de incidentes o de protección sanitaria se define por lo general en un radio de 15 a 30 metros (50-100 pies). Su propósito es el de proteger el anillo del pozo.

3.4 Subdivisión ulterior

En algunos casos, y con fines prácticos, puede ser de utilidad subdividir aún más el área de captura de la fuente a efectos de facilitar la aplicación de controles graduales del uso del suelo y brindar tiempos razonables para la aplicación de sistemas de control, medidas correctivas y la búsqueda de nuevas fuentes de suministro en caso de detección de problemas.

*La EPA de EE.UU. (1987, 1993) se refiere a la zona definida por un área **isócrona de 500 días** de flujo horizontal alrededor de una fuente subterránea o superficial como **Zona-3 – zona de acción correctiva**. Esta zona está destinada a proteger el pozo de contaminantes químicos que pueden migrar*

é proteger o poço de poluentes químicos que poderiam se deslocar até a fonte; ela inclui normalmente uma parte importante da área de recarga, ou zona de captura total de um poço de produção. A Zona 3 deve ser ampla o suficiente para proporcionar um tempo hábil para detectar e responder ao evento contaminante, incluindo o tempo para desenvolver uma nova fonte de abastecimento de água.

De acordo com o documento de Diretrizes de Proteção de Poços da EPA, o tempo de trânsito (TDT) usado para calcular o raio das Zonas de Proteção 2 e 3 é de dois anos (equivalente a uma isócrona de 730 dias) e de cinco anos (equivalente a uma isócrona de 1.825 dias), de acordo com a tabela 2.

hacia la fuente; la misma incluye por lo general una porción importante del área de recarga, o Zona de Contribución a un pozo de producción. La Zona 3 debe ser lo suficientemente amplia como para proporcionar un tiempo razonable para detectar y responder al evento contaminante, incluyendo el tiempo para desarrollar una nueva fuente de abastecimiento de agua.

De acuerdo con el documento de directivas de Protección de Cabezal de Pozos de la EPA, el tiempo de tránsito (TOT) usado para calcular el radio de las Zonas de Protección 2 y 3 es de dos (2) años (equivalente a una isócrona de 730 días) y de 5 años (equivalente a una isócrona de 1825 días), de acuerdo con la Tabla 2 que se muestra a continuación.

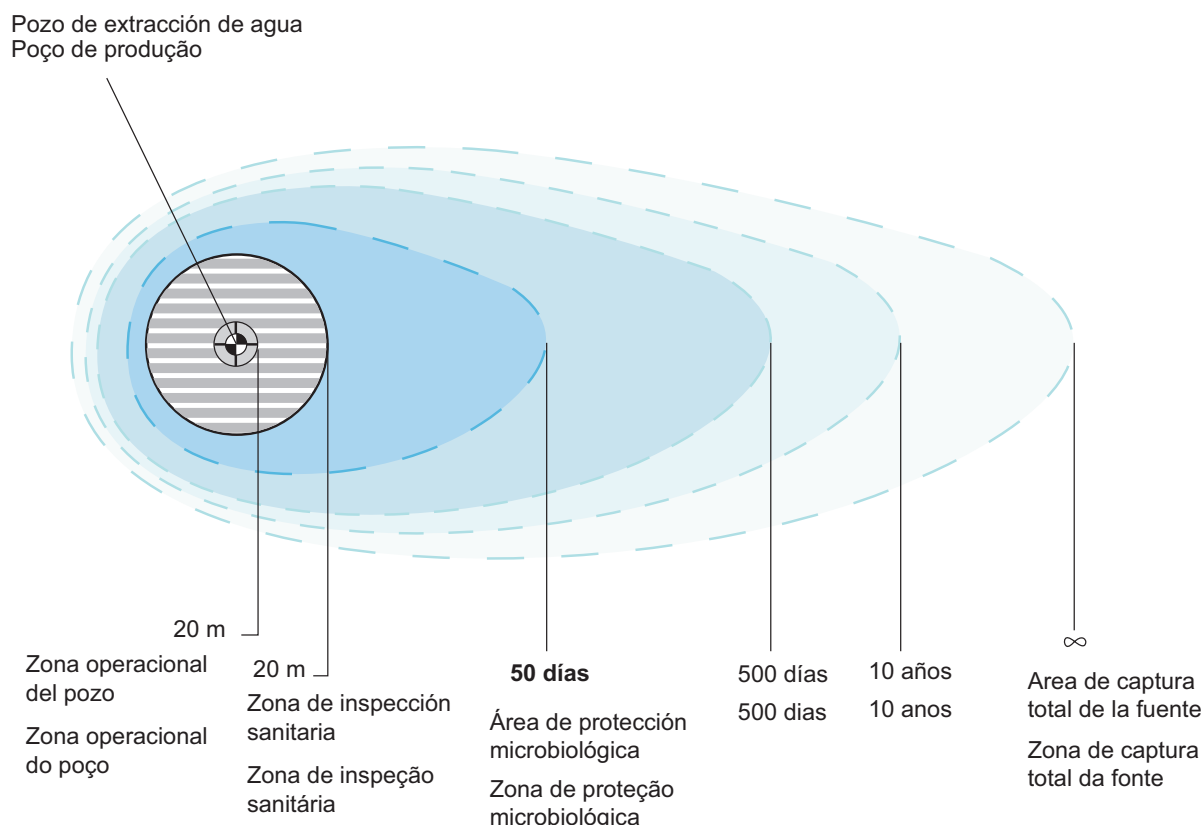


Figura 7.-

Esquema de áreas de captura e perímetros em aquífero livre de acordo com os tempos de trânsito.

Figura 7.-

Esquema de áreas de captura y perímetros en acuífero libre según tiempos de tránsito.

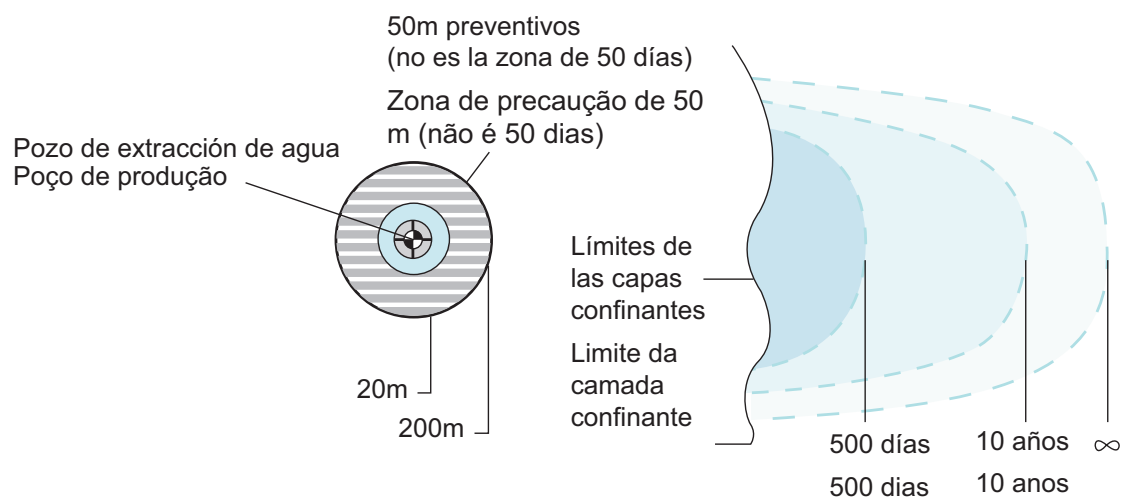


Figura 8.-

Esquema das zonas de captura e perímetros, do tempo de trânsito em aquífero localmente confinado.

Figura 8.-

Esquema de áreas de captura y perímetros en acuífero confinado según tiempos de tránsito.

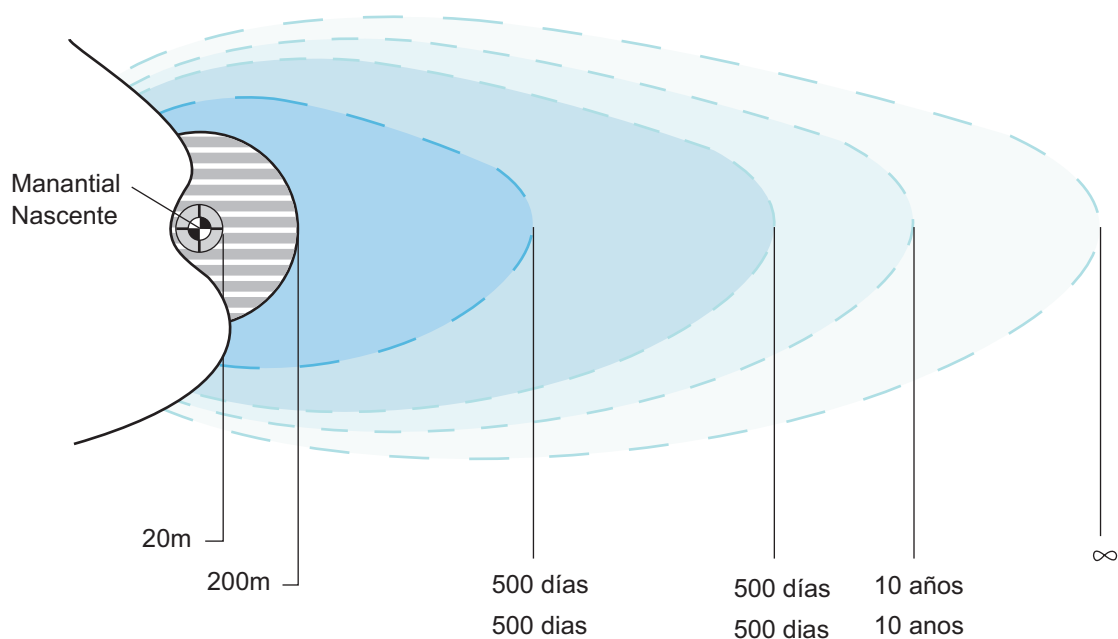


Figura 9.-

Esquema das zonas de captura e perímetros, do tempo de trânsito em nascente de água em aquífero não confinado.

Figura 9.-

Esquema de áreas de captura y perímetros en manantial libre según tiempos de tránsito.

	Tipos de aquíferos e fluxos de água subterrânea		
Zonas de proteção	Aquíferos porosos	Cursos superficiais, condutos, meios cársticos ou com fissuras/falhas	Cursos superficiais, condutos, meios cársticos ou com fissuras/falhas
	Crítérios de fluxo poroso	Crítérios de fluxo difuso (4)	Crítérios de fluxo por condutos
Zona 1	50 ou 100 pés (304–76.2 m)	50 ou 100 pés (76.2-30.4 m)	100 pés (30.4 m)
Zona 2	Raio de TDT: 2 anos	Raio de TDT: 2 anos	Áreas vulneráveis dentro dos limites do sistema de fluxo
Zona 3	Raio de TDT: 5 anos	Raio de TDT: 5 anos	Limites do sistema de fluxo

Tabela 2.-

Métodos e critérios aceitáveis para a delimitação de Áreas de Proteção de Poços (WHPA), adaptado do Documento de Diretrizes de Proteção (WHP) da EPA, 1993.

	Tipos de medios de acuíferos y flujos de agua subterrânea		
Zonas de protección	Medios porosos	Cursos superficiales, túneles, medios carbonatados o con fracturas/fallas	Cursos superficiales, túneles, medios carbonatados o con fracturas/fallas
	Criterios de flujo poroso	Criterios de flujo difuso (4)	Criterios de flujo por conductos
Zona 1	50 o 100 pies (304–76.2 m)	50 o 100 pies (76.2-30.4 m)	100 pies (30.4 m)
Zona 2	Radio de TOT : 2 años	Radio de TOT : 2 años	Áreas vulnerables dentro de los límites del sistema de flujo
Zona 3	Radio de TOT: 5 años	Radio de TOT: 5 años	Límites del sistema de flujo

Tabla 2.-

Métodos y criterios aceptables para el delineamiento de áreas de protección de cabezales de pozos (WHPA), adoptado del documento de directivas de protección (WHP) de la EPA, 1993.

3.5 Métodos relevantes disponíveis para a determinação de Áreas de Proteção de Poços de Abastecimento de Água

Os programas de proteção de águas subterrâneas da Agência de Proteção Ambiental (EPA), assim como os do Banco Mundial, reconheceram uma variedade de técnicas para determinar medidas de proteção de zonas de proteção de poços de

3.5 Métodos relevantes disponibles para la determinación de áreas de protección de pozos de suministro de agua

Los programas de protección de aguas subterráneas de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA), así como los del Banco Mundial, han reconocido una variedad de técnicas para determinar las medidas de protección de zonas

- Raio Arbitrário Fixo (AFR).
- Raio Calculado Fixo (CFR).
- Formas Variáveis Simplificadas (SVS).
- Modelos Analíticos (AM).
- Mapeamento Hidrogeológico (HM).
- Diversos modelos matemáticos de fluxo/trânsito (NM).

Esse método é denominado Raio Calculado Fixo (CFR), pois a área que descreve é circular, com um mesmo raio em todas as direções. As informações

- Radio arbitrario fijo (AFR);
- Radio calculado fijo (CFR);
- Conformaciones variables simplificadas (SVS);
- Modelos analíticos (AM);
- Mapeo hidrogeológico (HM); y
- Diversos modelos matemáticos de flujo/tránsito (NM).

Este método es denominado de Radio Calculado Fijo (CFR) porque el área que describe es circular, con un radio igual en toda dirección. Sus

requeridas são limitadas, consistem de vazões de bombeamento, comprimento da seção filtrante (*screened-interval*), porosidade do aquífero e o TDT selecionado. A tabela 3 descreve a equação de raio fixo calculado.

Tendo em vista que se trata de uma simplificação a respeito do que se conhece sobre o aquífero e sobre as condições de funcionamento do sistema diante da extração, incorpora-se um fator de segurança (FS) à técnica de CFR.

requerimientos de ingreso de datos son limitados, consistentes en caudales de bombeo, longitud de filtro de la perforación (screened-interval), porosidad del acuífero y el TOT seleccionado. La Tabla 3 describe la ecuación de radio calculado fijado.

En virtud de que se trata de una simplificación del conocimiento del acuífero y de las condiciones de funcionamiento del sistema ante la extracción, se incorpora un Factor de Seguridad (F.S.) a la técnica de CFR.

Equação de Raio Calculado Fixo:	$r_{\min} = FS \sqrt{Qt / nH\pi}$
$r_{\min}$	Raios de Zonas (2 e 3) medidos a partir do poço (m).
Q	Volume anual médio de bombeamento – m³/ano.
t	<i>Tempo de trânsito</i> = dois anos para Zona 2; cinco anos para Zona 3 ou outro TDT aceitável (p. ex., 50 dias para Zona 2 e 500 dias para Zona 3), ou cálculo de tempo de trajeto (TDT baseado na velocidade do fluxo da corrente).
n	<i>Porosidade</i> (relação entre o volume de poros no aquífero e o volume total) Utilizar o valor real se houver. Caso se conheça a litologia do aquífero, mas não sua porosidade, usar: Xistos fraturados ou rocha cristalina fraturada (fluxo difuso) 0.02 Rochas solúveis fraturadas (p. ex.: calcáreo) (fluxo difuso) 0.05 Arenito ou deslizamento glacial 0.15 Arenito fraturado (fluxo difuso) 0.17 Aluvião, cascalho, areia; arenito não consolidado, parcialmente consolidado e conglomerados 0.25.
H	Seção filtrante ou intervalo aberto ¹ do poço (m). Comprimento real, ou 10 pés (3.408 m)
π	$\pi = 3.1416$.
FS	Fator de segurança: (para abastecer a zona de amortecimento) = 1.3 (quando se conhecem todos os valores) = 1.5 (quando não se conhecem um ou mais valores).

¹ *Screened interval* é o comprimento da abertura em filtro ou da seção filtrante através da qual a água é bombeada do aquífero. Caso se tenha mais de um intervalo de *screening*, deve-se agregar todos os comprimentos em conjunto e usar seu total para calcular esse valor. Para um poço sem filtro, o termo equivalente é **intervalo aberto**. Essa informação pode estar disponível na ficha de registro do poço, ou mesmo nos relatórios geológicos ou de engenharia. Caso não seja possível obter essa informação, recomenda-se ao menos o uso do valor correspondente a 3,408 m (10 pés).

Tabela 3.-

Equação, definições e valores por falta para o Raio Fixo Calculado (CFR).

Ecuación de Radio Calculado Fijo:	$r_{min} = FS \sqrt{Qt / nH\pi}$
r_{min}	Radio de Zonas 2 (y 3) medido desde cabezal de pozo (en metros).
Q	Nivel promedio anual de bombeo m ³ por año.
t	Tiempo de Tránsito = 2 años para Zona 2; 5 años para Zona 3 u otro TOT aceptable (ejemplo: isócronas de 50 días para Zona 2 500 días para Zona 3), o cálculo de TOT basado en velocidad del caudal.
n	Porosidad (Proporción de volumen de poros en el acuífero respecto del volumen total) Utilizar valor real si se conoce. Si se conoce la litología del acuífero, pero no su porosidad, usar: Esquistos fracturados o roca cristalina fracturada (flujo difuso) 0.02 Rocas solubles fracturadas (p.ej., piedra caliza) (flujo difuso) 0.05 Piedra arenisca o deslizamiento glacial 0.15 Piedra arenisca fracturada (flujo difuso) 0.17 Aluvión, grava, arena; arenisca no consolidada, parcialmente consolidada y conglomerados 0.25.
H	Intervalo filtrado o perforado ¹ del pozo (metros). Longitud real, o 10 pies (3.408 metros).
π	$\pi = 3.1416$.
FS	Factor de seguridad: (para proporcionar 'Zona de Amortiguación') = 1.3 (cuando todos los valores son conocidos) = 1.5 (cuando se desconocen uno o más valores).

¹ "Screened Interval" se refiere a la longitud del filtro o la perforación en el pozo a través de los cuales el agua es bombeada del acuífero. Si se dispone de más de un intervalo de "screening", se debe agregar todos los largos en conjunto y usar su suma para obtener este valor. Para un pozo sin filtro, el término equivalente es de "Intervalo Abierto". Esta información puede estar disponible en la ficha de registro del pozo, o bien en los informes geológicos o de ingeniería. Si no se puede obtener esta información, se recomienda al menos usar el valor correspondiente a 3,408 metros (10 pies).

Tabla 3.-

Ecuación, Definiciones y Valores por Defecto para el Radio Calculado Fijo (CFR).

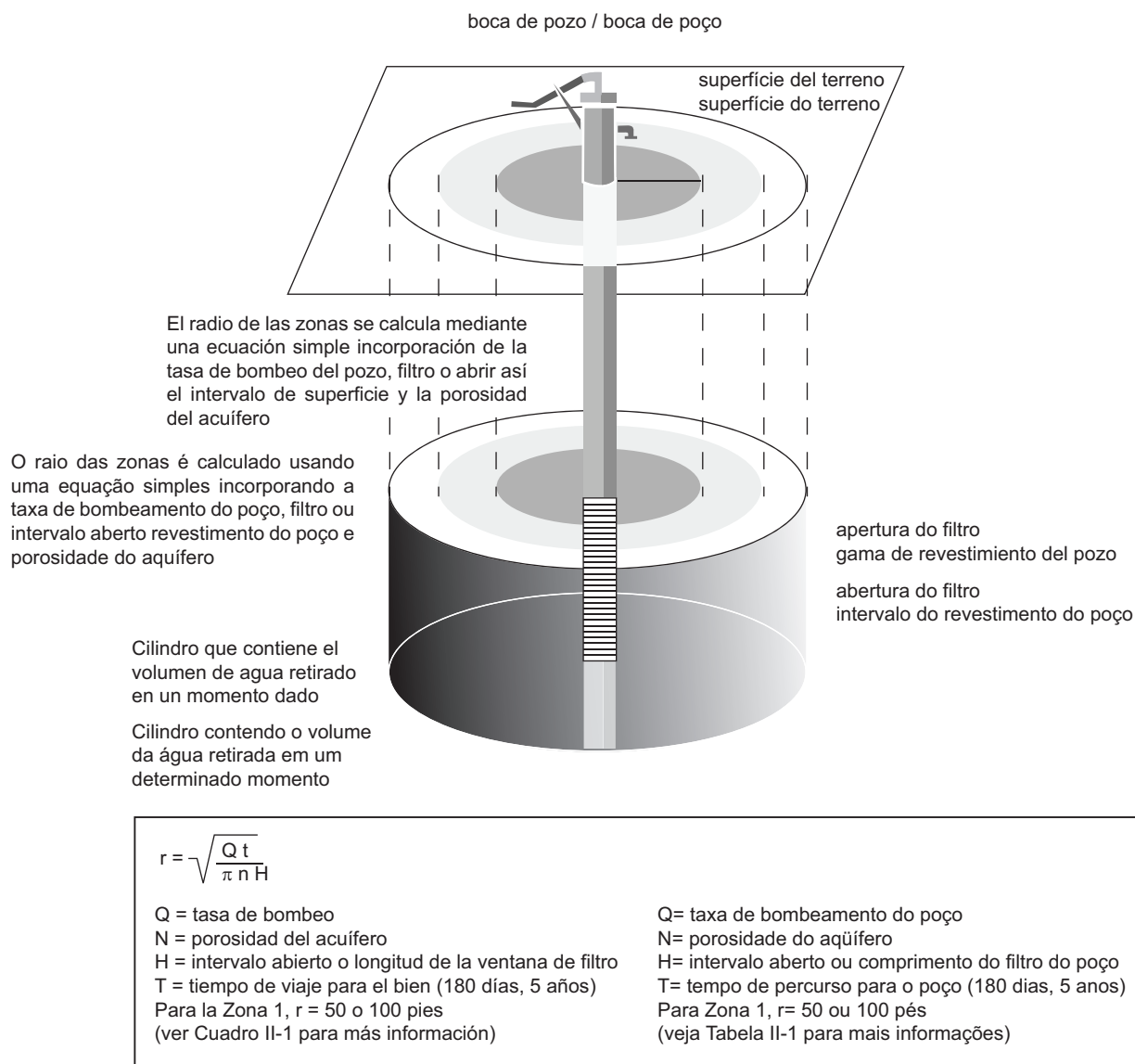


Figura 10.-

Esquema geral de delimitação de zonas de WHPA por meio do Método de Raio Calculado Fixo (CFR) — retirado do programa guia da EPA .

O método de delimitação de Raio Calculado Fixo (CFR) é o método simplificado mais aceito para delimitação dos raios de tempo de trânsito (TDT) de dois e cinco anos para Zonas 2 e 3.

Figura 10.-

Esquema general de delineamiento de zonas de WHPA mediante el Método de Radio Calculado Fijo (CFR) (adoptado del programa de guía de la EPA).

El método de delineamiento de Radio Fijo Calculado (CFR) es el método simplificado mas aceptado para delinear los radios de Tiempo de Tránsito (TOT) de 2 y 5 años para Zonas 2 y 3.

No caso de aquíferos fissurais, pode-se utilizar o Método de Raio Calculado Fixo (CFR) quando as condições de fluxo estiverem documentadas com mapeamento hidrogeológico e/ou dados de campo. Vê-se um comentário a respeito dessas técnicas e como estão relacionados à caracterização do fluxo em EPA, 1993.

3.5.3 Formas Variáveis Simplificadas (SVS)

O procedimento de SVS envolve a geração de um conjunto de formas que representam uma variedade de condições hidrogeológicas e de bombeamento (figura 6 e tabela 4). As formas variáveis são calculadas medindo-se a distância do gradiente descendente e da extensão lateral dos limites de fluxo subterrâneo de água ao redor de um poço de bombeamento, segundo equações analíticas como equações de fluxo uniforme. A forma apropriada é selecionada a seguir para condições hidrogeológicas e de bombeamento semelhantes ou compatíveis com as encontradas no poço, e a forma é então orientada ao redor do poço, de acordo com os padrões de fluxo das águas subterrâneas. Um tempo de trânsito (TDT) ou um critério de limite de sistema de fluxo determina nesse momento a extensão do gradiente ascendente da WHPA.

Esse método é utilizado quando podem ser feitas estimativas razoáveis da condutividade e gradientes hidráulicos (tais como: valores conservadores, citados na literatura e em mapas potenciométricos generalizados regionais de superfície). Esse método “**Modificado de Formas Variáveis Simplificadas**” é particularmente adaptável a áreas rurais ou de poços particulares nas quais os dados específicos do local são limitados, mas há informação regional ou geral disponível. O princípio que apoia esse método está no fornecimento de um fator de segurança ou zona de amortecimento, ao redor da qual seria uma boa avaliação de uma Área de Proteção de Poços se os dados fossem mais exatos, detalhados e confiáveis.

O Método Modificado de Formas Variáveis Simplificadas considera gradientes hidráulicos subestimados mediante a inclusão de uma zona de amortecimento na direção do gradiente ascendente e gradientes superestimados na inclusão de uma zona de amortecimento na

Para los casos de acuíferos fisurados, el Método de Radio Calculado Fijo (CFR) puede utilizarse cuando las condiciones de flujo se encuentran documentadas por medio de Mapeo Hidrogeológico y/o Datos de Campo. Un comentario sobre estas técnicas y la manera en que se relacionan con la caracterización del flujo es proporcionada por la EPA, 1993.

