



GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DESAFIOS E CAMINHOS

República Federativa do Brasil

Jair Bolsonaro

Presidente da República

Ministério do Desenvolvimento Regional

Daniel Ferreira

Ministro

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Diretoria Colegiada

Veronica Sánchez da Cruz Rios (Diretora-Presidente)

Vitor Saback

Maurício Abijaodi

Ana Carolina A. N. de Castro

Filipe de Mello Sampaio Cunha

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL

GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DESAFIOS E CAMINHOS

Brasília – DF
ANA
2022

© 2022, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Blocos "B", "L", "M" e "T"
CEP: 70610-200, Brasília – DF
PABX: (61) 2109-5400 / (61) 2109-5252
Endereço eletrônico: <https://www.gov.br/ana/pt-br>

Comitê de Editoração

Joaquim Guedes Corrêa Gondim Filho (coordenador)
Flávio Hadler Tröger
Humberto Cardoso Gonçalves
Rogério de Abreu Menescal (secretário-executivo)

Equipe editorial

Organização
Pilar Carolina Villar

Autores

Pilar Carolina Villar
Ricardo Hirata
José Luiz Albuquerque Filho
Ana Maciel de Carvalho

Colaboradores

Adivane Terezinha Costa
Alberto Manganelli
Alexandre Saia
Amélia Fernandes
Ana Carolina Corberi Famá Ayoub e Silva
Antonio Luiz Pinhatti
Bruno Conicelli
Camila de Lima
Daniel José da Silva
Daniele Tokunaga Genaro
Didier Gastmans
Drielly Sousa Rodrigues
Dua Kudushana Singgih Yejezkial Klaas
Frederico Cláudio Peixinho
Gabriel de los Cobos
Hermam Vargas
Ingo Wahnfried
Jacinta Palerm
João Alberto Oliveira Diniz
João Carlos Simanke Souza
José Elio Guimarães Campos
Jose Luis Arumi
Júlio Henrichs de Azevedo
Luciana Cordeiro de Souza-Fernandes
Malva Andrea Mancuso
Mara Akie Iritani
Marcos B. Barbosa
Marcio Cardoso
Maria Antonieta A. Mourão
Maria Luiza Machado Granziera
Osvaldo Aly Junior
Ovídio Alejandro Melo Jara
Paulo Galvão
Reginaldo A. Bertolo
Roberto Eduardo Kirchheim
Vagney Aparecido Augusto

Valmor Freddo

Veridiana T. de S. Martins
Wilson Rodrigues de Melo Junior
Zulema Guadalupe Lazos Ramírez

Conselho Editorial

Adriana Niemeyer Pires Ferreira
Ana Maria Zügel
Didier Gastmans
Dora Atman
Fabricio Bueno da Fonseca Cardoso
Fernando Roberto de Oliveira
Letícia Lemos Moraes
Márcia Tereza Pantoja Gaspar
Renato Saraiva Ferreira
Roberto Eduardo Kirchheim
Vagney Aparecido Augusto

Projeto gráfico e editoração

Ladislau Lima

Supervisão editorial

Renata Rozendo Maranhão
Jorge Thierry Calasans
Fernando Roberto de Oliveira
Fabrício Bueno da Fonseca Cardoso

Foto capa

Capa: Surgência de aquífero fraturado na Zona rural de Guaribas – Piauí (PI)
Foto: Érico Hiller / Banco de Imagens ANA

Todos os direitos reservados

É permitida a reprodução de dados e informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Catalogação na fonte: CEDOC/BIBLIOTECA

A265g	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Governança das águas subterrâneas : desafios e caminhos / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico / Pilar Carolina Villar ; Ricardo Hirata ; José Luiz Albuquerque ; Ana Maciel de Carvalho. – Brasília : ANA, 2022. 202 p. : il.
	ISBN: 978-65-88101-27-8 (Digital) ISBN: 978-65-88101-28-5 (Impresso) 1. Águas subterrâneas - gestão. 2. Águas subterrâneas - qualidade. 3. Aquíferos transfronteiriços. 4. Direito de uso. 5. Governança na gestão de aquífero. I. Título. CDU 556.388(81)

Elaborada por Marcelo Santana Costa – CRB-1/1849

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – POÇO DE ÁGUA NO CASTELO DE VINCENNES, FRANÇA (SÉC. XII).....	18
FIGURA 2 – FUNDAMENTOS, OBJETIVOS, DIRETRIZES, INSTRUMENTOS DE GESTÃO E ARQUITETURA INSTITUCIONAL DA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS.....	30
FIGURA 3 – MATRIZ E FUNCIONAMENTO DO SINGREH	32
FIGURA 4 – AGENDA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	36
FIGURA 5 – INSTRUMENTOS DE GESTÃO HÍDRICA NAS POLÍTICAS PÚBLICAS	39
FIGURA 6 – MAPA DAS CONCESSÕES DE LAVRAS DE ÁGUAS MINERAIS E POTÁVEIS DE MESA NO BRASIL	45
FIGURA 7 – VOLUME DE ÁGUA E MÉDIA ANUAL DOS FLUXOS NO CICLO HIDROLÓGICO.....	55
FIGURA 8 – CICLO DA ÁGUA	56
FIGURA 9 – DISTRIBUIÇÃO DOS AQUÍFEROS FRATURADOS, SEDIMENTARES E CÁRSTICOS NO BRASIL.....	62
FIGURA 10 – (A) PAREDE DE PEDREIRA EM GRANITO (ITAPECERICA DA SERRA, SP), COM ALTURA TOTAL APROXIMADA DE 90 M, EM QUE SE OBSERVAM VÁRIAS BANCADAS; (B) ESQUEMA DA PAREDE EM (A) COM REPRESENTAÇÃO DE FRATURAS VERTICais (1, 2A) E FRATURAS INCLINADAS (2B, 2C).....	63
FIGURA 11 – PAREDE DE PEDREIRA DE BASALTO EM RIBEIRÃO PRETO (SP), COM CERCA DE 50 M DE ALTURA.....	64
FIGURA 12 – ÁGUA SUBTERRÂNEA RETORNANDO À SUPERFÍCIE NA FORMAÇÃO NOVO REMANSO, MANAUS (AM). ESTA NASCENTE CONTRIBUI PARA O FLUXO DE BASE DE UM AFLUENTE DO RIO TARUMÃ-AÇU	66
FIGURA 13 – POÇO EM ESCOLA NA COMUNIDADE DO RETIRO, MUNICÍPIO DE HUMAITÁ (AM), À MARGEM ESQUERDA DO RIO MADEIRA. AS MARCAS NA PAREDE INDICAM O NÍVEL ALCANÇADO PELO RIO EM 2014. O POÇO EXPLORA DEPÓSITOS SEDIMENTARES QUATERNÁRIOS.....	67
FIGURA 14 – PROCESSO INICIAL DE CARSTIFICAÇÃO EM ROCHA CALCÁRIA EM ALARGAMENTO NOS PLANOS DE ACAMAMENTO DA ROCHA (DESCONTINUIDADES), POR ONDE O FLUXO DE ÁGUA ACIDIFICADA CIRCULOU	69
FIGURA 15 – ENTRADA DE CAVERNA EM PAINS/MG, INDICANDO O NÍVEL D'ÁGUA NA PORÇÃO MAIS PROFUNDA. UM EXEMPLO DE CONEXÃO ENTRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS	70
FIGURA 16 – FUNCIONAMENTO DE UM AQUÍFERO.....	71
FIGURA 17 – O ARCABOUÇO GEOLÓGICO COMO ELEMENTO BASE DE DEFINIÇÃO DO TERRITÓRIO DA BACIA E DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA	73
FIGURA 18 – (A) MODELO CONCEITUAL PARA RIOS EFLUENTES; (B) MODELO CONCEITUAL PARA RIOS INFLUENTES, CENÁRIO EM QUE A ELEVAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA QUE SEPARA A ZONA SATURADA DA NÃO SATURADA ESTÁ CONECTADA COM O RIO; (C) MODELO CONCEITUAL PARA RIOS INFLUENTES, CENÁRIO EM QUE A ELEVAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA QUE SEPARA A ZONA SATURADA DA NÃO SATURADA ESTÁ DESCONECTADO DO RIO; (D) MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DIRETO	76
FIGURA 19 – A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO E O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA (ESQUERDA), E AS RELAÇÕES ENTRE AS REDES DE DRENAGEM DO SAU E O RIO SÃO FRANCISCO (DIREITA)	77
FIGURA 20 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DO SAU, A REDE DE DRENAGEM DO PLATÔ E A FORMA COMO ESSAS ÁGUAS ALCANÇAM O RIO SÃO FRANCISCO	78

FIGURA 21 – SISTEMAS AQUÍFEROS BRASILEIROS, SEGUNDO A ANA.....	80
FIGURA 22 – OS PRINCIPAIS AQUÍFEROS BRASILEIROS.....	81
FIGURA 23 – PERFIL DOS USUÁRIOS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO PAÍS.....	83
FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO DOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS (TOTAL E POR TAMANHO DE POPULAÇÃO) DE ACORDO COM O TIPO DE FONTE DE ABASTECIMENTO.....	84
FIGURA 25 – DEPENDÊNCIA DOS ESTADOS BRASILEIROS POR ÁGUA SUBTERRÂNEA, SEGUNDO A DISTRIBUIÇÃO DE POÇOS TUBULARES (A: USO URBANO; B: USO RURAL).....	85
FIGURA 26 – (A) NÚMERO DE OUTORGAS DE DIREITO DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS VÁLIDAS; (B) VAZÃO TOTAL POR TIPO DAS OUTORGAS DE DIREITO DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (M ³ /S) (2015).....	86
FIGURA 27 – PRINCIPAIS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PRESTADOS PELAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	88
FIGURA 28 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO HIDROSTÁTICA ENTRE ÁGUA DOCE E ÁGUA SALGADA EM AQUÍFERO COSTEIRO	93
FIGURA 29 – MODELO CONCEITUAL DOS AQUÍFEROS DA RMR E SEUS VÁRIOS PROCESSOS DE SALINIZAÇÃO.....	94
FIGURA 30 – ÁREAS PESQUISADAS EM AMBIENTES DE PLATÔS LATERÍTICOS DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO	97
FIGURA 31 – DETALHE DAS RAÍZES ATRAVESSANDO AS DIVERSAS CAMADAS DO PERFIL LATERÍTICO: I – LATOSOLO AMARELO ± 4 M; II – NÓDULOS DE BAUXITA ± 6 M; III – BAUXITA SÓLIDA ± 7 M; E IV – ARGILA VARIEGADA ± 15 M	98
FIGURA 32 – (I) ÁREA COM COBERTURA VEGETAL ORIGINAL; (II) ÁREA DESMATADA PARA O INÍCIO DE ATIVIDADE DE MINERAÇÃO DE BAUXITA; E (III) ÁREA EM RECUPERAÇÃO AMBIENTAL PÓS-LAVRA	99
FIGURA 33 – BLOCO DIAGRAMA ILUSTRANDO RELAÇÕES DE FATORES ABIÓTICOS (SOLO E GEOLOGIA) E BIÓTICOS (COBERTURA VEGETAL, SISTEMAS RADICULARES) COM EFEITOS NA CONEXÃO HIDRÁULICA E NOS PADRÕES DE FLUXO SUBTERRÂNEO EM PLATÔS LATERÍTICOS DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO.....	100
FIGURA 34 – POLÍTICAS PÚBLICAS, TIPOS DE PLANOS, ÂMBITOS GEOGRÁFICOS E ENTIDADES COORDENADORAS DO PROCESSO DE PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	107
FIGURA 35 – DIRETRIZES PARA ELABORAÇÃO DE PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	112
FIGURA 36 – AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NOS PLANOS DE BACIA, COM BASE NAS RESOLUÇÕES CNRH.....	115
FIGURA 37 – CONCEITO DE PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS.....	118
FIGURA 38 – ZONA DE CONTRIBUIÇÃO E ZONA DE TRANSPORTE DE UM POÇO EM AQUÍFERO LIVRE.....	119
FIGURA 39 – ESQUEMA IDEALIZADO PARA A DELIMITAÇÃO DOS PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇO EM AQUÍFERO LIVRE	120
FIGURA 40 – ÁREA DE RESTRIÇÃO E CONTROLE DO USO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG) NO MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO PRETO, SP	122
FIGURA 41 – ETAPAS DO PROCEDIMENTO DE ENQUADRAMENTO DOS CORPOS DE ÁGUA SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS, DEFINIDAS PELA RES. CNRH Nº 91/2008.....	125
FIGURA 42 – ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS E OUTORGA DE DIREITO DE USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	127

FIGURA 43 – COBRANÇA PELO USO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL – COMITÊS ESTADUAIS	134
FIGURA 44 – EXEMPLOS DE MÉTODOS DE RECARGA À SUPERFÍCIE.....	156
FIGURA 45 – EXEMPLOS DE MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL EM PROFUNDIDADE NA ZONA NÃO SATURADA	156
FIGURA 46 – ESQUEMA DE MÉTODOS DE INJEÇÃO DIRETA.....	156
FIGURA 47 – OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)	163
FIGURA 48 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DAS INFRAESTRUTURAS DO PAD	164
FIGURA 49 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DO SISTEMA DESENVOLVIDO PELA EMBRAPA	165
FIGURA 50 – GESTÃO COMPARTILHADA DOS SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO	165
FIGURA 51 – DIFERENTES NÍVEIS DE PARTICIPAÇÃO PÚBLICA	171
FIGURA 52 – ÁREA DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM SANTA CATARINA	173
FIGURA 53 – SEÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DO ESTADO DE SÃO PAULO E SEUS SISTEMAS AQUÍFEROS.....	175
FIGURA 54 – AQUÍFEROS TRANSFRONTEIRIÇOS NO TERRITÓRIO BRASILEIRO.....	176
FIGURA 55 – O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI E SUAS ZONAS DE GESTÃO	177
FIGURA 56 – REDE INTEGRADA DE MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (RIMAS)	183
FIGURA 57 – LIMITES DA ÁREA DE RESTRIÇÃO E CONTROLE (ARC) DE CAPTAÇÃO E USO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DE JURUBATUBA.....	185
FIGURA 58 – ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE DADOS COM BASE NO CRUZAMENTO DAS INFORMAÇÕES DISPONÍVEIS NO SIG DO PROJETO JURUBATUBA, INTEGRANDO DADOS DE ÁREAS CONTAMINADAS, SISTEMA DE GERENCIAMENTO AMBIENTAL DA CETESB, CADASTRO DE POÇOS TUBULARES E COLETA DE DADOS EM CAMPO	186
FIGURA 59 – MODELO DE GERENCIAMENTO DA INFORMACAO APPLICADO AO GERENCIAMENTO DE AREAS CRITICAS.....	187
FIGURA 60 – LOCALIZAÇÃO DO AQUÍFERO SANTO DOMINGO, BAIXA CALIFORNIA SUL, MÉXICO.....	188
FIGURA 61 – GEOLOGIA DO AQUÍFERO SANTO DOMINGO.....	189
FIGURA 62 – EXTRAÇÕES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM MM3 NO AQUÍFERO SANTO DOMINGO (USO AGRÍCOLA)	190
FIGURA 63 – LOCALIZAÇÃO DO AQUÍFERO GENEbra	193
FIGURA 64 – PERFIL LONGITUDINAL DO AQUÍFERO GENEbra	194
FIGURA 65 – SEÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA DAS UNIDADES COMPONENTES DO AQUÍFERO GENEbra	194
FIGURA 66 – INSTRUMENTOS JURÍDICOS RELACIONADOS À PROMOÇÃO DA COOPERAÇÃO INTERNACIONAL PARA O AQUÍFERO GENEbra	196

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PRINCIPAIS RESOLUÇÕES NACIONAIS EDITADAS PELO CNRH RELACIONADAS ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	35
QUADRO 2 – CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS MINERAIS DE ACORDO COM AS SUAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS....	46
QUADRO 3 – CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES MINERAIS QUANTO AOS GASES E TEMPERATURA.....	46

QUADRO 4 – AÇÕES PRIORITÁRIAS ÀS REGIÕES HIDROGRÁFICAS PREVISTAS NO PROGRAMA NACIONAL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	109
QUADRO 5 – CLASSES PARA O ENQUADRAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	123
QUADRO 6 – PADRÓES PARA O ENQUADRAMENTO DE CLASSE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	124
QUADRO 7 – PRINCIPAIS FATORES QUE LEVAM À EXISTÊNCIA DE POÇOS IRREGULARES E AÇÕES MITIGADORAS.....	129
QUADRO 8 – PREÇO UNITÁRIO BÁSICO (PUB) DA ÁGUA APLICADO NA COBRANÇA PELO USO DOS RECURSOS HÍDRICOS EM ALGUNS COMITÊS ESTADUAIS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	135
QUADRO 9 – PROPOSTA DE ORGANIZAÇÃO DE PROGRAMAS PARA O DESENVOLVIMENTO E GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (PDGAS)	137
QUADRO 10 – INFRAÇÕES ADMINISTRATIVAS RELACIONADAS AO USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	141
QUADRO 11 – CRIMES AMBIENTAIS RELACIONADOS ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	142
QUADRO 12 – PRINCIPAIS DISTINÇÕES ENTRE AS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS	149
QUADRO 13 – BENEFÍCIOS E DIFICULDADES DA PARTICIPAÇÃO SOCIAL	170

LISTA DE VÍDEOS

VÍDEO 1 – CICLO DA ÁGUA (CICLO HIDROLÓGICO)	55
VÍDEO 2 – ESKEMA ILUSTRATIVO SOBRE A BOMBA BIÓTICA	57
VÍDEO 3 – DOCUMENTÁRIO RIOS VOADORES.....	57
VÍDEO 4 – AQUÍFERO AMAZONAS	66

LISTA DE BOXES

BOX 1 – O TEMPO DOS AQUÍFEROS E O TEMPO DO SER HUMANO	18
BOX 2 – NATUREZA JURÍDICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	29
BOX 3 – OS ESTADOS E A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	40
BOX 4 – AS COMPETÊNCIAS MUNICIPAIS RELACIONADAS ÀS ÁGUAS	42
BOX 5 – AQUÍFEROS FRATURADOS.....	63
BOX 6 – AQUÍFEROS SEDIMENTARES	65
BOX 7 – AQUÍFEROS CÁRSTICOS.....	67
BOX 8 – INTERAÇÕES RIO-AQUÍFERO: A IMPORTÂNCIA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO	75
BOX 9 – SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS (SE) DE AQUÍFEROS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	87
BOX 10 – MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	90
BOX 11 – INTRUSÃO SALINA EM AQUÍFEROS COSTEIROS	93

BOX 12 – A IMPORTÂNCIA DA COBERTURA FLORESTAL NA RECARGA DE AQUÍFEROS: LIÇÕES APRENDIDAS NO SISTEMA AQUÍFERO ALTER DO CHÃO.....	97
BOX 13 – PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS (PIRH) DA UNIDADE DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PARANAPANEMA (PIRH PARANAPANEMA)	116
BOX 14 – PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇOS (PPP)	117
BOX 15 – ESTABELECIMENTO DE ÁREAS DE RESTRIÇÃO E CONTROLE DO USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO INSTRUMENTO DE GERENCIAMENTO DA EXPLORAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG), EM RIBEIRÃO PRETO, SP	121
BOX 16 – POR QUE TEMOS TANTOS POÇOS IRREGULARES?.....	128
BOX 17 – CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DE VAZÕES OUTORGÁVEIS EM MANANCIAIS SUBTERRÂNEOS	130
BOX 18 – OS DIFERENTES TIPOS DE VALOR DOS RECURSOS AMBIENTAIS.....	136
BOX 19 – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (SIAGAS).....	139
BOX 20 – O USO CONJUNTIVO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS COMO ESTRATÉGIA DE ENFRENTAMENTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	153
BOX 21 – RECARGA ARTIFICIAL DOS AQUÍFEROS: UMA ALTERNATIVA PARA O AUMENTO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA	155
BOX 22 – REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS: VALORES ORIENTADORES <i>VERSUS</i> REPARAÇÃO AMBIENTAL INTEGRAL	159
BOX 23 – A CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA POR MEIO DE CANATES OU GALERIAS FILTRANTES: EXEMPLOS NA AMÉRICA LATINA	162
BOX 24 – PROGRAMA ÁGUA DOCE.....	164
BOX 25 – A SUPEREXPLORAÇÃO DO AQUÍFERO JACARTA E OS SEUS IMPACTOS À CIDADE.....	168
BOX 26 – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (ABAS)	169
BOX 27 – A EXPERIÊNCIA DO PROJETO EDUCAÇÃO AMBIENTAL PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI, NA ZONA DE RECARGA DIRETA, NO ESTADO DE SANTA CATARINA/BRASIL	173
BOX 28 – O ACORDO SOBRE O AQUÍFERO GUARANI.....	179
BOX 29 – CENTRO REGIONAL PARA A GESTÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA AMÉRICA LATINA E CARIBE (CEREGAS): EXEMPLO PRÁTICO DA IMPORTÂNCIA DA COOPERAÇÃO INTERNACIONAL.....	180
BOX 30 – REDE INTEGRADA DE MONITORAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (RIMAS)	182

LISTA DE TABELA

TABELA 1 – POPULAÇÃO DAS PRINCIPAIS LOCALIDADES DO VALE DE SANTO DOMINGO	188
--	-----



LISTA DE SIGLAS

AAC – Aquífero Alter do Chão	DGA – Direção Geral de Águas
ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas	DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ADI – Ação Direta de Inconstitucionalidade	ETA – Estação de Tratamento de Água
ALADYR – Associação Latino-Americana de Dessoralinização	ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico	FEHIDRO – Fundo Estadual de Recursos Hídricos
ANM – Agência Nacional de Mineração	GAC – Gerenciamento de Áreas Contaminadas
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bio-combustíveis	GCM – Modelo de Circulação Geral
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária	GEF – Fundo Global para o Meio Ambiente
APA – Áreas de Proteção de Aquíferos	GIRH – Gestão Integrada dos Recursos Hídricos
APP – Áreas de Preservação Permanente	IAH – Associação Internacional de Hidrogeólogos
ARC – Áreas de Restrição e Controle	IDA – Associação Internacional de Dessoralinização
AS – Águas Subterrâneas	IHP – Programa Hidrológico Intergovernamental
AUPIT – Associação dos Usuários do Perímetro Irrigado de Tourão	IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
BDNAC – Banco de Dados Nacional sobre Áreas Contaminadas	ITRC – <i>Interstate Technology Regulatory Council</i>
BHRSF – Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	JGB – Bacia Hidrogeológica de Jacarta
BNCC – Base Nacional Comum Curricular	JV – Juntas de Vigilância
CAF – Banco de Desenvolvimento da América Latina	LC – Lei Complementar
CAS – Comunidade de Águas Subterrâneas	LQP – Limite de Quantificação Praticável
CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica	MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
CBH-AT – Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê	MAR – <i>Managed Aquifer Recharge</i>
CBH-SF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	MCG – Mudanças Climáticas Globais
CDC – Código de Defesa do Consumidor	MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional
CeReGAS – Centro Regional para a Gestão de Águas Subterrâneas da América Latina e do Caribe	MEA – Avaliação Ecossistêmica do Milênio
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo	MMA – Ministério do Meio Ambiente
CF/88 – Constituição da República Federativa do Brasil de 1988	MME – Ministério de Minas e Energia
CNARH – Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos	MPSP – Ministério Público do estado de São Paulo
CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos	OAB – Ordem dos Advogados do Brasil
CONAGUA – Comissão Nacional de Águas	ODM – Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente	ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
CONERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos	OEA – Organização dos Estados Americanos
CREA – Conselhos Regionais de Engenharia e Agronomia	ONU – Organização das Nações Unidas
CRH – Conselho de Recursos Hídricos	OUA – Organização de Usuários de Águas
CS – Coeficiente de Sustentabilidade	PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
DAA – Direito de Aproveitamento de Águas	PDGAS – Programas para o Desenvolvimento e Gestão das Águas Subterrâneas
DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica	PEI – Plano Estadual de Irrigação
	PERH – Política (Plano) Estadual de Recursos Hídricos
	PIRH – Planos Integrados de Recursos Hídricos
	PNAS – Programa Nacional de Águas Subterrâneas
	PNDR – Política Nacional de Desenvolvimento Regional

PNDU – Política Nacional de Desenvolvimento Urbano	SIG – Sistema de Informação Geográfica
PNI – Política Nacional de Irrigação	SIGRH – Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos
PNLD – Programa Nacional do Livro e do Material Didático	SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente	SINIMA – Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente
PNOT – Política Nacional de Ordenamento Territorial	SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
PNPDEC – Política Nacional de Proteção e Defesa Civil	SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
PNRH – Política (Plano) Nacional de Recursos Hídricos	SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
PNS – Política Nacional de Saneamento	SNIS – Sistema Nacional de Informações de Saneamento
PNSH – Política Nacional de Segurança Hídrica	SNRH – Sistema Nacional de Recursos Hídricos
PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento	SNSH – Secretaria Nacional de Segurança Hídrica
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente	SQL – <i>Structured Query Language</i>
PPA – Plano Plurianual	SRH – Secretaria de Recursos Hídricos
PPP – Perímetro de Proteção de Poços	SRHU – Secretaria de Recursos Hídricos Urbanos
PRA – Programa Estadual de Regularização Ambiental	SSD – Sistemas de Suporte à Decisão
PSA – Pagamento por Serviços Ambientais	STD – Sólidos Totais Dissolvidos
PSAG – Projeto Sistema Aquífero Guarani	STF – Supremo Tribunal Federal
PUB – Preço Unitário Básico	STJ – Superior Tribunal de Justiça
RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional	TVA – <i>Tennessee Valley Authority</i>
RIMAS – Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas	UC – Unidade de Conservação
RMR – Região Metropolitana do Recife	UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
RMSP – Região Metropolitana de São Paulo	UNSDSN – <i>United Nation Sustainable Development Solutions Network</i>
RNQA – Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade das Águas	VET – Valor Econômico Total
RPD – Recarga Potencial Direta	VI – Valor de Investigação
RPE – Reserva Potencial Explotável	VMP – Valor Máximo Permitido
SAG – Sistema Aquífero Guarani	VO – Valor Orientador
SAPR – Sistema Aquífero da Planície do Recife	VP – Valor de Prevenção
SAU – Sistema Aquífero Urucuia	VRQ – Valor de Referência de Qualidade
SE – Serviços Ecossistêmicos	ZA – Zoneamento Agroecológico
SEWRPC – <i>Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission</i>	ZC – Zona de Contribuição
SGB-CPRM – Serviço Geológico do Brasil	ZEE – Zoneamento Econômico Ecológico
SHAC – Setor Hidrológico de Aproveitamento Comum	
SIAGAS – Sistema de Informação de Águas Subterrâneas	

APRESENTAÇÃO

A gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas é prevista pela Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelecida pela Lei nº 9.433/1997, e é um elemento fundamental para garantir a segurança hídrica do Brasil. Apesar de sua invisibilidade natural e social, essas águas são indispensáveis para a manutenção do fluxo dos rios e de diversos ecossistemas, além de garantir o abastecimento de água de vários usos da água, como o abastecimento de populações vulneráveis sem acesso à rede de água encanada. Nesse contexto os integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) vêm atuando para superar os desafios no sentido da gestão integrada dos recursos hídricos.

Dada a importância do tema, a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu o tema *Águas Subterrâneas – Tornar Visível o Invisível* para o Dia Mundial da Água de 2022. O propósito dessa escolha foi explicar o papel vital das águas subterrâneas nos sistemas de água e saneamento, agricultura, indústria, ecossistemas e adaptação às mudanças climáticas.

Ciente da relevância do tema das águas subterrâneas e em sintonia com os debates nacionais e internacionais sobre recursos hídricos, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) tem produzido

estudos e projetos para difundir um melhor conhecimento e monitoramento de aquíferos brasileiros.

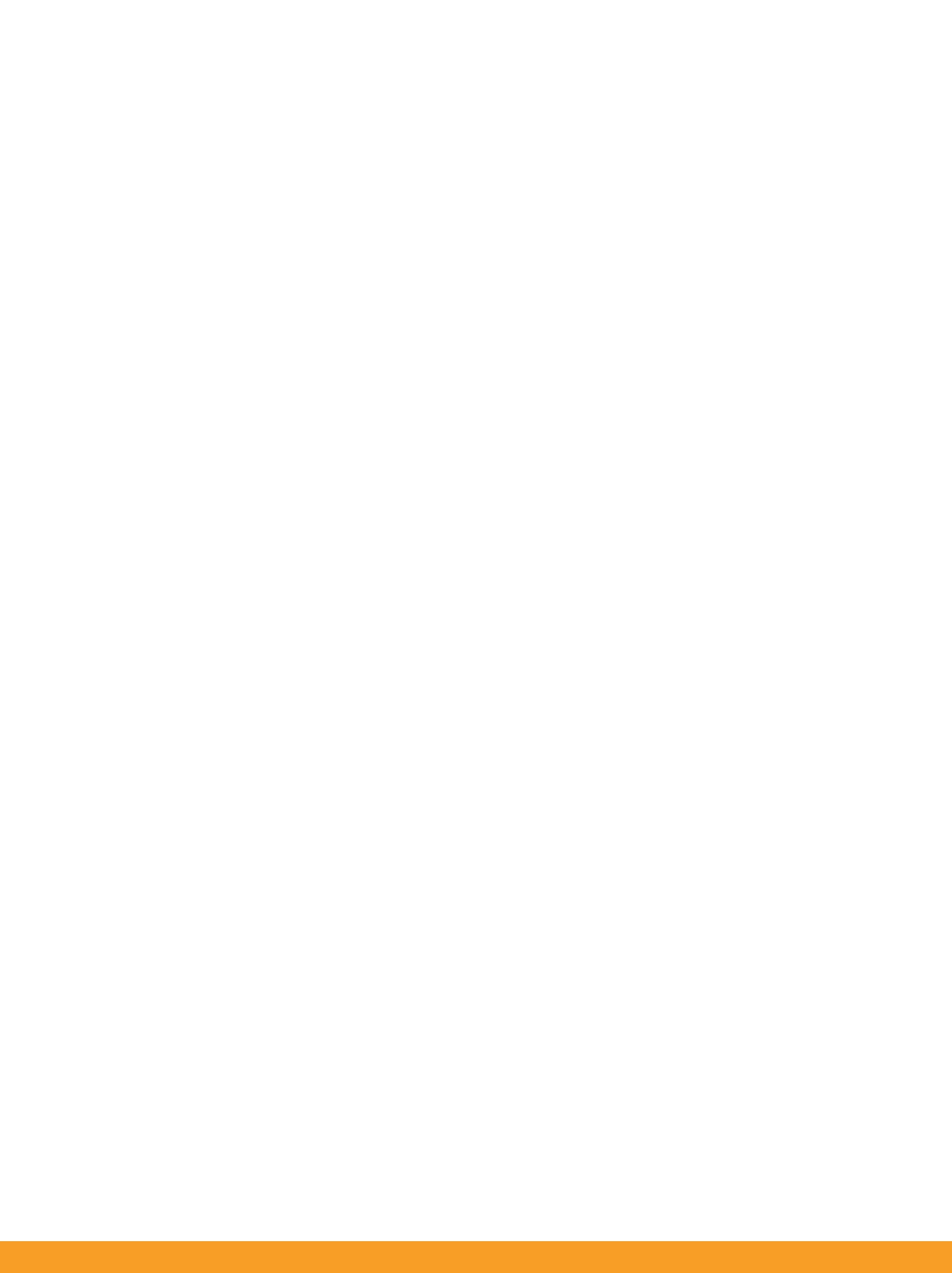
A ANA também tem atendido uma demanda crescente por capacitação sobre esse assunto e, para tanto, vem produzindo materiais didáticos, como o livro *Governança das Águas Subterrâneas: Desafios e Caminhos*. Tal publicação corresponde a mais um esforço da Agência para fomentar a reflexão sobre a gestão dos aquíferos nacional e internacionalmente.

Com este livro a instituição busca contribuir para que os diversos atores sociais possam compreender a importância das águas subterrâneas e como os instrumentos de gestão de recursos hídricos podem ser utilizados para fomentar a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas.

Por conta de sua qualidade técnica e da atualidade dos temas abordados, este material servirá como base para quatro cursos na modalidade de ensino a distância (EaD) sobre o tema de águas subterrâneas, que serão lançados pela ANA em 2022. A publicação também terá edições em inglês e espanhol para alcançar o público internacional.

Boa leitura!

Diretoria Colegiada da ANA



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	11
INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 1 – A CONSTRUÇÃO DA GOVERNANÇA E DA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	21
1.1 GOVERNANÇA, GOVERNABILIDADE E GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ALINHANDO OS CONCEITOS	21
1.1.1 O CONCEITO DE GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS (GIRH) E SEU PAPEL NA GOVERNANÇA DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	25
1.2 A CONSTITUIÇÃO FEDERAL DE 1988 E AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	26
1.3 A POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH): UMA NOVA FORMA DE GERIR AS ÁGUAS	30
1.4 O ARRANJO INSTITUCIONAL PARA A PROTEÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: O SINGREH	31
1.4.1 MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL: O NOVO COORDENADOR DA GESTÃO DE ÁGUAS	33
1.4.2 O CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH) E SEU PAPEL NO ESTABELECIMENTO DE DIRETRIZES ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	34
1.4.3 A ATUAÇÃO DA ANA NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E A GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS	35
1.4.4 COMITÊS DE BACIA HIDROGRÁFICA (CBHS) E A INCLUSÃO DOS AQUÍFEROS NA GESTÃO	37
1.5 OS ESTADOS E A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	38
1.6 MUNICÍPIOS E SEU PAPEL NA GESTÃO DOS AQUÍFEROS	41
1.7 A RESPONSABILIDADE DOS USUÁRIOS NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	43
1.8 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E ÁGUAS MINERAIS NO BRASIL	44
REFERÊNCIAS	49
CAPÍTULO 2 – A ÁGUA SUBTERRÂNEA NO CICLO HIDROSSOCIAL	53
2.1 O CICLO HIDROLÓGICO E AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	55
2.1.1 O CICLO HIDROSSOCIAL	60
2.2 O QUE SÃO E COMO FUNCIONAM OS AQUÍFEROS	60
2.3 AS INTERAÇÕES DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS METEÓRICAS, SUPERFICIAIS, SUBTERRÂNEAS E COSTEIRAS	72
2.4 AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL	79
2.5 COMO E ONDE AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS SÃO USADAS NO PAÍS?	82
2.6 AS FUNÇÕES AMBIENTAIS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CICLO HIDROLÓGICO	86
2.6.1 PERENIZAÇÃO E REGULARIZAÇÃO DO CICLO HIDROLÓGICO NO PLANETA	89
2.6.2 TRATAMENTO DO SISTEMA SOLO-AQUÍFERO E A EXCELENTE QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	89
2.6.3 MANTENEDORA DA VIDA E DE ECOSISTEMAS	89
2.7 AS AMEAÇAS AOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS BRASILEIROS	91

2.7.1 SUPEREXPLORAÇÃO DE AQUÍFEROS	91
2.7.2 CONTAMINAÇÃO DE SOLO E DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	95
2.7.3 REDUÇÃO DA RECARGA DOS AQUÍFEROS EM VIRTUDE DA ALTERAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA	96
REFERÊNCIAS	101
CAPÍTULO 3 – A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DA TEORIA À PRÁTICA	105
3.1 PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS	107
3.1.1 PLANO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH)	108
3.1.2 PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PERH)	111
3.1.3 PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	111
3.1.4 CONTEÚDO DOS PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	113
3.1.4.1 DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO DE UM PLANO DE BACIA NO ESTADO DE SÃO PAULO	113
3.1.5 CONTEÚDO MÍNIMO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NOS PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS	114
3.1.6 INSTRUMENTOS DE GESTÃO ESPECÍFICOS PARA AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	117
3.2 ENQUADRAMENTO DOS CORPOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA, CONFORME OS USOS PREPONDERANTES	123
3.3 OUTORGA DE DIREITO DE USO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	126
3.4 COBRANÇA PELO USO DE RECURSOS HÍDRICOS: RECURSOS FINANCEIROS PARA PROMOVER A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	133
3.4.1 AÇÕES PARA AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS QUE PODERIAM SER CUSTEADAS COM A COBRANÇA	136
3.5 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES E AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	138
3.5.1 SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS (SNIRH)	138
3.5.2 CADASTRO NACIONAL DE USUÁRIOS DE RECURSOS HÍDRICOS (CNARH)	138
3.6 IMPLICAÇÕES JURÍDICAS PELO USO IRREGULAR DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	140
3.7 INSTRUMENTOS DE OUTRAS POLÍTICAS QUE CONTRIBUEM PARA A GOVERNANÇA DAS ÁGUAS	143
REFERÊNCIAS	144
CAPÍTULO 4 – GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E O FORTALECIMENTO DA GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS	147
4.1 ESTABELECENDO UMA AGENDA DE IMPLEMENTAÇÃO DA GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	149
4.2 ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUAS E A SUPEREXPLORAÇÃO DE AQUÍFEROS	153
4.3 ESTRATÉGIAS PARA A PROTEÇÃO DA QUALIDADE DOS AQUÍFEROS	158
4.3.1 GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS E AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	158
4.4 GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO MEIO DE GARANTIR O DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO	161
4.4.1 O USO HISTÓRICO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	161
4.4.2 O PAPEL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO MEIO PARA ATINGIR OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)	162

4.4.3 A NECESSIDADE DE CONHECER O PAPEL SOCIOECONÔMICO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	167
4.5 INTEGRANDO A SOCIEDADE NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: A IMPORTÂNCIA DA PARTICIPAÇÃO SOCIAL	169
4.6 COOPERAÇÃO ENTRE OS DIVERSOS ENTES ADMINISTRATIVOS E O ENFOQUE NA GESTÃO LOCAL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	174
4.6.1 AQUÍFEROS TRANSFRONTEIRIÇOS E INTERESTADUAIS: O CASO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG)	175
4.7 MONITORAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	180
4.8 GALERIA DE CASOS	184
4.8.1 A GESTÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS COMPLEXAS POR MÚLTIPHAS FONTES: O CASO DA REGIÃO DO DISTRITO INDUSTRIAL DE JURUBATUBA, SÃO PAULO	184
4.8.2 A GESTÃO DA ÁGUA E A RECUPERAÇÃO DO AQUÍFERO SANTO DOMINGO, COMONDÚ, BAIXA CALIFORNIA SUL, MÉXICO	188
4.8.3 AS COMUNIDADES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (CAS) NO CHILE	191
4.8.4 O AQUÍFERO GENEbra (SUÍÇA-FRANÇA): UMA HISTÓRIA DE SUCESSO NA COOPERAÇÃO TRANSFRONTEIRIÇA A NÍVEL LOCAL	193
REFERÊNCIAS	197
CONSIDERAÇÕES FINAIS	201



INTRODUÇÃO

A vida acontece sobre os aquíferos. Eles provêm sustentação e água para as sociedades e os ecossistemas. Apesar disso, boa parte da população não os conhece ou sequer sabe sobre a sua importância, nem consegue estabelecer uma relação de conexão do seu território com os aquíferos ali existentes. Se a sobrevivência humana dependesse da capacidade de cada um identificar os aquíferos que fornecem água para a sua cidade ou a forma como eles contribuem para manter os principais rios regionais, quantos passariam no teste? Essa realidade impacta a gestão e a governança das águas subterrâneas, que exige ações no sentido de superar a sua invisibilidade natural e social, bem como uma cultura de apropriação privada à revelia da lei, amparada por uma tolerância do Poder Público e da sociedade em relação ao uso irregular dessas águas (VILLAR, 2016).

Ao considerar o aprofundamento dos cenários de escassez e de degradação hídrica, constata-se que a sobrevivência da humanidade depende da construção de um novo pacto com as águas, o que, certamente, inclui os aquíferos. Se a sociedade não os conhecer, não haverá pressão política para implementar as ações necessárias para geri-los ou para expor os conflitos relacionados à apropriação de suas águas. A frase “*perdi o poço*” ou “*a nascente secou*” ditas com resignação, refletem, na maioria dos casos, o uso inadequado dessas águas, que sequer é percebido, sendo solucionado, a depender da situação econômica do usuário, com a perfuração de um poço mais profundo, por outras alternativas (caminhão pipa, construção de cisternas, etc.) ou, no pior dos casos, com o abandono da terra.