3.5.3 Conformaciones variables simplificadas (SVS)

El procedimiento de SVS involucra la generación de un juego de formas que representa un conjunto de condiciones hidrogeológicas y de bombeo (Figura 6 y Tabla 4). Las formas variables son calculadas midiendo la distancia al gradiente descendente y a la extensión lateral de los límites de flujo subterraneo de agua alrededor de un pozo de bombeo, según ecuaciones analíticas tales como ecuaciones de flujo uniforme. La forma apropiada es seleccionada a continuación para condiciones hidrogeológicas y de bombeo similares o concordantes con aquellas encontradas a Cabezal de pozo, y la forma es entonces orientada en derredor del pozo, de acuerdo con los patrones de flujo de las aguas subterráneas. Un Tiempo de Tránsito (TOT) o un criterio de límite de sistema de flujo determina en ese momento la extensión de la gradiente ascendente del WHPA.

*Este método es utilizado cuando se pueden determinar estimaciones razonables de la conductividad y la gradiente hidráulicas (tales como valores conservadores citados en la literatura relevante, y en mapas potenciométricos generalizados regionales de superficie). Este método “**Modificado Simplificado de Formas Variables**” es particularmente adaptable a áreas rurales o de pozos privados en las que los datos específicos del sitio son limitados, pero sí se dispone de información regional o general. El principio que apoya este método radica en la provisión de un factor de seguridad o Zona de Amortiguación, alrededor de cuál sería una buena evaluación de un Área de Protección de Cabezal de Pozo si los datos fuesen más exactos, detallados y confiables.*

El método Modificado Simplificado de Formas Variables toma en consideración gradientes hidráulicas subestimadas mediante la inclusión de una Zona de Amortiguación en dirección de la gradiente ascendente y las gradientes sobreestimadas por medio de la inclusión de una

direção do gradiente descendente, assim como de linhas de fluxo precariamente estimadas, por meio da inclusão de uma zona, tipo *buffer*, definida a partir da extensão da área em aproximadamente 76,2 m (250 pés) para cada 304,8 m (1000 pés) de gradiente ascendente de Raio Calculado Fijo (CFR). Essas zonas de amortecimento servem, portanto, como segurança, dada a incerteza do valor de condutividade hidráulica.

O método é bastante fácil de aplicar e não exige grande sofisticação do modelador matemático, uma vez que as formas a serem usadas já foram definidas. A introdução de dados é ligeiramente mais complicada que o CFR, com a contagem adicional de parâmetros hidrogeológicos básicos. Esse método não consegue representar adequadamente aquíferos com grande heterogeneidade e não considera limites hidrológicos como canais de irrigação, lagos ou drenagens superficiais.

Para delimitar uma Área de Proteção de Poços usando o Método Modificado de Formas Variáveis Simplificadas:

- 1) Traçar um círculo ao redor do poço usando o método de Raio Calculado Fijo (ver figura 6):

$$r_{\min} = \sqrt{FSQt / nH\pi}$$

- 2) Traçar uma linha central ao longo do poço na direção do gradiente ascendente do fluxo para determinar a distância aproximada de trânsito a partir do poço ("z"), utilizando-se a seguinte equação:

$$z = \frac{Ki}{n} t$$

E o conteúdo das variáveis constantes da equação da tabela 4 a seguir.

zona de amortiguación en dirección de la gradiente descendente, así como de líneas de caudales pobremente estimadas, por medio de la inclusión de una 'buffer zone' definida por medio de la extensión del área en unos 250 pies por cada 1000 pies de gradiente ascendente de Radio calculado Fijo (CFR). Estas Zonas de Amortiguación sirven asimismo como de seguridad, dada la incertidumbre del valor de conductividad hidráulica.

El método es bastante fácil de aplicar, y requiere de escasa sofisticación por parte del modelador matemático, una vez que las formas a usar han sido definidas. El ingreso de datos es ligeramente más complicado que el CFR, con el conteo adicional de parámetros hidrogeológicos básicos. Este método no logra representar adecuadamente acuíferos con substancial variabilidad hidrogeológica (heterogeneidad), y no toma en cuenta límites hidrológicos tales como canales de riego, lagos o corrientes superficiales.

Para delinear un área de protección de cabezal de pozo usando el método Modificado Simplificado de Forma Variable:

- 1) *Trazar un círculo alrededor de pozo empleando el método de Radio Calculado Fijo (ver Figura 6):*

$$r_{\min} = \sqrt{FSQt / nH\pi}$$

- 2) *Trazar una línea central a través del pozo en dirección de la gradiente ascendente del flujo a fin de determinar la distancia aproximada de tránsito desde el pozo ("z") utilizando la siguiente ecuación:*

$$z = \frac{Ki}{n} t$$

y el contenido de las constantes de ecuación de la Tabla 4 a continuación.

Tabela 4.-
Método Modificado de Formas Variáveis Simplificadas – variáveis constantes da equação (EPA, 1993).

Tabla 4.-
Método Modificado Simplificado de Forma Variable - Constantes de Ecuación (adoptado de EPA, 1993).

- 3) Traçar uma linha perpendicular à linha de centro, a uma distância 'z' do ponto central; chamá-la de A-A'.
- 4) Traçar mais duas linhas tangentes ao círculo e paralelas à linha de centro. No ponto de interseção dessas linhas com a linha A-A', medir a distância externa z/4; colocá-las como pontos B e B'.
- 5) Traçar linhas tangentes de B e B' até o círculo.
- 6) Usando o poço como ponto central, desenhar um arco de B a B' (caso se disponha dos limites hidrológicos, eles podem proporcionar esse limite de gradiente ascendente).

- 3) Trazar una línea perpendicular a la línea de centro, a la distancia 'z' desde el punto central; denominarla A-A'.
- 4) Trazar otras dos líneas tangenciales al círculo y paralelas a la línea de centro. Donde estas líneas cruzan la línea A-A', medir la distancia externa z/4; mostrarlas como puntos B y B'.
- 5) Trazar líneas de tangente desde B y B' al círculo.
- 6) Usando el pozo como punto central, dibujar un arco desde B a B' (los límites hidrológicos, si están presentes, pueden proporcionar este límite de gradiente ascendente).

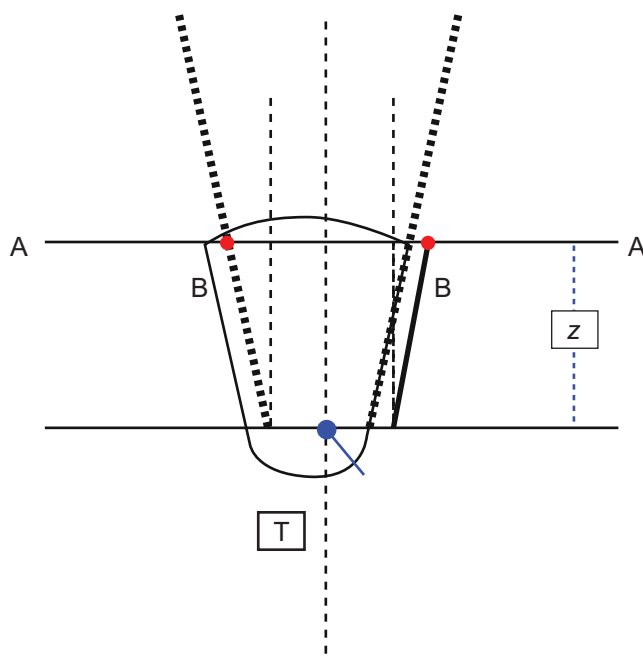


Figura 11.-

Forma Modificada de Formas Variáveis Simplificadas (EPA, 1993).

Figura 11.-

Forma modificada simplificada variable (adoptada de EPA, 1993).

3.5.4 Modelos analíticos (AM)

O enfoque de modelos analíticos (AM) usa equações hidrogeológicas conhecidas para modelar matematicamente o fluxo de água subterrânea e o transporte de poluentes. As equações, geralmente, costumam ser bastante simples de resolver, mas requer a introdução

3.5.4 Modelos Analíticos (AM)

El enfoque de Modelos Analíticos (AM) utiliza ecuaciones hidrogeológicas conocidas para modelar matematicamente el flujo de agua subterrânea y transporte de contaminantes. Las ecuaciones son por lo general bastante simples de resolver, pero requieren cierto número de

038

na velocidade do fluxo em aquíferos tanto confinados quanto não confinados. Maiores detalhes podem ser encontrados no Apêndice D do documento EPA (1993).

3.5.5 Mapeamento hidrogeológico (HM)

O HM identifica aspectos físicos e hidrológicos que controlam o fluxo da água dentro de um sistema aquífero. Este método compreende o mapeamento do sistema de fluxo que delimita a zona de contribuição ou captação (ZOC) de poços por meio da identificação dos limites do fluxo. Os limites físicos do fluxo de água subterrânea podem incluir os contatos geológicos formados pelos limites do aquífero, características estruturais, como barreiras de falhas ou zonas de fraturas, e aspectos topográficos que podem funcionar como divisores de água subterrânea. Alguns corpos de água superficiais, como rios, canais e lagos, entre outros, também podem funcionar como limites para o sistema de fluxo.

O mapeamento da vulnerabilidade é outra técnica de HM que identifica áreas particularmente vulneráveis à contaminação das águas subterrâneas. Essas áreas são formadas por leitos rochosos pouco profundos ou expostos, solos permeáveis, zonas de falhas geológicas, zonas de fraturas e feições cársticas como cavidades naturais de dissolução e dolinas (*sinkholes*). A fim de proteger os poços, é de grande importância descobrir áreas vulneráveis em que haja probabilidade de que fontes potencialmente poluentes na superfície causem interferência conduzindo um contaminante à captação para abastecimento. O mapeamento de vulnerabilidade não gera necessariamente uma ZOC para um poço determinado; entretanto, utilizado em combinação com o mapeamento do sistema de fluxo, constitui um ótimo elemento para avaliar a susceptibilidade de regiões específicas dentro dos limites do sistema de fluxo em relação à contaminação da água subterrânea. A técnica de HM funciona adequadamente em regiões em que a geologia do terreno subsuperficial é variável, como de rocha fraturada, e naquelas em que aparecem limites próximos à superfície (EPA- EE.UU., 1991).

A informação requerida pelo mapeamento hidrogeológico pode incluir mapas topográficos,

y bombeo de pozos basados en la velocidad del flujo en acuíferos tanto confinados como no confinados. Para mayores detalles, referirse al Apêndice D del documento EPA (1993).

3.5.5 Mapeo hidrogeológico (HM)

El HM identifica los aspectos físicos e hidrológicos que controlan el flujo del agua dentro de un sistema acuífero. Este método comprende el Mapeo de Sistema de Flujo que delinea la Zona de Contribución (ZOC) de pozos mediante la identificación de los límites del flujo. Los límites físicos del caudal de agua subterrânea pueden incluir los contactos geológicos que conforman los límites del acuífero, características estructurales tales como muros de fallas o zonas de fracturación, y aspectos topográficos que pueden operar como divisores de agua subterrânea. Algunos aspectos hidrológicos, entre otros los ríos, canales y lagos pueden también funcionar como límites del sistema de flujo.

El mapeo de vulnerabilidad es otra técnica de HM que identifica áreas particularmente vulnerables para la contaminación de las aguas subterrâneas. Tales áreas comprenden lechos rocosos poco profundos o expuestos, suelos permeables, zonas de fallas geológicas, zonas de fracturas, y características cársticas como soluciones de continuidad de cavidades y cenotes (*sinkholes*). Para los propósitos de la protección de cabezales de pozos es de la mayor importancia descubrir las áreas vulnerables en las cuales es probable que los contaminantes potencialmente vertidos en la superficie sean transportados a la fuente de abastecimiento. El mapeo de vulnerabilidad no produce necesariamente una ZOC para un pozo determinado; no obstante, utilizado en combinación con el mapeo del sistema de flujo, constituye un excelente elemento para evaluar la susceptibilidad de regiones más específicas dentro de los límites del sistema de caudal en cuanto a la contaminación del agua subterrânea. La técnica de HM trabaja correctamente en regiones en las que la geología del terreno sub-superficial es variable, tal como de roca fracturada, y en las que se presentan límites en la cercanía de la superficie (EPA- EE.UU., 1991).

La información requerida por el mapeo hidrogeológico puede incluir mapas topográficos, fotografía aérea, mapas e informes geológicos

fotografias aéreas, mapas e relatórios geológicos e hidrogeológicos, registros de poços, dados de reconhecimento geológico do terreno e dados de testes de aquíferos. Os mapas topográficos sugerem a localização de divisores de águas subterrâneas em aquíferos não confinados. A fotografia aérea pode ser usada para detectar sinais de falhas e fraturas; a fotografia infravermelha identifica as matas ciliares, cuja presença pode indicar a extensão de um aquífero aluvial (livre). Os mapeamentos e os relatórios hidrogeológicos contêm informação sobre os parâmetros do aquífero, como gradientes, transmissividade, direção e orientação do fluxo da água e a condutividade hidráulica. Os relatórios geológicos, por sua vez, sinalizam áreas de afloramento e de direção e mergulho (*strike and dip*) de formações aquíferas; também revelam a localização de falhas, sinclinais e anticlinais. Os registros escritos de poços trazem descrição da litologia constituinte do aquífero, evidências de fraturas, perfis construtivos de poços, ensaios de bombeamento, profundidade dos poços e nível estático da água. Os **ensaios de campo** de aquíferos podem, portanto, proporcionar informações úteis sobre a caracterização dos sistemas de fluxo de aquíferos (e poços) e condições de contorno; com isso pesquisadores e engenheiros podem frequentemente delimitar Áreas de Proteção de Poços (WHPA) com base em ensaios de campo e observações.

É preciso que o pesquisador passe por um treinamento profissional em geologia e hidrogeologia e adquira certa experiência nessas áreas a fim de interpretar todos os dados do mapeamento.

3.5.6 Modelos numéricos (NM)

Os modelos numéricos ou matemáticos permitem representar complexas condições subterrâneas e aspectos hidrológicos com um grau de precisão razoável. Alguns modelos podem usar modelos analíticos para determinar o transporte de poluentes, adaptando o modelo analítico de transporte ao modelo numérico de fluxo que inclui os processos de advecção e dispersão dentro do aquífero. Os modelos demandam um volume de dados considerável, principalmente se possuírem componentes analíticos. Se o modelo tiver de ser preciso, o número de células tem de

e hidrogeológicos, registros de pozos, datos de reconocimiento geológico del terreno y datos de prueba de acuíferos. Los mapas topográficos sugieren la localización de divisorias de aguas subterráneas en acuíferos no confinados. La fotografía aérea puede ser empleada para detectar trazas de fallas y fracturas; la fotografía infrarroja identifica vegetación riparia, cuya presencia puede indicar la extensión de un acuífero aluvial no confinado. Los mapeos y reportes hidrogeológicos contienen información sobre los parámetros del acuífero, tales como gradientes, transmisividad, dirección y orientación del flujo del agua y la conductividad hidráulica. Los informes geológicos, por su parte, señalan áreas de afloramiento y de actitud y orientación (*strike and dip*) de formaciones acuíferas; también muestran la ubicación de fallas, sinclinas y anticlinas. Los registros escritos de pozos contienen una descripción de los materiales componentes del acuífero, evidencias de fracturamientos, completamiento de pozos, ensayos de bombeo, profundidad de los pozos y nivel estático del agua. Los **Ensayos de Campo** de acuíferos pueden asimismo proporcionar información útil sobre la caracterización de los sistemas de flujo de acuíferos (y pozos) y condiciones de límites; con ello científicos e ingenieros pueden a menudo delinear Áreas de Protección de Cabezales de Pozos (WHPA) sobre la base de ensayos de campo y observaciones.

Un entrenamiento profesional en geología e hidrogeología, así como la experiencia en dichos campos es necesario por parte del investigador a los efectos de interpretar todos los datos del mapeo.

3.5.6 Modelos Numéricos (NM)

Los modelos numéricos o matemáticos permiten representar complejas condiciones subterráneas y aspectos hidrológicos con un grado razonable de precisión. Algunos modelos pueden usar modelos analíticos para delinear el transporte de contaminantes, adaptando el modelo analítico de transporte al modelo numérico de flujo que incluye los procesos de advección y dispersión dentro del acuífero. Los modelos demandan un considerable volumen de ingreso de datos, particularmente si tienen componentes analíticos. Si el modelo debe ser preciso, el número de celdas de grilla necesita ser grande en aquellas regiones en las que ocurren campos de importancia. Ello

ser grande onde houver áreas importantes. Isso aumenta o custo total do trabalho. Será preciso que os responsáveis pela modelagem tenham experiência no trabalho e consigam reconhecer as limitações e as deficiências do modelo.

A principal vantagem da opção numérica é que pode considerar um aquífero heterogêneo com condições de contorno complexas. Esse método permite dividir o aquífero em várias zonas de porosidade variável, espessuras saturadas e transmissividade nas direções das coordenadas x e y. A opção numérica delimita zonas de captura ao redor de poços de bombeamento para um fluxo de água subterrânea estável. Consequentemente, algumas estimativas tornam-se necessárias no que se refere às médias diárias de vazão de produção de poços municipais de abastecimento de água.

Uma das desvantagens desse modelo é que às vezes não consegue produzir resultados aceitáveis para zonas de captura de tamanho reduzido com limitação de tempo. Para períodos de simulação de menos de três anos, as rotas de zona de captura nem sempre se adaptam ao gradiente hidráulico regional. O Escritório de Proteção de Água Subterrânea da EPA recomenda períodos de tempo entre 10 e 25 anos para a determinação de zonas de captura em relação ao tempo. Isso é necessário, com esse método, quando se considera o comprimento dos períodos de simulação, para equilibrar o tamanho limitado da área em estudo e as restrições do modelo.

Área de Proteção de Poços — WHPA Versão 2.2: GPTRAC – Opção Numérica. O módulo de Rastreamento Geral de Partícula (GPTRAC) tem dois componentes, uma opção semianalítica e uma opção numérica. O módulo numérico do GPTRAC é aparentemente o método mais versátil por causa da sua capacidade de delimitar WHPA em aquíferos heterogêneos com um complexo sistema de fluxo. Este módulo está limitado apenas pelo modelo numérico utilizado para a obtenção do mapa potenciométrico.

Outros modelos numéricos normalmente usados são: MODFLOW, FLOWPATH, PLASM e SUTRA. A tabela 5 traz maiores informações sobre modelamento numérico.

aumenta el costo total del trabajo. El responsable de la modelación deberá poseer experiencia en su empleo y deberá ser capaz de reconocer las limitaciones y anomalías del modelo.

La principal ventaja de la opción numérica es que puede tomar en consideración un acuífero heterogéneo con condiciones complejas de límites. Este método permite dividir al acuífero en numerosas zonas de porosidad variable, espesores saturados y transmissividad en las direcciones de las coordenadas x e y. La opción numérica delinea zonas de captura alrededor de pozos de bombeo para un flujo estable del agua subterránea. Consecuentemente, algunas estimaciones se hacen necesarias en cuanto a los niveles de promedio diario de bombeo desde pozos municipales de suministro de agua.

Una de las desventajas de este modelo es que en algunas oportunidades no logra producir resultados razonables para zonas de captura de reducido tamaño con limitación de tiempo. Para tiempos de simulación menores de tres años, los senderos de zona de captura a veces no se adaptan a la gradiente hidráulica regional. La Oficina de Protección de Agua Subterránea de la EPA recomienda períodos de tiempo de 10 a 25 años cuando se desean determinar zonas de captura en relación con tiempo. Ello es necesario con este método, cuando se considera la longitud de los períodos de simulación, para equilibrar el tamaño limitado del área bajo estudio y las restricciones del modelo.

Área de Protección de Cabezal de Pozo - WHPA Versión 2.2: GPTRAC – Opción Numérica. El módulo de Rastreo General de Partícula (GPTRAC) contiene dos componentes, una opción semianalítica y una opción numérica. El módulo numérico del GPTRAC parece ser el método más versátil, por su capacidad de delinear WHPA para acuíferos de tipo heterogéneo dotados de un sistema complejo de flujo. Este módulo está limitado solamente por el modelo numérico utilizado para obtener el mapa potenciométrico del cabezal del pozo.

Otros modelos numéricos empleados habitualmente son: MODFLUJO, FLUJOPATH, PLASM y SUTRA. Para mayor información acerca de modelamiento numérico, referirse a la Tabla 5.

ORGANIZAÇÃO	ENDEREÇO WEB SITE
International Association of Hydrogeologists	http://www.iah.org/weblinks.htm#softw
International Ground Water Modelling Center	http://www.mines.edu/igwmc/
Nacional Grounwater Association	http://www.ngwa.org/
EPA Center for Subsurface Modelling Support	http://www.epa.gov/ada/csmos.html
USGS Water Resources Applications Software	http://www.water.u.sgs.gov/software/

Tabela 5.-

Sites de interesse com informação sobre modelamento numérico de água subterrânea para proteção de fontes (FOSTER et al., 2003).

ORGANIZACIÓN	DIRECCIÓN SITIO WEB
International Association of Hydrogeologists	http://www.iah.org/weblinks.htm#softw
International Ground Water Modelling Center	http://www.mines.edu/igwmc/
Nacional Grounwater Association	http://www.ngwa.org/
EPA Center for Subsurface Modelling Support	http://www.epa.gov/ada/csmos.html
USGS Water Resources Applications Software	http://www.water.u.sgs.gov/software/

Tabla 5.-

Sitios Web útiles de información sobre modelamiento numérico de aguasubterrânea para protección de fuentes (adoptado de Foster et al, 2003).

3.6 Considerações especiais

A presente seção aborda a compatibilidade dos métodos citados anteriormente com regimes especiais de fluxo em aquíferos e considerações especiais que podem ocorrer no Sistema Aquífero Guarani.

A fim de aumentar de forma geral a complexidade e a sofisticação, os métodos indicados a seguir são aceitos para a delimitação de Zonas 2 e 3 de Áreas de Proteção de Poços:

- **Para aquíferos porosos:** Raio Calculado Fijo (CFR); modelos analíticos de fluxo (AM); Formas Variáveis Simplificadas (SVS); mapeamentos hidrogeológicos (HM); e modelos numéricos. De acordo com antecedentes geológicos, e hidrológicos e a figura 1, o regime de fluxo poroso predomina ao longo da maior parte das áreas do Aquífero

3.6 Consideraciones especiales

La presente sección se refiere a la compatibilidad de los métodos previamente citados con regímenes especiales de flujo de aquíferos, como así también a las consideraciones especiales que pueden probablemente presentarse en el Sistema Acuífero Guarani.

Con el objeto de incrementar de manera general la complejidad y sofisticación, los métodos que se indican a continuación son de aceptación para el delineamiento de Zonas 2 y 3 de Áreas de Protección de Cabezales de Pozos:

- **Para acuíferos porosos:** Radio Calculado Fijo (CFR); Modelos Analíticos de Flujo (AM); Formas Simplificadas Variables (SVS); Mapeos Hidrogeológicos (HM); y Modelos Numéricos. De acuerdo con los antecedentes geológicos e hidrológicos y la Figura 1, el

Guaraní, tanto nas zonas de arenitos jurássicos quanto em arenitos cretácicos do grupo Bauru do Brasil e seus equivalentes na Argentina, no Paraguai e no Uruguai. Isso inclui a maior parte dos afloramentos da área de recarga direta nos limites oriental e ocidental da Bacia Geológica do Paraná, assim como nas áreas potenciais de descarga ao longo das áreas de captura dos Rios Tietê, Uruguai e Paraná.

- **Para aquíferos fissurais:** qualquer um dos métodos mencionados podem ser usados para delimitar Zonas 2 e 3, mas devem ser utilizados mapeamentos hidrogeológicos e/ou dados de ensaios de campo para determinar a existência das condições de fluxo. Em relação ao Sistema Aquífero Guaraní, essa situação acontece geralmente na Formação Serra Geral (basaltos fraturados) e em menor proporção nos arenitos.
- **Para aquíferos cársticos:** mapeamentos hidrogeológicos e/ou dados de Ensaios de Campo, ou mesmo modelamento numérico a fim de estabelecer os limites do sistema de fluxo (Zona 3) e as áreas de vulnerabilidade (Zona 2), dentro dos limites de fluxo do sistema. Os mapeamentos hidrogeológicos e/ou dados de ensaios de campo são os métodos mais simplistas aceitos para delimitar as Zonas 2 e 3 em aquíferos de fluxos em condutos. Além disso, para poços perfurados em uma zona cárstica, falhada (zona de brechas de falha) ou aquíferos fissurais em que o fluxo pode ser caracterizado total ou parcialmente como fluxo de conduto, assim como para o caso de Sistemas de Poços Públicos (PWS) que descansam para seu abastecimento de água potável em ribeirões e/ou túneis, a Zona 2 é definida pela localização (isto é, a delimitação) de áreas vulneráveis dentro dos limites do sistema do fluxo que alimenta o poço (curso de água ou túnel). Os mapeamentos de vulnerabilidade e/ou os Métodos de Campo são as técnicas básicas a serem aplicadas. A Zona 3 é definida pelos limites do sistema de fluxo que alimenta o poço, ribeirão ou túnel, conforme determinado pelos métodos de mapeamento hidrogeológico e/ou métodos de campo.

régimen de flujo poroso predomina a lo largo de la mayor parte de las áreas del Acuífero Guaraní, tanto en las zonas de areniscas jurásicas como en las areniscas cretáceas del grupo Bauru del Brasil y sus equivalentes en Argentina, Paraguay y Uruguay. Ello incluye la mayor parte de los afloramientos del área de recarga directa en los límites oriental y occidental de la cuenca geológica Paraná, así como también en las áreas potenciales de descarga a lo largo de las áreas de captura de los ríos Tiele, Uruguay Paraná.