Nesse sentido, este livro promove o conhecimento sobre as diferentes perspectivas dos aquíferos e sua importância para a sociedade e ecossistemas, além de apontar caminhos para superar os desafios. No capítulo 1 – “**A construção da governança e da gestão das águas subterrâneas**” – contextualiza-se a estrutura de governança das águas subterrâneas, identificando os conceitos de governança, gestão e gerenciamento, bem como se apresentam os principais atores envolvidos na política hídrica nacional e o papel de cada um na promoção da governança das águas subterrâneas. No capítulo 2 – “**A água subterrânea no ciclo hidrossocial**” – expõe-se a dinâmica dos aquíferos no ciclo hidrológico, sua importância como provedores de serviços

ecossistêmicos e os principais impactos que ameaçam essa reserva hídrica. No capítulo 3 – “**A gestão das águas subterrâneas: da teoria à prática**” – apresentam-se os principais instrumentos de gestão de águas e a forma como eles têm sido aplicados às águas subterrâneas. No capítulo 4 – “**Governança das águas subterrâneas e o fortalecimento da gestão integrada dos recursos hídricos**” – constam as estratégias e os desafios que precisam ser enfrentados na busca pela governança e a gestão integrada das águas subterrâneas. Ao final desse capítulo traz-se uma galeria de casos compostos de quatro experiências de gestão de aquíferos que buscam fomentar soluções para a sua degradação. São elas: *a*) o processo de remediação do aquífero Jurubatuba (na região metropolitana de São Paulo); *b*) o combate à superexplotação do aquífero Santo Domingo (México); *c*) as Comunidades de Águas Subterrâneas no Chile; e *d*) a gestão transfronteiriça do Aquífero Genebra, compartilhado entre a França e a Suíça.

A metodologia empregada é a análise documental da legislação, da literatura especializada e de documentos técnicos, bem como a apresentação de estudos de casos que servem para ilustrar o funcionamento dos aquíferos, demonstrar os riscos da falta de gestão ou o potencial dessas águas em promover o desenvolvimento. Para ampliar as visões sobre as águas subterrâneas utilizou-se o recurso dos “boxes” e da “galeria de casos”, cujo objetivo é aprofundar os conceitos e ideias trabalhadas nos capítulos, com base no relato de especialistas convidados. Os boxes são expostos no decorrer do texto, enquanto a galeria de casos se configura como uma sessão do Capítulo 4, ilustrando casos práticos que utilizam estratégias de governança para os aquíferos, apesar de todos os desafios envolvidos nesse processo.

Dessa forma, a obra se conforma como um esforço coletivo de muitos profissionais que se dedicam à governança/gestão dos aquíferos. A reserva hídrica subterrânea foi construída naturalmente ao longo de décadas, séculos e milênios, portanto, os seres humanos devem usar esse patrimônio de forma consciente e sustentável, maximizando os seus benefícios a longo prazo. O Box 1 expõe a necessidade de um processo de governança que busque conciliar o tempo dos aquíferos e dos seres humanos, bem como revela a complexidade dos desafios a serem enfrentados.

Box 1 – O tempo dos aquíferos e o tempo do ser humano

Veridiana T. de S. Martins

Toda a água da Terra é a mesma desde a origem do planeta, ou seja, não há geração de nova água, nem perda de água para fora do Sistema Terra. Nossa planeta é um sistema aberto para a energia (solar), mas fechado para a água. No Planeta Azul, a água tem sido reciclada por mais de 4 bilhões de anos. O ciclo da água, ou hidrológico, é o responsável por essa reciclagem, e é impulsionado pela energia solar. Assim, a molécula de água passa do estado sólido para o líquido e gasoso, ou faz o caminho contrário, e é transferida entre os diferentes reservatórios terrestres, tais como mar, lagos, rios, plantas, solo, rochas e animais. A água subterrânea corresponde a apenas 1% da água do Planeta. Por outro lado, representa 30% da água doce e 97% da água doce disponível em estado líquido (MARSHAK, 2019; PRESS et al., 2006; REYNOLDS et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2009). Nos mais de quatro bilhões de anos da Terra, uma mesma molécula de água já esteve em todos os reservatórios e mais de uma vez. Em alguns, a água se renova em dias, mas em outros pode demorar milhares de anos para atravessar, como no caso das águas subterrâneas.



Figura 1 – Poço de água no Castelo de Vincennes, França (Séc. XII)

Fonte: Foto: Veridiana T. S. Martins.

Nos oceanos, por conta do grande volume, o tempo de residência da água é de aproximadamente 3.000 anos; na atmosfera, o vapor de água dura em média apenas 10 dias; na biosfera é de aproximadamente uma semana; nos rios, duas; e nos solos de duas semanas a um ano (TEIXEIRA et al., 2009; MARSHAK, 2019). Nas coberturas de gelo e geleiras esse valor varia de dezenas a milhares de anos, sendo que há testemunhos de gelo da Antártica que datam de 2,7 milhões de anos (YAN et al., 2019). Nos lagos, o tempo de residência das águas é de dezenas de anos. As águas subterrâneas possuem um tempo de residência que varia entre dias, semanas a centenas de milhares de anos. Da sua área de recarga até a área de descarga, o Aquífero Guarani apresenta idades que variam de atuais até 835 mil anos (AGGARWAL et al., 2015). Essa idade mais antiga foi constatada em um poço no Município de Lins (SP). Quanto mais distante da área de recarga e mais profundo o poço, mais antiga é a água. A velocidade média do fluxo

de água no Aquífero Guarani é 0,7 m/ano (AGGARWAL *et al.*, 2015). Isso significa que as águas que são extraídas do poço que explora o Guarani na Cidade de Lins (SP) não são águas que entraram no aquífero nos dias atuais, mas sim, há mais de 800 mil anos. Nesse período, os hominídeos que andavam pelo planeta eram os *Homo erectus* e os *Homo heidelbergensis*, que estavam começando a controlar o fogo. No Brasil, o fóssil mais antigo encontrado é o de Luzia, datado de 12.500 a 13.000 anos, muito mais recente do que as águas do Guarani nesse poço em Lins.

A água sempre foi um importante recurso natural e, tanto a localização desses recursos quanto o domínio de sua exploração foram fundamentais ao desenvolvimento da humanidade. Crises hídricas e climáticas, aumento populacional, outros usos para a água, como na mineração, irrigação, geração de energia, indústrias, entre outros, são fatores que forçaram a procura e o desenvolvimento de técnicas capazes de extrair água do subterrâneo. Os primeiros poços construídos pelo ser humano datam de até 3.000 anos a.C., eram cavados formando espirais a fim de permitir o acesso com algum animal de carga, e não passavam de 50 m de profundidade (CUSHMAN; TARTAKOVSKY, 2017).

No início da Era Cristã havia pouco mais de 170 milhões de habitantes no Planeta. Hoje já são mais de sete bilhões de pessoas (ROSER; ORTIZ-OSPINA, 2019). A quantidade de água permanece a mesma. Nos últimos 120 anos, o volume de água consumido anualmente aumentou 500%, enquanto a população teve um aumento de 370% (RITCHIE; ROSER, 2018). Isso indica que a necessidade do recurso hídrico aumenta mais rapidamente do que a população. Associado a isso há o aumento dos problemas ambientais e, consequentemente, de contaminação do recurso hídrico.

A consciência ambiental e o conhecimento a respeito dos sistemas hídricos necessários para se evitar e enfrentar a contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos só passaram a existir mais recentemente na história de evolução da humanidade. Mesmo assim, a percepção dos impactos ambientais sobre os recursos hídricos subterrâneos ainda está longe de ser ideal. O desconhecimento sobre o seu funcionamento dá margem a interpretações quase que mágicas sobre a sua ocorrência e qualidade, muitas vezes desconectadas do restante dos recursos hídricos. É muito comum associarem a água subterrânea a uma água fornecida por Deus e que, por ser da natureza, é limpa: “*a terra filtra tudo*”.

A palavra *aquífero* não é ensinada nas escolas e pode soar tão estranha para adultos quanto para crianças. Certa vez, em uma prova de transferência para pessoas com diploma de nível superior (pessoas que já possuíam uma graduação), na pergunta que pedia a definição de aquífero, um candidato respondeu que “*aquífero era a junção de seres aquáticos*”. A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), de 2018, não menciona, em seu texto, a água subterrânea e nem aquíferos, havendo apenas a referência à palavra *sustentabilidade* em nota de rodapé. A BNCC é responsável por determinar o conteúdo¹ que deve ser ensinado aos alunos nas escolas e, por consequência, o teor dos livros didáticos, selecionados pelo Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD). Embora alguns livros didáticos abordem o tema *águas subterrâneas*, essa inclusão não é garantida pela BNCC, o que demonstra que não se dá o devido valor ao tópico *águas subterrâneas*, e nem se preparam os professores para trabalharem com elas em sala de aula.

O tempo das águas subterrâneas é muito diferente do tempo da sociedade, do destino que ela dá às águas e dos problemas gerados pelo seu uso. Em 2100 serão 10 bilhões de pessoas dependendo do mesmo volume de água que os seus antepassados, com o agravamento das mudanças climáticas e contaminações. Como reverter esse quadro? Como preservar a qualidade da água? Como usar a água de maneira sustentável? Como garantir água de qualidade para as futuras gerações?

Não há uma única resposta para essas perguntas e, também, não há solução individual. Não há outra forma de se atingir a sustentabilidade senão pelo conhecimento, educação, preparo, prevenção e trabalho coletivo. Somente dessa forma é possível melhorar a capacidade de reconhecer e resolver os problemas, promover a organização social e a participação civil, criar políticas públicas e leis que garantam a preservação do recurso hídrico e diminuir as vulnerabilidades, melhorando a percepção sobre os recursos hídricos subterrâneos. Em conjunto, essas ações podem mudar o cenário futuro e garantir água para as próximas gerações, respeitando o tempo dos aquíferos no tempo do ser humano.

¹ “A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) é um documento de caráter normativo que define o conjunto orgânico e progressivo de aprendizagens essenciais que todos os alunos devem desenvolver ao longo das etapas e modalidades da Educação Básica” (texto extraído da página do Ministério da Educação e Cultura (MEC) na internet. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov>).





Poço tubular no Sistema Aquífero Guarani da SAAE
de São Gabriel do Oeste (MS)
Foto: Roberto E. Kirchheim / Banco de Imagens ANA

CAPÍTULO 1

A CONSTRUÇÃO DA GOVERNANÇA E DA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS



1.1 GOVERNANÇA, GOVERNABILIDADE E GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: ALINHANDO OS CONCEITOS

O conceito de governança das águas subterrâneas emergiu na literatura no final dos anos 2000. Uma das suas primeiras e mais citadas definições foi estabelecida em um relatório conduzido pelo *Global Water Partnership*, que a definiu da seguinte forma:

é o conjunto de sistemas políticos, sociais, econômicos e administrativos que existem para desenvolver e gerir os recursos hídricos e a prestação de serviços de água nos diferentes níveis da Sociedade. (ROGERS; HALL, 2003, p. 7).

Desde então surgiram diversos conceitos e abordagens para a governança das águas (RIBEIRO; JOHNSON, 2018). Nessa profusão de literatura emergiu a ideia de governança das águas subterrâneas como uma vertente específica e mais restrita, justificada pelos seguintes fatores (JARVIS *et al.*, 2005; MADANI; DINAR, 2012; VILLHOLTH; CONTI, 2018):

- importância ecossistêmica, pois mantém o fluxo de base dos rios, nascentes e áreas úmidas;
- principal reservatório de águas doces disponível às populações no planeta;
- recurso natural mais extraído do subsolo no mundo e no Brasil;

- taxas de extração superam as taxas de reposição em vários aquíferos;
- contaminação que, em muitos casos, inviabiliza o aquífero em virtude da complexidade técnica e dos custos da despoluição;
- características específicas que dificultam a sua gestão, com destaque às seguintes: *a)* a invisibilidade natural e social dessas águas; *b)* a baixa velocidade do fluxo subterrâneo; *c)* a extensão dos aquíferos; e *d)* a dificuldade de controlar o seu acesso;
- percepção cultural de que essas águas se vinculam ao direito de propriedade do solo;
- políticas públicas que negligenciam as águas subterrâneas e sua relação com as águas superficiais;
- desconhecimento sobre a situação dessas águas e dos aquíferos.

Nesse contexto, entendeu-se que enfatizar a governança das águas subterrâneas contribuiria para fomentar a reflexão sobre a forma como Estados, usuários e sociedade geram esse recurso, e buscar estratégias específicas diante das particularidades naturais e sociais dos aquíferos. Não há um consenso sobre o significado da governança das águas subterrâneas, portanto, é possível encontrar diversas definições na literatura.

A governança das águas subterrâneas pode ser definida como:

[...] o exercício da autoridade competente e a promoção de ação coletiva responsável para garantir a utilização sustentável e eficiente dos recursos hídricos subterrâneos para o benefício da humanidade e dos ecossistemas dependentes. (FOSTER *et al.*, 2009, p. 3).

[...] a estrutura que comprehende as leis, regulamentos e costumes sobre o uso da água subterrânea, bem como os processos de engajamento do setor público, setor privado e sociedade civil. Pode envolver ações administrativas de coordenação e processos de tomada de decisão entre e dentro os diferentes níveis jurisdicionais. Esta estrutura fundamentalmente molda como as águas subterrâneas são geridas e como os aquíferos são usados. (MEGDAL *et al.*, 2014, p. 678).

[...] a promoção de uma ação coletiva responsável destinada a garantir o controle, a proteção e a utilização socialmente sustentável dos recursos hídricos subterrâneos e dos sistemas aquíferos para o benefício da humanidade e dos ecossistemas dependentes. (FAO, 2016, p. 17).

[...] a estrutura que comprehende o processo, as interações e as instituições, nas quais os atores (ou seja, governo, setor privado, sociedade civil, academia, etc.) participam e decidem sobre a gestão das águas subterrâneas dentro e através de múltiplas áreas geográficas (ou seja, subnacionais, transfronteiriças e global) e institucional/setorial, conforme aplicável. (VILLHOLTH; CONTI, 2018, p. 14).

A governança não se confunde com governabilidade, tampouco com gestão ou gerenciamento, embora essa distinção gere dúvidas e se observe confusão entre os termos. A distinção entre esses conceitos centra-se no número de atores envolvidos e na amplitude do seu escopo (VILLHOLTH; CONTI, 2018). A **governabilidade** é parte da governança, porém, restringe-se à “dimensão estatal do exercício de poder” (GONÇALVES, 2005, p. 3), concentrando-se nos atributos do exercício de poder do Governo e em suas condições sistêmicas, tais como: “o regime político (se democrático ou autoritário), a forma de governo (se parlamentarista ou presidencialista), as relações entre os poderes (maior ou menor assimetria, por exemplo), os sistemas partidários (se pluripartidarismo ou bipartidarismo).” (DINIZ, 1999, p. 196).

A **governança** tem escopo mais abrangente e inclusivo do que a governabilidade, pois incorpora o “conjunto de mecanismos e procedimentos para lidar com a dimensão participativa e plural da sociedade”, considerando as visões não apenas do governo (governabilidade), mas, também, dos cientistas, usuários, organizações não governamentais, sociedade civil e comunidades tradicionais (VILLHOLTH; CONTI, 2018). Pressupõe, portanto: *a) expandir e aperfeiçoar os meios de interlocução e de administração do jogo de interesses*; e *b) conferir ao Estado maior flexibilidade de atuação, permitindo a descentralização de funções, transferência de responsabilidades, e ampliar “o universo de atores participantes, sem abrir mão dos instrumentos de controle e supervisão.”* (DINIZ, 1999, p. 196).

Por sua vez, a **gestão** centra-se nos atores com competência para realizar ações rotineiras voltadas ao diagnóstico, monitoramento e aplicação de instrumentos de gestão ou das leis. Seu foco reside na atuação de técnicos e gestores hídricos dedicados a implementar as leis (políticas) por meio de ações específicas. Dessa forma, a gestão de recursos hídricos é uma função típica do Estado, que se orienta por meio de um arcabouço legal, no qual se estabelecem as diretrizes de atuação, os instrumentos de gestão e os responsáveis por levar a cabo os planos, programas e ações destinadas a garantir a qualidade e a quantidade da água para o atendimento das gerações atuais e, principalmente, das futuras gerações (CAMPOS; FRACALANZA, 2010). Segundo a FAO (2016, p. 17), o termo *gestão de águas subterrâneas* “compreende

as atividades realizadas por atores legitimados para desenvolver, usar e proteger de forma sustentável os recursos hídricos subterrâneos.”

Já o **gerenciamento de recursos hídricos** corresponde à execução de ações estruturais e não estruturais voltadas ao controle dos sistemas hídricos (naturais ou artificiais), com o objetivo de garantir o benefício humano e os requisitos ambientais (GRIGG, 1996). As medidas estruturais são aquelas que demandam a construção de estruturas, tais como: barragens, adutoras, Estações de Tratamento de Água (ETAs) e Esgoto (ETEs), ou obras de contenção de erosão no solo, recuperação de áreas contaminadas, desassoreamento de corpos d’água, entre outras. As medidas não estruturais correspondem aos programas ou atividades que não exigem obras, como zoneamento do uso e ocupação do solo, ações de educação ambiental, campanhas para a legalização do uso das águas, etc. (GRIGG, 1996).

À medida que se fortalece a ideia de governança, percebe-se uma mudança no paradigma da gestão das águas, que deixa de ser um tema exclusivo dos órgãos técnicos governamentais e passa a buscar parcerias com outros atores, inclusive incluindo outras abordagens, tais como: *a) aprendizagem social; b) técnicas de negociação e mediação de conflitos; c) saberes tradicionais; d) ações de educação ambiental; e) criação ou ampliação das oportunidades de participação dos usuários e da sociedade civil, etc.*

A necessidade de fortalecer a governança se justifica em razão de que os desafios da implementação da gestão das águas e do meio ambiente só serão superados com o apoio e parceria de diversos atores que vão além do Poder Público e dos usuários legitimados no sistema, devendo incluir as universidades, a sociedade civil e as comunidades tradicionais, bem como as organizações não governamentais e até as organizações internacionais. Cada um desses atores pode, de diversas formas, contribuir para a proteção dos aquíferos, tais como: *a) promoção e difusão do conhecimento técnico; b) adoção de tecnologias que economizem água; c) adoção de práticas conservacionistas no meio rural ou de manutenção da permeabilidade no meio urbano; d) respeito à legislação vigente; e) investimentos na melhoria das redes de abastecimento e de esgoto, entre outras.*

1.1.1 O conceito de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH) e seu papel na governança dos recursos hídricos subterrâneos

A GIRH se consubstanciou como o principal modelo de gestão de recursos hídricos adotado no mundo (BORCHARDT; BOGARDI; IBISCH, 2016). Organismos internacionais, tais como: *Global Water Partnership*, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), conferências internacionais e as edições do Fórum Mundial da Água – defendem que esse é o modelo mais eficiente para garantir sustentabilidade ao uso das águas. Seus apoiadores sustentam que os problemas hídricos poderiam ser solucionados pela GIRH, independentemente das diferentes condições físicas, econômicas, sociais e ambientais dos países (BISWAS, 2008). Advertem, porém,

que sua aplicação demanda um contexto de governança adequado para que, efetivamente, possa promover a boa governança das águas.

Boa parte da literatura atribuiu sua fundamentação aos princípios da Declaração de Dublin, de 1992, e à sua inclusão no Capítulo 18 da Agenda 21, adotada na Rio 1992, contudo, sua origem é anterior a tudo isso (BORCHARDT; BOGARDI; IBISCH, 2016). Alguns autores afirmam que a ideia de gestão integrada dos recursos hídricos remonta à primeira metade do século XIX, quando foi criada a *Tennessee Valley Authority* (TVA), em 1933, ou às discussões propostas na Conferência de Mar del Plata, na década de 1970 (BENSON; GAIN; ROUILLARD, 2015; BORCHARDT; BOGARDI; IBISCH, 2016).

Não há consenso sobre o que é a GIRH, contudo, o conceito mais difundido foi elaborado pelo *Global Water Partnership*, que assim a define:

GIRH é um processo que promove o desenvolvimento e gestão coordenada da água, terra e recursos relacionados, a fim de maximizar o bem-estar econômico e social resultante de forma equitativa, sem comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas vitais. (GWP, 2000, p. 22).

Esse conceito visa a promover a integração horizontal dos múltiplos usos e a integração vertical entre os diversos níveis institucionais (local, estadual ou provincial, nacional e transfronteiriço). Apesar do otimismo acerca desse conceito, ele é marcado por incertezas (BISWAS, 2008), tais como: quem e como se promove esse processo? Quais são os recursos naturais relacionados? Que parâmetros devem ser maximizados e como elegê-los? Qual o alcance desse bem-estar econômico e social? O que é sustentabilidade e quais seriam os seus parâmetros? Como definir os ecossistemas vitais e, em contrapartida, quais não o são? (BISWAS, 2008; VILLAR, 2015).

Na prática, os processos para alcançar a boa governança e implementar a GIRH são desafiadores e complementares. A GIRH estimula que a legislação e as instituições de água adotem os seguintes princípios: *i)* bacia hidrográfica como unidade espacial de gestão; *ii)* participação dos atores sociais; *iii)* mecanismos de financiamento; *iv)* monitoramento; e *v)* desenvolvimento de sistemas de informação. Além disso, incentiva que sejam adotadas as seguintes estratégias de gestão (VILLAR, 2015):

- definição dos papéis do Estado em relação aos outros atores e a forma como se operacionalizam as titularidades e as responsabilidades dos usuários e dos fornecedores de água;
- construção de parcerias entre governo, setor empresarial, comunidade e organizações voluntárias;
- prescrição em lei das instituições gestoras governamentais e das suas respectivas competências;
- busca de formas para garantir o uso sustentável do recurso;
- análise da situação dos recursos hídricos;
- instalação de consórcios de atores envolvidos no processo decisório, com representação dos setores da sociedade e equilíbrio de gênero;
- organização de sistemas de alocação e captação de água, permissão de descarte de águas residuais e bancos de dados;
- gestão de recursos hídricos baseada na bacia hidrográfica;

- estruturas organizacionais em nível de bacia e sub-bacias de forma a permitir a tomada de decisão no nível mais baixo possível;
- elaboração de planos para a GIRH com base em uma abordagem multisectorial e na participação dos atores.

No caso específico das águas subterrâneas, a GIRH chama a atenção para os seguintes pontos-chave:

- as águas superficiais e subterrâneas não podem ser geridas de forma separada entre si ou independentemente dos ecossistemas relacionados (KENNEDY *et al.*, 2009);
- a gestão das águas subterrâneas requer que se observe o balanço entre extração das águas subterrâneas e a sua recarga, bem como se faça um planejamento de uso de médio e longo prazo (KENNEDY *et al.*, 2009);
- a gestão das águas subterrâneas deve acompanhar o impacto da irrigação e de tarifas subsidiadas para o uso de energia e água que, embora desejáveis do ponto de vista socioeconômico, podem estimular a superexplotação do aquífero (FOSTER; AIT-KADI, 2012);
- a gestão das águas subterrâneas deve ser incluída nas políticas de urbanização em virtude do impacto do uso e ocupação do solo e da ausência ou inadequação dos serviços de saneamento (FOSTER; AIT-KADI, 2012);
- a escala espacial da bacia hidrográfica precisa de ajustes para promover a gestão dos aquíferos (FOSTER; AIT-KADI, 2012).

A partir dos anos 1990, diversos governos mudaram seus marcos legais e institucionais com o objetivo de implementar a GIRH e incorporar suas ferramentas na escala da bacia hidrográfica. E, por se tratar de um processo sociopolítico, cada país a incorporou de forma distinta (MIRANDA; REYNARD, 2020). As próximas sessões buscam demonstrar como o Brasil implementou esse processo em sua política de águas.

1.2 A CONSTITUIÇÃO FEDERAL DE 1988 E AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A Constituição Federal de 1988 representa um marco na gestão das águas subterrâneas, pois transformou radicalmente a sua natureza jurídica (discutida em detalhes no Box 2). Essas águas eram regidas pelo

Código de Águas (Decreto nº 24.643/1934) que, de forma geral, as enquadrava como águas particulares (art. 8º), sendo seu uso livre para os proprietários do terreno onde se encontravam (art. 96):

Art. 8º. São particulares as nascentes e todas as águas situadas em terrenos que também o sejam, quando as mesmas não estiverem classificadas entre as águas comuns de todos, as águas públicas ou as águas comuns.

Art. 96. O dono de qualquer terreno poderá apropriar-se por meio de poços, galerias, etc. das águas que existam debaixo da superfície de seu prédio contanto que não prejudique aproveitamentos existentes nem derive ou desvie de seu curso natural águas públicas dominicais, públicas de uso comum ou particulares.

Ao contrário das águas superficiais classificadas, majoritariamente, como águas públicas (uso comum ou dominicais) ou comuns, as águas subterrâneas, em sua maioria, eram consideradas particulares. Havia, porém, duas exceções a esse tratamento jurídico, restritas ao caso das nascentes, ou seja: *a)* formassem a cabeceira de um rio (*caput fluminis*) em virtude da abundância de seu fluxo, conforme previsto no art. 2º, alínea *e* do Decreto nº 24.643/1934; ou *b)* estivessem situadas em terrenos públicos (TOVAR, 1955). Apesar nesses dois casos, as águas subterrâneas seriam consideradas públicas.

Dessa forma, as águas subterrâneas estavam atreladas ao Direito de Propriedade (estabelecido à época pelo art. 526 do Código Civil de 1916). Seu aproveitamento era permitido desde que não houvesse desvio de nascentes que abasteciam populações (art. 94) e nem causassem prejuízo ou diminuição das águas públicas dominicais ou públicas de uso comum ou particulares de terceiros (art. 96, parágrafo único) (TOVAR, 1955). Além disso, eram proibidas construções que poluissem ou utilizassem a água do poço ou nascente alheia (art. 98), bem como a abertura de poço junto à propriedade vizinha (art. 97).

Os arts. 34, inc. I, e 35 da Constituição Federal de 1946, cuja redação foi mantida pela Carta Magna de 1967, publicizou todas as águas superficiais, repartindo seu domínio entre a União e os Estados, contudo, silenciou-se no tocante às águas subterrâneas, que continuaram privadas:

Art. 34. Incluem-se entre os bens da União:

I – os lagos e quaisquer correntes de água em terrenos do seu domínio ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limite com outros países ou se estendam a território estrangeiro, e bem assim as ilhas fluviais e lacustres nas zonas limítrofes com outros países;

Art. 35. Incluem-se entre os bens do Estado os lagos e rios em terrenos do seu domínio e os que têm nascente e foz no território estadual.

Dessarte, as águas subterrâneas somente se tornaram públicas com a promulgação da Constituição Federal de 1988, que repartiu o domínio das águas entre União e Estados, conforme determinam os seus arts. 20 e 26:

Art. 20. São bens da União:

III - os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais;

[...]

IX - os recursos minerais, inclusive os do subsolo;

Art. 26. Incluem-se entre os bens dos Estados:

I – as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União.

As águas atribuídas à União, no inc. III, restringem-se às águas superficiais (lagos, rios e correntes de água) que preencham as seguintes condições: “limítrofes com Estados ou com outro país, ou situadas em mais de um Estado ou país.” (MILARÉ, 2020, p. 1154). Por sua vez, o art. 26 atribui aos Estados os recursos hídricos superficiais e subterrâneos compreendidos em seu território. No caso das águas subterrâneas, entretanto, não há qualquer condicionante territorial (MILARÉ, 2020). Apesar disso, em virtude de especificidades previstas na legislação mineral, algumas águas subterrâneas são classificadas como recursos minerais, submetendo-se ao domínio da União. Esse tema será tratado com detalhes mais adiante, no item *Águas subterrâneas e águas minerais*.

As águas subterrâneas, portanto, pertencem aos Estados (CAMARGO; RIBEIRO, 2009; FERNANDES, 2019; VILLAR; GRANZIERA, 2020). A Carta Magna extinguiu as águas municipais e particulares, cujo entendimento foi corroborado pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (Lei nº 9.433/1997), que classificou a água como um bem de domínio público (art. 1º, inc. I). Com isso, não mais se aplicou o Direito de Propriedade sobre os recursos hídricos, cujo uso passou a ser condicionado à regulação estadual. A maioria das disposições do Código de Águas tornou-se incompatível com o regime de dominialidade instituído pela Constituição Federal e com o regime das águas da Lei nº 9.433/1997.

Na jurisprudência do Superior Tribunal de Justiça (STJ) insinuou-se a possibilidade de existirem águas subterrâneas federais (STJ, 2013; 2016a; 2016b). Esses acórdãos adotaram a linha de argumentação do art. 20, inc. III da CF/88 ao atribuir o domínio da União aos “rios, lagos e quaisquer correntes de água”, não fazendo diferenciação quanto ao fato de serem superficiais ou subterrâneos, cabendo apenas observar a localização do recurso, ou seja, se ele se situa em terrenos de domínio federal, se serve de limite com outros países, ou se estende/provém de território estrangeiro.

Essa interpretação surgiu em ações cujo objetivo era discutir a legalidade ou ilegalidade de atos do Poder Público que, amparados por decretos estaduais ou pelo art. 45 da Política Nacional de Saneamento (PNS) (Lei nº 11.445/2007), visavam a coibir o uso de poços sem outorga, como fonte alternativa de água em áreas dotadas de rede de abastecimento de água. Essa tese jurídica, portanto, foi aventada em ações que não discutiam o domínio estadual ou federal, e se deu num processo sem a participação dos Estados ou da União.

Por isso, o teor da decisão a seguir (e de outras similares) não tem força legal para afastar o domínio estadual das águas subterrâneas. Essa controvérsia já foi aventada no âmbito do Executivo e Legislativo nos anos 2000 por meio da discussão do Projeto de Emenda à Constituição (PEC) nº 43/2000, que buscava transferir ao domínio federal as águas subterrâneas que ultrapassassem os limites estaduais ou que fossem compartilhadas com outros países. A PEC 43/2000 foi estimulada, em grande parte, pela discussão sobre o Aquífero Guarani, contudo, foi arquivada por questões de mérito. Nesse sentido, a Comissão de Constituição, Justiça e Cidadania se manifestou de forma contrária à proposta:

A medida consignada na proposta em exame mostra-se contrária ao modelo descentralizado de gestão de recursos hídricos desenvolvido nos últimos anos, que, em nossa visão, é o que melhor se adapta à necessidade de conciliar o aproveitamento dos recursos à gestão ambiental, especialmente em vista do nosso arranjo federativo e das dimensões do país. O debate travado na Audiência Pública realizada na CMA sobre a titularidade e o gerenciamento das águas revelou que a transferência para a União da titularidade das águas subterrâneas não contribui para o aperfeiçoamento da Política Nacional de Recursos Hídricos. (CASAGRANDE; ABREU, 2010, p. 4).

Trecho do Recurso Especial nº 1.306.093 que trata da existência de águas subterrâneas nacionais em ação que discute sobre a possibilidade de coexistência de poços em áreas dotadas de rede pública de água

[...] as águas subterrâneas não são mencionadas, de modo explícito, no art. 20, inciso III, da Constituição Federal, que define os bens da União. Já, no art. 26, inciso I, que dispõe sobre os recursos hídricos estaduais, delas cuida diretamente. A diferente forma de expressão nos dois dispositivos constitucionais levou alguns a defenderem a tese de que as águas subterrâneas seriam – sempre e em qualquer circunstância – de domínio dos Estados, nunca da União. Trata-se, não custa reiterar, de interpretação equivocada do texto constitucional. Primeiro, no plano teleológico, já que os mesmos fundamentos que materialmente justificam, nos termos do art. 20 da Constituição Federal, a dominialidade federal das águas superficiais (ocupação de terrenos federais, espraiamento por mais de um Estado, demarcação de fronteira internacional, ou origem ou destino internacional) recomendariam, com maior razão até que não se deixem águas subterrâneas sob o domínio exclusivo dos Estados e Distrito Federal. Segundo, porque o que se tem, na comparação dos dois artigos, não é omissão, pura e simples, das águas subterrâneas no art. 20, mas o uso de técnica de redação que dispensa tal menção, pois o legislador limitou-se a falar em lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham. Ora, não fez nenhuma alusão ao fato de tais rios, lagos e correntes serem superficiais ou subterrâneos. O art. 26 tinha mesmo que mencionar as águas subterrâneas, pois, se não o fizesse, correr-se-ia o risco de, por interpretação, afirmar que todas as águas subterrâneas seriam de propriedade da União, conquanto quase impossível (situação que se altera, gradativamente, com avanços tecnológicos) dizer, com precisão, onde começa e termina um aquífero. O que se pretendeu, portanto, não foi excluir a União da dominialidade, mas assegurar que os Estados não seriam apartados das águas subterrâneas, de modo a fazer coincidirem as mesmas hipóteses fáticas de reconhecimento de sua dominialidade sobre águas de superfície. (STJ. *Recurso Especial nº 1.306.093-RJ. 2ª Turma.* Relator: Ministro Herman Benjamin, j. 28/05/2013).

A inclusão das águas subterrâneas na ideia de “rios, lagos ou quaisquer correntes de água” foge da definição técnica desses termos que, na literatura sobre Hidrologia, se enquadram como *recursos hídricos superficiais*. As águas subterrâneas não estão compreendidas nesses termos, pois se movimentam através dos poros ou fissuras das rochas, portanto, salvo situações muito específicas, o fluxo não forma correntes de águas, sendo lento e heterogêneo, como se verá com maior detalhamento no Capítulo 2.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e diversos Comitês de Bacia se manifestaram contrários à PEC nº 43/2000 (CASAGRANDE; ABREU, 2010). Os argumentos para esse posicionamento remetem à dificuldade de precisar os sistemas aquíferos e seus limites, uma vez que são formados por diversas formações geológicas, com distintos limites. Criar, portanto, um sistema que exigisse determinar quais aquíferos pertencem à União e quais aos Estados geraria grandes dificuldades à gestão. Além disso, a gestão dos aquíferos deve priorizar a escala local em virtude das características dos fluxos subterrâneos.

Sendo assim, cabe aos estados brasileiros estabelecer as políticas para a gestão de seus recursos hídricos subterrâneos, conforme determinam as diretrizes previstas pela legislação nacional. Além de definir o domínio das águas, a Constituição Federal de 1988 determinou no art. 21, inc. XIX, a obrigação da União “instituir o sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir os critérios de outorga de direito de seu uso.” O art. 22, inc. IV, por sua vez, atribuiu à União a competência privativa para legislar sobre o direito de águas (VILLAR; GRANZIERA, 2020). Tais comandos constitucionais abriram caminho à promulgação da Lei nº 9.433/1997, que fundamenta as bases da governança hídrica no país. A gestão estadual das águas subterrâneas está condicionada à observância dos pressupostos constantes na legislação federal de águas. O domínio estadual não interfere na capacidade da União em estabelecer negociações que envolvam aquíferos transfronteiriços (art. 21, inc. I, da CF/88), tanto é assim que o Brasil celebrou, com a Argentina, Paraguai e Uruguai, o Acordo sobre o Aquífero Guarani, cujos pressupostos devem ser obedecidos pelos Estados.

Box 2 – Natureza Jurídica das Águas Subterrâneas

Pilar Carolina Villar e Maria Luiza Machado Granziera

O art. 3º, inc. V, da Lei nº 6.938/1981, ao tratar dos recursos ambientais faz menção às águas subterrâneas, interiores, superficiais e aos estuários. Trata-se, pois, de bens públicos, sujeitos à proteção por força da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA).

Essa proteção refere-se, também, ao art. 225 da CF/88, segundo o qual “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida.” A expressão *bem de uso comum do povo* não se confunde com os bens públicos de uso comum estabelecidos no art. 99, inc. I, do Código Civil, pois o equilíbrio ambiental (macrobem) não é público ou privado, mas refere-se muito mais a um interesse ou a uma necessidade do que a um domínio ou uma propriedade (GRANZIERA, 2019). Da mesma forma, o art. 1º, inc. I, da Lei nº 9.433/1997, classifica as águas contidas em corpos hídricos (rios, lagos ou aquíferos) como um bem de domínio público. O Poder Público, portanto, não é o proprietário do meio ambiente ecologicamente equilibrado, mas o seu gestor, cuja função é administrar bens que não lhe pertencem, de forma fundamentada e participativa (YOSHIDA, 2007; MACHADO, 2010; VILLAR; GRANZIERA, 2020).

A Lei nº 6.938/1981 define meio ambiente como “o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas.” Ou seja, o equilíbrio ambiental ou o meio ambiente ecologicamente equilibrado que garante a vida em todas as suas formas é o macrobem, protegido pela Carta Magna, a que todos têm direito. A água é um componente central desse contexto imaterial do meio ambiente. Ela está em movimento no ciclo hidrológico (subterrâneo, superficial, meteórico) e conecta-se à perspectiva ambiental de macrobem, sendo classificada como bem de natureza difusa e de uso comum do povo (VILLAR; GRANZIERA, 2020; VIEGAS, 2005).

Com o advento do Código de Defesa do Consumidor (CDC), o macrobem ambiental, como bem de uso comum do povo, passou a ser interpretado como interesse ou direito difuso “assim entendidos [...], os transindividuais, de natureza indivisível, de que sejam titulares pessoas indeterminadas e ligadas por circunstâncias de fato.” (art. 81, inc. I, do CDC).

Benjamin (1993, p. 75) explica que esse “complexo ambiental é composto por entidades singulares” que, de forma isolada, também são bens jurídicos. Nesse caso, as águas, inclusive as subterrâneas, como recursos ambientais (art. 3º, inc. V), consistem em microbens, sujeitos aos regimes jurídicos específicos. Para tanto, regras próprias definem o domínio (federal ou estadual), o uso (outorga de direito de uso de recursos hídricos) e a proteção (resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama).

As águas subterrâneas, como microbens, de acordo com a Lei nº 9.433/1998, se enquadram como recursos hídricos e correspondem à “parcela de água sujeita à destinação específica para uso ou utilização por pessoa física ou jurídica.” (VILLAR; GRANZIERA, 2020). A alocação privada dessa água deve obedecer aos critérios da Lei nº 9.433/1997, que exige a obtenção de outorga de direito de uso de recursos hídricos por meio de decisão fundamentada do órgão gestor estadual (VILLAR; GRANZIERA, 2020). As águas pluviais e aquelas derivadas dos corpos hídricos não mais se caracterizam como públicas e passam a compor o domínio daquele que as captou, desde que respeitadas as formalidades legais.

Excepcionalmente, o Código de Águas Minerais estabelece situações em que as águas subterrâneas são classificadas como recursos minerais. Para que isso ocorra, essas águas devem apresentar determinadas características físicas ou físico-químicas, ou, ainda, de potabilidade, além de se enquadrar nos seguintes tipos de usos: água mineral, termal, gasosa, de mesa ou destinado a fins balneários. Nesse caso, é exigida autorização de pesquisa e exploração, bem como a obtenção do direito de lavra junto à Agência Nacional de Mineração. Alguns Estados, como o Ceará¹ e São Paulo² determinaram que a exploração da água subterrânea como recurso mineral também se condiciona à legislação de recursos hídricos. Nesse caso, essas águas possuem, concomitantemente, natureza jurídica de recurso hídrico e mineral.

1. Mais informações, consultar o Anexo 13 da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – CE (Disponível em:).
2. No estado de São Paulo, empreendimentos destinados ao envase de águas potáveis de mesa, minerais ou fins balneários se sujeitam ao cadastro por meio do Sistema de Outorga Eletrônica, para fins de gerenciamento dos recursos hídricos. No caso de captações em nascentes consultar a Instrução Técnica DPO nº 9/2017 e no caso de poços consultar a Instrução Técnica DPO nº 10/2017.

1.3 A POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH): UMA NOVA FORMA DE GERIR AS ÁGUAS

A Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil foi instituída pela Lei nº 9.433/1997, e é composta por 57 artigos divididos em quatro títulos: Título I – Da Política Nacional de Recursos Hídricos; Título II – Do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh); Título III – Das Infrações e Penalidades; e Título IV – Das Disposições Gerais e Transitórias. Os dispositivos da política de águas se referem às águas de maneira geral, sem diferenciar águas superficiais e subterrâneas.

Esse diploma transformou a gestão dos recursos hídricos até então regulamentada pelo Código de Águas (Decreto nº 24.643/1934) (POMPEU, 2006). O Código de Águas, editado sob os auspícios do Governo Provisório decorrente da Revolução de 1930, tinha uma visão centralizadora, privatista e utilitarista, focada principalmente no uso do potencial hidráulico, sem

preocupação com a conservação das águas (MILARÉ, 2020). A Lei nº 9.433/1997, por sua vez, foi o resultado de um longo processo de debates, e estruturou um modelo de governança pautado na gestão descentralizada, integrada e participativa (BARBI; JACOBI, 2007), que incorporou as principais diretrizes do modelo da GIRH.

A Figura 2 demonstra os fundamentos, objetivos, diretrizes, instrumentos de gestão e as instituições contidas na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Essa lei adotou a bacia hidrográfica como unidade de gestão, permitiu a participação dos atores sociais, atribuiu um valor econômico à água, determinou as organizações responsáveis pela gestão, estabeleceu instrumentos para orientar o aproveitamento, uso, proteção das águas e o sistema de informação. Além disso, estabeleceu que a gestão das águas deve integrar os aspectos de quantidade e qualidade, bem como levar em conta os múltiplos usos dos recursos hídricos, a gestão ambiental, o uso do solo, o planejamento territorial e a relação com os sistemas estuarinos e zonas costeiras.