- **Para aquíferos fisurados:** cualquiera de los métodos mencionados precedentemente pueden ser empleados para delinear Zonas 2 y 3, pero deben utilizarse Mapeos Hidrogeológicos y/o Datos de Ensayos de Campo para establecer la existencia de las condiciones de flujo. Con respecto al Sistema Acuífero Guaraní, esta situación se da generalmente en la Formación Serra Geral (basaltos fracturados) y en menor medida en las areniscas.
- **Para aquíferos karsticos:** Mapeos Hidrogeológicos y/o Datos de Ensayos de Campo, o bien Modelamiento Numérico a efectos de establecer los límites del sistema de flujo (Zona 3) y las **áreas de vulnerabilidad** (Zona 2), dentro de los límites de flujo del sistema. Los Mapeos Hidrogeológicos y/o Datos de Ensayos de Campo son los métodos más simplistas que se aceptan para delinear Zonas 2 y 3 para aquíferos de flujo de conducto. Además, para pozos perforados en una zona cárstica, fallada ("zona de escombros de falla") o aquíferos fracturados en los que el flujo puede ser caracterizado total o parcialmente como flujo de conducto, así como también para el caso de Sistemas de Pozos Públicos (PWS) que descansan para su abastecimiento de agua potable en arroyos y/o túneles, la Zona 2 es definida por la localización (es decir, el delineamiento) de 'áreas vulnerables' dentro de los límites del sistema del flujo que alimenta el pozo (curso de agua o túnel). Los Mapeos de Vulnerabilidad y/o los Métodos de Campo son las técnicas basales a aplicar. La Zona 3 es definida por los límites del sistema de caudal que alimenta el pozo, arroyo o túnel, según lo determinado por los Métodos de Mapeo Hidrogeológico y/o los Métodos de Campo.

Dos métodos simples, o método de Raio Calculado Fixo (CFR) é o mais aceito para delimitação das Zonas 2 e 3 para aquíferos porosos e/ou fissurais. Contudo, em determinadas circunstâncias pode não ser o mais indicado, e os sistemas públicos de poços de abastecimento de água (PWS) podem exigir a aplicação de critérios e/ou métodos alternativos para delimitação de WHPA correspondente. Tais circunstâncias incluem, entre outras: poços em rochas metamórficas e ígneas, áreas de recarga que se encontram fora da área de proteção, delimitação de WHPA para vários poços em um campo de produção, aquíferos confinados, áreas de interação de águas subterrâneas e superficiais e poços em várias camadas aquíferas.

Qualquer que seja o caso, os métodos de delimitação de WHPA devem ser selecionados e aplicados tendo como base as melhores condições geológicas e hidrogeológicas existentes.

Soluções propostas para algumas das circunstâncias já mencionadas em relação ao Sistema Aquífero Guarani:

Áreas de recarga fora dos limites das Zonas 1, 2 e 3

Uma Área de Proteção de Poço (WHPA) de Zona 3, delimitada por meio de CFR, pode não abranger toda a ZOC para um poço localizado em uma área com gradiente hidráulico significativo. Tal situação pode caracterizar poços e poços de observação que estejam localizados nas proximidades das zonas de recarga, ao longo das bordas oriental e ocidental da Bacia Geológica do Paraná, do Sistema Aquífero Guarani. Outros métodos de delimitação de WHPA que utilizam um cálculo de tempo de trânsito (TDT) podem apresentar limitações semelhantes. Em algumas circunstâncias, como quando uma área vulnerável de recarga está localizada no limite de maior cota piezométrica de um WHPA, a Área de Proteção de Poço pode expandir-se na direção do gradiente ascendente a fim de proporcionar uma proteção adicional. Essa área expandida pode estender-se fora da área predeterminada até incluir a zona de contribuição completa. Essa zona expandida vai permitir uma importante proteção das áreas de recarga além dos limites do WHPA e pode proporcionar informação sobre fontes potenciais de contaminação fora da Zona 3, com potencial de poluir a Área de Proteção do Poço. Isso pode ser

El método de Radio Fijo Calculado Fijo (CFR) es el más aceptado de los métodos simples para el delineamiento de Zonas 2 y 3 para acuíferos de flujos porosos y/o fisurados. Sin embargo, bajo determinadas circunstancias puede no ser el más indicado y los sistemas públicos de pozos de abastecimiento de agua (PWS) pueden requerir la aplicación de criterios y/o métodos alternativos para delinear el WHPA correspondiente. Tales circunstancias incluyen, entre otras: pozos en rocas metamórficas y cristalina, áreas de recarga que yacen fuera del Área de Protección, delineamiento de WHPA para múltiples pozos en un campo de producción, acuíferos confinados, áreas de interacción de aguas subterráneas/aguas superficiales y pozos en acuíferos múltiples.

Cualquiera sea el caso, los métodos de delineamiento de WHPA deben ser seleccionados y aplicados sobre la base de las mejores condiciones geológicas e hidrogeológicas prevalecientes.

Soluciones propuestas para algunas de las circunstancias mencionadas precedentemente con referencia al Sistema Acuífero Guarani:

Áreas de recarga que yacen fuera de los límites de las Zonas 1, 2 y 3

Un Área de Protección de Cabezal de Pozo (WHPA) de Zona 3 delineada por medio de CFR puede no abarcar la ZOC completa para un pozo ubicado en un área de gradiente hidráulico significativa. Tal situación puede caracterizar pozos y perforaciones de observación que estén localizados en la cercanía de las zonas de recarga a lo largo de los bordes oriental y occidental de la Cuenca Geológica Paraná del Sistema Acuífero Guarani. Otros métodos de delineamiento de WHPA que utilizan un cálculo de Tiempo de Tránsito (TOT) pueden ofrecer limitaciones similares. En ciertas circunstancias, tales como cuando un área vulnerable de recarga está localizada en el límite de mayor cota piezométrica de un WHPA, el área de protección de cabezal de pozo puede expandirse en dirección del gradiente ascendente con el objeto de proporcionar una protección adicional. Esta área expandida puede extenderse fuera del área prefijada hasta incluir la Zona de Contribución completa. Esta zona expandida permitirá una importante protección a las áreas de recarga más allá de los límites del WHPA, y podrá proporcionar información sobre fuentes potenciales de contaminación fuera de la Zona 3 que tendrían el potencial de liberar contaminantes en el área

aplicado por meio da determinação de uma zona adicional de amortecimento (*buffer-zone*) que inclua uma grande parte da zona de captura.

Aquíferos confinados

O enfoque de delimitação para aquíferos confinados é similar ao dos não confinados ou semiconfinados, segundo a tabela 3. Os aquíferos confinados são em geral menos susceptíveis à contaminação e muitas vezes podem justificar a redução de ações de manejo em fontes de abastecimento que podem ser de natureza menos restritiva. As áreas de recarga para aquíferos confinados de qualquer forma deveriam ser consideradas para sua inclusão no plano de proteção.

Delimitação de Áreas de Proteção de Poços (WHPA) em um campo de poços de produção

Se as Áreas de Proteção de Poços (WHPA) diferentes se superpõem, a área de proteção resultante pode ser definida por meio da combinação (p. ex: *nesting* ou *clustering*; ver figura 7) das áreas de proteção individuais, nas zonas em que haja superposição, de cada poço do campo de poços de produção. Quando são usados métodos de modelamento computacional (por exemplo, WHPA, WHAEM etc.) para delineamento dessas áreas de proteção, a interferência de superposição de um poço sobre outro deve ser incorporada ao modelamento. Tais condições caracterizam os poços localizados em áreas altamente povoadas como o Estado de São Paulo no Brasil, onde 60,5% dos centros urbanos são servidos total ou parcialmente por fontes de águas subterrâneas.

de protección del cabezal de pozo. Ello puede ser aplicado mediante la fijación de una zona adicional de amortiguación (*buffer-zone*) que incluya una gran parte de la zona de captura.

Acuíferos confinados

El enfoque de delineamiento para acuíferos confinados es similar al de los no confinados o semiconfinados; referirse a la Tabla 3. Las condiciones de acuíferos confinados son por lo general menos sensibles a la contaminación, y a menudo pueden justificar la reducción de enfoques de manejo de fuentes de abastecimiento que pueden ser de naturaleza menos prescriptiva. Las áreas de recarga para acuíferos confinados deberían de cualquier manera ser consideradas para su inclusión en el plan de protección.

Delineamiento de Áreas de Protección de Cabezales de Pozos (WHPA) para múltiples pozos en un campo de pozos de producción
Si las Áreas de Protección de Cabezales de Pozos (WHPA) de pozos diferentes se superponen, el WHPA del campo de pozos puede ser definido mediante combinación (p.ej: “*nesting*” o “*clustering*”; ver Figura 7) de las Áreas de Protección de Cabezales de Pozos (WHPA) individuales en las zonas en que exista superposición. Cuando se usan enfoques de modelamiento por computación (por ejemplo, WHPA, WHAEM, etc.) para delineas dichas áreas de protección, la interferencia de superposición de un pozo por sobre otro debe ser incorporada al modelamiento. Tales condiciones caracterizan los pozos emplazados en áreas altamente pobladas tales como el Estado de São Paulo en Brasil, en el cual el 60.5 % de los centros urbanos son servidos total o parcialmente por fuentes de aguas subterráneas.

Sobreposición de áreas de protección de boca de pozo Sobreposição de áreas de proteção de boca de poço

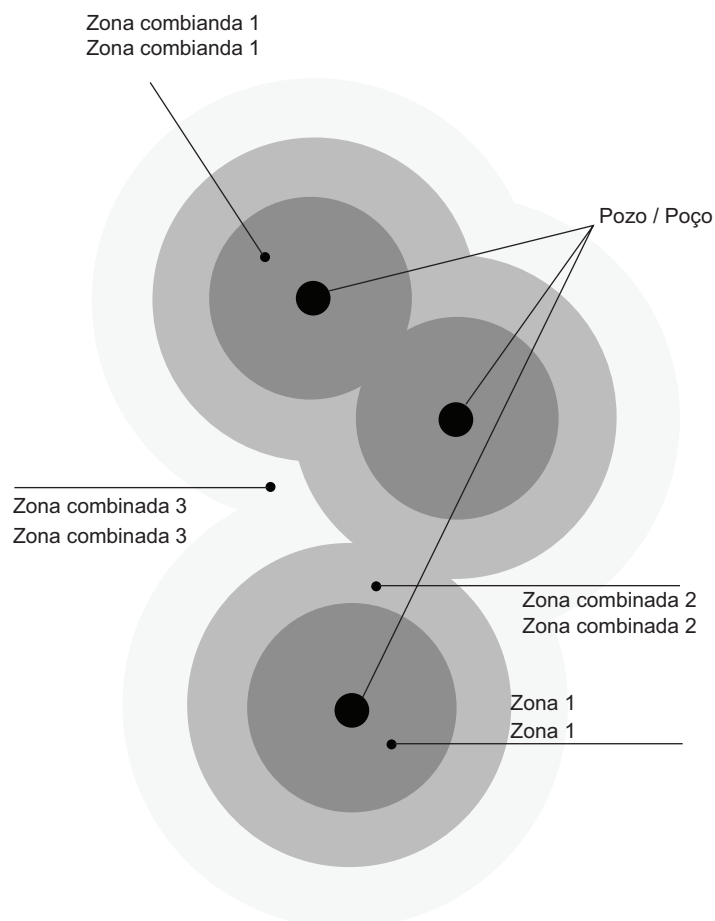


Figura 12.-

Superposição de Áreas de Proteção de Poços (EPA, 1993).

3.7 Relatório de delimitação de Áreas de Proteção de Poços (WHPA)

Os relatórios de delimitação de Áreas de Proteção de Poços de Abastecimento de Água devem ser submetidos ao órgão gestor dos recursos hídricos correspondente, na pessoa de um profissional de engenharia, geologia ou hidrologia.

Os sistemas de abastecimento público de água, cujas captações consistem em vários poços que

Figura 12.-

Superposición de áreas de protección de cabezales de pozos superpuestas (adoptado de EPA, 1993).

3.7 Reporte de delineamiento de áreas de protección de cabezales de pozos (WHPA)

Los informes de delineamiento de Áreas de Protección de Pozos de Suministro de agua debe ser sometido ante las autoridades de agua correspondientes por un profesional de la rama de ingeniería, geología o hidrología.

Los Sistemas de Suministro Público abastecido por múltiples pozos que explotan el mismo

explotam o mesmo aquífero, podem resumir a informação num único relatório de delimitação. O órgão gestor dos recursos hídricos deve adotar as estratégias de manejo e controle do uso nas zonas definidas de proteção recomendadas. O relatório de delimitação deverá incluir os seguintes dados, caso estejam disponíveis:

- Dados geológicos.
- Dados do aquífero.
- Dados dos poços.
- Dados de bombeamento.
- Informação de delimitação de Áreas de Proteção de Poços de Abastecimento de Água (WHPA).
- Mapa que mostre os limites das zonas de proteção dos poços em escala adequada.
- Zoneamento atual e mapa cadastral.
- Avaliação de susceptibilidade.

acuífero pueden resumir la información en un único Informe de Delineamiento. La autoridad de aguas implementará las estrategias de manejo y control del recurso dentro de las zonas definidas de protección recomendadas. El Informe de Delineamiento deberá incluir los siguientes datos, si ellos se encuentran disponibles:

- *Datos geológicos*
- *Datos del acuífero*
- *Datos de pozos*
- *Datos de bombeo*
- *Información de delineamiento de áreas de protección de pozos de suministro de agua (WHPA)*
- *Mapa mostrando los límites de zonas de WHPA a escala adecuada*
- *Zonificación actual y plano del mapa catastral*
- *Evaluación de susceptibilidad*

4 VULNERABILIDADE

O mapeamento da vulnerabilidade de um aquífero à contaminação é normalmente o primeiro passo para a estimativa do risco de contaminação e proteção da qualidade da água subterrânea, quando o interesse é de âmbito municipal ou estadual (FOSTER et al., 2002).

A definição mais aceita de vulnerabilidade de um aquífero à contaminação é aquela que a identifica como as características intrínsecas dos meios que separam a zona saturada do aquífero da superfície do terreno, o que determina sua susceptibilidade a ser adversamente afetada por uma carga poluente aplicada na superfície. Considerando isso, a vulnerabilidade é função da acessibilidade hidráulica à penetração de um poluente na zona saturada e da capacidade de atenuação dos meios geológicos sobrepostos à zona saturada, seja por fenômenos de retenção físico-química ou reação com poluentes.

Como foi dito, a vulnerabilidade é uma propriedade inerente ao aquífero, não dependente do poluente nem da carga aplicada, elementos que, junto com a vulnerabilidade à contaminação, permitem a elaboração de mapas de risco ou periculosidade de contaminação do aquífero pelo poluente e a carga aplicada.

4 VULNERABILIDAD

El mapeo de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero es normalmente el primer paso para la estimación del riesgo de contaminación del agua subterránea y protección de la calidad, cuando el interés es de escala municipal o provincial (Foster, S. et al 2002).

La definición mas aceptada de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero es aquella que la identifica como las características intrínsecas de los estratos que separan el sector de acuífero saturado de la superficie del terreno, lo cual determina su sensibilidad a verse adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en superficie. Considerando esto, la vulnerabilidad es función de: la accesibilidad hidráulica a la penetración de un contaminante a la zona saturada, y de la capacidad de atenuación de los estratos sobreyacentes a la zona saturada, ya sea por fenómenos de retención físico-química o reacción con los contaminantes.

Como se indicó, la vulnerabilidad es una propiedad propia del acuífero, no dependiente del contaminante ni de la carga aplicada, elementos que junto a la vulnerabilidad a la contaminación permiten la realización de mapas del riesgo o peligrosidad a la contaminación del acuífero respecto del contaminante y la carga aplicada.

(para aquíferos confinados), seguida de
classificação na escala de 0,6–1,0.

O índice final integrado de vulnerabilidade do aquífero é o produto dos três índices desses parâmetros (figura 8), calculado por meio da seguinte fórmula:

$$IGOD = I_G \times I_O \times I_D$$

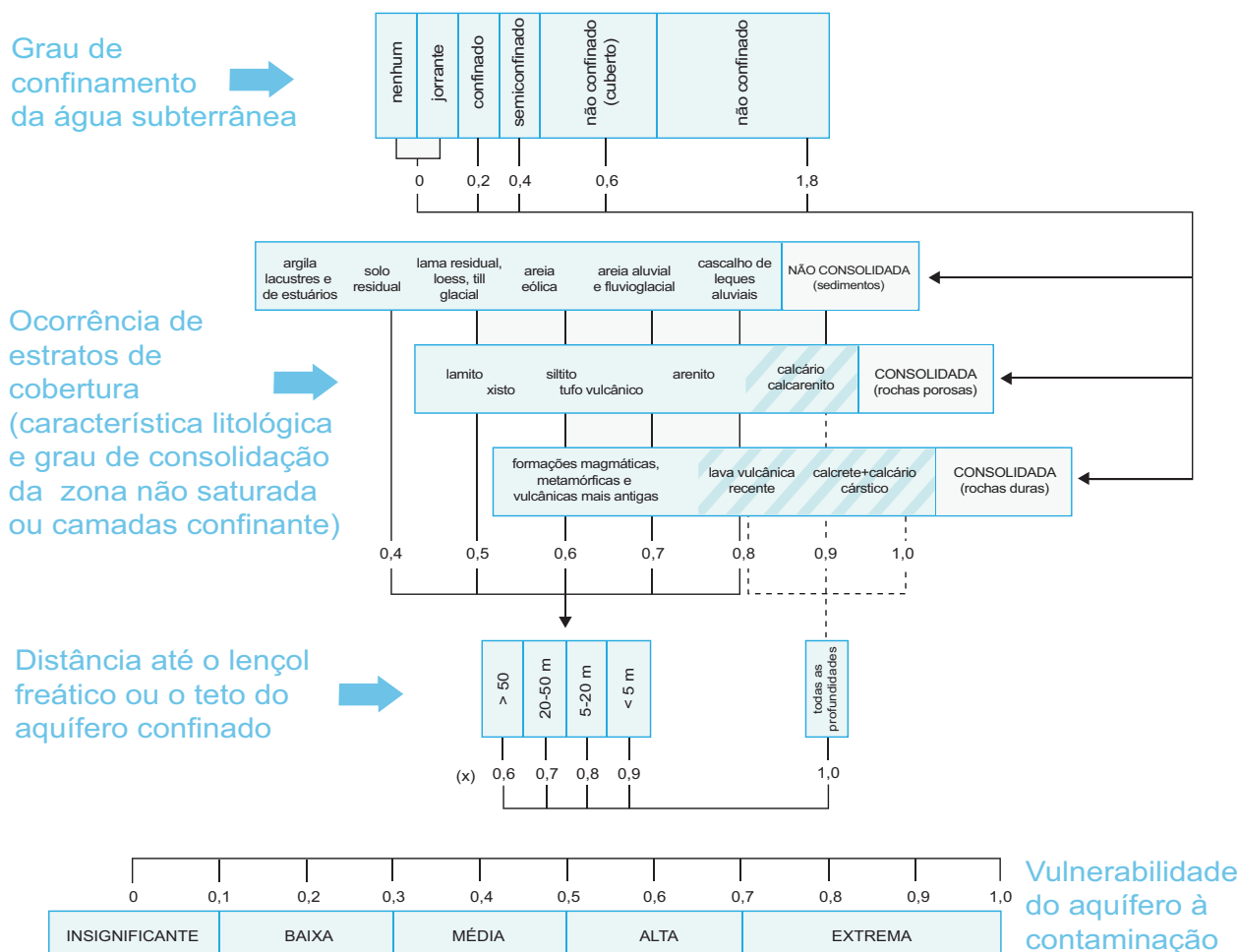
I_G , I_O e I_D representam os índices dos três parâmetros usados pelo método.

con la consiguiente calificación en la
escala 0.6–1.0.

El índice final integrado de vulnerabilidad del aquífero es el producto de los índices que componen estos parámetros (Figura 8), y se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$IGOD = I_G \times I_O \times I_D$$

I_G , I_O e I_D representan los índices de los 3 parámetros usados por el método.



Continua.-

Continua.-

Continuação.-

Continuación.-

Grado de confinamiento hidráulico

Ocurrencia del sustrato suprayacente (características litológicas y grado de consolidación de la zona no saturada o capa confinantes)

Distancia al nivel del agua subterránea (no confinados) o al techo del acuífero (confinados)

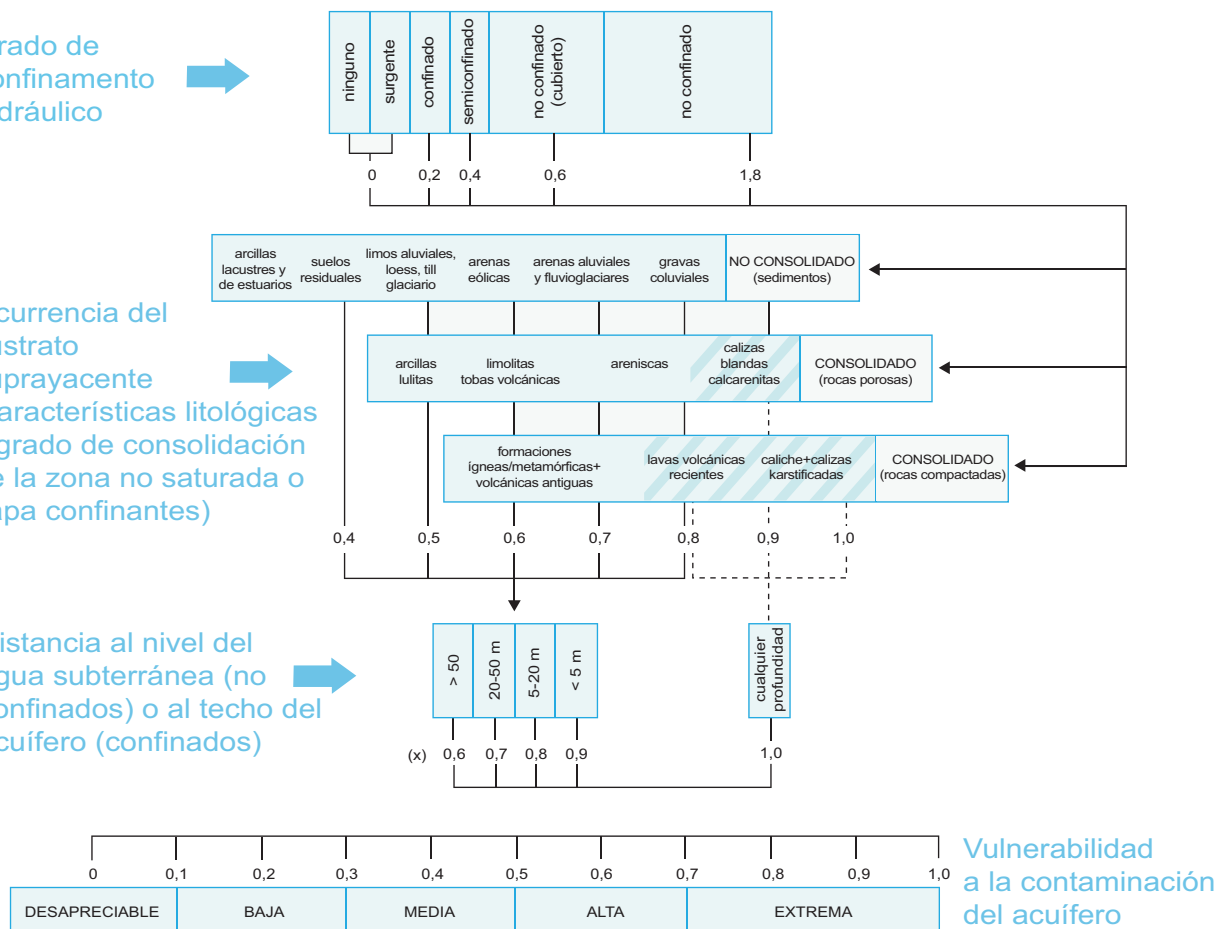


Figura 13.-

Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação (FOSTER et al., 2003).

Figura 13.-

Sistema GOD para la evaluación de vulnerabilidad de contaminación de aquíferos (según Foster et al, 2003).