FUNDAMENTOS (art. 1º)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ bem de domínio público; ▪ recurso natural limitado, dotado de valor econômico; ▪ uso prioritário para o consumo humano e a desidratação de animais em situações de escassez; ▪ uso múltiplo das águas; ▪ bacia hidrográfica como unidade territorial para implementação da PNRH e atuação do Singreh; ▪ gestão descentralizada e participativa (Poder Público, usuários e comunidades).
OBJETIVOS (art. 2º)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade hídrica, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; ▪ utilização racional e integrada dos recursos hídricos; ▪ prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos; ▪ incentivar e promover a captação, a preservação e o aproveitamento de águas pluviais.
DIRETRIZES GERAIS DE AÇÃO (art. 3º)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade; ▪ adequação da gestão de recursos hídricos às diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais das diversas regiões do País; ▪ integração da gestão hídrica com a ambiental; ▪ articulação do planejamento hídrico com os setores usuários e com os planejamentos regional, estadual e nacional; ▪ articulação da gestão hídrica com a do uso do solo; ▪ integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras.
INSTRUMENTOS DE GESTÃO (art. 5º)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ planos de Recursos Hídricos; ▪ enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; ▪ outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; ▪ cobrança pelo uso de recursos hídricos; ▪ Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

continua →

SINGREH (art. 33º)

- Conselho Nacional de Recursos Hídricos;
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico;
- Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do DF;
- Comitês de Bacia Hidrográfica;
- órgãos dos poderes públicos federal, estaduais, do DF e municipais cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos;
- Agências de Água.

Figura 2 – Fundamentos, objetivos, diretrizes, instrumentos de gestão e arquitetura institucional da Política Nacional de Recursos Hídricos

Fonte: Brasil (Lei nº 9.433/1997).

A aplicação da PNRH é conduzida pelo Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh), que se materializa num conjunto de órgãos e colegiados destinados a implementar a gestão integrada das águas. A integração da gestão das águas superficiais, subterrâneas e meteóricas é necessária diante da indissociabilidade do ciclo hidrológico. Há, contudo, uma série de desafios que envolvem o problema das distintas territorialidades, a competência dos diferentes órgãos gestores e entes administrativos, a setorização das políticas públicas e a participação dos atores sociais.

A Lei nº 9.433/1997 não trouxe diretrizes específicas às águas subterrâneas, nem definiu o conceito e alcance da gestão integrada ou forma de conciliar a territorialidade da bacia hidrográfica com a dos aquíferos, tampouco especificou a maneira de se aplicar os instrumentos de gestão às particularidades das águas subterrâneas, ou de construir a coordenação com outras políticas, tais como a ambiental, saneamento, desenvolvimento territorial, costeira, municipal, estadual e nacional. Ao estabelecer o Singreh, porém, criou-se um aparato institucional capaz de adaptar e operacionalizar a gestão às particularidades dos recursos subterrâneos. A Res. CNRH nº 202/2018, no art. 3º, estabelece os principais aspectos a serem considerados na gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas:

- I. delimitação das áreas de recarga e de contribuição dos aquíferos para os rios diretamente conectados;
- II. estimativa da contribuição dos aquíferos para a vazão de base dos rios;
- III. estimativa da recarga e as reservas explotáveis e renováveis;
- IV. estimativa da disponibilidade hídrica integrada subterrânea e superficial para os diversos usos, considerando os incisos anteriores; e

V. as redes de monitoramento hidrometeorológica e hidrogeológica necessárias.

A edição da Lei nº 9.433/1997 representou um avanço à gestão das águas e, apesar da sua aplicação ter priorizado os recursos superficiais, gradativamente, percebe-se um esforço institucional para incluir as águas subterrâneas. A falta de dados técnicos, de redes de monitoramento, de aderência dos usuários aos instrumentos de gestão, de fiscalização do Poder Público e de consciência social sobre o recurso, contudo, dificultam a sua aplicação.

1.4 O ARRANJO INSTITUCIONAL PARA A PROTEÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: O SINGREH

O Singreh corresponde ao conjunto de órgãos e entidades que atuam na gestão de recursos hídricos no Brasil, com hierarquias e atribuições específicas segundo a sua escala de atuação. Seus objetivos foram definidos no art. 32 da Lei nº 9.433/97:

- coordenar a gestão integrada das águas;
- arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos;
- implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos;
- planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos;
- promover a cobrança pelo uso de recursos hídricos.

A Figura 3 apresenta o organograma e as atribuições dos órgãos e entidades que compõem o Singreh. Devido à repartição do domínio das águas, o sistema se

divide em dois níveis de competência: federal e estadual. Essa arquitetura político-administrativa é composta por órgãos estruturados em três categorias, conforme a sua natureza e atuação (GRANZIERA, 2015, p. 125):

- **Órgãos colegiados:** Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH); Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal; e Comitês de Bacia Hidrográfica;
- **Órgãos e entidades de gestão e controle:** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Agências de Água, órgãos e entidades dos poderes públicos federal, estaduais, do Distrito Federal e municipais, cujas competências se

relacionem com a gestão e controle de recursos hídricos;

- **Organizações civis de recursos hídricos:** a) consórcios e associações intermunicipais de bacias hidrográficas; b) associações regionais, locais ou setoriais de usuários de recursos hídricos; c) organizações técnicas e de ensino e pesquisa com interesse na área de recursos hídricos; d) organizações não governamentais com objetivos de defesa de interesses difusos e coletivos da sociedade; e) outras organizações reconhecidas pelo Conselho Nacional ou pelos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos.

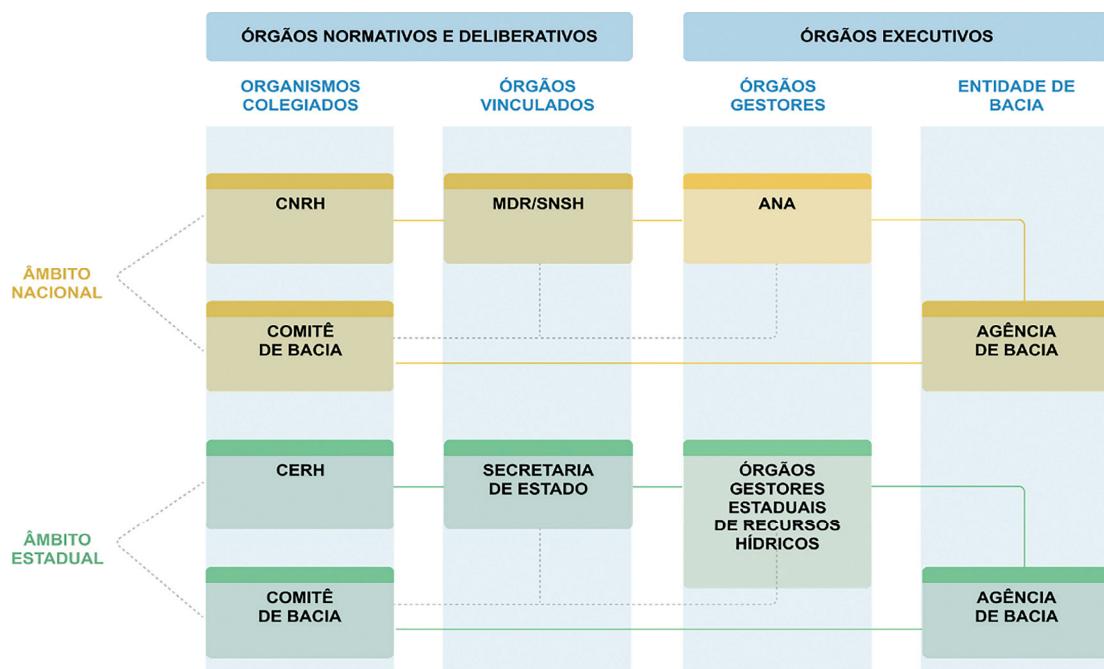


Figura 3 – Matriz e funcionamento do Singreh*

Fonte: Villar e Granziera (2020, p. 48). (*) Composição, natureza jurídica e atribuições específicas de cada órgão ou entidade serão detalhadas nos próximos itens.

Os órgãos do Singreh são os responsáveis por promover a gestão integrada das águas e conciliar a territorialidade dos aquíferos e da bacia. Nesse sentido, quando os aquíferos ultrapassam os limites da bacia, esses órgãos devem promover “a uniformização de diretrizes e critérios para coleta dos dados e elaboração dos estudos hidrogeológicos necessários à identificação e caracterização da bacia hidrogeológica” (art. 4º da Res.

CNRH nº 15, de 11 de janeiro de 2001), e os Comitês de Bacia Hidrográfica “deverão buscar o intercâmbio e a sistematização dos dados gerados para a perfeita caracterização da bacia hidrogeológica” (art. 4º, parágrafo único).

No caso dos aquíferos transfronteiriços ou interestaduais, o Singreh é responsável por promover a integração dos “órgãos dos governos federal, estaduais

e do Distrito Federal que têm competências no gerenciamento de águas subterrâneas.” Caso haja conflitos nesse processo, os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal são os responsáveis por resolvê-los em primeira instância, e o CNRH em última instância (art. 5º, § 1º, da Res. CNRH nº 15/2001). No caso dos aquíferos transfronteiriços, deve-se levar em conta os acordos celebrados entre a União e os países com os quais o aquífero é compartilhado.

Além disso, o Sistema Nacional e os Sistemas Estaduais e do Distrito Federal de Gerenciamento de Recursos Hídricos devem orientar os municípios a: *a)* promover a gestão integrada das águas subterrâneas de forma a seguir os planos de recursos hídricos; *b)* proteger as áreas de recarga dos aquíferos; e *c)* estimular a adoção de práticas de reuso e de recarga artificial (Res. CNRH nº 15/2001).

Não se pode esquecer, porém, que embora as águas subterrâneas sejam geridas pelos sistemas estaduais de recursos hídricos, esses integram uma ordem nacional. Há, portanto, toda uma infraestrutura institucional e normativa nacional que influencia essa gestão. Os estados são os responsáveis por organizar a gestão das águas subterrâneas, controlar o uso e qualidade, bem como fiscalizar o seu uso, contudo, suas políticas devem estar alinhadas à política nacional de recursos hídricos. Tradicionalmente, a gestão do uso (quantidade) é realizada pelos órgãos estaduais de recursos hídricos, enquanto os aspectos de qualidade são analisados pelos órgãos estaduais ambientais, estabelecidos pelo Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama).

Para mais informações sobre os órgãos estaduais de recursos hídricos e meio ambiente, consultar:

<https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos/orgaos-gestores/lista-de-orgaos-gestores-estaduais>.

Os órgãos que compõem a estrutura nacional do Singreh têm importante papel na orientação e coordenação dessa gestão estadual, o que será exposto com mais detalhes nos próximos itens.

1.4.1 Ministério do Desenvolvimento Regional: o novo coordenador da gestão de águas

Originalmente, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) era o órgão central do Singreh, e sediava a Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e a Agência

Nacional de Águas³ (ANA). No MMA, a Secretaria de Recursos Hídricos era a responsável por: *a)* monitorar o funcionamento do Singreh; *b)* promover a integração da gestão de recursos hídricos e ambiental; *c)* coordenar a elaboração e auxiliar no acompanhamento e implementação do Plano Nacional de Recursos Hídricos; *d)* promover a cooperação técnica e científica; *e)* ordenar, em sua esfera de competência, a elaboração de planos, programas e projetos nacionais referentes a águas subterrâneas, e monitorar o desenvolvimento de suas ações dentro do princípio da gestão integrada dos recursos hídricos (art. 11 do Decreto nº 4.755, de 20 de junho de 2003).

A partir da Medida Provisória nº 870, de 1º de janeiro de 2019, convertida na Lei nº 13.844/2019, a Política Nacional de Recursos Hídricos passou a integrar o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) – pasta que surgiu da fusão dos Ministérios das Cidades e da Integração Nacional. Além da PNRH, o MDR tem competência nas seguintes políticas relacionadas à gestão hídrica: Política Nacional de Desenvolvimento Regional (PNDR); Política Nacional de Desenvolvimento Urbano (PNDU); Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC); Política Nacional de Segurança Hídrica (PNSH); Política Nacional de Irrigação (PNI), observadas as competências do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA); Política Nacional de Saneamento (PNS), e formulação e gestão da Política Nacional de Ordenamento Territorial (PNOT). Além disso, passou a ser o responsável pelos planos, programas, projetos e ações de gestão de recursos hídricos, infraestrutura e garantia da segurança hídrica, irrigação, proteção e defesa civil e de gestão de riscos e desastres, e habitação, saneamento, mobilidade e serviços urbanos (art. 29).

A Secretaria Nacional de Recursos Hídricos (SNRH) foi extinta e cedeu lugar à Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (SNSH), composta pelo Departamento de Obras Hídricas e Apoio a Estudos sobre Segurança Hídrica, pelo Departamento de Projetos Estratégicos, e pelo Departamento de Recursos Hídricos e de Revitalização de Bacias Hidrográficas (art. 2º, inc. II, *b*, do Decreto nº 10.773/2021). As competências da SNSH incluem: *a)* coordenar a formulação, revisão, implementação, monitoramento e avaliação da Política Nacional de Segurança Hídrica, da Política Nacional de Recursos Hídricos e de seus instrumentos; *b)* for-

3. Atualmente, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

mular políticas, planos e normas e definir estratégias sobre gestão integrada de recursos hídricos, incluídas as águas fronteiriças e transfronteiriças; *c*) coordenar a elaboração e a revisão de planos, programas e projetos nacionais referentes a águas subterrâneas, e monitorar o desenvolvimento de suas ações, de acordo com o princípio da gestão integrada dos recursos hídricos; e *d*) exercer a função de Secretaria-Executiva do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (art. 19 do Decreto nº 10.773/2021).

As competências do Departamento de Obras Hídricas e Apoio a Estudos sobre Segurança Hídrica, do Departamento de Projetos Estratégicos e do Departamento de Recursos Hídricos e de Revitalização de Bacias Hidrográficas se encontram, respectivamente, nos arts. 20, 21 e 22 do Decreto nº 10.773/2021. O Departamento de Obras Hídricas e Apoio a Estudos sobre Segurança Hídrica é o responsável pelo apoio à execução de obras de perfuração de poços e pelo acompanhamento da implementação das ações dos projetos destinados à ampliação da oferta hídrica. O Departamento de Projetos Estratégicos, por sua vez, tem papel protagonista na elaboração de estudos e propostas da Política Nacional de Segurança Hídrica e de seus instrumentos e no acompanhamento, supervisão e fiscalização das ações destinadas ao aproveitamento estratégico dos recursos da água e do solo. Já o Departamento de Recursos Hídricos e de Revitalização de Bacias Hidrográficas é o responsável por: *a*) coordenar, apoiar e monitorar a implementação da Lei nº 9.433/1997 e do Plano Nacional de Recursos Hídricos; *b*) apoiar os Estados e o Distrito Federal na implementação das políticas e sistemas de gerenciamento estaduais; *c*) apoiar tecnicamente a constituição e o funcionamento dos comitês de bacias hidrográficas; *d*) propor diretrizes para o gerenciamento de aquíferos fronteiriços e transfronteiriços; *e*) elaborar planos, programas e projetos relacionados aos recursos hídricos, incluindo as águas subterrâneas; *f*) exercer a Secretaria-Executiva do CNRH; e *g*) articular a gestão de recursos hídricos com a do uso do solo.

1.4.2 O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e seu papel no estabelecimento de diretrizes às águas subterrâneas

O CNRH, com caráter nacional, é o órgão consultivo e deliberativo do Singreh, que a partir de 2019 passou a integrar a Estrutura Regimental do MDR. Sua atuação foi prevista nos arts. 33, inc. I, e 34 a 36 da Lei 9.433/1997, e no art. 2º da Lei nº 9.984/2000, e

foi regulamentado pelo Decreto 10.000/2019. O art. 2º da Lei nº 9.984/2000 atribui ao CNRH a seguinte função:

Art. 2º. Compete ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos promover a articulação dos planejamentos nacional, regionais, estaduais e dos setores usuários elaborados pelas entidades que integram o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e formular a Política Nacional de Recursos Hídricos, nos termos da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.

As competências do CNRH encontram-se elencadas no art. 1º do Decreto nº 10.000/2019 e em seu Regimento Interno, aprovado pela Resolução CNRH nº 215, de 30 de junho de 2020. Esse colegiado é responsável por estabelecer diretrizes complementares à implementação da Lei nº 9.433/1997. O CNRH editou diversas resoluções a fim de orientar a gestão e a aplicação dos instrumentos de gestão às águas subterrâneas (Quadro 1).

Esses atos normativos nacionais orientam os Estados e os comitês de bacia no processo de aplicação dos instrumentos de gestão hídrica às águas subterrâneas e estabelecem diretrizes e ações de gestão, como é o caso da implantação da rede de monitoramento integrado ou das diretrizes gerais para a recarga artificial e intercâmbio de dados entre órgãos estaduais de recursos hídricos e o sistema de águas minerais.

Até a edição do Decreto nº 10.000/2019, o CNRH possuía uma Câmara Técnica de Águas Subterrâneas (CTAS), que tinha como principais objetivos: *a*) discutir e propor a inserção da gestão das águas subterrâneas na PNRH; *b*) compatibilizar as legislações relativas à sua exploração e utilização; *c*) propor mecanismos institucionais de integração de gestão das águas; *d*) propor mecanismos de proteção e gerenciamento e ações mitigatórias e compensatórias; *e*) analisar e propor ações com vistas a minimizar ou solucionar conflitos (art. 2º da Res. CNRH nº 9, de 21 de junho de 2000). As atribuições da CTAS foram incorporadas pela Câmara Técnica de Integração com a Gestão Ambiental e Territorial (CTIGAT) (art. 9º, inc. IV, do Decreto nº 10.000/2019).

O CNRH também tem competência para atuar na resolução de conflitos entre os Estados relacionados às águas superficiais e subterrâneas. Esse papel de mediação pode ser muito importante no caso dos aquíferos interestaduais e transfronteiriços, ou no caso de conflitos que envolvam a contribuição dos aquíferos aos rios federais.

RESOLUÇÕES NACIONAIS EDITADAS PELO CNRH	
Resolução CNRH nº 15/2001	Estabelece as diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas
Resolução CNRH nº 16/2001	Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos
Resolução CNRH nº 22/2002	Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas nos Planos de Recursos Hídricos
Resolução CNRH nº 29/2002	Define diretrizes para outorga de uso dos recursos hídricos e aproveitamento dos recursos minerais
Resolução CNRH nº 48/2005	Estabelece critérios gerais para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos
Resolução CNRH nº 76/2007	Estabelece diretrizes gerais para integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários
Resolução CNRH nº 91/2008	Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos
Resolução CNRH nº 92/2008	Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro
Resolução CNRH nº 107/2010	Estabelece diretrizes e critérios a serem adotados no planejamento, implantação e operação de Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas
Resolução CNRH nº 126/2011	Aprova diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos
Resolução CNRH nº 153/2013	Estabelece critérios e diretrizes para implantação de Recarga Artificial de Aquíferos no território brasileiro
Resolução CNRH nº 184/2016	Estabelece diretrizes e critérios gerais para definição das derivações e captações de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, e lançamentos de efluentes em corpos de água e acumulações de volumes de água de pouca expressão, considerados insignificantes, os quais independem de outorga de direito de uso de recursos hídricos, e dá outras providências
Resolução CNRH nº 202/2018	Estabelece diretrizes para gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplam a articulação entre a União, os estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão.

Quadro 1 – Principais Resoluções nacionais editadas pelo CNRH relacionadas às águas subterrâneas

Fonte: Villar e Granziera (2020).

1.4.3 A atuação da ANA nas águas subterrâneas e a gestão integrada dos recursos hídricos

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), originalmente Agência Nacional de Águas, foi criada pela Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. A Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, mudou a sua denominação original e ampliou o seu rol de competências. O art. 1º da Lei nº 9.984/2000 define a ANA da seguinte forma:

entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação

dos serviços públicos de saneamento básico, e estabelece regras para sua atuação, sua estrutura administrativa e suas fontes de recursos.

Trata-se de autarquia sob regime especial, com autonomia administrativa e financeira, integrante do Singreh que, em 2019, teve sua vinculação transferida do MMA ao MDR (Decreto nº 9.666/2019). No âmbito de suas competências, tem as seguintes funções: implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos e instituir normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico, bem como promover a gestão das águas de domínio da União. Suas competências estão previstas nos arts. 4º e 4ºA da Lei nº 9.984/2000.