A elaboração do mapa GOD para vulnerabilidade de um aquífero à contaminação segue os procedimentos indicados na figura 9. Eles podem ser retratados com uma grade e seus contornos correspondentes, mas é cada vez mais comum que sejam gerados pela tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

La generación del mapa de GOD para la vulnerabilidad de contaminación de un acuífero respeta los procedimientos indicados en la Figura 9. Tales procedimientos pueden ser llevados a cabo sobre la base de una grilla y con sus correspondientes contornos, pero son cada vez más frecuentemente generados por la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (GIS).

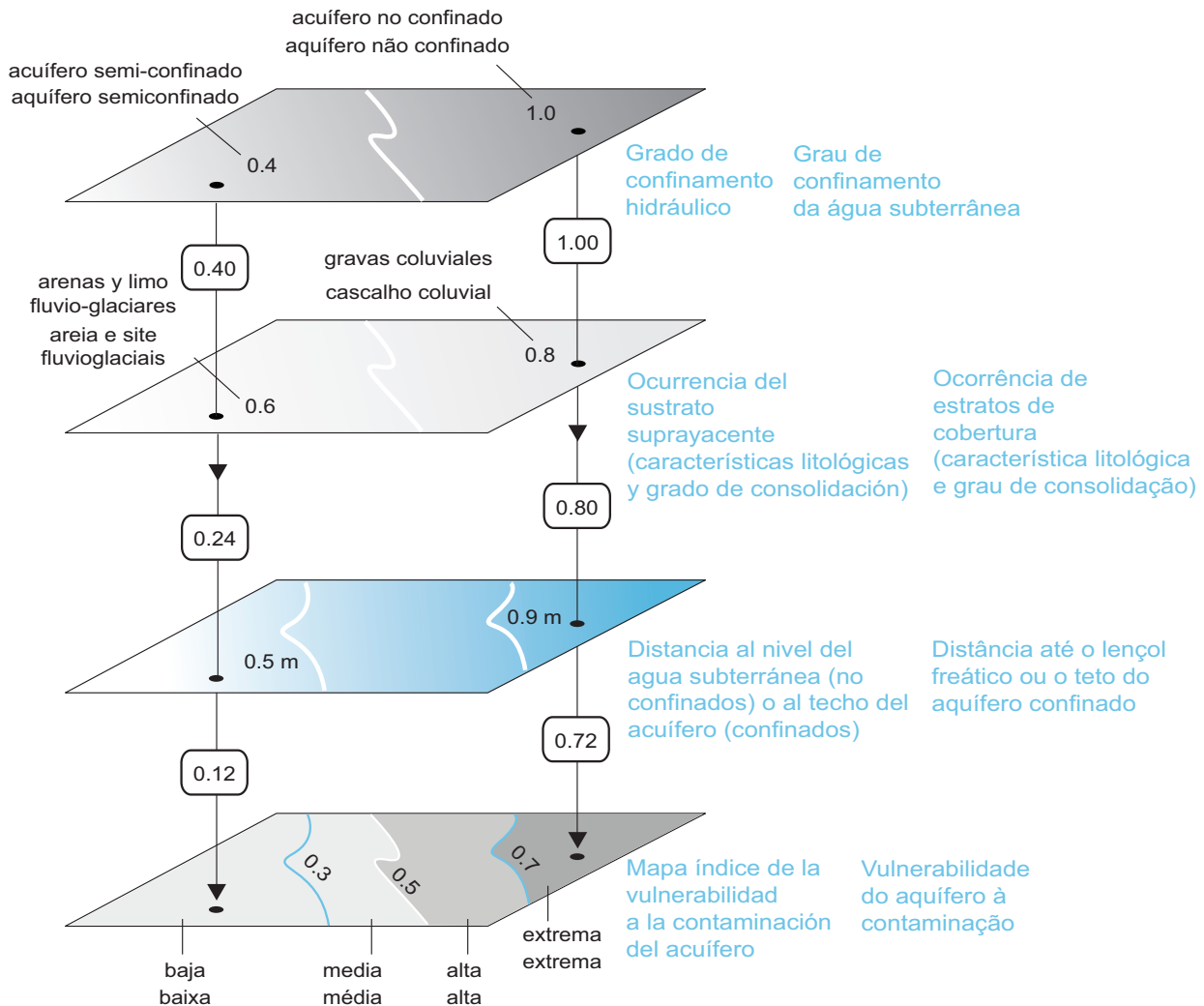


Figura 14.-

Elaboración do mapa de vulnerabilidade do aquífero utilizando o Sistema GOD (FOSTER et al., 2003).

Figura 14.-

Generación de mapa de vulnerabilidad de aquífero utilizando el Sistema GOD (según Foster et al, 2003).

DRASTIC (ALLER et al., 1987) é um método paramétrico de pesos relativos e classificação. O DRASTIC é formado pela avaliação de sete parâmetros hidrogeológicos, características-chave que são decisivas para o destino e transporte de poluentes e processos de atenuação que atuam na zona não saturada e na própria água subterrânea. Os parâmetros levados em conta são: (D) profundidade até a água subterrânea, (R) taxa de recarga natural,

DRASTIC (Aller y asoc., 1987) es un método paramétrico de peso relativo y clasificación. El DRASTIC está compuesto por la evaluación de siete parámetros hidrogeológicos, características clave que son decisivas en cuanto al destino y transporte de contaminantes y procesos de atenuación que actúan en la zona no saturada y en el agua subterránea en sí misma. Los parámetros tomados en cuenta son: (D) Profundidad hasta el agua subterránea, (R) Recarga, (A) Medio

de acordo com as categorias correspondentes. O nível 10 corresponde à categoria mais vulnerável. O índice de vulnerabilidade pode ser encontrado com a seguinte fórmula:

$$IS = \sum P_{1,7} \times N_{1,7}$$

Seu valor, uma variável entre 26 e 260, é dividido em seis intervalos correspondentes às diferentes classes de vulnerabilidades especificadas no método SINTACS.

O **AVI** (VAN STEMPOORT et al., 1993) é um método classificado como de abordagem por modelo analógico ou numérico que utiliza dois parâmetros: a grossura de cada camada sedimentar superposta sobre o aquífero saturado mais superficial (d) e a condutividade hidráulica estimada (k) de cada uma dessas camadas sedimentares (tabela 6).

utilizados en el **DRASTIC**, es decir, medios de suelo, topografía, etc.) desde 1 a 10, según los rangos correspondientes. El nivel 10 es atribuido al rango más vulnerable. El índice de vulnerabilidad se obtiene de la siguiente fórmula:

$$IS = \sum P_{1,7} \times N_{1,7}$$

Su valor, una variable entre 26 y 260, es dividido en seis intervalos en relación con las diferentes clases de vulnerabilidades especificadas por el método SINTACS.

El **AVI** (Van Stempoot y asoc., 1993) es un método de reaccionamiento analógico o numérico que emplea dos parámetros: el grosor de cada capa sedimentaria superpuesta por sobre el acuífero saturado más superficial (d) y la conductividad hidráulica estimada (k) de cada una de estas capas sedimentarias (Tabla 6).

K (Condutividade hidráulica)	Litologia k (m/d)	Cascalho 10 ³	Areia 10 ⁻² -10 ⁻²	Marga 10 ⁻³ -10 ⁻¹	Loans 10 ⁻⁴ -10 ⁻¹	Argila 10 ⁻⁷ -10 ⁻⁵
------------------------------	----------------------	-----------------------------	---	---	---	--

Tabela 6.-

Valores de Classificação de Parâmetros K para o Método AVI (DRAOUI et al., 2007).

K (Conductividad hidraulica)	Litología k (m/d)	Grava 10 ³	Arena 10 ⁻² -10 ⁻²	Marga 10 ⁻³ -10 ⁻¹	Loans 10 ⁻⁴ -10 ⁻¹	Arcilla 10 ⁻⁷ -10 ⁻⁵
------------------------------	----------------------	--------------------------	---	---	---	---

Tabla 6.-

Valores de Clasificación de Parámetros K para el Método AVI (Draoui y asoc., 2007).

O AVI não utiliza o princípio de índices e pesos relativos, mas determina o índice médio de vulnerabilidade obtido da relação entre os dois parâmetros, de acordo com a equação a seguir:

$$AVI = \sum d / k$$

Os valores de índices do método AVI se dividem em cinco categorias de vulnerabilidade que representam os diferentes graus de redução da contaminação.

El AVI no utiliza el principio de índices y pesos relativos, pero determina el índice promedio de vulnerabilidad obtenido de la relación entre los dos parámetros, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$AVI = \sum d / k$$

Los valores índices del método AVI se dividen en cinco rangos de vulnerabilidad que representan los diferentes grados de reducción de contaminación.

Draoui et al. (2007) realizaram um estudo comparativo com os quatro métodos de mapeamento da vulnerabilidade mencionados em um aquífero detrítico a noroeste do Marrocos, conhecido como Martil-Alila. Traçaram-se mapas de vulnerabilidade para cada um dos métodos, para cargas altas e baixas de precipitação anual. Os quatro métodos demonstraram semelhanças em relação às classes de distribuição da vulnerabilidade mostradas nos mapas. O grau de vulnerabilidade refletido no método DRASTIC sofre grande influência das condições climáticas, efeito que aparece com menor intensidade nos métodos SINTACS e GOD. Os demais parâmetros afetam significativamente o índice de vulnerabilidade por causa das ligeiras variações entre classes diferentes. Os métodos para mapeamento da vulnerabilidade correspondem a dois grupos diferentes (paramétrico para GOD, DRASTIC e SINTACS e modelo analógico para o AVI), o que se faz notar no grau de vulnerabilidade que registram. O AVI é o único método que registra predominância das duas classes extremas (muito baixa e muito alta). O DRASTIC foi o método mais adaptável para o aquífero detrítico Martil-Alila.

4.2 Aplicabilidade dos métodos e limitações gerais

Os métodos GOD e DRASTIC de mapeamento de vulnerabilidade de aquíferos à contaminação são normalmente os mais usados. A maior vantagem do método GOD é a simplicidade e a fácil aplicação. Outra vantagem em relação à aplicação deste método no Sistema Aquífero Guarani é que já existe uma longa experiência em sua aplicação local, por exemplo: em Río Cuarto, Argentina (BLARASÍN et al., 1993, 1999); São Paulo, Brasil (HIRATA et al., 1990); Caçapava, Brasil (MARTIN et al., 1998); e Esperanza, Argentina (PARIS et al., 1998, 1999 apud FOSTER et al., 2002). A utilização do método DRASTIC também é bastante simples. Os resultados de vulnerabilidade em muitas áreas coincidem muito bem com estudos e medições de campo (p. ex.: DRAOUI et al., 2007; THIRUMALAVISAN; KARMEGEM, 2001). Entretanto, em virtude da interação de excessivos parâmetros calculados, este método tende às vezes a gerar um índice de vulnerabilidade de significado não muito claro. Outra desvantagem é que, em comparação com aquíferos não

Un estudio comparativo de los cuatro métodos previamente mencionados de mapeo de vulnerabilidad fue aplicado por Draoui y Asoc., (2007), en un acuífero detrítico en un acuífero al noroeste de Marruecos conocido como Martil-Alila. Los mapas de vulnerabilidad fueron trazados para cada uno de los métodos, para cargas altas y bajas de precipitación anual. Los cuatro métodos demostraron similitudes en cuanto a las clases de distribución de la vulnerabilidad mostradas por los mapas. El grado de vulnerabilidad reflejado por el método DRASTIC es influenciado significativamente por las condiciones climáticas. Este efecto es menos notable para los métodos SINTACS y GOD. Los restantes parámetros, debido a sus ligeras variaciones entre diferentes clases no afectan de manera importante el índice de vulnerabilidad. El hecho de que los métodos para el mapeo de la vulnerabilidad corresponden a dos grupos distintos (paramétrico para GOD, DRASTIC y SINTACS, y de racionamiento analógico para el AVI) es evidente en el grado de vulnerabilidad que registran. El AVI es el único método que registra la predominancia de las dos clases extremas (muy baja y muy alta). El DRASTIC fue el método más adaptable para el caso del acuífero detrítico Martil-Alila.

4.2 Aplicabilidad de los métodos y limitaciones generales

Los métodos de mapeo de vulnerabilidad de contaminación de acuíferos GOD y DRASTIC son los más comúnmente empleados. La mayor ventaja del método GOD es su simplicidad y facilidad de aplicación. Otra ventaja con respecto al Consorcio SAG es que posee ya una larga experiencia en su aplicación local (por ejemplo, en Río Cuarto, Argentina (Blarasín y asoc., 1993, 1999), São Paulo, Brasil (Hirata y asoc., 1990), Caçapava, Brasil (Martin y asoc., 1998) y Esperanza, Argentina (Paris y asoc., 1998, 1999, referenciado en Foster et al., 2002), y por ello esta manera de aplicación es más accesible. El método DRASTIC es también de utilización simple y sencilla. Los resultados de vulnerabilidad en muchas áreas coinciden relativamente bien con estudios y mediciones de campo (p.ej. Draoui y asoc., 2007; Thirumalavisan y Karmegem, 2001). Sin embargo, debido a la interacción de demasiados parámetros sopesados, este método tiende a veces a generar un índice de vulnerabilidad de significado poco claro. Otras desventajas son que este método subestima

consolidados, esse método subestima a vulnerabilidade de aquíferos fissurais. Além disso, a classificação indexada de parâmetros que expressem a mobilidade do contaminante na zona saturada é uma complicação desnecessária (FOSTER et al., 2002).

4.3 Limitações gerais

Os mapas de vulnerabilidade de aquíferos têm como finalidade dar apenas uma primeira indicação geral do perigo potencial de contaminação de águas subterrâneas a fim de permitir aos órgãos de regulamentação, planejamento e desenvolvimento para elaboração de pareceres mais bem embasados sobre novos programas propostos e sobre a aplicação de prioridades no controle da contaminação da água subterrânea e do monitoramento de sua qualidade. Eles também podem ser utilizados como guia para o manejo das terras. Entretanto, os mapas de vulnerabilidade não podem ser usados para outros fins, como a delimitação de zonas de proteção, que requeririam uma escala muito maior. Além disso, esses métodos são aceitáveis apenas para a avaliação do risco de contaminação da água subterrânea, associado às descargas de poluentes que acontecem na superfície do terreno e na fase aquosa, e não devem ser usados para análise de risco de poluentes descarregados sob a superfície e derramamentos de poluentes orgânicos sintéticos, pesados e imiscíveis (DNAPL) (FOSTER et al., 2002). Pode-se conservar a validade técnica do índice e do mapa de vulnerabilidade de contaminação de aquíferos esclarecendo-se que esses tipos de cargas poluentes são excluídos da consideração pela metodologia proposta. Outra condição que requer um procedimento especial é a existência de águas subterrâneas de pobre qualidade natural a baixa profundidade.

la vulnerabilidad para acuíferos fracturados en comparación con acuíferos no consolidados, y que la clasificación indexada de parámetros que reflejan movilidad de contaminantes en la zona saturada constituye una complicación innecesaria (Foster y asoc., 2002).

4.3 Limitaciones generales

Los mapas de vulnerabilidad de acuíferos solo tienen el propósito de otorgar una primera indicación general del peligro potencial de contaminación de aguas subterráneas a los efectos de permitir a los entes de reglamentación, planificación y desarrollo emitir juicios mejor informados sobre nuevos desarrollos propuestos y sobre la aplicación de prioridades en el control de la contaminación del agua subterránea y el monitoreo de su calidad. Los mismos pueden también ser utilizados como una guía para el manejo de las tierras. No obstante, los mapas de vulnerabilidad no pueden ser empleados para otros propósitos, tales como la delimitación de zonas de protección, que requerirían una escala bastante mayor. Además de ello, estos métodos son solamente aceptables para evaluar el riesgo de contaminación del agua subterránea asociado con descargas de contaminantes que ocurren en la superficie del terreno y en la fase acuosa, y no deben ser empleados para analizar el peligro de los elementos contaminantes descargados bajo la superficie y vertidos de contaminantes orgánicos sintéticos pesados inmiscibles (DNAPL) (Foster y asoc., 2002). La validez técnica del índice y del mapa de vulnerabilidad de contaminación de acuíferos puede ser mantenida, si se clarifica perfectamente que estos tipos de cargas contaminantes son excluidas de la consideración por parte de la metodología propuesta. Otra condición que requiere un procedimiento especial es la existencia de aguas subterráneas de pobre calidad natural a escasa profundidad.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / *REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS*

ALLER, L.; BENNETT T.; LEHR J. H.; PETTY R. H.; HACKETT, G. **DRASTIC**: a standardised system for evaluating potential underground water contamination using hydrogeological settings, US EPA Report 600/2-87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma, p. 622, 1987.

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. **Hydrogeology J.** 7 (3), p. 313-336, 1999.

CAMPOS, H.C.N. S. Modelación conceptual y matemática del Acuífero Guaraní, Cono Sur. Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guaraní. **Acta Geológica Leopoldensia**, 23 (4), p. 3-50 Institut für Tropentechnologie 201, 1999.

CIVITA, M. **La carta della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento**. Pitagora, Bologna, 1994.

CHANG, H. K. **Uso atual e potencial do Aquífero Guarani**. Technical report, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), São Paulo, 2001.

CLEARY, T. C. B. F.; CLEARY, R.W. Delineation of wellhead protection areas: Theory and practice. **Water Sci. Technol.**, 24, p. 239-250, 1991.

DRAOUI, M.; VIAS, J.; ANDREO, B.; TARGUSTI, K.; SITITU EL MESSARI. A comparative study of four vulnerability mapping methods in a detritic aquifer under mediterranean climatic conditions. **Environmental Geology Journal**, 2007.

DNM. **Normas climatológicas, 1961-1990**. Brasília: Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Secretaria Nacional de Irrigação, Departamento Nacional de Meteorologia (DNM), 1992. p. 1-84.

FOSTER, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, contamination risk and protection strategy. In: VAN DUIJVENBOODEN W.; VAN WAEGENINGH, H.G. (Ed.). **Vulnerability of soil and underground water to pollutants**. Proc Inf TNO Comm Hydrol Res, The Hague 38, p. 69-86, 1987.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Underground water contamination risk assessment**. A methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS Technical report, Lima-Peru, 2nd edn, p. 73, 1991.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Underground Water Quality Protection: a Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies**. Washington DC, USA: World Bank Publication, 2002.

FOSTER, S.; GARDUÑO, H.; KEMPER, K.; TUINHOF, A.; NANNI, M.; DUMARS, C. **Underground Water Quality Protection: defining strategy and setting priorities** — Briefing Note 8. Washington DC, USA: World Bank Publication, 2003.

GEF. **Environmental protection and sustainable development of the Guarani aquifer system project**. Report 23490, GEF/BIRD. 2002.

_____. Sistema Acuífero Guaraní GEF-BIRD-OEA perfil preliminar del proyecto piloto de gestión y protección en Ribeirão Preto, Brasil. **Report Sep**, 19, GEF/BIRD, 2003.

GEOLOGICAL Map of Brazil, 2nd Edition, MME/DNPM, 1995.

GEOLOGICAL Map of Rio de la Plata Basin, OEA, 1970.

GROUND Water Source Protection User's Guide, January 2007. State of Utah, Department of Environmental Quality, Division of Drinking Water.

CAMPOS, H. C. **Mapas Hidrogeológicos del Acuífero Guaraní, Map of Geological Integration of the Prata Basin**, 1998, Mercosul/SGT2, 1999.

INTEGRATED Source Water Assessment and Protection (ISWAP) Project Plan, November. Colorado Department of Public Health and Environment, Water Quality Control Division, Source Water Assessment and protection Project, 2007.

MAP of hidrogeológicosal integration of the Prata Basin, in elaborating, Mercosul/SGT2.

PARADIS, D.; MARTEL, R.; KARANTA, G.; LEFEBVRE, R.; MICHAUD, Y.; THERRIEN, R.; NASTEV, M. Comparative Study of Methods for WHPA Deliniation. **Ground Water Journal**, v. 45, p. 158-167, 2007.

PARADIS, D.; MARTEL, R. HYBRID: a wellhead protection areas deliniation method for aquifer of limited extent. **Geological Survey of Canadá** — Technical Note 1, 2007.

REBOUÇAS, A.C. **Recursos de água subterrâneos da Bacia do Paraná**. Thesis of "livre docência", Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1976.

ROCHA, G. O grande manancial do Cone Sul. **Estudos Avançados**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 30, p. 191-213, 1997.

ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C.; GIUSTI, D. A.; NADAL, C. A.; XAVIER, J. M. Distribuição do Geotermalismo na Bacia Sedimentar do Paraná. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, Curitiba, 1(1), p. 67-74, 2001.

SMA. **Um exemplo de solução integrada para a criação de áreas de proteção de captações destinadas ao abastecimento público com usos de modelos de sustentabilidade e sistemas avançados de suporte de tecnologia de informação**. Report, Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA), São Paulo, 2004.

SOUTH America Hydrogeological Map, 1996, DNPM/CPRM/Unesco.

SOURCE Water and protection Program, Denver, Colorado, November (303)p. 692-3500. Colorado Department of Public Health and Environment, Water Quality Control Division, Source Water Assessment and Protection Project, 2004.

STROBL, R. O.; ROBILLARD, P. D. Comparison of several EPA- recommendation US and German well-head protection area delineation methods in agricultural settings. **Water Sci. Technol.**, (24), p. 239-250, 2006.

Thirumalavivsan, D.; Karmegan, M. **Aquifer Vulnerabilidad Assessment Using Analytical Process and GIS for the Upper Palar Watershed**. 22nd Asian Conference on Remote Sensing publication. 5-9 November 2001, Singapore, 2001.

U.S. EPA. **Guidelines for delineation of wellhead protection areas**. EPA-440/5-93-001. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1987.

U.S. EPA. **Delineation of wellhead protection areas in fractured rocks**. EPA-570/9-91-009. Washington, DC: U. S. Environmental protection Agency, Office of Water, 1991.

GROUND Water Source Protection User's Guide — State of Utha, January 2007 and other.

6 ANEXO I: MAPA GOD DE VULNERABILIDADE NAS CIDADES DE RIVERA (URUGUAI) E SANTANA DO LIVRAMENTO (BRASIL). EXEMPLO DE CÁLCULO DE VULNERABILIDADE NO AQUÍFERO GUARANI

6.1 Introdução

O presente exemplo foi desenvolvido com informação pública gerada pelo Projeto SAG no contexto dos trabalhos de pesquisa financiados por fundos de universidades.

Utilizou-se informação do Projeto “Desenvolvimento Metodológico para a Avaliação da Recarga e Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Guaraní na Argentina e Uruguai” e informação dos autores para completar ou complementar aspectos que faltavam.

Desenvolveu-se o exemplo considerando-se a metodologia GOD já apresentada.

Um mapa de vulnerabilidade é uma ferramenta para gestão do uso do solo. Por essa razão, sua estimativa deve basear-se em informações confiáveis que representem adequadamente o modelo conceitual de funcionamento hidrogeológico na área. Ademais, qualquer estimativa que se faça, –e que não seja respaldada por um modelo conceitual sustentável (baseado num conjunto de técnicas como: geologia, hidrogeologia, hidroquímica, hidráulica etc.), –gerará resultados que podem levar a usos inadequados do solo (em algumas zonas) e, com isso, gerar problemas no futuro.

6.2 Marco hidrogeológico

As cidades de Rivera (Uruguai) e Santana do Livramento (Brasil) estão entre as quatro áreas-piloto selecionadas no Projeto SAG, o que aconteceu por haver nessa zona uma população de mais de 160.000 habitantes, os quais têm o

6 ANEXO I: MAPA DE VULNERABILIDAD GOD EN LAS CIUDADES RIVERA (URUGUAY) Y SANT´ANA DO LIVRAMENTO (BRASIL). EJEMPLO DE CÁLCULO DE VULNERABILIDAD EN EL ACUÍFERO GUARANÍ

6.1 Introducción

El presente ejemplo fue desarrollado a partir de información pública generada por el Proyecto SAG en el marco de los trabajos de investigación financiados por Fondo de Universidades.

Se utilizó información del proyecto “Desarrollo metodológico para la evaluación de la recarga y la vulnerabilidad del Sistema Acuífero Guaraní en Argentina y Uruguay” e información de los autores para completar o complementar aspectos faltantes.

El ejemplo se desarrolló considerando la metodología GOD, antes presentada.

Un mapa de vulnerabilidad es una herramienta para la gestión de uso del suelo. Debido a ello, su estimación debe basarse en información confiable, que represente adecuadamente el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico en el área. En contraposición, cualquier estimación que se realice, y no esté soportada por un modelo conceptual sustentable (basado en multiplicidad de técnicas como: geología, hidrogeología, hidroquímica, hidráulica, etc.), generará resultados que pueden direccionar usos del suelo inadecuados (en algunas zonas), y con ello generar problemas a futuro.

6.2 Marco hidrogeológico

Las ciudades de Rivera (Uruguay) y Sant´Ana do Livramento (Brasil) fue una de las cuatro Áreas piloto seleccionadas en el Proyecto SAG. Ello obedeció a que en dicha zona se encuentra una población de más de 160.000 habitantes, las

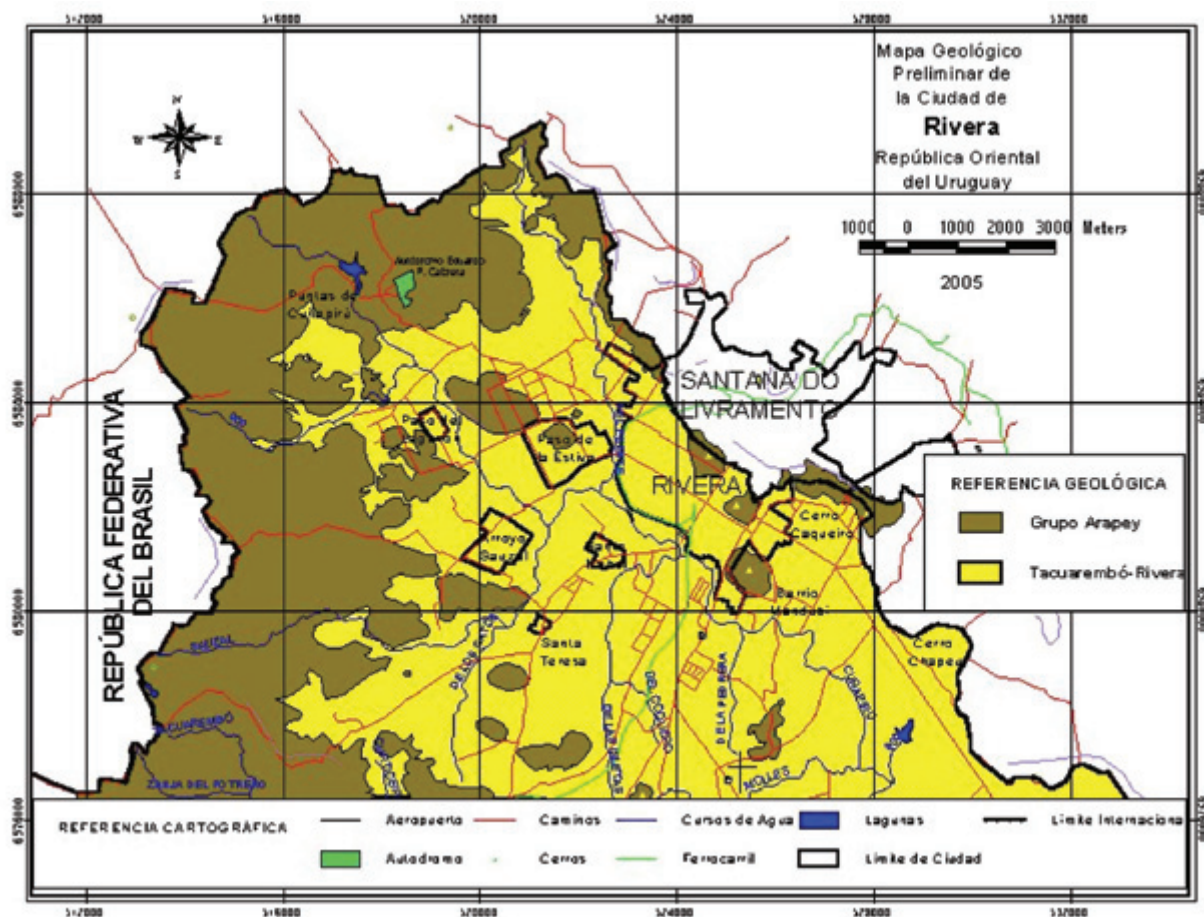


Figura 15.-
Geología superficial del área de estudio.

La información analizada permite indicar que parte del agua de lluvia infiltra en las fisuras de los basaltos, que parcialmente desciende hacia el sector de areniscas permeables superior del SAG. Esta recarga se caracteriza por su alta conductividad eléctrica y pH, determinada por el tipo de rocas en las cuales circula (basaltos de la formación Serra Geral). Asimismo, el sector permeable superior del acuífero Guaraní “somero” recibe recarga de agua de lluvia que percola a través de un suelo con pH bajo, escaso contenido de materia orgánica y de mínima capacidad buffer. La gran extensión de éste sector permeable produce que el agua que infiltró en basaltos y se dirige dentro de las areniscas

os setores inferiores e vá se misturando com a água recarregada verticalmente, gerando uma diminuição da condutividade hidráulica e do pH na direção do fluxo.

Embora boa parte da água que circula no setor aquífero “superficial” seja descarregada nos corpos de água superficiais, uma importante quantidade de água desce até o setor aquífero “profundo”, circulando através do setor pouco permeável. Esse processo e a posterior circulação no setor profundo geram um aumento de carbonatos, Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e, com isso, da condutividade elétrica e do pH.

As figuras a seguir mostram esquematicamente o modelo conceitual desenvolvido.

hacia los sectores bajos se vaya mezclando con agua recargada verticalmente, produciendo una disminución de la conductividad hidráulica y pH en dirección del flujo.

Aunque buena parte del agua que circula en el sector acuífero “somero” descarga en las cuerpos de agua superficiales, una importante cantidad de agua desciende hacia el sector acuífero “profundo” circulando a través del sector poco permeable. En este proceso y posterior circulación en el sector profundo genera un incremento de los carbonatos, STD y con eso de la conductividad eléctrica y pH.

En las siguientes figuras se muestra en forma esquemática el modelo conceptual desarrollado.

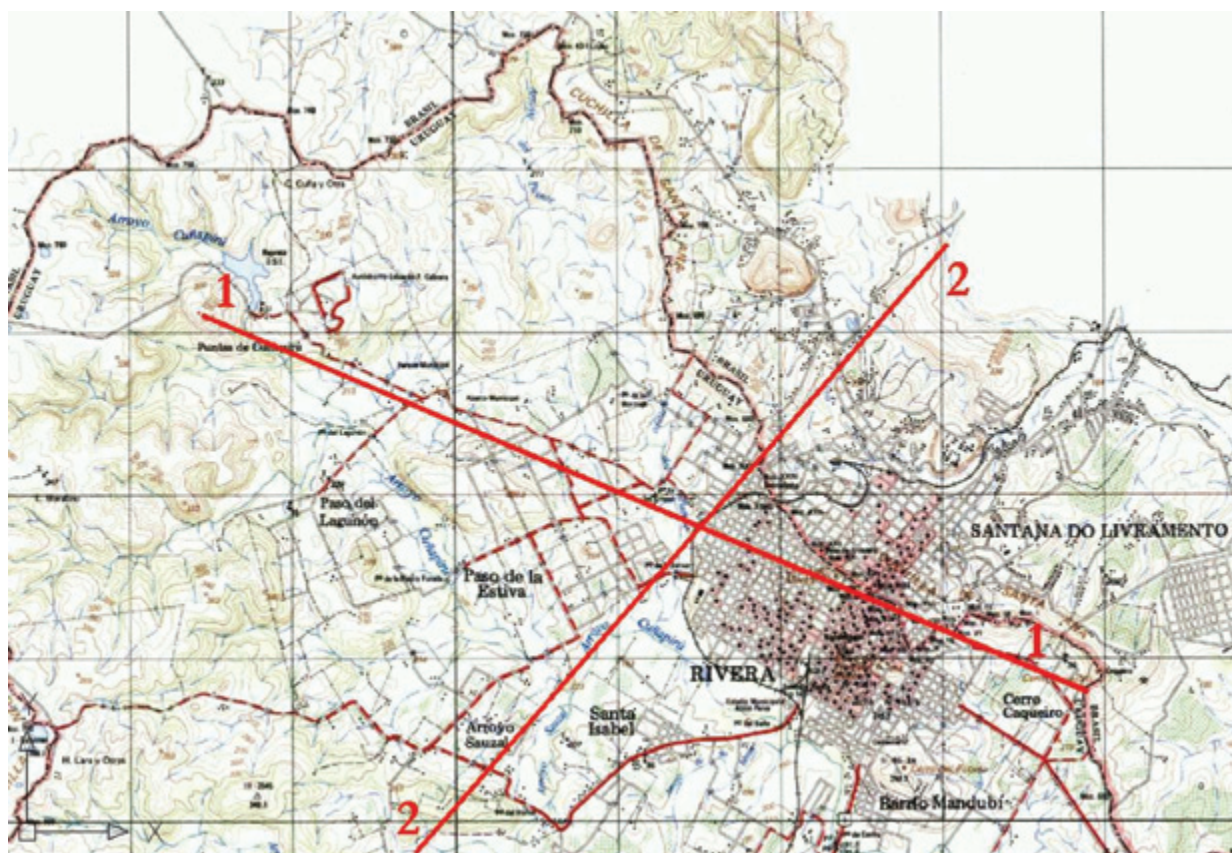


Figura 16.-
Cartografia de base e localização de cortes geológicos.

Figura 16.-
Cartografía de base y ubicación de cortes geológicos.

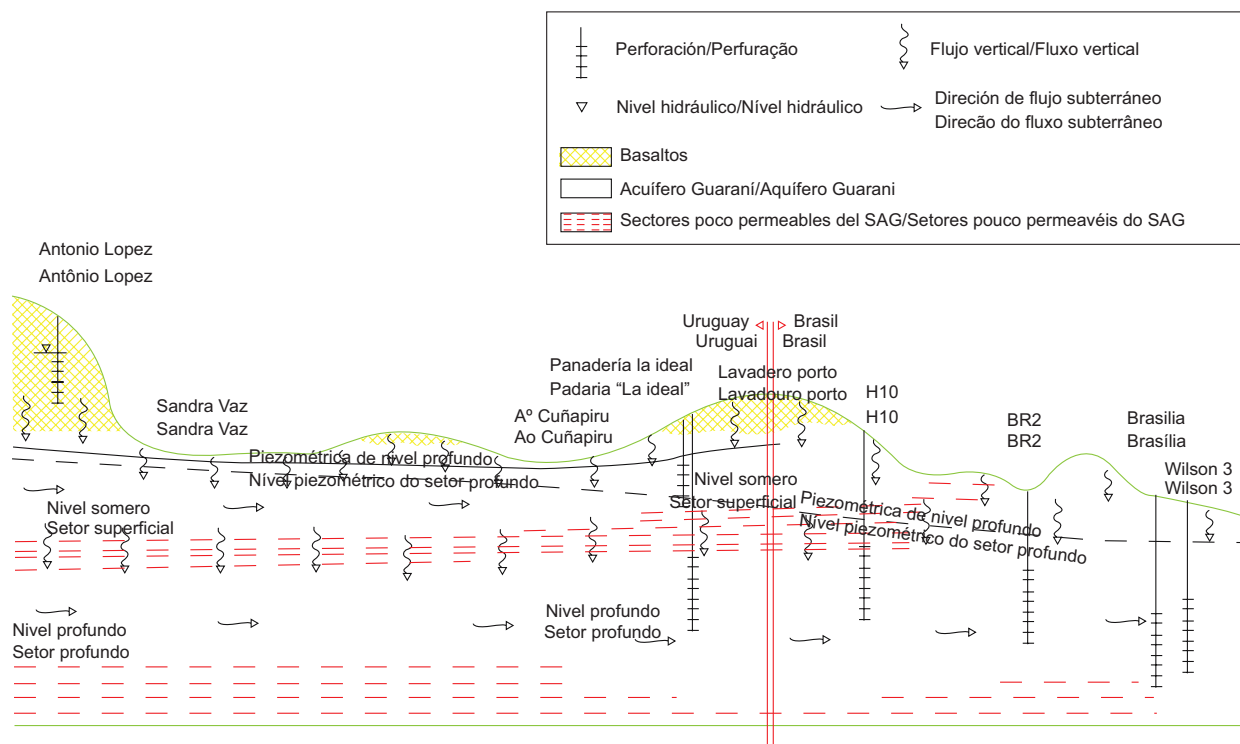


Figura 17.-
Corte 2-2.

Como foi dito anteriormente, um mapa de vulnerabilidade deve basear-se em uma análise consistente da realidade. Com base nisso e com o modelo conceitual de funcionamento apresentado, deve-se elaborar um mapa de vulnerabilidade para cada nível de aquífero detectado no SAG dentro da área de estudo. Assim, será apresentada uma estimativa para o aquífero superficial (onde aparece), outra para o profundo e um mapa que compila informação de ambos.

6.3 Metodologia

A informação necessária para obtenção dos mapas de vulnerabilidade foi introduzida num Sistema de Informação Geográfica (SIG),⁶ com

⁶ Utilizaram-se QGis, que é um cliente SIG de multiplataforma disponível sob licença compatível com software livre e sem custo algum.

Figura 17.-
Corte 2-2.

Como fue mencionado anteriormente, un mapa de vulnerabilidad debe basarse en un acabado análisis de la realidad. En base a ello y con el esquema conceptual de funcionamiento expuesto, es necesario realizar un mapa de vulnerabilidad para cada nivel acuífero detectado del SAG dentro del área de estudio. Por ello, se realizará una estimación para el acuífero somero (donde se presenta), otro para el profundo y un mapa que recopila información de ambos.

6.3 Metodología

La información necesaria para la obtención de los mapas de vulnerabilidad fue cargada en un sistema de información geográfica (SIG) ⁶, con el

⁶ Se utilizó QGis que es un cliente SIG multiplataforma disponible bajo una licencia compatible con Software Libre y sin costo.

cual se operó para asignar los rangos de valores de cada una de las capas. Con dichos valores se realizó la multiplicación y obtención del índice final. Se utilizó la topografía del modelo digital de terreno del proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la Agencia Aeronáutica Espacial de EUA.

6.4 Cálculo de la vulnerabilidad

6.4.1 Acuífero Somero

6.4.1.1 Factor G – Grado de confinamiento

De acuerdo al modelo conceptual, para el factor G, confinamiento del acuífero, se determinó la piezometría del acuífero somero. Evaluando esta en conjunto con la geología, se observa que el área bajo los basaltos es casi exclusivamente confinada (o semiconfinada), mientras que en la zona de areniscas aflorantes se presenta como libre. En las zonas con cobertura de basaltos diseminadas en el área de trabajo, se observó un comportamiento de acuífero libre.

En base a lo indicado, se clasificó el área, lo cual se presenta a continuación ⁷.

⁷ En la zona donde no se presenta el acuífero superior, aflorando el inferior, se indica como "No corresponde"

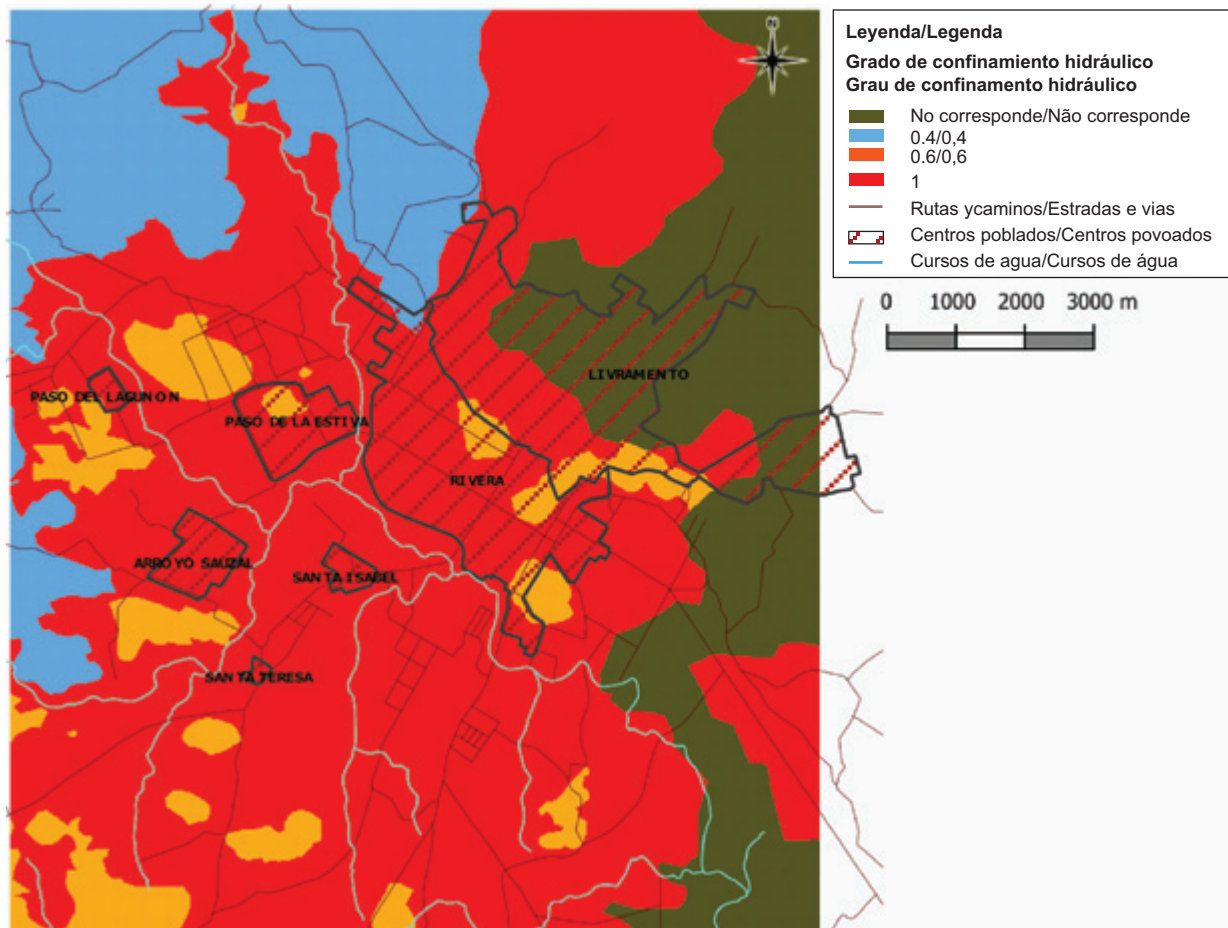


Figura 18.-
Grau de confinamiento hidráulico.

6.4.1.2 Fator O – ocorrência de estratos de cobertura (litologia e consolidação)

Para o fator O, identificaram-se as características da litologia que constitui a cobertura do aquífero. Na área considerada, aparecem na superfície basaltos e arenitos.

Conforme indicado, classificou-se a área como se vê a seguir.

Figura 18.-
Grado de confinamiento hidráulico.

6.4.1.2 Factor O – Ocurrencia del sustrato suprayacente

Para el factor O, estrato sobreyacente a la zona saturada, se identificaron las características de la litología que se encuentra sobre el acuífero. En el área considerada, se presentan en superficie basaltos y areniscas.

En base a lo indicado, se clasificó el área, lo cual se presenta a continuación.

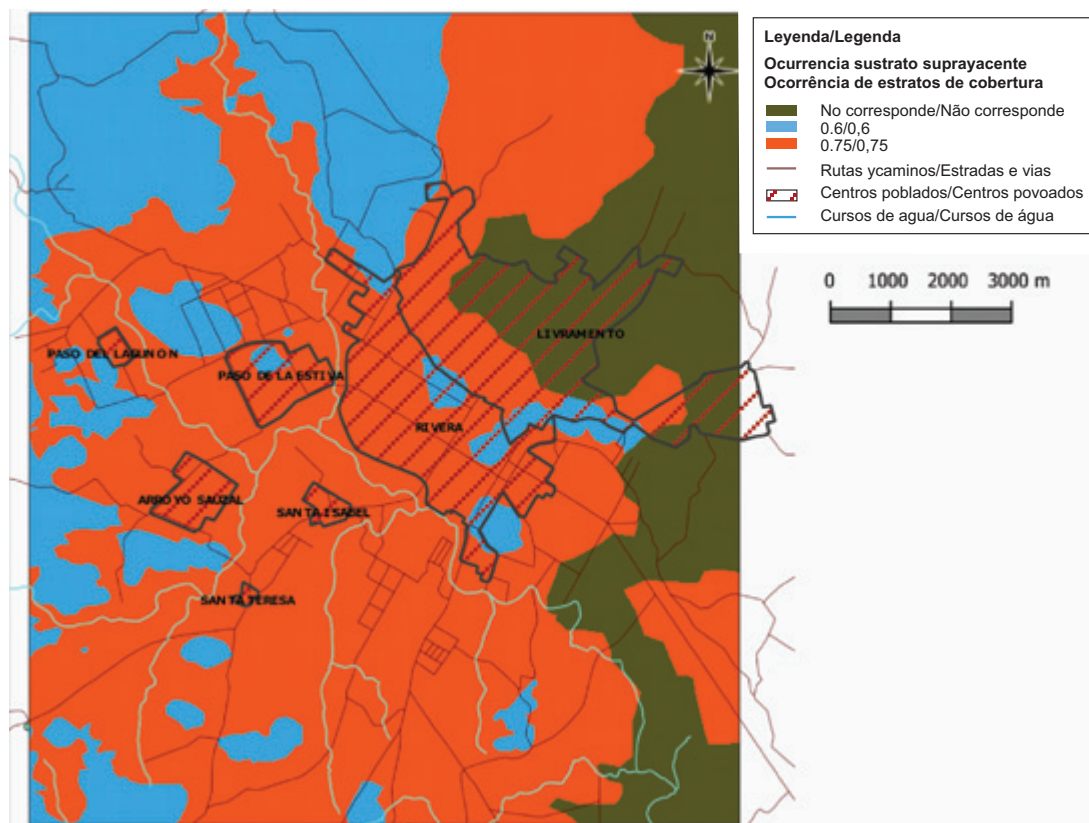


Figura 19.-

Ocorrência de estratos de cobertura.

Figura 19.-

Ocurrencia sustrato suprayacente.

6.4.1.3 Fator D – distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado

O fator D se calcula a partir da piezometria, do topo do aquífero e da topografia. Este fator foi encontrado pela diferença entre a superfície do terreno e a superfície de cota de topo do aquífero ou a superfície piezométrica, conforme corresponda.

A ponderação foi feita separando em três intervalos, de menos de 5 m, de 5 a 20 m e de mais de 20 m de distância, que correspondente à distância a ser percorrida por um poluente aplicado na superfície para alcançar a zona saturada.

Os resultados aparecem a seguir.

6.4.1.3 Factor D – Distancia al agua o al techo del acuífero

El factor D, profundidad del nivel de agua o espesor del confinante, se calcula a partir de la piezometría, el techo del acuífero y la topografía. Este factor se obtuvo por la diferencia entre la superficie de terreno y la superficie de cota de techo del acuífero o la piezometría, según correspondiere.

La ponderación se realizó separando en tres intervalos, de menos de 5m, de 5 a 20m, y más de 20m de espesor, espesores correspondiente a la distancia a recorrer por un contaminante aplicado en superficie para alcanzar la zona saturada.

Los resultados se presentan a continuación.

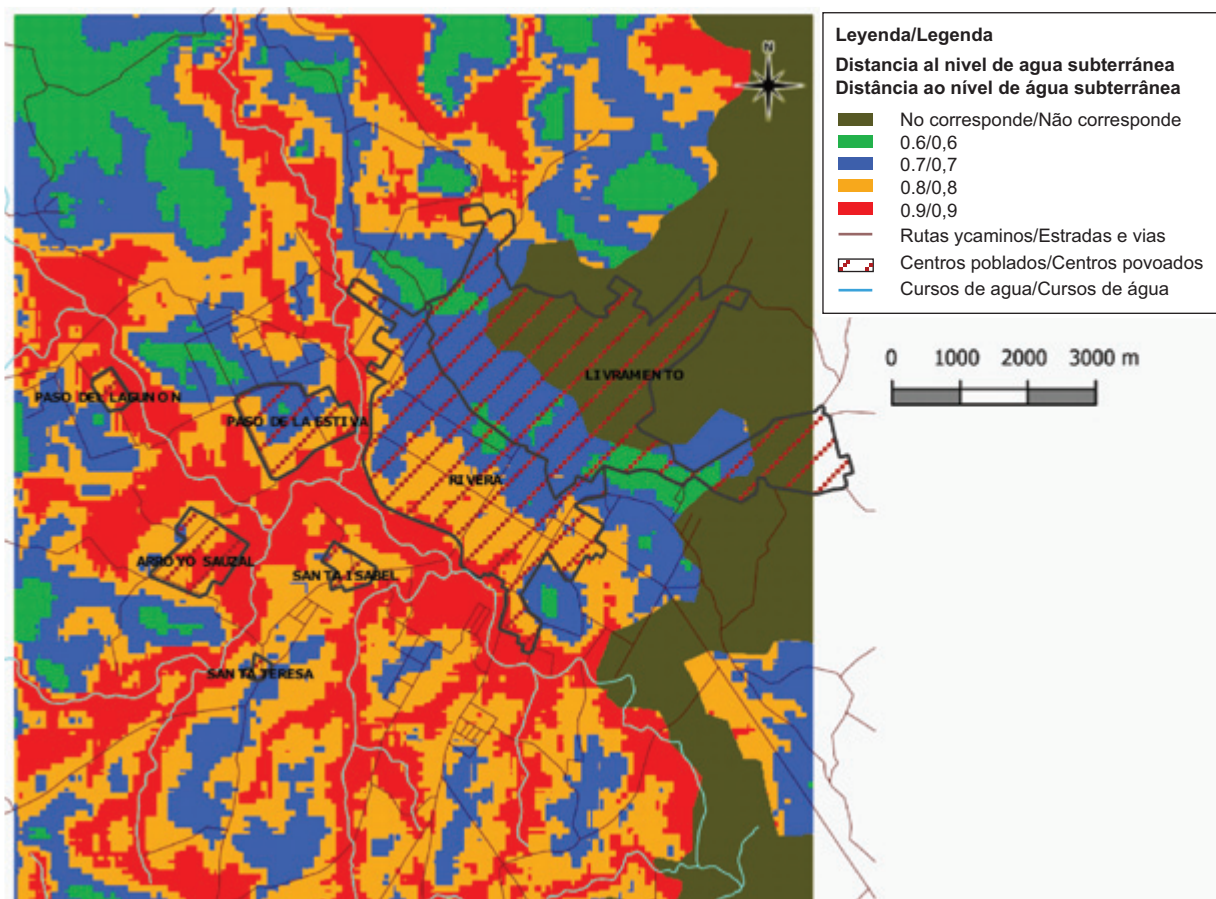


Figura 20.-

Distância ao nível de água subterrânea.