No tocante às águas subterrâneas, a ANA busca apoiar a gestão estadual e fortalecer a gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, ressaltando sempre a relação rio-aquífero. Sua atuação na área de águas subterrâneas se dá, principalmente, por meio da implementação da Agenda de Ações para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos, doravante chamada de Agenda de Águas

Subterrâneas, que contempla as atribuições previstas no Programa Nacional de Águas Subterrâneas (PNAS), incluso no Plano Nacional de Recursos Hídricos. Essa agenda visa a “propor e executar um conjunto de ações que venham fortalecer a implementação da gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos no Brasil”, e se estrutura em cinco ações principais que se dividem em várias atividades (Figura 4):

AGENDA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	
AÇÕES	ATIVIDADES
Promoção da gestão integrada de aquíferos conectados com rios federais	Diagnóstico dos aquíferos conectados com rios federais Elaboração de avaliações para a gestão integrada Proposição de marcos regulatórios e alocações
Elaborações de avaliações hidrogeológicas	Identificar e elaborar estudos em aquíferos de áreas urbanas abastecidas por AS Identificar e elaborar avaliações hidrogeológicas em aquíferos interestaduais e transfronteiriços Elaborar portfólio para soluções de abastecimento com AS em áreas com vulnerabilidade hídrica por eventos críticos
Sistematização de dados e monitoramento de AS	Operar e manter o Sistema de Águas Subterrâneas SAS/SRH Planejar e coordenar a Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas (RENAMAS)
Apoio a elaboração de planos de recursos hídricos no tema AS	Elaborar o diagnóstico de águas subterrâneas nos planos de recursos hídricos Implementar ações previstas nos planos de recursos hídricos para AS
Capacitação	Planejamento de capacitação específica em gestão integrada Implementação da capacitação específica em gestão integrada

Figura 4 – Agenda de águas subterrâneas

Fonte: ANA (2015, p. 12).

A ANA busca ampliar o conhecimento hidrogeológico, cuja ação se dá por meio da realização do mapeamento dos aquíferos, como, por exemplo, a elaboração do *Mapa das Áreas Aflorantes dos Aquíferos e Sistemas Aquíferos do Brasil* (escala 1:1.000.000) (ANA, 2013). Ou, ainda, pela realização de estudos técnicos em aquíferos interestaduais ou transfronteiriços e da relação rio-aquífero, como ocorreu no caso dos Aquíferos da Chapada do Apodi; Sistema Aquífero Urucuia (SAU) (ANA, 2017); Sistema Aquífero Guarani (SAG); Aquíferos da Província Hidrogeológica do Amazonas (ANA, 2015a); ambientes cársticos na Bacia do São Francisco (2018) ou do Projeto-piloto de gestão integrada rio/aquífero nas

bacias dos rios Verde Grande e Carinhanha (projeto em execução, em parceria com o SGB-CPRM). Além disso, são realizados estudos em aquíferos estratégicos para o abastecimento das regiões metropolitanas, como é o caso de Maceió, Natal, Belém, Ilha de São Luís e Manaus.

Diante de sua atuação na elaboração dos planos de recursos hídricos em bacias hidrográficas de domínio da União, a ANA incluiu, de modo pioneiro, a abordagem hídrica integrada rio/aquífero em planos de bacias, a exemplo do caso dos Planos de Bacia Hidrográfica do Rio Doce, Rio Grande, Rio Paranapanema e do Rio Paraguai. A Agência atua em estreita articulação com os

órgãos estaduais gestores de recursos hídricos, comitês de bacias e agências de bacias, com vistas a elaborar os Planos de Bacias hidrográficas.

A ANA também tem competência para organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH) (art. 4º, inc. XIV, da Lei nº 9.984/2000), que armazena diversos dados relacionados aos recursos hídricos. Além disso, ela atua na coordenação e planejamento da Rede Nacional de Monitoramento de Águas Subterrâneas, conforme a Res. CNRH 107/2010. Em 2019, em parceria com o Serviço Geológico do Brasil – (SGB-CPRM), a ANA iniciou um projeto piloto em aquíferos com elevado escoamento de base, com vistas à operação conjunta de pontos de monitoramento da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) de forma integrada com a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). O primeiro projeto-piloto contemplou o Sistema Aquífero Urucuia, com cerca de 75 pontos, operando conjuntamente. Atualmente, a RIMAS tem cerca de 400 pontos de monitoramento, distribuídos em 24 aquíferos e 20 estados (GENARO; PEIXINHO; MOURÃO, 2019). Vale destacar a metodologia pioneira, com escopo regional, desenvolvida pela ANA para o planejamento de redes de monitoramento de águas subterrâneas, tendo o escoamento de base entre as variáveis analisadas.

O SGB-CPRM é uma empresa pública ligada ao Ministério de Minas e Energia, com atribuições de Serviço Geológico do Brasil⁴. Embora não seja um órgão integrante do Singreh, o SGB-CPRM é um importante parceiro da ANA no levantamento de dados geológicos sobre águas subterrâneas. A instituição detém o maior acervo de dados geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos do país. Além disso, opera parte da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), assim como a Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS). Também é responsável pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), que possui amplo cadastro de poços no Brasil. O acervo é constituído por informações catalogadas por meio de fichas de poços fornecidas por instituições públicas e privadas, gestoras e usuárias de água subterrânea, cujo cadastro não tem validade para averiguação da regularidade do uso das águas.

1.4.4 Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs) e a inclusão dos aquíferos na gestão

Os Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs) são órgãos colegiados com atribuições normativas, deliberativas e consultivas, vinculados ao Poder Público e subordinados aos respectivos Conselhos de Recursos Hídricos (Res. CNRH nº 5/2000). Eles fazem parte dos sistemas nacionais e estaduais de gerenciamento de recursos hídricos. Caso a sua área de atuação seja um rio federal, vinculam-se ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos; no caso de rios estaduais, ligam-se ao respectivo Conselho Estadual de Recursos Hídricos.

Trata-se de instâncias políticas que se materializam por meio da construção de um fórum de discussão entre o Poder Público, usuários e sociedade civil, portanto, não possuem personalidade jurídica. Esses órgãos colegiados se caracterizam como a instância mais importante de participação local e de integração do planejamento e

Outra contribuição das atividades da ANA para as águas subterrâneas está relacionada ao Programa Produtor de Água. Em parceria com diversas instituições são conduzidos projetos locais que adotam práticas de conservação de solo e de recuperação e manutenção da cobertura vegetal com vistas a aumentar a permeabilidade do solo e recuperar ou aumentar o fluxo hídrico de nascentes, além de reduzir os processos erosivos. O Programa também estimula a adoção de arranjos para Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), contribuindo, assim, com o engajamento do produtor rural na adoção e manutenção das boas práticas implementadas. A ANA, inclusive, desenvolveu metodologia (OLIVEIRA *et al.* 2021) para identificar as áreas mais favoráveis nas bacias hidrográficas para adoção de práticas conservacionistas com vistas a maximizar a recarga

Para mais informações sobre o programa consulte o site Produtor de Água:

<https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-produtor-de-agua>.

Na implementação das suas atribuições e competências legais, a ANA conta com a parceria e colaboração de outros órgãos e instituições públicas, esse é o caso do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM).

4. Ver Lei nº 8.970, de 28 de dezembro de 1994.

da gestão de águas (VILLAR; GRANZIERA, 2020). A Lei nº 9.433/1997, no art. 38, e a Res. CNRH 5/2000, definem as suas principais competências:

- promover o debate das questões relacionadas aos recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes;
- arbitrar, em primeira instância administrativa, os conflitos relacionados aos recursos hídricos;
- aprovar o Plano de Recursos Hídricos da bacia;
- acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos da bacia e sugerir as providências necessárias ao cumprimento de suas metas;
- propor ao Conselho Nacional e aos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos as acumulações, derivações, captações e lançamentos de pouca expressão para efeito de isenção da obrigatoriedade de outorga de direitos de uso de recursos hídricos, de acordo com os seus domínios;
- estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos e sugerir os valores a serem cobrados;
- compatibilizar os planos de bacias hidrográficas de cursos de água de tributários, com o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica de sua jurisdição;
- aprovar as propostas da Agência de Água, que lhe forem submetidas;
- submeter, obrigatoricamente, os planos de recursos hídricos da bacia hidrográfica à audiência pública;
- desenvolver e apoiar iniciativas em Educação Ambiental;
- aprovar seu regimento interno.

Esses colegiados têm papel central na gestão e aplicação dos instrumentos de gestão. A Lei nº 9.433/1997, em seu art. 37, estabelece que os CBHs podem ter como área de atuação: *a) a “totalidade de uma bacia hidrográfica”* (inc. I); *b) a “sub-bacia hidrográfica de tributário do curso de água principal da bacia, ou de tributário desse tributário”* (inc. II); ou *c) o “grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas”* (inc. III).

A área de atuação dos CBHs considera a territorialidade dos recursos hídricos superficiais, que é mais fácil de definir. A bacia hidrográfica se refere justamente ao “espaço geográfico delimitado pelo respectivo divisor de águas, cujo escoamento super-

ficial converge para seu interior, sendo captado pela rede de drenagem que lhe concerne.” (ANA, 2015b, p. 7). Apesar dessa unidade territorial ter como foco o recorte das águas superficiais, isso não inviabiliza a gestão dos aquíferos que se encontram nesse espaço, especialmente em razão da ideia de gestão integrada dos recursos hídricos.

Como o recorte da bacia hidrográfica nem sempre converge com os limites dos aquíferos, os CBHs devem construir arranjos de cooperação interinstitucional com vistas à gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas. Tanto é assim que a Res. CNRH nº 15/2001, em seu art. 4º, parágrafo único, determinou que no caso dos aquíferos subjacentes a duas ou mais bacias hidrográficas, cabe aos CBHs buscar o intercâmbio e a sistematização dos dados gerados para a perfeita caracterização da bacia hidrogeológica.

O CBH tem competência para aprovar e acompanhar a execução dos planos de bacia hidrográfica. O colegiado, portanto, deve verificar se esse instrumento de planejamento incorporou as águas subterrâneas, observando as diretrizes do CNRH, com destaque para as Res. CNRH nº 22/2002, nº 92/2008 e nº 202/2008. Além disso, o CBH é o responsável por propor as situações de isenção da obrigatoriedade de outorga de direito de uso, e estabelecer os valores da cobrança pelo uso dos recursos hídricos subterrâneos.

De forma geral, os CBHs enfrentam dificuldades em inserir as águas subterrâneas em suas discussões. Em grande parte, isso se deve à priorização dos recursos hídricos superficiais, à falta de conhecimento sobre as águas subterrâneas e de pessoal especializado ou à ausência de organização dos usuários de poços ou da sociedade em relação aos aquíferos. Programas e iniciativas de Educação Ambiental e capacitação técnica voltadas às águas subterrâneas contribuiriam para promover o conhecimento e transformar essa realidade.

1.5 OS ESTADOS E A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os estados e o Distrito Federal são responsáveis por definir as políticas estaduais para os seus recursos hídricos, inclusive das águas subterrâneas, e por estabelecer a infraestrutura institucional dos Sistemas Estaduais de Gerenciamento de Recursos Hídricos, implantar os instrumentos de gestão hídrica previstos na Lei nº 9.433/1997, e promover estudos sobre os aquíferos (FERNANDES, 2019).

A gestão estadual hídrica deve observar as normas nacionais relacionadas ao Direito de Águas, que é de competência privativa da União (art. 22, inc. IV, da CF/88) (FERNANDES, 2019; VILLAR; GRANZIERA, 2020). A Lei nº 9.433/1997 e as Resoluções do CNRH e do Conama estabeleceram ou regulamentaram instrumentos de gestão aplicáveis às águas subterrâneas, que devem ser incorporados às políticas estaduais, bem como recomendam a realização de diversos estudos técnicos no âmbito das bacias hidrográficas (VILLAR; HIRATA, 2022).

Os instrumentos de gestão hídrica podem ser divididos em duas categorias: os que se dedicam às

águas em geral e os específicos às águas subterrâneas. A Figura 5 demonstra esses instrumentos de gestão, de competência dos órgãos que integram os Sistemas Estaduais de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Além dos instrumentos de gestão hídrica, há instrumentos de outras políticas públicas de aplicação estadual que podem contribuir para a gestão dos aquíferos, tais como: licenciamento ambiental, zoneamento econômico-ecológico, zoneamento agroecológico, planos de irrigação, planos estaduais de saneamento, planos estaduais de resíduos sólidos, gerenciamento de áreas contaminadas, etc. Além disso, os estados e o Distrito Federal devem estimular os municípios a considerarem os aquíferos nos processos de ordenamento territorial municipal.



Figura 5 – Instrumentos de gestão hídrica nas políticas públicas

Fonte: Villar e Hirata (2022, p. 5).

As resoluções do CNRH destacam a importância da realização de estudos técnicos sobre as águas subterrâneas, principalmente no âmbito dos planos de bacia, de forma a contemplar a sua integração com as águas superficiais (vide Res. CNRH nº 92/2008 e Res. CNRH nº 202/2018). Esses atos normativos determinam, por exemplo, a realização de estudos hidrogeológicos

para delimitar áreas de recarga e vulnerabilidade à poluição dos aquíferos; diagnósticos de disponibilidade e demanda de águas subterrâneas; avaliações hidrológicas integradas que delimitem a contribuição dos aquíferos para os rios diretamente conectados; e estimativa da contribuição do aquífero para a vazão de base dos rios. Destacam, ainda, a importância da

instalação de redes estaduais de monitoramento da qualidade e quantidade das águas subterrâneas (art. 10 da Res. CNRH 92/2008) e de redes de monitoramento hidrometeorológica e hidrogeológica (art. 3º, inc. V da Res. CNRH nº 202/2018), bem como a emissão de relatórios de qualidade (art. 13, § 2º, e art. 33 da Res. Conama 396/2008).

Os estados e o Distrito Federal são os responsáveis pela gestão das águas subterrâneas, mesmo no caso dos aquíferos interestaduais e transfronteiriços. Boa parte dos aquíferos atravessa os limites estaduais e, em alguns casos, até os limites nacionais. Esse dado demonstra a importância das políticas e sistemas estaduais de

recursos hídricos e sua atuação conjunta para gerir os aquíferos, principalmente no estabelecimento de ações de monitoramento conjunto, troca de informações e ações de gestão que protejam as áreas de recarga e o fluxo subterrâneo, quando compartilhados. É necessária, também, maior articulação entre os sistemas federal e estaduais, algo que já ocorre no caso das águas superficiais por meio da Rede Nacional de Monitoramento de Qualidade das Águas (RNQA) e do Programa de Estímulo à Divulgação de Dados de Qualidade de Água – Programa Qualiágua (Res. ANA nº 643/2016). O Box 3 demonstra que ainda há longo caminho para consolidar a gestão estadual.

Box 3 – Os estados e a gestão das águas subterrâneas

Luciana Cordeiro de Souza-Fernandes

As águas subterrâneas são consideradas *bens dos estados*, ou seja, sua gestão deve ser feita pelos estados e o Distrito Federal, aos quais cabe a competência de legislar a sua gestão e proteção. Faltam, contudo, estudos sobre a forma como se dá essa gestão estadual. Souza-Fernandes e Oliveira (2018a,b,c,d) realizaram um trabalho de coleta de legislações estaduais hídricas das cinco regiões brasileiras (Centro-Oeste, Norte, Nordeste, Sudeste e Sul) e concluíram que somente 12 Unidades da Federação possuem leis específicas sobre águas subterrâneas: São Paulo, Minas Gerais, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Alagoas, Pernambuco, Maranhão e Pará.

As 26 UF e o DF, portanto, já estabeleceram as suas Políticas Estaduais de Recursos Hídricos (PERH), sendo que em alguns estados as águas subterrâneas foram disciplinadas ao longo de suas PERHs. Significa dizer, como pode ser observado na Coletânea da Legislação de Águas Subterrâneas do Brasil – em seus cinco volumes – que nesses estados não há regulamentação legal individualizada sobre a gestão e o uso das águas subterrâneas da forma como ocorre em São Paulo, por exemplo.

Em relação à análise das legislações existentes, os autores chegaram às seguintes conclusões: a) há repetição de conceitos e determinações oriundas da lei paulista (Lei nº 6.134, de 02 de junho de 1988), precursora no legislar das águas subterrâneas; b) nem todas as UFs estabeleceram a criação de áreas de proteção e conservação para as águas subterrâneas; e c) as leis das UFs que legislaram não observaram as peculiaridades da hidrogeologia local.

A proteção das águas subterrâneas exige um esforço integrado entre estados e municípios em virtude da interconexão entre essas águas e o solo. Isso é especialmente importante nas áreas de recarga e afloramento de aquíferos pois, dada a sua vulnerabilidade, requerem ferramentas e ou instrumentos legais próprios (urbanísticos) para a proteção do solo e via reflexa da qualidade das águas subterrâneas.

Link para coletânea: <https://materiais.aguasustentavel.org.br/coletanea>.

1.6 MUNICÍPIOS E SEU PAPEL NA GESTÃO DOS AQUÍFEROS

A CF/88 elevou os municípios à categoria de entes federativos, o que não é algo usual em outros sistemas federativos (MIRANDA; REYNARD, 2020). Apesar de extinguir as águas municipais, a Carta Magna aumentou consideravelmente a autonomia política, jurídica, administrativa e financeira dos municípios, atribuindo-lhes diversas competências que os tornaram protagonistas na gestão dos recursos hídricos (MIRANDA; REYNARD, 2020; VILLAR; GRANZIERA, 2020).

Os municípios adquiriram competência administrativa exclusiva para prestar os serviços públicos de interesse local (art. 30, inc. V, da CF/88), dentre os quais a organização e prestação do saneamento, seja de forma direta ou sob regime de concessão ou permissão. A relação saneamento e aquíferos é direta. Essas águas são importante fonte hídrica para o abastecimento público ou para as soluções alternativas de abastecimento quando não há rede pública ou, ainda, para aliviar a demanda por água da prestadora de usos não residenciais (HIRATA *et al.*, 2019). Além disso, a ausência de rede coletora ou perdas de esgoto, bem como a má gestão dos resíduos sólidos constituem as principais fontes de contaminação dos aquíferos (HIRATA *et al.*, 2019).

A gestão municipal do saneamento deve ficar atenta aos seguintes aspectos:

- verificar e fiscalizar a forma como a prestação do serviço de água interfere nos níveis hídricos do aquífero;
- controlar, por meio da vigilância sanitária, a qualidade da água distribuída à população;
- fiscalizar o cumprimento das obrigações jurídicas relacionadas ao uso das águas subterrâneas;
- incluir nos contratos de prestação de serviço cláusulas relacionadas à proteção do aquífero, tais como: pagamento por serviços ambientais gerados pela manutenção de áreas de recarga; programas de monitoramento dos níveis hídricos; expansão e renovação das redes coletoras de esgoto; mecanismos de incentivo à permeabilidade do solo nas áreas de recarga; e campanhas de Educação Ambiental;
- promover campanhas de conscientização sobre o uso racional das águas subterrâneas e dos aquíferos regionais;

- garantir a disposição adequada dos resíduos sólidos.

O município também detém competência exclusiva para promover o ordenamento territorial mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano (art. 30, inc. VIII, da CF/88) e a competência legislativa exclusiva em assuntos de interesse local (art. 30, inc. I, da CF/88). Dessa forma, esse ente se torna o principal responsável por estabelecer limitações de uso e ocupação do território urbano para proteger os aquíferos, utilizando os instrumentos previstos no art. 4º do Estatuto da Cidade (Lei nº 10.257/2001), com especial ênfase ao Plano Diretor, ao Zoneamento Municipal e à criação de espaços territoriais protegidos. O planejamento territorial municipal deve observar as diretrizes contidas nos planos de bacia hidrográfica de forma a contribuir para a gestão integrada das águas e do solo (Res. CNRH nº 15/2001, art. 6º).

Dessarte, o município pode impor restrições administrativas ao uso do solo, como por exemplo: *a)* adoção de parâmetros ambientais mais rígidos para ocupação das áreas de recarga; *b)* proibição da instalação de atividades ou empreendimento potencialmente poluidor em áreas de recarga; *c)* imposição de maiores porcentagens de área verde ou de tecnologias que contribuam para garantir a permeabilidade do solo; *d)* estímulo à adoção de práticas de reuso; ou *e)* estabelecimento de unidades de conservação em áreas de recarga. Nesse sentido, a Res. CNRH nº 15/2001 determina que os órgãos do Singreh devem propor mecanismos de estímulo aos municípios para a proteção dos aquíferos e adoção de práticas de reuso e recarga artificial das águas (art. 6º, parágrafo único).

O art. 23 da Carta Magna atribui competência administrativa comum em matéria ambiental, o que permite que os municípios tenham ações destinadas a proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer uma de suas formas; preservar as florestas, a fauna e a flora; promover a melhoria das condições de saneamento básico; registrar, acompanhar e fiscalizar as concessões de direitos de pesquisa e exploração de recursos hídricos e minerais em seus territórios (vide art. 23 da CF/88). Além disso, a Lei Complementar (LC) nº 140/2011, no art. 9º, inc. XIV, *a* e *b*, regulamentou a competência municipal para o licenciamento ambiental de atividades que causem ou possam causar impacto ambiental de âmbito local. O Box 4 sintetiza as principais competências municipais correlacionadas às águas.

Box 4 – As competências municipais relacionadas às águas

Pilar Carolina Villar
Didier Gastmans
Hermam Vargas

Os municípios possuem as seguintes responsabilidades legais relacionadas aos recursos hídricos e temas correlatos:

1. prestar os serviços de saneamento (CF/88, art. 30, inc. V, e Lei nº 11.445/2007);
2. promover o ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano (art. 30, inc. VIII);
3. incluir medidas que estimulem o reuso e a recarga natural ou artificial nos instrumentos de ordenamento territorial ou nos contratos de prestação de serviços públicos (art. 6º, parágrafo único, da Res. CNRH 15/2001);
4. proteger o meio ambiente e combater a poluição (CF/88, art. 23, inc. VI e LC 140/2011);
5. executar e fazer cumprir no município as políticas nacionais, estaduais e municipais relacionadas à proteção do meio ambiente e gerir os recursos ambientais sob sua competência (LC nº 140/2011, art. 9º, incs. I, II e III);
6. promover a integração de programas e ações de órgãos e entidades da administração pública federal, estadual e municipal, relacionados à proteção e à gestão ambiental no município (LC nº 140/2011, art. 9º, inc. IV);
7. promover o desenvolvimento de estudos e pesquisas direcionados à proteção e à gestão ambiental, divulgando os resultados obtidos (LC nº 140/2011, art. 9º, inc. VI);
8. organizar e manter o Sistema Municipal de Informações sobre Meio Ambiente e prestar informações aos demais entes (LC nº 140/2011, art. 9º, incs. VII e VIII);
9. promover e orientar a educação e conscientização ambiental (LC nº 140/2011, art. 9º, inc. XI);
10. promover o licenciamento ambiental das atividades ou empreendimentos de impacto ambiental de âmbito local (LC nº 140/2011, art. 9º, inc. XIV);
11. fiscalizar o cumprimento das normas ambientais (CF/88, art. 23, inc. VI e LC 140/2011, art. 17, § 3º);
12. participar da composição dos Comitês de Bacia (art. 39 da Lei nº 9.433/1997);
13. promover a integração das políticas locais de saneamento básico, de uso, ocupação e conservação do solo e de meio ambiente com as políticas nacional e estadual de recursos hídricos (art. 31 da Lei nº 9.433/1997);
14. formular a política pública de saneamento básico e prestar diretamente ou por delegação os serviços de saneamento, definindo o ente responsável pela regulação e fiscalização, bem como os seus procedimentos (art. 9º da Lei nº 11.445/2007);
15. elaborar os planos de saneamento básico de forma compatível com os planos de bacia (art. 9º e 19 da Lei nº 11.445/2007);
16. realizar a gestão integrada dos resíduos sólidos gerados (art. 10 da Lei nº 12.305/2010);
17. contribuir de forma conjunta com a União e os estados para a manutenção e organização do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (Sinir), fornecendo as informações sobre os resíduos gerados (art. 12 da Lei nº 12.305/2010);
18. elaborar os planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos (art. 18 da Lei nº 12.305/2010);

19. fornecer as informações solicitadas pela coordenação do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (art. 2º da Lei nº 9.782/1999);
20. exercer vigilância da qualidade da água em articulação com a Vigilância Sanitária de forma a inspecionar a qualidade da água no sistema ou solução alternativa coletiva de abastecimento (Portaria MS nº 5/2017);
21. garantir informações à população sobre a qualidade da água para consumo humano e os riscos à saúde (Portaria de Consolidação MS nº 5/2017, alterada pela Portaria MS nº 888/2021, art. 12, incs. V e VI);
22. executar as diretrizes de vigilância da qualidade da água para consumo humano definidas no âmbito nacional e estadual (Portaria de Consolidação MS nº 5/2017, alterada pela Portaria nº 888/2021);

1.7 A RESPONSABILIDADE DOS USUÁRIOS NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O aproveitamento das águas subterrâneas se faz por meio de poços em nascentes ou outras estruturas de captação. Os principais usuários de águas subterrâneas (maiores quantidades) utilizam os poços tubulares⁵ e se beneficiam de forma exclusiva dessas águas, cujo aproveitamento está sob seu controle. Os usuários de águas subterrâneas, portanto, são atores fundamentais para que se alcancem os objetivos previstos na Lei nº 9.433/1997.

Cada Estado tem suas exigências relacionadas ao uso das águas subterrâneas, porém, de forma geral, são responsabilidades dos usuários das águas subterrâneas: a) obter as permissões necessárias para perfurar o poço e usar as águas subterrâneas (por exemplo licença de perfuração de poço, outorga de direito de uso ou outros documentos que atestem tratar-se de uso isento ou insignificante); b) contratar empresas idôneas de perfuração que sigam as normas técnicas; c) realizar a inscrição no cadastro de poços; d) operar e manter o poço de acordo com as normas técnicas, de forma a protegê-lo de contaminantes; e) monitorar a qualidade e quantidade da água, mantendo um bombeamento dentro dos parâmetros técnicos recomendados e dos termos da outorga; f) guardar a informação necessá-

ria sobre o perfil e funcionamento do poço; g) dotar a captação de água subterrânea de dispositivos que permitam a coleta de água, medições de nível, vazão e volume captado, de forma a realizar o monitoramento quantitativo e qualitativo; h) recolher os valores devidos pelo uso da água nos casos em que a cobrança esteja implementada na bacia; e i) tamponar os poços abandonados ou improdutivos, conforme instruções do órgão gestor estadual. Além disso, os usuários podem adotar soluções tecnológicas que permitem a economia ou a otimização do uso dos recursos hídricos, bem como contribuir no processo de fiscalização, denunciando ou orientando proprietários não regularizados (VILLAR; GRANZIERA, 2020).

No caso das águas subterrâneas classificadas como minerais, termais, gasosa, potáveis de mesa ou para fins balneários, destacam-se as seguintes obrigações: a) obtenção de autorização de pesquisa e de portaria de lavra junto à Agencia Nacional de Mineração (ANM); b) obedecer aos termos constantes na autorização de pesquisa e na portaria de lavra emitida pela ANM; c) proteger, conservar e utilizar essas fontes de acordo com os preceitos técnicos; d) estabelecer perímetros de proteção de águas minerais; e) observar as exigências do órgão estadual de gerenciamento de recursos hídricos para esse tipo de empreendimento em relação à necessidade de outorga, cadastro ou autorizações de perfuração (Villar; Granziera, 2020, p. 129).

Além de seguir as normas estaduais e federais, os usuários devem zelar para que seus poços sejam projetados, construídos e operados de acordo com as normas técnicas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu uma série de normas relacionadas ao projeto, construção e operação de poços, que devem

5. Os poços são divididos em duas categorias principais: i) poços tubulares; e ii) poços escavados, que recebem diversos nomes, segundo a região do Brasil. O poço tubular é uma perfuração cilíndrica e vertical realizada por meio de máquinas, revestida com material em PVC aditivado ou em aço na forma de tubos e filtros, sendo popularmente chamado de poço artesiano ou semiartesiano. O poço artesiano, no entanto, é aquele poço tubular no qual a água se eleva de forma natural, sem ajuda de bombas, jorrando acima da superfície do solo. Já o poço escavado (cacimba ou amazonas) é um poço raso de grande diâmetro.

ser observadas. São elas: NBR nº 12212:1992 – Projeto de poço tubular profundo para captação de água subterrânea; NBR nº 12244:2006 – Construção de poço tubular profundo para captação de água subterrânea; NBR nº 13604:1996 – Filtros e tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos – Especificações; NBR nº 13605:1996 – Filtros e tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos – Determinação Dimensional – Método de Ensaio; NBR nº 13606:1996 – Tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos – Determinação do módulo de elasticidade à flexão – Método de ensaio; NBR nº 13607:1996 – Tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos – Verificação da flexão ao impacto; NBR nº 13608:1996 – Tubos de revestimento em PVC para poços tubulares profundos – Verificação do desempenho da junta rosável – Método de ensaio; NBR nº 15495-1:2007, versão corrigida 2:2009 – Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados – Parte 1: Projeto e construção.

Baseados na eficiência hídrica, os usuários podem adotar soluções tecnológicas que permitam a economia ou a otimização do uso dos recursos hídricos, bem como contribuir com o processo de fiscalização, denunciando ou orientando proprietários clandestinos, posto que o uso irregular pode prejudicar a disponibilidade hídrica dos usuários legalizados. Frisa-se ainda a responsabilidade sobre os poços abandonados ou improdutivos, os quais devem ser tamponados, conforme determina o procedimento previsto pelo órgão gestor estadual, uma vez que representam potencial fonte de contaminação do aquífero e um risco à segurança das pessoas e animais.

No Brasil, infelizmente, a maioria dos usuários de águas subterrâneas é irregular, portanto, descumpre as obrigações legais e técnicas relacionadas à perfuração, construção e operação de poços, configurando uma “apropriação privada sem regulamentação das águas subterrâneas, o que corresponde a uma forma de usurpação da água.” (VILLAR, 2016, p. 92). Dessa forma, os donos de poços que não fazem parte do sistema de licenças governamentais utilizam um bem de uso

comum do povo como se fosse um bem privado, sem prestar qualquer contrapartida à sociedade, gerando impactos socioambientais que lesam a sociedade, os usuários e os ecossistemas. A utilização dessas águas sem a autorização do Poder Público Estadual pode ser enquadrada como infração administrativa e crime, conforme é especificado nos Quadros 10 e 11 do Capítulo 3, independentemente da obrigação de recuperar e/ou indenizar os danos causados ao meio ambiente ou a terceiros.

1.8 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E ÁGUAS MINERAIS NO BRASIL

As águas minerais e potáveis de mesa são extraídas de fontes naturais ou por extração de águas subterrâneas (ASSIRATI, 2018), e se caracterizaram por serem “águas subterrâneas especiais” e “distintas das águas comuns por diferenciados estágios de mineralização.” (QUEIROZ; PONTES, 2015, p. 15). Toda água mineral é subterrânea, porém, nem toda água subterrânea é mineral (HIRATA *et al.*, 2019).

A extração dessas águas é intensa, sendo classificadas como o recurso mineral mais explorado do subsolo brasileiro (HIRATA *et al.*, 2019). No ano de 2017, a extração para composição de bebidas foi de 21,9 bilhões de litros, enquanto os usos balneários consumiram 82,2 bilhões de litros nas 83 concessões existentes distribuídas nos “estados de Goiás (com 92,7% do volume utilizado declarado), Santa Catarina (2,5%), São Paulo (2,0%), Mato Grosso do Sul (1,4%), Paraná (1,3%), Rio Grande do Sul e Pernambuco (com menos de 1% cada).” (ASSIRATI, 2018, p. 2).

O Brasil é o 5º maior mercado mundial de águas en-garrafadas (ASSIRATI, 2018) e detém mais de mil áreas de lavras de águas minerais e potáveis de mesa, sendo que 48% se localizam na região Sudeste (QUEIROZ; PONTES, 2015). A Figura 6 demonstra as concessões de lavras de água mineral ou potável de mesa em relação aos domínios hidrogeológicos. Algumas dessas concessões se localizam em áreas que apresentam problemas relacionadas à escassez de água.

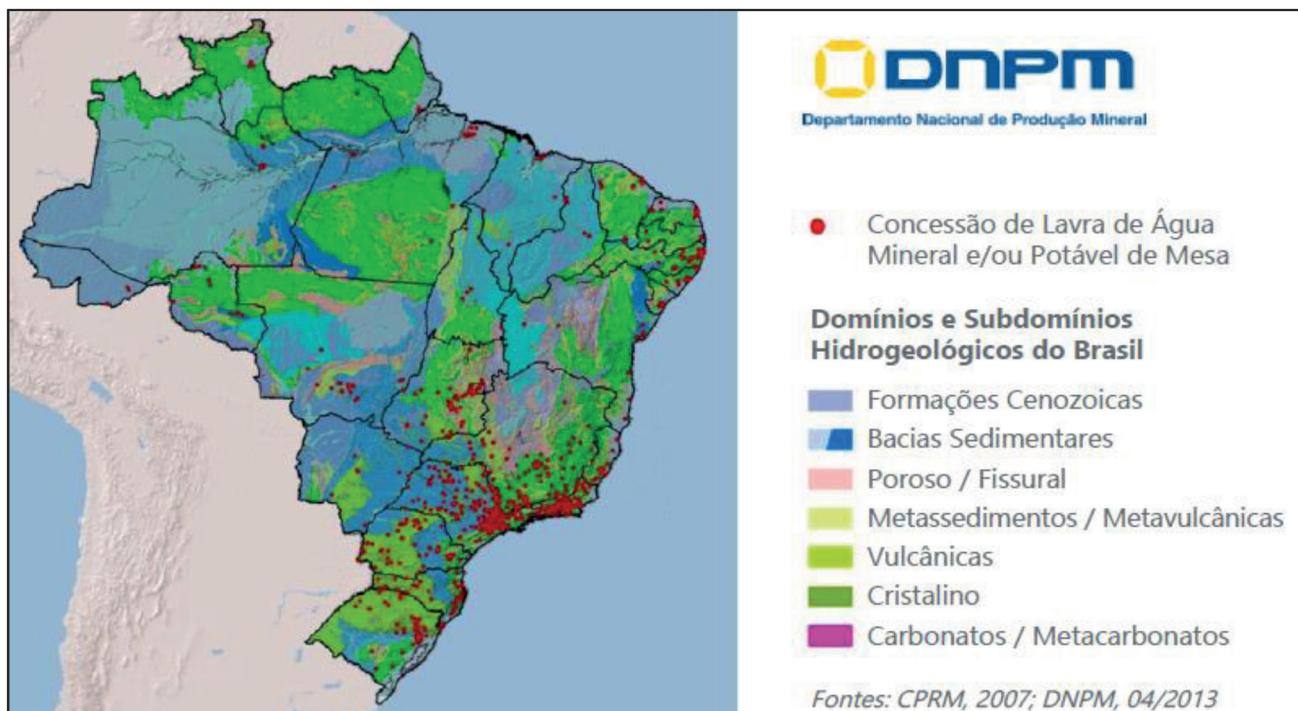


Figura 6 – Mapa das concessões de lavras de águas minerais e potáveis de mesa no Brasil

Fonte: Queiroz e Pontes (2015, p. 27).

Essas águas também estão muito ligadas ao turismo, seja para fins medicinais ou balneários. Embora não se disponha de estudos sobre o seu papel econômico, importantes complexos turísticos foram construídos com base em sua exploração, tais como: Araxá (MG), Poços de Caldas (MG), Rio Quente (GO), Caldas Novas (GO), Olímpia (SP), Águas de Lindoia (SP), Santo Amaro da Imperatriz (SC), Gramado (RS), entre outras localidades.

As águas minerais são definidas no art. 1º do Código de Águas Minerais (Decreto- Lei nº 7.841, de 08 de agosto de 1945) da seguinte forma:

água mineral são aquelas provenientes de fontes naturais ou de fontes artificialmente captadas que possuam composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas distintas das águas comuns, com características que lhes confiram uma ação medicamentosa.

A definição das “água potáveis de mesa” se encontra no art. 3º do Código de Águas Minerais (Decreto- Lei nº 7.841, de 08 de agosto de 1945), que assim as descreve:

as águas de composição normal provenientes de fontes naturais ou de fontes artificialmente captadas que preencham tão somente as condições de potabilidade para a região.

A água mineral possui ação medicamentosa, enquanto a água potável de mesa preenche apenas os requisitos de potabilidade. Sua comercialização exige que o rótulo informe o tipo da água, ou seja, se mineral ou potável de mesa. O Decreto-Lei nº 7.841/1945 classifica as águas minerais em 12 grupos, de acordo com a sua composição química (Quadro 2); já as fontes são classificadas de acordo com os gases presentes e a sua temperatura (Quadro 3).

Classificação	Caracterização conforme a composição química
Radíferas	substâncias radioativas dissolvidas, o que lhes dá radioatividade permanente
Alcalino-bicarbonatadas	compostos alcalinos equivalentes a, no mínimo, 0,200 g de bicarbonato de sódio (NaHCO_3)/litro
Alcalino-terrosas	compostos alcalino-terrosos equivalentes a, no mínimo, 0,120 g de carbonato de cálcio (CaCO_3)/litro
a) alcalino-terrosas cárnicas	no mínimo, 0,048 g de catione Ca, na forma do bicarbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)/litro
b) alcalino-terrosas magnesianas	no mínimo, 0,30 g de catione Mg na forma de bicarbonato de magnésio (MgCO_3)/litro
Sulfatadas	no mínimo, 0,100 g/litro do ânion sulfato (SO_4^{2-}) combinado com os cátions sódio (Na^+), potássio (K^+) e magnésio (Mg^{2+})
Sulfuroosas	no mínimo, 0,001 g do ânion enxofre (S)/litro
Nitratadas	no mínimo, 0,100 g/litro do ânion nitrato (NO_3^{-}) de origem mineral
Cloretadas	no mínimo, 0,500 g de cloreto de sódio (NaCl)/litro
Ferruginosas	no mínimo, 0,005 g do cátion ferro (Fe)/litro
Radioativas	radônio (Rn) dissolvido
a) fracamente radioativas	teor de radônio (Rn) entre 5-10 un. Mache/litro, a 20°C e pressão de 760 mm Hg
b) radioativas	teor de radônio (Rn) entre 10-50 un. Mache/litro, a 20°C e pressão de 760 mm Hg
c) fortemente radioativas	teor de radônio (Rn) > a 50 un. Mache/litro, a 20°C e pressão de 760 mm Hg
Toriativas	teor de torônio (Tn) (um isótopo do radônio) em dissolução, equivalente em unidades eletrostáticas a duas unidades Mache/litro, no mínimo
Carbogasosas	200 ml de CO ₂ livre dissolvido, a 20°C e 760 mm Hg de pressão/litro
Oligominerais	Não atingem os limites estabelecidos na legislação, mas possuem comprovada ação medicamentosa atestada por estudos sujeitos à fiscalização e aprovação da Comissão Permanente de Crenologia

Quadro 2 – Classificação das águas minerais de acordo com as suas características químicas

Fonte: Brasil (Decreto-Lei nº 7.841/1945).

Classificação das fontes quanto aos gases	Caracterização
Fontes radioativas	
a) fracamente radioativas	no mínimo, uma vazão gasosa de um litro/minuto (l.p.m.) com um teor em radônio compreendido entre 5-10 un. Mache/litro de gás espontâneo, a 20°C e pressão de 760 mm Hg
b) radioativas	no mínimo, uma vazão gasosa de 1 l.p.m., com um teor compreendido entre 10-50 un. Mache/litro de gás espontâneo, a 20°C e pressão de 760 mm Hg
c) fortemente radioativas	no mínimo, uma vazão gasosa de 1 l.p.m., com teor em radônio superior a 50 un. Mache/litro de gás espontâneo, a 20°C e pressão de 760 mm Hg
Fontes toriativas	no mínimo, uma vazão gasosa de 1 l.p.m., com um teor em torônio na emergência equivalente em unidades eletrostáticas a duas unidades Mache/litro.
Fontes sulfuroosas	as que possuírem na emergência desprendimento definido de gás sulfídrico.

Classificação das fontes quanto à temperatura	Caracterização
Fontes frias	temperatura inferior a 25º C
Fontes hipotermais	temperatura entre 25 e 33º C
Fontes mesotermais	temperatura entre 33 e 36º C
Fontes isotermais	temperatura entre 36 e 38º C
Fontes hipertermais	temperatura superior a 38º C

Quadro 3 – Classificação das fontes minerais quanto aos gases e temperatura

Fonte: Brasil (Decreto-Lei nº 7.841/1945).

Apesar de as águas minerais e potáveis de mesa serem subterrâneas, elas foram classificadas como recursos minerais por força do Código de Águas Minerais. De acordo com o art. 4º do Código, o aproveitamento comercial desses recursos demanda um regime de autorizações sucessivas de pesquisa e de concessão de lavra, instituídas pelo Código de Minas (Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967), que deu nova redação ao Decreto-Lei nº 1.985, de 29 de janeiro de 1940.

Ao classificar essas águas como recursos minerais, seu domínio legal foi atribuído à União, com base no art. 20, inc. IX, da Constituição Federal de 1988⁶. Nesse sentido, o Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018, determina que cabe à União “organizar a administração dos recursos minerais, a indústria de produção mineral e a distribuição, o comércio e o consumo de produtos minerais”, bem como formular as “políticas públicas para a pesquisa, a lavra, o beneficiamento, a comercialização e o uso dos recursos minerais” (art. 3º).