Figura 20.-

Distancia al nivel de agua subterránea.

6.4.1.4 Índice GOD de vulnerabilidade

Analizando em conjunto todos os fatores anteriores, ao multiplicar os coeficientes correspondentes para cada faixa, obtém-se o mapa de índices GOD de vulnerabilidade à contaminação do aquífero superior.

A partir dele, fez-se uma classificação de acordo com as categorias observadas (baixa, média e alta). Não foram identificados setores de vulnerabilidade extrema, nem irrelevante.

Os resultados aparecem a seguir.

6.4.1.4 Índice de vulnerabilidad GOD

Analizando en conjunto todos los factores anteriores, al multiplicar para cada sitio los coeficientes correspondientes se obtiene el mapa de índices de Vulnerabilidad GOD a la contaminación del acuífero superior.

A partir de este, se realizó una clasificación, de acuerdo a las categorías observadas (baja, media y alta). No se identificaron sectores de vulnerabilidad extrema ni tampoco despreciable.

A continuación se presentan los resultados.

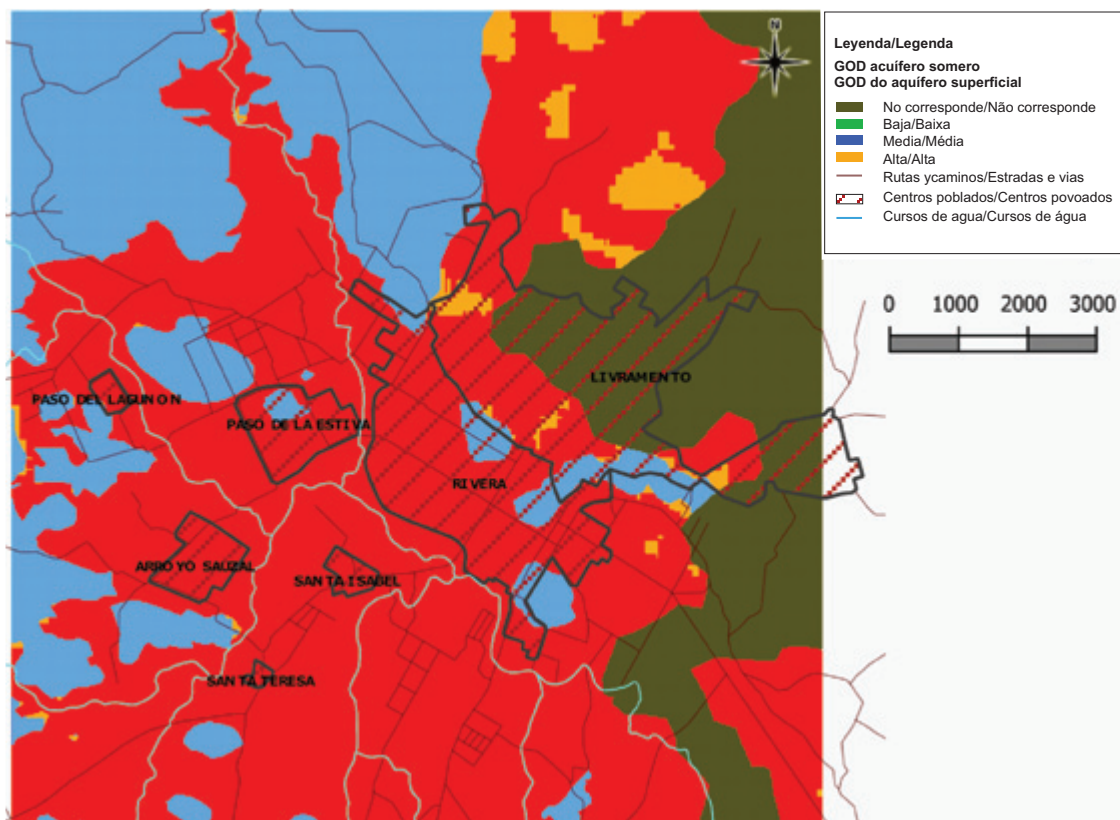


Figura 21.-
GOD do aquífero superficial.

6.4.2 Aquífero profundo

6.4.2.1 *Fator G – grau de confinamento hidráulico da água subterrânea*

De acordo com o modelo conceitual, para o fator G, determinou-se a piezometria do aquífero profundo.

Esse aquífero se encontra semiconfinado em quase toda a sua extensão, mostrando-se livre apenas na zona de afloramentos.

Conforme indicado, classificou-se a área, que é apresentada a seguir.⁸

⁸ A zona em que não aparece o aquífero superior, aflorando o inferior, está indicada como “Não corresponde”.

Figura 21.-
GOD aquífero somero.

6.4.2 Acuífero Profundo

6.4.2.1 *Factor G – Grado de confinamiento*

De acuerdo al modelo conceptual, para el factor G, confinamiento del acuífero, se determinó la piezometría del acuífero profundo.

Este acuífero se encuentra semiconfinado en la casi totalidad de su extensión, observándose libre solamente en el área aflorante.

En base a lo indicado, se clasificó el área, lo cual se presenta a continuación.⁸

⁸ *En la zona donde no se presenta el acuífero superior, aflorando el inferior, se indica como “No corresponde”.*

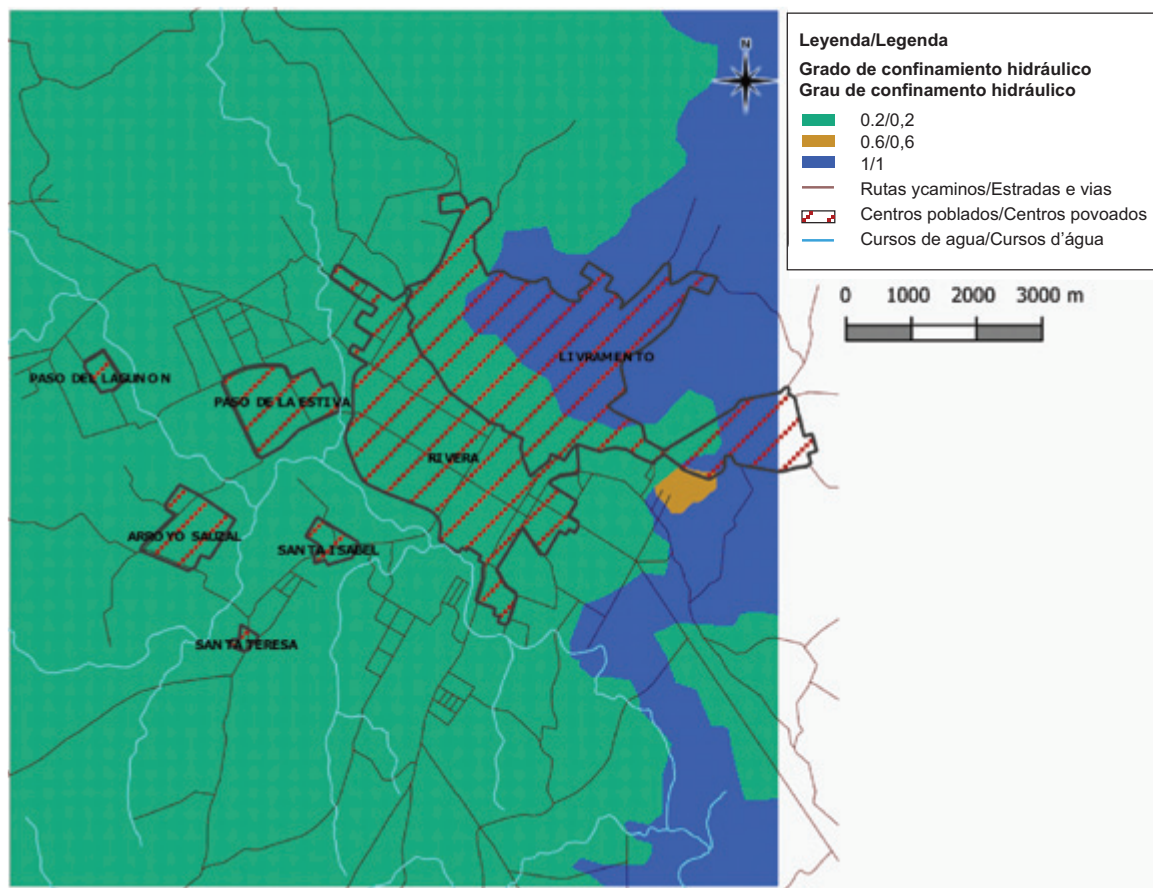


Figura 22.-
Grau de confinament hidràulic.

Figura 22.-
Grado de confinamiento hidráulico.

6.4.2.2 Fator O – ocorrência de estratos de cobertura

Para o fator O, identificaram-se as características da litologia que se encontra sobre o aquífero profundo.

Na área considerada, o aquífero profundo está aflorando sob o aquífero superior, ou sob este aquífero e os basaltos.

Com base nisso, optou-se por considerar o fator correspondente ao basalto nas áreas em que aparecem basaltos sobre o aquífero superficial. Partiu-se do princípio de que quando existem dois meios superpostos, a vulnerabilidade sempre será inferior à correspondente a cada um deles

6.4.2.2 Factor O – Ocurrencia del sustrato suprayacente

Para el factor O, estrato sobreyacente a la zona saturada, se identificaron las características de la litología que se encuentra sobre el acuífero.

En el área considerada, el acuífero profundo se encuentra aflorando, bajo el acuífero superior, o bajo dicho acuífero y los basaltos.

En base a ello, se optó por considerar en las áreas donde se presentan los basaltos sobre el acuífero somero el factor correspondiente al basalto. Ello obedece a que cuando existen dos medios superpuestos, la vulnerabilidad siempre será inferior a la correspondiente a cada uno por

isoladamente, de modo que é mais factível considerar a inferior que considerar o estrato imediatamente superior (arenitos).

Com este critério, classificou-se a área. Os resultados encontrados aparecem a seguir.

separado, por lo que, tomar la inferior es mucho más ajustada a la realidad que considerar al estrato inmediatamente superior (areniscas).

Con este criterio, se clasificó el área, obteniéndose el resultado que se muestra a continuación.

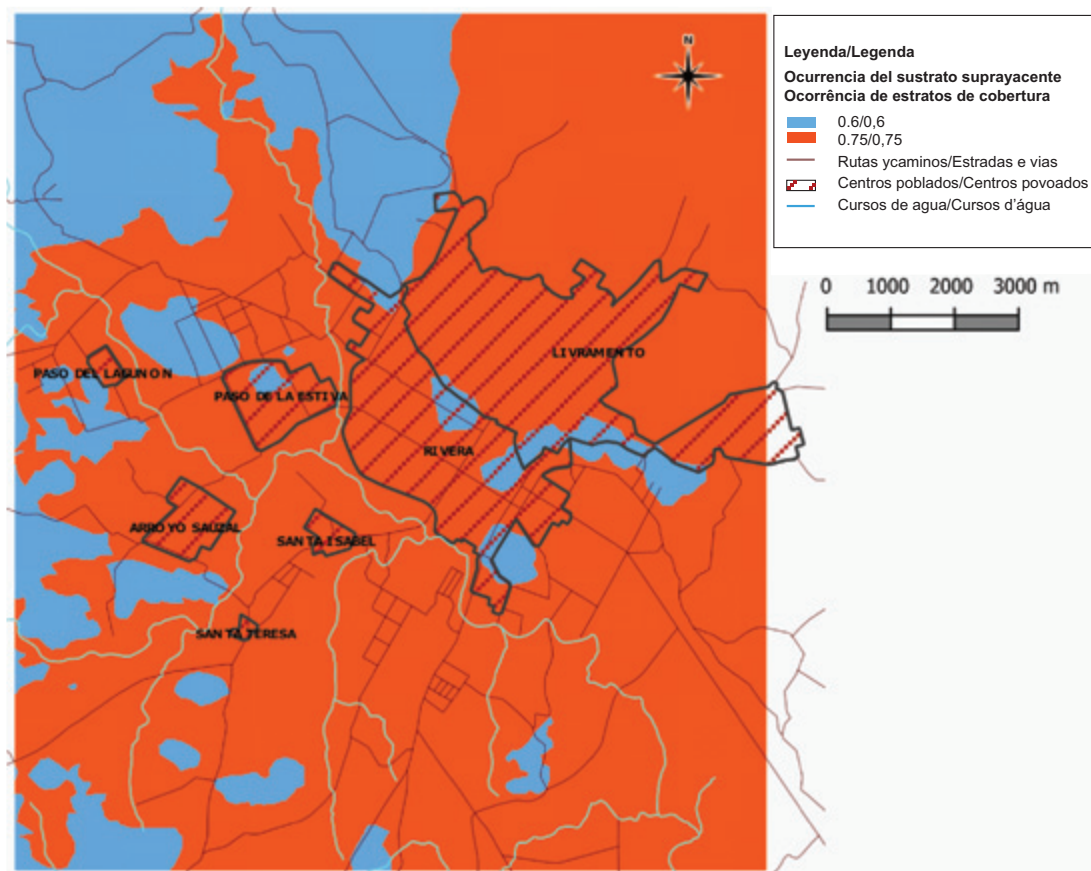


Figura 23.-
Ocorrência de estratos de cobertura.

6.4.2.3 Fator D – distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado

O fator D foi calculado a partir da piezometria, do topo do aquífero e da topografia. Esse fator foi obtido pela diferença entre a superfície do terreno e a superfície de cota de topo do aquífero ou a superfície piezométrica, conforme corresponda.

Figura 23.-
Ocorrência sustrato suprayacente.

6.4.2.3 Factor D – Distancia al agua o al techo del acuífero

El factor D, profundidad del nivel de agua o espesor del confinante, se calcula a partir de la piezometría, el techo del acuífero y la topografía. Este factor se obtuvo por la diferencia entre la superficie de terreno y la superficie de cota de techo del acuífero o la piezometría, según correspondiere.

A ponderação foi feita separando em três intervalos, de menos de 5 m, de 5 a 20 m e mais de 20 m de distância, que correspondem à distância a ser percorrida por um poluente aplicado na superfície para alcançar a zona saturada.

Os resultados aparecem a seguir.

La ponderación se realizó separando en tres intervalos, de menos de 5m, de 5 a 20m, y más de 20m de espesor, espesores correspondiente a la distancia a recorrer por un contaminante aplicado en superficie para alcanzar la zona saturada.

Los resultados se presentan a continuación.

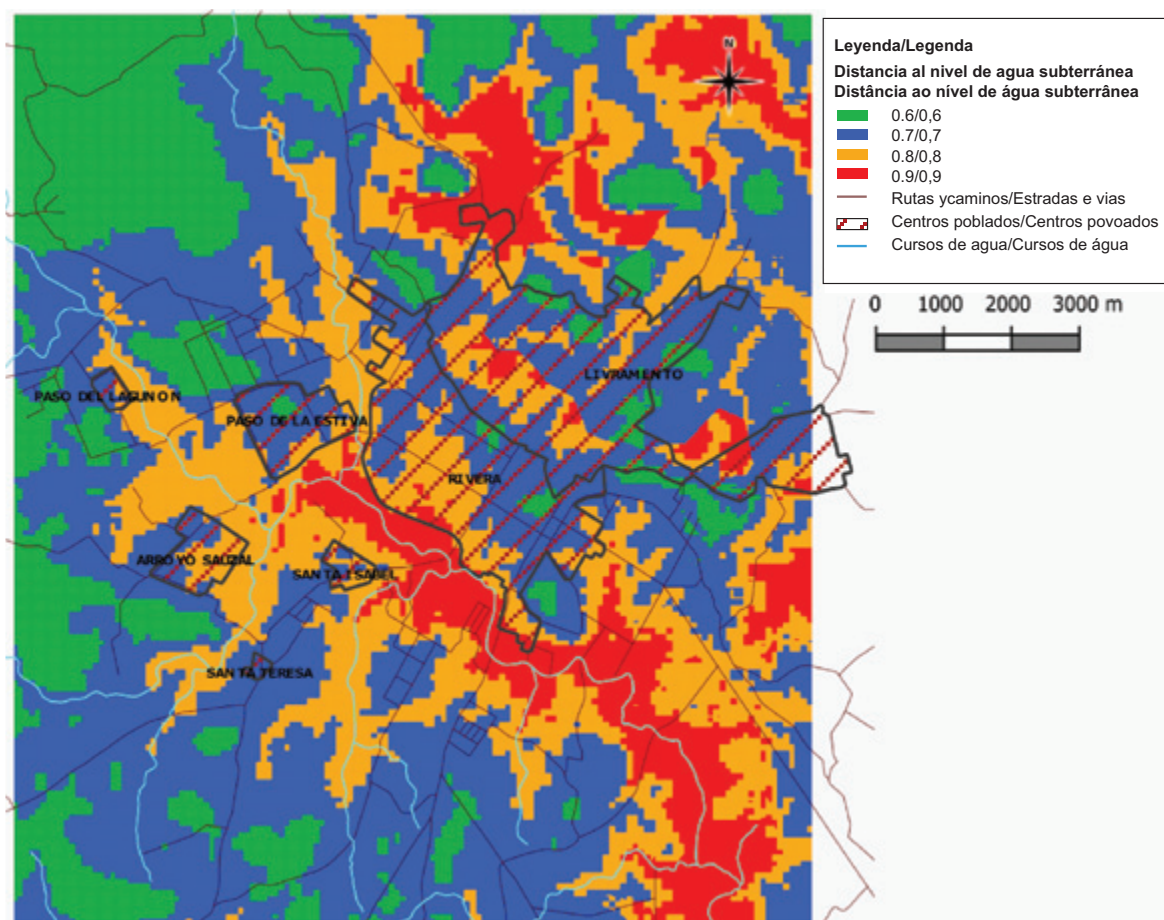


Figura 24.-
Distância ao nível da água subterrânea.

Figura 24.-
Distancia al nivel de agua subterránea..

6.4.2.4 Índice GOD de vulnerabilidade

Analizando em conjunto todos os fatores anteriores, ao multiplicar os coeficientes correspondentes para cada faixa, obtém-se o mapa de índices GOD de vulnerabilidade para contaminação do aquífero profundo.

6.4.2.4 Índice de vulnerabilidad GOD

Analizando en conjunto todos los factores anteriores, al multiplicar para cada sitio los coeficientes correspondientes se obtiene el mapa de índices de Vulnerabilidad GOD a la contaminación del acuífero inferior.

Os resultados aparecem a seguir

A continuación se presentan los resultados.

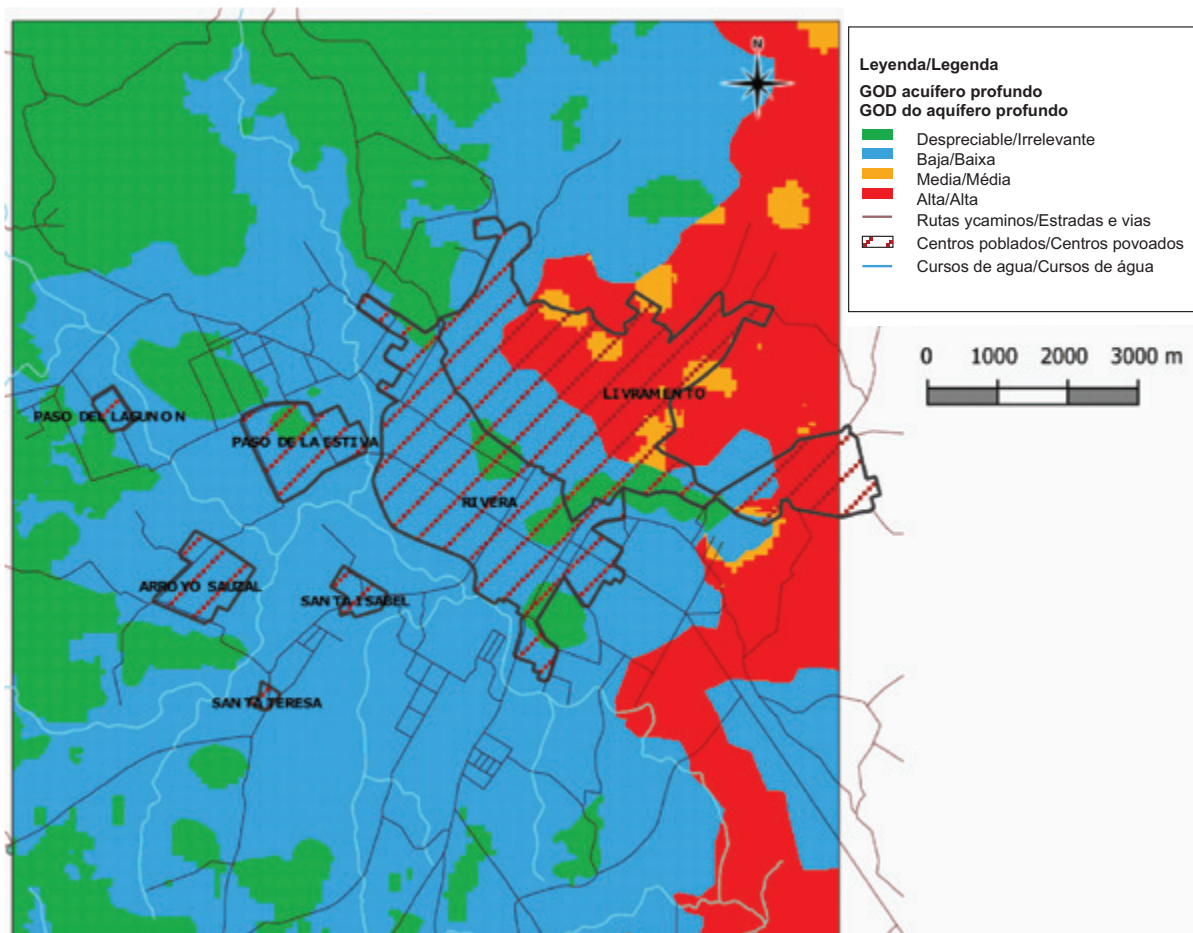


Figura 25.-
GOD acuífero profundo.

6.4.3 Índice de vulnerabilidad GOD del acuífero Guaraní en el área de estudio

El índice de vulnerabilidad GOD del acuífero profundo presenta valores relativos mayores donde el acuífero somero no existe.

Visto de outra maneira, quando existe o aquífero superficial, ele funciona como proteção sobre o profundo,⁹ proteção que não se tem quando este está aflorante.

Como foi dito, a estimativa dos índices de vulnerabilidade é uma importante ferramenta de gestão do uso do solo.

Se forem consideradas a preocupação e a necessidade dos gestores do território, ou empresas, de avaliar a possível locação, deve-se, preferencialmente, contar com um único mapa de vulnerabilidade do Aquífero Guaraní, o qual não deve corresponder a nenhum dos dois aquíferos e sim àquele que esteja aflorando em cada ponto considerado.

Por essa razão, elaborou-se uma composição dos mapas de índices de vulnerabilidade obtidos, determinando para cada um o setor correspondente ao que esteja presente na superfície. Visto de outra maneira, apresentou-se toda a área de ocorrência do aquífero superficial e, onde ele não ocorre, ocorrendo exclusivamente o profundo, agregou-se o índice de vulnerabilidade deste último.

Visto de otra manera, cuando el acuífero somero está presente, este ofrece una cierta protección sobre el profundo⁹, la que no se tiene cuando está aflorando.

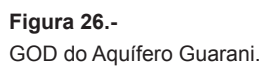
Como se indicó, la estimación de los índices de vulnerabilidad es una importante herramienta de gestión del uso del territorio

Si se considera la preocupación o necesidad de los gestores del territorio o empresas que evalúen la posible locación, es de mayor utilidad el contar con un único mapa de vulnerabilidad del acuífero Guaraní, el cual no corresponda a ninguno de los dos acuíferos, sino a aquel que se encuentra aflorando en cada punto considerado.

Por ello, se realizó una composición de los mapas de índices de vulnerabilidad obtenidos, tomándose de cada uno el sector correspondiente al que se encuentre presente en superficie. Visto de otra manera, se presentó toda el área de presencia del acuífero somero, y donde este no se encontraba, alcanzándose exclusivamente el profundo, se agregó el índice de vulnerabilidad de éste último.

⁹ Note-se que os fenômenos de intercomunicação de níveis hidráulicos por causa de perfurações que tomam água de ambos aquíferos (prática comum na zona) não são considerados pelo método, uma vez que está sendo considerado um poluente que penetra no aquífero pela superfície do terreno.

⁹ Obsérvese que los fenómenos de intercomunicación de niveles hidráulicos debido a perforaciones que toman agua de ambos acuíferos (práctica común en la zona) no son tenidos en cuenta por el método ya que se está pensando en un contaminante que ingresa al acuífero desde la superficie de terreno.



074

7 ANEXO II: ZONAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA. EXEMPLO DO AQUÍFERO FREÁTICO DO GRUPO BAURU (SIMILAR AO AQUÍFERO GUARANI)

7.1 Zonas de proteção de poços e proteção da qualidade da água

O poço Chohav 4 é uma perfuração de 120.5 m de profundidade, escavado em um aquífero freático constituído em arenito, situado na área agrícola. As condições hidrogeológicas ao redor do poço Chohav 4 são similares às dos arenitos cretácicos das formações do Grupo Bauru, Piramboia ou Rosário do Sul (Formação Botucatu) do Aquífero Guaraní, e por essa razão foi selecionado como estudo de caso para delimitação de zonas de proteção de poço e de medidas de proteção da qualidade da água subterrânea.

A seção do aquífero ao redor do poço Chohav 4 é formada por arenitos alternados com camadas de marga calcoargilosa e de argila. A água no arenito flui em direção ao oeste. O índice de porosidade médio do aquífero é de cerca de 0.25. As zonas de proteção do poço foram calculadas com o método de Raio Calculado Fixo (CFR) (ver tabela 5). A tabela 6 apresenta os parâmetros do poço Chohav 4 e as zonas calculadas de proteção. A Zona de Proteção 1, que representa a área operacional do poço, é fixada com um raio de 20 m em torno dele, segundo regulamentações emitidas pelo Ministério da Saúde. A figura 4 descreve a disposição geográfica do poço Chohav 4 e suas áreas de proteção.

7 ANEXO II: ZONAS DE PROTECCIÓN DE POZOS DE SUMINISTRO DE AGUA. EJEMPLO EN UN ACUÍFERO SEDIMENTARIO FREÁTICO DEL GRUPO BAURU (SIMILAR AL DEL ACUÍFERO GUARANÍ)

7.1 Zonas de protección de cabezales de pozos y protección de la calidad del agua

El pozo Chohav 4 es una perforación de 120.5 m de profundidad excavado en un acuífero freático de roca arenisca en una zona agrícola. Las condiciones hidrogeológicas en torno al pozo Chohav 4 son similares a las de las areniscas cretáceas de las formaciones del Grupo Bauru, Pirambóia o Rosario do Sul (Formación Botucatu) del Acuífero Guaraní, y en consecuencia fue seleccionado como caso de estudio para el delineamiento de zonas de protección de cabezal de pozo y de medidas de protección de la calidad del agua subterránea.

La sección del acuífero alrededor del pozo Chohav 4 está compuesta por rocas areniscas alternadas con capas de marga caliza – arcillosa y de arcilla. El agua en el acuífero de arenisca fluye hacia el oeste. El índice de porosidad promedio del acuífero es de alrededor de 0.25. Las Zonas de Protección del pozo han sido calculadas empleando el método de Radio Fijo Calculado (CFR) (ver Tabla 5). La Tabla 6 presenta los parámetros del pozo Chohav 4 y las áreas calculadas de protección. La Zona de Protección 1, que representa el área operativa del pozo es fijada como un radio de 20 metros alrededor del mismo, según las reglamentaciones emitidas por el Ministerio de Salud Pública. La Figura 4 describe la disposición geográfica del pozo Chohav 4 y las áreas de protección de cabecera del mismo.

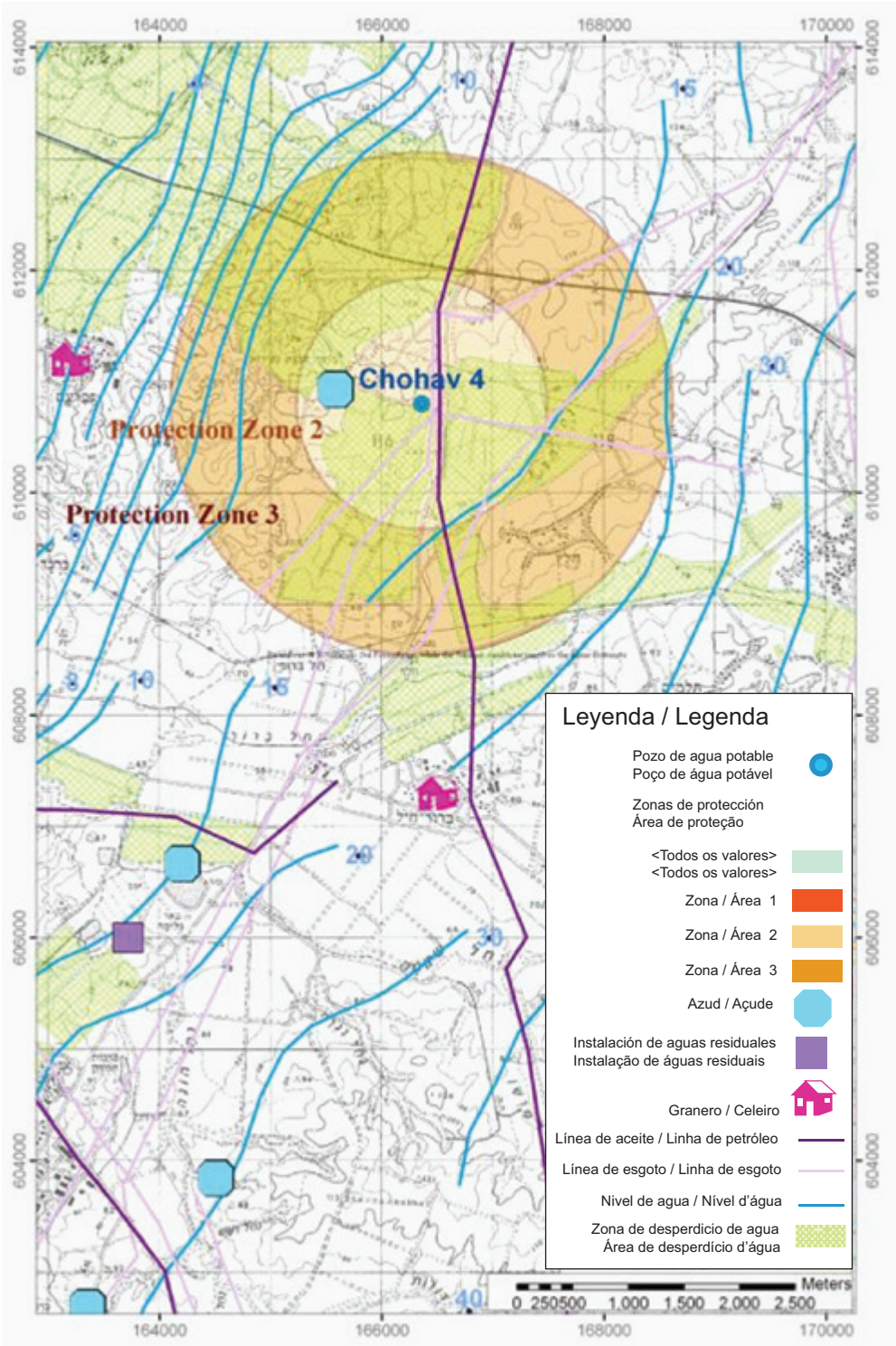


Figura 27.-
Áreas 2 e 3 de Proteção de Cabeceira do Poço Chohav 4.

Figura 27.-
Áreas 2 y 3 de Protección de Cabecera del Pozo Chohav 4.

Equação de Raio Calculado Fixo:	$r_{\min} = FS \sqrt{Qt / nH\pi}$
$r_{\min}$	Raios de Zonas (2 e 3) medidos a partir do poço (m).
Q	Volume anual médio de bombeamento — m³/ano.
t	Tempo de trânsito = dois anos para Zona 2; cinco anos para Zona 3 ou outro TDT aceitável (p. ex., 50 dias para Zona 2 e 500 dias para Zona 3), ou cálculo de tempo de trajeto (TDT baseado na velocidade do fluxo da corrente).
n	Porosidade (relação entre o volume de poros no aquífero e o volume total) Utilizar o valor real se houver. Caso se conheça a litologia do aquífero, mas não sua porosidade, usar: Xistos fraturados ou rocha cristalina fraturada (fluxo difuso) 0.02 Rochas solúveis fraturadas (p. ex.: calcáreo) (fluxo difuso) 0.05 Arenito ou deslizamento glacial 0.15 Arenito fraturado (fluxo difuso) 0.17 Aluvião, cascalho, areia; arenito não consolidado, parcialmente consolidado e conglomerados 0.25.
H	Seção filtrante ou intervalo aberto ¹ do poço (m). Comprimento real, ou 10 pés (3.408 m)
π	$\pi = 3.1416$.
FS	Fator de segurança: (para abastecer a zona de amortecimento) = 1.3 (quando se conhecem todos os valores) = 1.5 (quando não se conhecem um ou mais valores).

Tabela 7.-

Equação de Raio Calculado Fixo (CFR), definições e valores por falta.

Ecuación de Radio Calculado Fijo:	$r_{\min} = FS \sqrt{Qt / nH\pi}$
$r_{\min}$	Radio de Zonas 2 (y 3) medido desde cabezal de pozo (en metros).
Q	Nivel promedio anual de bombeo m³ por año.
t	Tiempo de Tránsito = 2 años para Zona 2; 5 años para Zona 3 u otro TOT aceptable (ejemplo: isócronas de 50 días para Zona 2 500 días para Zona 3), o cálculo de TOT basado en velocidad del caudal.
n	Porosidad (Proporción de volumen de poros en el acuífero respecto del volumen total) Utilizar valor real si se conoce. Si se conoce la litología del acuífero, pero no su porosidad, usar: Esquistos fracturados o roca cristalina fracturada (flujo difuso) 0.02 Rocas solubles fracturadas (p.ej., piedra caliza) (flujo difuso) 0.05 Piedra arenisca o deslizamiento glacial 0.15 Piedra arenisca fracturada (flujo difuso) 0.17 Aluvión, grava, arena; arenisca no consolidada, parcialmente consolidada y conglomerados 0.25.

Ecuación de Radio Calculado Fijo:	$r_{\min} = FS \sqrt{Q / nH\pi}$
H	Intervalo filtrado o perforado ¹ del pozo (metros). Longitud real, o 10 pies (3.408 metros).
π	$\pi = 3.1416$.
FS	Factor de seguridad: (para proporcionar 'Zona de Amortiguación') = 1.3 (cuando todos los valores son conocidos) = 1.5 (cuando se desconocen uno o más valores).

Tabla 7.-

Ecuación de Radio Fijo Calculado (CFR), Definiciones y Valores por Defecto.

Zona de Proteção 3 (m)	2256.9
Zona de Proteção 2 (m)	1128.4
Zona de Proteção 1 (m)	20
Total para Zona 3 (dias)	200
Total para Zona 2 (dias)	50
Porosidade (%)	25
Volume anual médio de bombeamento (m3/ano)	490000
Q – m ³ /h	70
Seção filtrante (m)	41.4
Profundidade do poço (m)	120.5
Cota do poço (m)	90
X	1 66.36 0
Y	610.800
Nome do poço	Chohav 4
Identificação do poço	11011

Tabela 8.-

Resumo dos resultados obtidos por Defeito.

Zona de Protección 3 (m)	2256.9
Zona de Protección 2 (m)	1128.4
Zona de Protección 1 (m)	20
TOTAL para Zona 3 (días)	200
TOTAL para Zona 2 (días)	50
Porosidad (porcentaje)	25
Volumen promedio anual de bombeo (m3/año)	490000
Q – m ³ /h	70
Intervalo filtrado (m)	41.4
Profundidad de pozo (m)	120.5
Elevación de pozo (m)	90
X	1 66.36 0
Y	610.800
Nombre del pozo	Chohav 4
Identificación del pozo	11011

Tabla 8.-

Resumo dos resultados obtidos por Defecto.

7.2 Medidas de proteção da qualidade da água

Algumas tubulações de petróleo, assim como uma instalação de tratamento de águas residuais e zonas irrigadas com águas residuais reutilizadas, superpõem-se com as zonas de proteção 2 e 3 do poço *Chohav 4*, as quais representam a área de proteção microbiológica (área de atenuação) e a área da zona de captura respectivamente.

7.2 Medidas de protección de la calidad del agua

Algumas tuberías de petróleo, así como también una instalación de tratamiento de aguas residuales y zonas irrigadas mediante aguas residuales recicladas se superponen con las zonas de protección de cabeceras 2 y 3 del Pozo *Chohav 4*, las cuales representan el área de protección microbiana (área de atenuación), y el área de la zona de captura respectivamente.

Para garantir a proteção da qualidade da água é essencial adotar medidas de prevenção para proteger o abastecimento de água de potenciais fontes de contaminação. O Anexo III deste relatório descreve dois métodos para proteção da fonte hídrica: o Programa de Avaliação e Proteção de Fontes Hídricas do Estado do Colorado – *Colorado Source Water Assessment and Protection Program* – SWAP (2004, 2007) e o **Documento Técnico do Usuário para Proteção de Fontes Hídricas Subterrâneas do Estado de Utah – *Utah Ground Water Source Protection User's Guide*** (2007). Para fins de simplificação, é apresentado a seguir o exemplo da fase de proteção da metodologia do SWAP do Colorado.

7.2.1 Participação dos setores interessados

Envolver no projeto todas as entidades interessadas, institutos de planejamento e agências locais, estatais e federais no processo de planejamento da proteção das fontes hídricas.

7.2.2 Desenvolvimento e implementação de um plano de proteção

O Plano de Proteção da Fonte Hídrica deve basear-se nos resultados da fase de avaliação e nas informações específicas do local emitidas por gestores e instituições locais, estaduais e federais, ou pelos correspondentes municipais. O plano deve levar em conta melhores práticas para gestão da proteção da água. No caso do poço *Chohav 4*, isso implicará:

- A construção de um cercado ao redor da Zona de Proteção 1 (círculo de 20 m de raio ao redor do poço) e a proibição de qualquer atividade que não esteja relacionada com a extração de água em si. Recomenda-se incisivamente que esta zona permaneça sob propriedade, controle e supervisão do órgão gestor dos recursos hídricos local.
- A proteção das tubulações de petróleo e de águas servidas de potenciais perdas e filtrações.
- A interrupção da irrigação por meio de águas residuais tratadas nas zonas de proteção propriamente ditas, ou a permissão da irrigação apenas com água

A fin de asegurar la protección de la calidad del agua es esencial emplear medidas de prevención para proteger el suministro del agua de fuentes potenciales de contaminación. El Anexo III del presente informe describe dos métodos para la protección de la fuente hídrica: el Programa de Evaluación y Protección de Fuentes Hídricas del Estado de Colorado – (Colorado Source Water Assessment and Protection Program – SWAP (2004, 2007), y la Guía de Usuarios para la Protección de Fuentes Hídricas Subterráneas del Estado de Utah (Utah Ground Water Source Protection User's Guide) (2007). Para mayor simplicidad, el ejemplo que se presenta a continuación la fase de protección de la metodología del SWAP de Colorado.

7.2.1 Participación de los Sectores Interesados

Involucrar en el proyecto a todas las entidades interesadas, institutos de planeamiento y agencias locales, estatales y federales en el proceso de planificación de protección de las fuentes hídricas.

7.2.2 Desarrollo e implementación de un Plan de Protección

El Plan de Protección de la Fuente Hídrica estará basado en los resultados de la fase de evaluación y en las informaciones específicas del sitio emitidas por los planificadores locales y las instituciones locales, estatales y federales, o las municipalidades correspondientes. El plan tomará en consideración las mejores prácticas para el manejo de la protección del agua. En el caso del pozo Chohav 4, ello comprenderá:

- Construcción de un cercado alrededor de la zona de protección 1 (círculo de 20 m de radio alrededor del pozo) y la prohibición de cualquier actividad que no esté relacionada con la extracción del agua en sí misma. Se recomienda enérgicamente que esta zona quede bajo la propiedad, control y supervisión de la autoridad local de aguas.
- Protección de las tuberías de petróleo y de aguas negras de potenciales pérdidas y filtraciones.
- Cese del riego por medio de aguas residuales tratadas en las zonas de protección propriamente dichas, o bien permitir sólo el riego con agua potable, o

potável ou proveniente de fontes de água autorizadas segundo os regulamentos existentes.

- A proibição da realização de atividades poluentes ou uso de fontes de contaminação (como construções, fábricas, matadouros, redes de tratamento de água etc.), dentro da zona de proteção do poço.

7.2.3 Monitoramento/atualização do plano de proteção

- A fim de identificar resultados mensuráveis e o êxito das medidas de proteção implementadas, recomenda-se perfurar 1 ou 2 poços de monitoramento de diâmetro pequeno, duas polegadas (2"), que alcancem o lençol freático, e recolher amostras da água tanto desses poços quanto do poço Chohav 4. Recomenda-se o recolhimento anual de amostras durante os primeiros cinco anos após a implementação do plano de proteção. Pode-se diminuir a frequência de recolhimento da amostra caso não se observe nenhuma diminuição da qualidade da água.
- Atualizar a cada cinco anos e com base nas novas tecnologias de proteção disponíveis, o plano de proteção das fontes potenciais de contaminação adjacentes ao poço.

proveniente de fuentes de agua autorizadas por las reglamentaciones existentes.

- Prohibición de realización de actividades contaminantes o uso de fuentes de contaminación (tales como edificaciones, fábricas, mataderos, plantas de tratamiento de agua, etc.), dentro de la zona de protección del pozo.

7.2.3 Monitoreo/Actualización del Plan de Protección

- Con el objeto de identificar resultados mensurables y el éxito de las medidas protectivas implementadas, se recomienda perforar 1 a 2 pozos de monitoreo de escaso diámetro ("2") que alcancen la napa hídrica, y efectuar muestreos del agua tanto desde dicho pozos como del pozo CHOHAV 4. La frecuencia de muestreo recomendada es de extracción de una muestra anual durante los primeros cinco años luego de la implementación del plan de protección. La frecuencia puede ser reducida si no se observa deterioro de la calidad del agua.
- Actualizar el plan de protección cada cinco años respecto de las fuentes potenciales de contaminación adyacentes al pozo, y sobre la base de las tecnologías de protección disponibles.

8 ANEXO III EJEMPLOS DE PLANOS DE PROTEÇÃO

O conceito de proteção das fontes de abastecimento de água subterrânea foi estabelecido há muito tempo e faz parte dos códigos legais de alguns países europeus há várias décadas (FOSTER et al., 2003). Este conceito evoluiu bastante e vem sendo regulamentado gradualmente em todo o mundo.

Em muitos países, a responsabilidade pelos aquíferos e pela proteção das fontes de água está a cargo de diferentes autoridades, agências de proteção do meio ambiente, companhias de água, proprietários particulares, municipais, locais etc.

8 ANEXO III - EJEMPLOS DE PLANES DE PROTECCION

El concepto de protección de las fuentes de suministro de agua subterránea ha sido establecido hace ya mucho tiempo, y forma parte de los códigos legales de algunos países europeos desde hace ya varias décadas (Foster et al, 2003). Este concepto ha evolucionado considerablemente, y está siendo regulado gradualmente en todo el mundo.

La responsabilidad por los acuíferos y la protección del fuentes de agua en mucho países está a cargo de diferentes autoridades, agencias de protección del medio ambiente, empresas de agua, propietarios privados, municipales locales, etc.

Foram desenvolvidas algumas metodologias de proteção a fim de satisfazer estruturas estatutárias e sistemas regulamentares locais (por exemplo, o Programa de Fontes Hídricas e Proteção, Denver, Colorado, novembro de 2004 (303) 692-3500, 2007; o **Documento Técnico do Usuário para Proteção de Fontes de Água do Estado de Utah**, janeiro de 2007, e muitos outros). A maior parte das metodologias compartilha conceitos básicos comuns. Isso ocorre, pois foram elaboradas para a proteção de fontes de água individuais e envolvem passos e ações previstas para avaliar a contaminação das águas subterrâneas dentro da Área de Proteção do Poço. Essas metodologias também trazem passos a empreender juntamente com a implementação de planos de proteção de captações de águas subterrâneas.

As seções seguintes resumem os principais componentes das metodologias de proteção de fontes de água subterrânea do Programa de Avaliação e Proteção de Fontes Hídricas – SWAP (2004, 2007) e das Diretrizes de Usuários para a Proteção de Fontes de Água Subterrânea do Estado de Utah (2007), a título de marcos de ação e diretrizes para proteção de fontes. Nesse ponto é preciso enfatizar que essas diretrizes devem até mesmo ser desenvolvidas com maior profundidade e ajustadas convenientemente para dar respostas aos aspectos locais e à estrutura estatutária e regulamentar presente nos diferentes países do Sistema Aquífero Guaraní (SAG).

8.1 Plano do Projeto Integral de Avaliação e Proteção de Fontes Hídricas do Estado do Colorado (ISWAP)

O Programa de Avaliação e Proteção de Fontes Hídricas – SWAP do Estado do Colorado foi elaborado com base em um enfoque “preventivo” em relação à contaminação de um sistema público de abastecimento de água, constituído por um processo de duas fases: fase de avaliação e fase de proteção (figura 15).

A **fase de avaliação** engloba o conhecimento da origem da água da fonte, dos poluentes potenciais que podem ameaçá-la, e o quão susceptível é cada fonte à contaminação potencial.

Como muitos sistemas de abastecimento obtêm

Ciertas metodologías de protección fueron desarrolladas a fin de satisfacer estructuras estatutarias y sistemas reglamentarios locales (por ejemplo, el Programa de Fuentes Hídricas y Protección, Denver, Colorado, Noviembre de 2004 (303) 692-3500, 2007; el Documento Técnico de Usuario para la Protección de Fuentes de Agua del estado de Utah, Enero de 2007, y muchos otros). La mayor parte de las metodologías comparten conceptos básicos comunes, puesto que han sido diseñadas para proteger fuentes de agua individuales, e involucran pasos y acciones a implementar para evaluar la contaminación de las aguas subterráneas dentro del área de protección de pozo, y pasos a emprender al tiempo de implementar planes de protección de fuentes de aguas subterráneas.

Las secciones siguientes resumen los principales componentes de las metodologías de protección de fuentes hídricas del Programa de Evaluación y Protección de Fuentes Hídricas – SWAP (2004, 2007), y de las Directivas de Usuarios para la Protección de Fuentes de Agua Subterránea del Estado de Utah (2007), a título de marcos de acción y directivas para protección de fuentes. Debe señalarse en este punto que estas directivas deben aún ser desarrolladas en mayor profundidad y ajustadas convenientemente para hacer frente a los aspectos locales, así como a la estructura estatutaria y reglamentaria presente en los distintos países del Sistema Acuífero Guaraní (SAG).

8.1 Plan del proyecto integral de evaluación y protección de fuentes hídricas del estado de colorado (ISWAP)

El Programa de Evaluación y Protección de Fuentes Hídricas – SWAP del Estado de Colorado ha sido diseñado para emplear un enfoque “preventivo” en cuanto a la contaminación de un sistema público de abastecimiento de agua, constituido por un proceso de dos fases: la fase de evaluación y la fase de Protección (Figura 15).

La Fase de Evaluación comprende el conocimiento de dónde proviene el agua de la fuente, qué contaminantes la amenazan potencialmente, y cuán susceptible es cada fuente a la contaminación potencial.

Debido a que muchos sistemas de abastecimiento

a água de múltiplas fontes (em várias captações subterrâneas e superficiais), a susceptibilidade de um sistema público de fornecimento de água é encontrada por meio da análise de cada uma das fontes. Para isso, analisam-se as propriedades de seu entorno e a disposição física, além das ameaças de potenciais focos de poluição.

Os resultados da análise são usados na estimativa do grau de susceptibilidade de cada uma das fontes de água.

A **fase de proteção** é um processo voluntário e contínuo, por meio do qual um sistema de abastecimento público de água e a comunidade local tomam medidas preventivas para proteger o fornecimento de água. Essa fase pode ser útil na execução de ações que visem a evitar tratamentos desnecessários ou custos de substituição associados à contaminação da fonte. Essa fase utiliza resultados da avaliação no desenvolvimento e na implementação de uma gestão adequada e estratégias de resposta, a fim de proteger as

obtienen el agua de fuentes múltiples (en varias captaciones subterráneas y en tomas superficiales), la susceptibilidad de un sistema público de suministro de agua es obtenida mediante el análisis de cada una de las fuentes. Para ello se analizan las propiedades de su entorno y la disposición física y las amenazas de las fuentes contaminantes potenciales.

Los resultados del análisis son utilizados para redactar una estimación del grado de susceptibilidad de cada una de las fuentes de agua.

La **Fase de Protección** es un proceso voluntario y continuo, mediante el cual un sistema de abastecimiento público de agua y la comunidad local emplean medidas preventivas para proteger el suministro de agua. Esta fase puede ser utilizada para emprender acciones tendientes a evitar tratamientos innecesarios o costos de sustitución asociados con la contaminación de la fuente. La misma emplea los resultados de la evaluación a efectos de desarrollar e implementar la gestión apropiada y estrategias de respuesta para proteger



Figura 29.-
Componentes do Programa SWAP do Colorado.

Figura 29.-
Componentes del Programa SWAP de Colorado.

fontes hídricas de possíveis contaminações. O Programa de Avaliação e Proteção de Fontes Hídricas foi desenvolvido para mananciais superficiais e subterrâneos

8.1.1 Fase de avaliação

Delimitação

A delimitação da área de captação de um poço, drenagem superficial ou túnel, e a definição da área ou zonas de proteção de poços.

Inventário de fontes potenciais de contaminação

- Elaboração de um inventário de fontes potenciais de contaminação encontradas em cada uma das áreas de avaliação de captações de água definidas; de qualquer atividade destinada a manufaturar, produzir, usar, armazenar, eliminar ou transportar poluentes regulamentados ou não; desde uma fonte pontual de contaminação (p. ex., tanques de armazenamento de petróleo, postos de gasolina, fábricas e instalações industriais, áreas municipais de disposição de resíduos sólidos, como lixões e aterros sanitários etc.), até um local não pontual de contaminação (áreas residenciais, terras de cultivos agrícolas, currais, campos irrigados com efluentes reciclados etc.).
- Criação de uma biblioteca de mapeamento eletrônico (por exemplo, um Sistema de Informação Geográfica — SIG) em conjunto com informação da delimitação da área da fonte hídrica.
- Elaboração de mapas de inventários de fontes poluentes e tabelas resumidas correspondentes a cada uma das áreas de avaliação de cada sistema público de abastecimento de água.
- Validação do inventário por meio da base de dados da autoridade local.

Análise de susceptibilidade

Realização de uma análise de susceptibilidade de cada fonte hídrica e avaliação do potencial de contaminação da fonte em concentrações que possam representar um risco para a saúde de seus consumidores.

Os dois componentes primários do modelo de

las fuentes hídricas de su potencial contaminación. El Programa de Evaluación y Protección de Fuentes Hídricas fue desarrollado para recursos superficiales y aguas subterráneas.

8.1.1 Fase de Evaluación

Delineamiento

El delineamiento del área que contribuye agua a un pozo, corriente de superficie o túnel, y definición del área o áreas de protección de cabezales de pozos.

Inventario de Fuentes potenciales de contaminación

- Generación de un inventario de fuentes potenciales de contaminación ubicadas dentro de cada una de las áreas definidas de evaluación de fuentes de agua, de cualquier actividad destinada a manufaturar, producir, usar, almacenar, eliminar o transportar contaminantes reglamentados o no reglamentados desde una fuente puntual de contaminación (p.ej. depósitos de petróleo, estaciones gasolineras, fábricas e instalaciones industriales, sitios municipales de relleno de residuos sólidos, etc.), hacia un sitio no puntual de contaminación (áreas residenciales, tierras de cultivos agrícolas, granjas ganaderas campos irrigados mediante efluentes reciclados, etc.).
- Creación de una biblioteca de mapeo electrónico (por ejemplo, un Sistema de Información geográfica-GIS) conjuntamente con información del delineamiento del área de la fuente hídrica, y
- Generación de mapas de inventarios de fuentes contaminantes y tablas de resumen correspondientes a cada una de las áreas de evaluación de cada sistema público de abastecimiento de agua.
- Validación del inventario mediante la base de datos de la autoridad local.

Análisis de Suceptibilidad

Realización de un análisis de susceptibilidad de cada fuente hídrica y evaluación del potencial de dicha fuente de ser contaminada en concentraciones que puedan representar un riesgo para la salud de sus consumidores.

Los dos componentes primarios del modelo de

análise de susceptibilidade são:

- 1) Determinação da vulnerabilidade física da fonte hídrica.
- 2) Ameaça de contaminação da fonte apresentada por uma fonte potencial de contaminação.

A determinação da ameaça de contaminação de uma fonte implica a análise do potencial de migração de elementos poluentes para esta fonte, do risco de contaminação gerado pela fonte de poluição, do volume do poluente, ou poluentes, em uso e da probabilidade de que os poluentes sejam liberados da fonte de contaminação na água a ser consumida. Uma metodologia detalhada para a estimativa do potencial de susceptibilidade à contaminação requer a utilização de um sistema de matriz de qualificação pontual para as variáveis dependentes e independentes no modelo de análise de susceptibilidade.

Divulgação ao público do Relatório SWAP

Divulgação do Relatório do Programa SWAP (avaliação e proteção de fontes hídricas) para que o consumidor tome ciência das possíveis ameaças a suas fontes de água potável.

8.1.2 Fase de proteção

O projeto correspondente à fase de proteção do Programa de Avaliação e Proteção de Fontes Hídricas (SWAP) tem quatro fases principais relatadas a seguir:

Envolver as partes interessadas

Participação de todas as partes interessadas ou afetadas, gestores de políticas, organizações comunitárias, agências locais, municipais, estaduais e federais, e estímulo à participação pública no processo de planejamento da proteção. O grupo de liderança e/ou o sistema público de água potável deveriam conduzir uma iniciativa organizada para aumentar a conscientização pública, identificar grupos e/ou indivíduos interessados em colaborar, definir e implementar as tarefas necessárias de avaliação e planejamento. Um comitê principal funcionará nesses casos como conselho encarregado da tomada de decisões a fim de desenvolver e eventualmente implementar o plano estabelecido de proteção da fonte de água.

análisis de susceptibilidad son los siguientes:

- 1) Asentamiento de la vulnerabilidad física de la fuente hídrica, y
- 2) Amenaza de contaminación de la fuente presentada por una fuente potencial de contaminación

La determinación de la amenaza de contaminación de una fuente involucra el examen del potencial de migración de elementos contaminantes hacia la fuente de agua, el peligro contaminante originado por la fuente de polución, el volumen del contaminante o contaminantes en uso, y la probabilidad de que los contaminantes se liberen desde la fuente de contaminación al agua a consumir. Una metodología detallada para la estimación de la susceptibilidad potencial de contaminación involucra la utilización de un sistema de matriz de calificación puntual para las variables dependientes e independientes en el modelo de análisis de susceptibilidad.

Difusión del Informe SWAP al Público

Difusión pública del Informe del Programa SWAP (Evaluación y Protección de Fuentes Hídricas) para que el consumidor tome conciencia de las amenazas potenciales a sus fuentes de agua potable.

8.1.2 Fase de Protección

El proyecto correspondiente a la fase de Protección del Programa de Evaluación y Protección de Fuentes Hídricas (SWAP) consiste en los cuatro Componentes principales que se indican a continuación:

Involucrar a las partes interesadas

Participación de todas las partes interesadas o afectadas, planificadores, organizaciones comunitarias, agencias locales, municipales, estatales y federales y estímulo de la participación pública en el proceso de planeamiento de la protección. El grupo de liderazgo y/o el sistema público de agua potable deberían conducir un esfuerzo bien organizado para elevar la conscientización pública, identificar grupos y/o individuos interesados en colaborar, y definir e implementar las tareas necesarias de evaluación y planificación. Un comité de guía servirá en estos casos como cuerpo a cargo de la toma de decisiones a los efectos de desarrollar y eventualmente implementar el plan establecido de protección de la fuente de agua.

Desenvolvimento de um plano de proteção

O esforço de planejamento da proteção da fonte de água começa com uma exaustiva compreensão dos resultados da fase de avaliação e da informação específica do local pelas partes interessadas.

Utiliza-se uma planilha previamente elaborada do plano de proteção para a formulação dos planos de proteção das fontes de água. Essa planilha deve simplificar todo o processo e tornar possível a adaptação de medidas de proteção da fonte e as “melhores práticas de gestão” aos elementos básicos, necessidades e circunstâncias específicas.

A planilha do plano de proteção deve servir como documento guia no processo de planejamento da proteção e deve gerar um documento de fácil compreensão e uso, que o Comitê Principal e os sistemas de abastecimento público de água poderão completar eficientemente e do qual serão responsáveis.

Implementação do plano de proteção

Uma vez que o plano de proteção de fontes de água deve identificar:

- 1) as ferramentas específicas de gestão que o sistema público de abastecimento de água e a comunidade empregarão para proteger sua fonte de água; e
- 2) de que maneira o sistema público e a comunidade o colocarão em prática.

A redução do risco por contaminação accidental de fontes de água potável é afetada pela forma como o sistema de abastecimento público e a comunidade utilizam as ferramentas específicas de gestão ou as ações que empreendem para proteger a água de suas fontes.

Monitoramento/atualização do plano de proteção

Quando se elabora um plano de proteção, cada sistema de abastecimento público de água é incentivado a identificar resultados mensuráveis que possam ser usados no monitoramento do sucesso das medidas de proteção implementadas. Esses resultados mensuráveis podem ser tão simples quanto a identificação de melhores

Desarrollo de un plan de protección

El esfuerzo de planeamiento de protección de la fuente de agua comienza con una exhaustiva comprensión de los resultados de la fase de evaluación y de la información específica del sitio por parte de las partes interesadas.

Se utiliza una plantilla previamente confeccionada del plan de protección para desarrollar los planes de protección de las fuentes de agua. La plantilla así confeccionada debería simplificar todo el proceso, y otorgará asimismo una oportunidad de adaptar las medidas de protección de la fuente y las “mejores prácticas de gestión” a los elementos básicos y a las necesidades y circunstancias específicas.

La plantilla del plan de protección servirá como documento de guía para el proceso de planeamiento de la protección y facilitará un documento de fácil comprensión y empleo, que el Comité de Guía y los sistemas de abastecimiento público de agua podrán completar eficazmente y hacerse cargo de su propiedad.

Implementación del plan de protección

Una vez que el plan de protección de fuentes de agua debe identificar:

- 1) las herramientas específicas de gestión que el sistema público de abastecimiento de agua y la comunidad emplearán para proteger su fuente de agua, y
- 2) de qué manera el sistema público y la comunidad lo llevarán a la práctica.

La reducción del riesgo por contaminación accidental de las fuentes de agua potable es afectada por la mejor forma en que el sistema de abastecimiento público y la comunidad utilizarán las herramientas específicas de gestión o las acciones que emprenderán para proteger el agua de sus fuentes.

Monitoreo/actualización del plan de protección

En el desarrollo de un plan de protección, cada sistema de abastecimiento público de agua es estimulado a identificar resultados mensurables que puedan ser usados para monitorear el éxito de las medidas de protección que han implementado. Estos resultados mensurables pueden ser tan simples como la identificación de las mejores

não haja informação específica do poço indicado (como, por exemplo, um teste de aquífero), podem ser usados os melhores dados disponíveis para determinar as áreas de proteção. As zonas deveriam ser desenvolvidas tendo em vista que os dados podem variar na medida em que se disponha de mais informação específica sobre o aquífero, uma vez que o poço seja perfurado e testado.

2. **Inventário de Fontes Potenciais de Contaminação** – o inventário é uma lista prioritária de todas as fontes potenciais de contaminação (PCS), nas zonas de proteção, e os riscos associados. A priorização pode ser feita com a ajuda das diretrizes de estabelecimento de prioridades da Agência de Proteção Ambiental (EPA): *Managing Ground Water Contamination Sources in Wellhead Protection Areas – A Priority Setting Approach*, (EPA 570/9-91-023) ou qualquer outro conjunto de diretrizes. O inventário deve ser atualizado periodicamente.
3. **Identificação e avaliação de controles de PCS** – a avaliação permite determinar as PCS adequadamente controladas e as que não são adequadamente controladas, de acordo com ações de regulação, das melhores práticas de prevenção à contaminação e aos controles físicos. Uma vez separadas as fontes potenciais de contaminação (PCS) controladas adequadamente das que não o são, pode-se dar início ao planejamento dos terrenos e levar à prática as estratégias convenientes de gestão e manejo, apenas para as PCS que foram avaliadas e controladas adequadamente.
4. **Mapa e lista de propriedade de terras** – é preciso que se tenha um mapa de propriedade das terras que inclua todas elas nas zonas um e dois, ou mesmo em toda a zona submetida à gestão.
5. **Contratos de uso de terras, cartas de intenção e regulamentos de distribuição por zonas** – são necessários contratos de uso da terra nas zonas de proteção de poços (WHPA). Os convênios de uso do terreno feitos por escrito devem indicar se o proprietário concorda em não instalar PCS não controladas dentro das áreas de proteção, exceto nos casos em que

una prueba de acuífero), podrán utilizarse los mejores datos disponibles para determinar las áreas de protección. Las zonas deberían ser desarrolladas tomando en cuenta que dichos datos pueden variar en la medida en que se disponga de mayor información específica acerca del acuífero una vez que el pozo sea perforado y ensayado.

2. **Inventario de fuentes potenciales de contaminación** – El inventario es una lista prioritaria de todas las Fuentes Potenciales de Contaminación (PCS) dentro de las zonas de protección, y sus riesgos asociados. La priorización puede ser realizada con la ayuda de las directivas de fijación de prioridades de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA): *“Managing Ground Water Contamination Sources in Wellhead Protection Areas – A Priority Setting Approach”*, (EPA 570/9-91-023) o cualquier otro conjunto de directivas. El inventario debe ser mantenido y actualizado periódicamente.
3. **Identificación y evaluación de controles de corrientes** – La evaluación permite determinar cuáles de las PCS son controladas apropiadamente y cuáles no lo son, de acuerdo con los controles de regulación, de las mejores prácticas de prevención de la contaminación prevención, y controles físicos. Una vez que se han separado las Fuentes Potenciales de Contaminación (PCS) adecuadamente controladas de las que no lo son, puede comenzarse a planificar los terrenos y llevar a la práctica las estrategias convenientes de gestión y manejo, sólo para las PCS que han sido evaluada y no controladas adecuadamente.
4. **Mapa y lista de propiedad de tierras** – Ello necesita de un mapa de propiedad de las tierras que las incluya todas ellas dentro de las zonas uno y dos, o bien la zona completa sometida a la gestión.
5. **Contratos de uso de tierras, cartas de intención y ordenanzas de distribución por zonas** – Se requieren contratos de uso de la tierra en las zonas de protección de pozos (WHPA). Los convenios de uso del terreno redactados por escrito deben indicar si su propietario acuerda no emplazar PCS no controladas dentro de las áreas de protección, a menos que se implementen normas para impedir descargas de contaminantes. Cualesquiera restricciones deben asimismo

se implementem normas para impedir descargas de poluentes. Todas as restrições devem, portanto, comprometer eventuais herdeiros, sucessores e/ou designados, e esses convênios devem ser apresentados e registrados perante as autoridades locais de gestão dos recursos hídricos.

6. **Cartas de intenção e contratos de uso de terras** – podem-se utilizar cartas de intenção registradas em cartórios públicos ao submeter inicialmente uma PER. Essas cartas devem incluir uma declaração na qual o proprietário concorda em registrar um contrato de uso da terra no cartório de registros do distrito correspondente, se a fonte demonstra ser aceitável. Deve-se apresentar uma cópia do contrato de uso da terra perante DDW (ou secretaria de recursos hídricos), sendo necessária uma carta de aprovação antes de o sistema de abastecimento de água (PWS) ser autorizado a incorporar a nova fonte hídrica ao sistema público.
7. **Regulamentos de divisão em zonas** – deve-se impedir o acesso de fontes de contaminação potenciais não controladas às zonas de proteção de poços e drenagens superficiais. É responsabilidade do sistema público de abastecimento de água (PWS) citar as referências apropriadas e interpretar os regulamentos de zoneamento a fim de reforçar essas restrições.

Recebimento de toda informação colateral antes do desenvolvimento de uma nova fonte – um dos propósitos do Programa de Proteção de Fontes Hídricas é assegurar que os sistemas de abastecimento tenham a capacidade de proteger seus novos poços ou cursos de água propostos antes de serem construídos. As PER e as especificações de construção devem ser submetidas à análise da Divisão de Água Potável (DDW) ou outro órgão gestor de recursos hídricos e devem receber a correspondente autorização por escrito.

Planos de proteção de fontes hídricas propostas – os planos de PER e de Proteção de Fontes de Água Potável (DWSP) constituem os meios primários dos sistemas de abastecimento público de água para proteger suas captações de contaminações potenciais. Estes planos devem ser documentos de trabalho usados

comprometer a sus eventuales herederos, sucesores y/o asignados, y tales convenios deben ser presentados y registrados ante las autoridades locales de manejo de los recursos hídricos.

6. **Cartas de intención y contratos de uso de tierras** – *Pueden utilizarse cartas de intención registradas ante notarios públicos al someter inicialmente una PER. Estas cartas deben incluir una declaración en la cual el propietario conviene en registrar un contrato de uso de la tierra en la oficina de registros del distrito correspondiente, si la fuente demuestra ser aceptable. Una copia del contrato de uso de la tierra deben ser presentado ante la DDW (o la dirección de aguas), debiendo disponerse de una carta de aprobación antes que se autorice al sistema de abastecimiento de agua (PWS) incorporar la nueva fuente hídrica al sistema público.*
7. **Ordenanzas de división en zonas** – *Debe impedirse el acceso de fuentes potenciales no controladas de contaminación de las zonas de protección de pozos y corrientes superficiales. Es responsabilidad del Sistema Público de Abastecimiento de Agua (PWS) citar las referencias apropiadas e interpretar las ordenanzas de zonificación con el objeto de sustanciar dichas restricciones.*

Recepción de toda la información colateral antes de desarrollar una nueva fuente – *Uno de los propósitos del programa de protección de fuentes hídricas es asegurar que los sistemas de suministro posean la capacidad de proteger sus nuevos pozos o cursos de agua propuestos antes que los mismos sean construidos. Las PER y las especificaciones de construcción deben ser sometidas al juicio de la División de Agua potable (DDW) u otra autoridad de aguas y recibir la correspondiente autorización por escrito.*

Planes propuestos de protección de fuentes hídricas – *Los planes de PER y de Protección de Fuentes de Agua potable (DWSP) constituyen los medios primarios de los sistemas de abastecimiento público de agua para proteger sus fuentes de contaminación. Dichos planes deben ser documentos de trabajo a ser utilizados en forma regular por los PWS. El Plan de DWSP debe ser redactado a la manera de un Documento Técnico de “qué y cómo” para la protección de las fuentes de agua potable en el*

regularmente pelos PWS. O Plano de DWSP deve ser redigido como um Documento Técnico de “que e como” para a proteção das fontes de água potável no presente e no futuro. Eles devem ser escritos de forma lógica, ser de fácil compreensão e devem incluir o programa correspondente de implementação.

Procedimento de delimitação para novos poços – deve-se usar o procedimento preferido na delimitação de zonas de proteção (Áreas de Proteção de Poços) para os novos poços de produção.

Parte II Diretrizes para poços, drenagens superficiais e túneis existentes – Planos de Proteção de Fontes de Água Potável (DWSP)

Requer-se um Plano de Proteção de Fontes de Água Potável (DWSP) para cada um dos poços, das fontes jorantes e dos canais ou túneis que sejam usados como fontes por um sistema de abastecimento público (PWS). Os planos de DWSP devem ser documentos de trabalho usados regularmente pelos PWS. Um Plano de Proteção de Fonte de Água Potável (DWSP) deve ser elaborado na forma de Documento Técnico prático pelo sistema público para a proteção atual e futura das fontes de água potável. Um Plano de Proteção de Fonte de Água Potável (DWSP) adequado deve conter as seguintes seções:

1. **Relatório de Delimitação**
2. **Inventário de fontes potenciais de contaminação**
3. **Identificação e avaliação dos controles normalmente aplicados**
4. **Programa de Manejo de Fontes de Contaminação Potenciais Existentes** – o programa desenvolvido para controlar cada uma das fontes potenciais de contaminação (PCS) dentro da área de proteção correspondente. As estratégias de manejo da terra podem ser reguladoras (por exemplo, zoneamento de Áreas de Proteção de Poços) ou não reguladoras (programas de educação do consumidor, monitoramento de águas subterrâneas etc.).
5. **Programa de Manejo de Futuras Fontes Potenciais de Contaminação** – é o programa desenvolvido para controlar as PCS que possam eventualmente penetrar nas áreas de proteção.
6. **Programa de implementação** – lista resumida das estratégias de manejo

presente y el futuro. Los mismos deben ser redactados en forma lógica y fácilmente comprensible, e incluir su correspondiente programa de implementación.

Procedimiento de delineamiento para nuevos pozos –Debe emplearse el procedimiento preferido para delinear zonas de protección (Áreas de Protección de Cabezales de Pozos) para los nuevos pozos de producción.

Parte II – Directivas para pozos, corrientes superficiales y túneles existentes – Planes de Protección de Fuentes de Agua potable (DWSP)

Se requiere un Plan de Protección de Fuentes de Agua potable (DWSP) para cada uno de los pozos, fuentes surgentes y canales o túneles que sean empleados como fuentes por un sistema de abastecimiento público (PWS). Los planes de DWSP deben ser documentos de trabajo usados en forma regular por los PWS. Un Plan de Protección de Fuente de Agua potable (DWSP) debe ser redactado en forma de Documento Técnico práctico por parte del sistema público para la protección actual y futura de las fuentes de aguas potables. Un Plan de Protección de Fuente de Agua potable (DWSP) adecuado debe comprender las siguientes secciones:

1. **Reporte de Delineamiento**
2. **Inventario de fuentes potenciales de contaminación**
3. **Identificación y evaluación de los controles aplicados corrientemente**
4. **Programa de manejo de fuentes de contaminación potencial existentes** –El Programa que se ha desarrollado para controlar cada una de las Fuentes de Contaminación Potencial (PCS) dentro del área de protección que corresponde. Las estrategias de manejo de la tierra pueden ser ya sean reguladoras (p. ej., zonificación de áreas de protección de Cabezales de pozos) o no reguladoras (programas de educación del consumidor, monitoreo de aguas subterráneas, etc.).
5. **Programa de manejo de futuras fuentes potenciales de contaminación** –Es el programa que se desarrolla a los efectos de controlar las PCS que pueden eventualmente penetrar en las áreas de protección.
6. **Programa de implementación** – Lista resumida de las estrategias de manejo de la tierra que se han identificado en los

da terra identificadas nos programas de gestão, e as datas em que será implementado cada um deles.

7. **Avaliação de recursos** – é uma análise dos recursos financeiros e outros que provavelmente serão requeridos para a execução do plano de DWSP.
8. **Seção de manutenção de registros** – seção do plano, usada para documentar a implementação de cada estratégia de manejo das terras identificadas no programa de implementação. Os documentos correspondentes podem incluir regulamentos de zoneamento, códigos, licenças, memorandos de entendimento, programas de educação do público consumidor, convênios de uso das terras etc.
9. **O plano de contingência** – um plano apresentado concomitantemente com o primeiro Plano de Proteção de Fontes de Água Potável (DWSP). Ele pode se dedicar à consideração de temas como emergências hídricas, racionamento, limpeza de fontes e desenvolvimento de novas fontes de abastecimento, entre outros.
10. **Informação pública** – notificações que devem ser distribuídas entre o público consumidor.
11. **Isonções de pesticidas e compostos orgânicos voláteis (VOC)** – explica o uso e as isenções de monitoramento de susceptibilidade correspondentes a pesticidas e compostos de tipo VOC (aldeídos, hidrocarbonetos aromáticos etc.).

programas de gestión, y las fechas en que se implementará cada uno de ellos.

7. **Evaluación de recursos** – *Es un análisis de los recursos financieros y varios que se estima se requerirán para llevar a cabo el plan de DWSP.*
8. **Sección de mantenimiento de registros** – *La sección del plan que se emplea para documentar la implementación de cada estrategia de manejo de las tierras que se han identificado en el Programa de Implementación. Los documentos correspondientes pueden incluir ordenanzas de zonificación, códigos, permisos, memorándums de entendimiento, programas de educación del público consumidor, convenios de uso de tierras, etc.*
9. **El plan de contingencia** – *Un plan presentado coincidentemente con el primer Plan de Protección de Fuentes de Agua potable (DWSP). El mismo puede dedicarse al tratamiento de temas tales como emergencias hídricas, racionamiento, limpieza de fuentes y desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, entre otros.*
10. **Información pública** – *Notificaciones que deben ser distribuidas entre el público consumidor.*
11. **Exenciones de plaguicidas y compuestos orgánicos volátiles (VOC)** – *Explica el uso y las exenciones de monitoreo de susceptibilidad correspondientes a plaguicidas y compuestos de tipo VOC (aldehídos, hidrocarburos aromáticos, etc.).*