A autorização de pesquisa e lavra, fiscalização e regulação do comércio dessas águas é atribuição federal realizada por meio da Agência Nacional de Mineração (ANM), instituída pela Lei nº 13.575/2017, e vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME). A ANM assumiu todas as atribuições do extinto Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (vide art. 32, da Lei nº 13.575/2017).

O Código de Águas Minerais permite que qualquer água subterrânea possa ser classificada como produto mineral, basta que sejam cumpridas as regras impostas pela ANM e os requisitos de potabilidade da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa). Dessa forma, as águas subterrâneas destinadas às finalidades de

envasamento e de uso balneário estariam sob a tutela da União e seriam classificadas como *recursos minerais*.

Já o Código de Minas indicou não apenas a possibilidade de haver jazidas de águas minerais como, também, de águas subterrâneas. Esses dois tipos de jazidas estavam previstos no art. 5º, revogado pela Lei nº 9.314, de 14 de novembro de 1996, e no art. 10, ainda vigente, que afirma a necessidade de regulação especial para ambos. Deve-se lembrar que na época da edição dessas leis, os recursos hídricos eram regidos pelo Código de Águas, de 1934, que classificava as águas subterrâneas, majoritariamente, como particulares, enquanto as Constituições Federais da época sequer as mencionavam. Com a promulgação da Constituição Federal de 1988, que expressamente incluiu as águas subterrâneas como bens estaduais, criou-se um óbice constitucional para a criação de jazidas federais de águas subterrâneas, posto que essas foram colocadas sob a tutela dos estados e regulamentadas pela legislação de recursos hídricos.

As águas subterrâneas, de acordo com o seu uso, podem se sujeitar a distintos tratamentos jurídicos, ainda que extraídas de um mesmo aquífero e com características físico-químicas equivalentes. Se destinadas a usos gerais, são classificadas como recursos hídricos; se destinadas aos usos balneários ou engarrafamento de águas minerais e potáveis de mesa, são consideradas recursos minerais (VILLAR; GRANZIERA, 2020).

São, porém, enquadradas como jazidas de águas minerais se cumprirem os seguintes requisitos: *a)* forem utilizadas para os fins especiais da legislação de águas minerais; *b)* preencherem os necessários requisitos de qualidade; e *c)* realizarem o procedimento administrativo junto à ANM, solicitando a autorização de pesquisa e de concessão de lavra, obrigatórias àqueles que desejem explorar esse potencial balneário e de envase (BOSON, 2002; CAUBET, 2009; QUEIROZ; PONTES, 2015). A autorização de pesquisa é o momento em que se dá o

6. Art. 20. São bens da União:
IX - os recursos minerais, inclusive os do subsolo.

primeiro contato entre o requerente e a ANM, sendo definida como “a execução dos trabalhos necessários à definição da jazida, sua avaliação e a determinação da exequibilidade do seu aproveitamento econômico.” (art. 2º, inc. V, da Res. 76/2007). Já a concessão de portaria de lavra para água mineral, termal, gasosa, potável de mesa ou destinada a fins balneários é definida como “ato administrativo mediante o qual é outorgado ao interessado o direito ao aproveitamento industrial das jazidas de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários.” (art. 2º, inc. V, da Res. 76/2007).

Em contrapartida, se a exploração das águas subterrâneas ocorrer para fins gerais, como abastecimento, irrigação ou uso industrial, elas se submetem ao regime jurídico dos recursos hídricos estaduais, que tem como principais formalidades: *a)* obtenção de outorga de direito de uso dos recursos hídricos ou comprovação de sua dispensa (por exemplo, declaração de uso insignificante); *b)* registro no cadastro de usuários; e *c)* cobrança pelo uso da água, caso seja implementada na bacia. As outorgas de direito de uso de águas subterrâneas devem obedecer às prioridades dos planos de recursos hídricos e essa extração é contabilizada no balanço hídrico da bacia.

A exploração das jazidas de águas minerais pode impactar a gestão dos recursos hídricos, interferindo na disponibilidade das águas subterrâneas e superficiais, contudo, esse tipo de uso não costuma ser contabilizado no balanço hídrico da bacia. Para contornar esse problema, a Res. CNRH nº 76/2007 estabeleceu “diretrizes gerais para a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários.” Essa Resolução reconheceu “a necessidade de integração e atuação articulada entre órgãos e entidades cujas competências se refiram aos recursos hídricos, à mineração e ao meio ambiente.” Para facilitar esse procedimento, o art. 3º da Res. CNRH nº 76/2007 recomenda que os órgãos gestores hídrico e mineral compartilhem informações e definam conjuntamente o conteúdo e os estudos técnicos dos procedimentos administrativos envolvidos. O seu art. 3º, parágrafo único, determina que as informações a serem compartilhadas referem-se, no mínimo:

- I. aos títulos de direitos minerários de pesquisa ou lavra de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários para a sua inclusão no Sistema de Informações de Recursos Hídricos e consideração pelos órgãos gestores de recursos hídricos;

II. aos atos administrativos relacionados ao uso de recursos hídricos, tais como: outorgas de direito de uso, manifestações prévias e autorizações de construção de poços, para a sua inclusão no sistema de informações de recursos minerais e consideração pelo órgão gestor de recursos minerais;

III. à área objeto de requerimento de pesquisa para água mineral, termal, gasosa, potável de mesa ou destinada a fins balneários;

IV. à área ou perímetro de proteção de fonte instituído pelo órgão gestor de recursos minerais, a fim de que seja considerado pelos órgãos gestores de recursos hídricos;

V. às áreas de restrição e controle estabelecidas pelo órgão gestor de recurso hídrico competente ou previstas nos planos de recursos hídricos, a fim de que sejam consideradas pelo órgão gestor de recursos minerais;

VI. ao monitoramento quantitativo e qualitativo disponível nos órgãos gestores;

VIII. àquelas necessárias à formulação dos planos de recursos hídricos e à atuação dos comitês de bacias hidrográficas.

O órgão gestor de recursos minerais deve observar os atos autorizativos e os usos cadastrados no órgão gestor de recursos hídricos no momento da análise do “requerimento de autorização para pesquisa de água mineral, termal, gasosa, potável de mesa ou destinada a fins balneários.” (art. 6º). O órgão gestor de recursos hídricos, por sua vez, no momento da análise do requerimento de outorga de direito de uso de recursos hídricos, deve observar “as informações existentes nos requerimentos de pesquisa, alvarás de pesquisa e portarias de lavra para água mineral, termal, gasosa, potável de mesa ou destinada a fins balneários.” (art. 7º).

Apesar de representar um passo positivo, sua operacionalização enfrenta limitações em promover a coordenação da gestão federal das águas minerais com a gestão estadual das águas subterrâneas (SERRA, 2009; SCALON, 2011; VILLAR; GRANZIERA, 2020). A Res. CNRH 76/2007 determina que sejam observadas as informações concedidas pelos órgãos gestores de recursos hídricos, entretanto, essas não vinculam a decisão da ANM, o que representa um problema, como explicam Villar e Granziera (2020, p. 115):

As águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa e destinadas aos fins balneários são recursos minerais, porém, também são recursos hídricos que integram o balanço hídrico da bacia e constituem um dos múltiplos usos da água. Realmente, essas águas têm natureza jurídica especial, posto que integram o campo de atuação de dois sistemas jurídicos, o mineral e o de recursos hídricos.

Um modelo de gestão que poderia aprimorar esse processo de integração seria condicionar os usuários das

águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa e destinadas aos fins balneários tanto às normas de mineração como às de recursos hídricos, posto que têm naturezas complementares (FERREIRA JÚNIOR, 2007). Com base no domínio estadual das águas subterrâneas e nas competências concorrente e comum, os estados podem estabelecer normas que estabeleçam a necessidade de outorga de direito de uso das águas subterrâneas classificadas como águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa e destinadas a fins balneários (FERREIRA JÚNIOR, 2007). Além disso, podem submeter a sua extração à cobrança, algo que acontece, por exemplo, no estado do Ceará. Tais exigências poderiam se justificar diante do art. 12, inc. II da Lei nº 9.433/1997, que condiciona toda “extração de água de aquífero subterrâneo” à outorga de direito de uso. A lei usa o termo genérico *água de aquífero* e não *recurso hídrico subterrâneo*.

A Resolução CNRH nº 29/2002, no art. 2º, inc. I, determina que a outorga de direito de uso das águas subterrâneas é uma exigência das atividades de mineração. O art. 9º, contudo, pondera que o contido na referida resolução não se aplica à mineração prevista no Código de Águas Minerais. A outorga de direito de uso possui dupla finalidade: *a) garantir o acesso ao recurso; e b) controlar o uso da água de forma a garantir o balanço hídrico da bacia*. Dessa forma, a portaria de lavra garante ao explorador da jazida o direito de acesso ao recurso mineral (água mineral, termal, gasosa, potável de mesa ou destinada a fins balneários), enquanto a outorga de direito de uso dos recursos hídricos garante que essa exploração se submete ao controle socioambiental (FERREIRA JÚNIOR, 2007). Assim, a inclusão das águas minerais no sistema de recursos hídricos contribuiria para sujeitar essas águas aos princípios de direito de águas, tais como o seu uso múltiplo, contribuindo para evitar conflitos, como os que ocorreram entre empresas privadas e os municípios do Circuito das Águas, em Minas Gerais.

Quanto à possibilidade de a Res. CNRH nº 76/2007 ter buscado construir uma base de integração entre o regime jurídico das águas minerais e de recursos hídricos, deve-se ir além. O Código de Águas Minerais deve ser interpretado à luz do Regime Constitucional de 1988 e harmonizado com a Lei nº 9.433/97. E, ainda que as águas tuteladas pelo Código de Águas Minerais sejam enquadradas como recurso mineral, elas são águas extraídas de aquíferos e, portanto, devem submeter-se à outorga.

No Brasil, embora o tema seja pouco explorado, existem conflitos relacionados aos usos de águas subterrâneas e águas minerais, como é o caso de Caldas

Novas e Rio Quente, no estado de Goiás (ANDRADA; ALMEIDA, 2012) ou, ainda, nas estâncias hidrominerais do Circuito das Águas, de Minas Gerais (Caxambu, São Lourenço, Cambuquira e Lambari) (BORGES *et al.*, 2006). A exigência de outorga estadual de direito de uso dos recursos hídricos para a concessão da portaria de lavra contribuiria para uma gestão mais eficiente das águas (VILLAR; GRANZIERA, 2020).

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, P. K.; MATSUMOTO, T.; STURCHIO, N. C.; CHANG, H. K.; GASTMANS, D.; ARAGUAS-ARAGUAS, L. J.; JIANG, W.; LU, Z. T.; MUELLER, P.; YOKOCHI, R.; PURTSCHERT, R.; TORGERSEN, T. Continental degassing of he by surficial discharge of deep groundwater. *Nature Geoscience*, v. 8, 2015, pp. 35-39.
- ANA. Agência Nacional de Águas. *Avaliação dos aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazônicas no Brasil* (escala 1:1.000.000) e *Cidades-Piloto* (escala 1:50.000). Hidrogeologia e modelo numérico de fluxo da PHA no Brasil, v. III, t. I, 2015a. 330p. Disponível em: <https://metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/api/records/07c7cf-8f-6e81-4040-b405-8361f6b4cdf9>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. *Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada e compartilhada*. 2017. Disponível em: <https://metadados.snrh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b26a6c8e-affa-4766-8cb7-ccdaadb3453>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. *Mapa das áreas aflorantes dos aquíferos e sistemas aquíferos do Brasil* (escala 1:1.000.000). 2013. Disponível em: <https://metadados.snrh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3ec60e4f-85ea-4ba7-a90c-734b57594f90>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. *Portaria nº 149, de 26 de março de 2015*. Lista de termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos. 2015b. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~iranil/Hidrologia/Dicionario%20hidrologia%20da%20ANA_Portaria_149-2015.pdf.
- ANDRADE, A. M.; ALMEIDA, L. Aquífero termal de Caldas Novas: monitoramento mensal realizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). *Águas subterrâneas*, v. 26, n. 1, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v26i1.25048>.
- ASSIRATI, D. M. *Sumário mineral*. Águas minerais. Agência Nacional de Mineração – ANM, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/agua-mineral>.
- BARBI, F.; JACOBI, P. R. Democracia e participação na gestão dos recursos hídricos no Brasil. *Revista Katálysis*. Florianópolis, v. 10 n. 2, jul./dez. 2007, pp. 237-244.
- BENJAMIN, Antônio Herman V. *Dano ambiental – prevenção, reparação e repressão*. São Paulo: Editora RT, 1993.

- BENSON, D.; GAIN, A. K.; ROUILLARD, J. J. Water governance in a comparative perspective: from IWRM to a 'Nexus' Approach? *Water Alternatives*, v. 8, n. 1, 2015, pp. 756-773.
- BISWAS, A. K. Integrated water resources management: is it working? *International Journal of Water Resources Development*, v. 24, n. 1, 2008, pp. 5-22.
- BORCHARDT, D.; BOGARDI, J. J.; IBISCH, R. B. **Integrated water resources management:** concept, research and implementation. Springer, 2016.
- BORGES, G. C.; BORTONI, E. C.; ALMEIDA, R. A.; BARISON, M. R. Uso de tecnologias para o monitoramento qualitativo de águas minerais. *Águas subterrâneas*. 2006. Disponível em: <https://aguas-subterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23148>.
- BOSON, P. H. G. Quem é responsável pelas águas minerais? *Água de minas II*. 2002. Disponível em: <http://www.almg.gov.br/RevistaLegis/Revista34/patricia34.pdf>.
- BRASIL (Constituição, 1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao compilado.htm.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa de 1967.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao67.htm.
- BRASIL. **Decreto- Lei nº 7.841, de 08 de agosto de 1945.** Código de Águas Minerais. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1937-1946/de7841.htm.
- BRASIL. **Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934.** Decreta o Código de Águas. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-24643-10-julho-1934-498122-normaactualizada-pe.html>.
- BRASIL. **Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018.** Regulamenta o Código de Mineração. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9406.htm.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm.
- BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm.
- BRASIL. **Resolução CNRH nº 202, de 28 de junho de 2018.** Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplam a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56128847/do1-2018-12-20-resolucao-n-202-de-28-de-junho-de-2018-56128598.
- CAMARGO, E.; RIBEIRO, E. A proteção jurídica das águas subterrâneas no Brasil. In: RIBEIRO, W. C. **Governança da água no Brasil:** uma visão interdisciplinar. São Paulo: Annablume, FAPESP, CNPq, 2009.
- CAMPOS, V. N. O.; FRACALANZA, A. P. Governança das águas no Brasil: conflitos pela apropriação da água e a busca da integração como consenso. *Ambiente & Sociedade*, v. 8, n. 2, 2010, pp. 365-382.
- CASAGRANDE, R.; ABREU, K. Parecer da Comissão de Constituição, Justiça e Cidadania (CCJ) nº 1.283, de 2010, sobre a Proposta de Emenda à Constituição nº 43, de 2000, tendo como primeiro signatário o Senador Júlio Eduardo, que modifica a redação dos arts. 20, III, e 26, I, da Constituição Federal, para definir a titularidade das águas subterrâneas. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=3910063&ts=1593983836886&disposition=inline>.
- CAUBET, C. G. Os contextos normativos brasileiros em matéria de águas subterrâneas. In: RIBEIRO, W. C. (Org.). **Governança da água no Brasil:** uma visão interdisciplinar. São Paulo: Annablume, 2009.
- CUSHMAN, J. H.; TARTAKOVSKY, D. M. **The handbook of groundwater engineering.** 3. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 1073p.
- DINIZ, E. **Crise, reforma do Estado e governabilidade.** Brasil, 1985-1995. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1999. 228p.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global framework for action to achieve the vision on groundwater governance.** Rome, Italy, 2016.
- FERNANDES, L. C. S. Panorama do arcabouço legal das águas subterrâneas do Brasil. *Revista de Direito Ambiental*, v. 94, 2019, pp. 339-378.
- FERREIRA JÚNIOR, V. O. C. A gestão das águas minerais e subterrâneas à luz da Constituição Federal de 1988. *Revista de Doutrina da 4ª Região*. Porto Alegre, n.18, jun. 2007. Disponível em: http://www.revistadoutrina.trf4.jus.br/index.htm?http://www.revistadoutrina.trf4.jus.br/artigos/Edicao018/Valter_Junior.htm.
- FOSTER, S.; AIT-KADI, M. Integrated Water Resources Management (IWRM): how does groundwater fit in? *Hydrogeology Journal*, v. 20, 2012, pp. 415-418.
- FOSTER, S.; GARDUÑO, H.; TUINHOF, A.; TOVEY, C. **Groundwater governance conceptual framework for assessment of provisions and needs.** Sustainable Groundwater Management Contributions to Policy Promotion. GWMATE/World Bank, 2009 (Strategic Overview Series, 1).
- GENARO, D. T.; PEIXINHO, F. C.; MOURÃO, M. A. **A Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS):** 10 anos de implementação e operação. Poster. In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 24 a 28 de novembro de 2019. Foz do Iguaçu-PR.
- GONÇALVES, A. F. **O conceito de governança.** XIV Congresso Nacional do Conpedi - Conselho Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Direito. Fortaleza, 2005. Disponível em: https://www.unisantos.br/upload/menu3niveis_1258398685850_alcindo_goncalves_o_conceito_de_governanca.pdf.
- GRANZIERA, M. L. M. **Direito ambiental.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015.
- GRANZIERA, M. L. M. **Direito ambiental.** 5. ed. São Paulo: Foco, 2019.
- GRIGG, N. **Water resources management:** principles, regulations and cases. New York: McGraw Hill, 1996. 540p.
- GWP. Global Water Partnership. **Integrated Water Resources Management.** Stockholm, Sweden: TAC Background Papers, n. 4, 2000. Disponível em: http://www.gwp.org/Global/GWP-CACENA_Files/en/pdf/tec04.pdf.

- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.** São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 2019.
- JARVIS, T. W. et al. International borders, groundwater flow and hydrochlorophrenia. **Groundwater**, v. 43, n. 5, 2005, pp. 764-770.
- KENNEDY, K.; SIMONOVIC, S.; TEJADA-Guibert, A.; DORIA, M. F.; MARTIN, J. L. **IWRM Implementation in basins, sub-basins and aquifers:** state of the art review. The United Nations World Water Assessment Programme. Unesco, 2009.
- MACHADO, P. A. L. **Direito ambiental brasileiro.** 18. ed. São Paulo: Malheiros, 2010.
- MADANI, K.; DINAR, A. Non-cooperative institutions for sustainable common pool resource management: application to groundwater. **Ecological Economics**, v. 74, 2012, pp. 34-45.
- MARSHAK, S. **Earth: portrait of a planet.** 6th ed. New York: W.W. Norton & Company, 2019. 1025p.
- MEGDAL, S. B.; GERLAK, A. K.; VARADY, R. G.; HUANG, L.-Y. Groundwater Governance in the United States: common priorities and challenges. **Groundwater**, v. 53, n. 5, 2014, pp. 677-684. doi:10.1111/gwat.12294.
- MILARÉ, E. **Direito do ambiente.** 12. ed. São Paulo: Thomson Reuters Brasil, 2020.
- MIRANDA, G. M.; REYNARD, E. Integrated water resources management in federations: the examples of Brazil and Switzerland. **Water**, v. 12, n. 7, 2020, 1914p.
- OLIVEIRA, F. R.; PRETO, L. A.; LIMA, K. J.; CARDOSO, F. B. F.; GASPAR, M. T. P.; MARRA, C. F. Methodology for the selection of priority areas to recharge the aquifers to implementing conservationist practices in watersheds. 47th IAH Congress. Brazil 2021.
- POMPEU, C. T. **Direito de águas no Brasil.** São Paulo: Revista dos Tribunais, 2006.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra.** São Paulo: Bookman, 2006. 656p.
- QUEIROZ, E. T.; PONTES, C. H. C. **Estudo diagnóstico das águas minerais e potáveis de mesa do Brasil.** Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, Diretoria de Fiscalização da Atividade Minerária, 2015.
- REYNOLDS, S.; JOHNSON, J.; MORIN, P.; CARTER, C. **Exploring Geology.** 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. 673p.
- RIBEIRO, N. B.; JOHNSSON, R. M. F. Discussions on water governance: patterns and common paths. **Ambient. Soc.** São Paulo, v. 21, 2018, e01252.
- RITCHIE, H.; ROSEN, M. **Water use and stress.** 2018. Disponível em: <https://ourworldindata.org/water-use-stress>.
- ROGERS, P.; HALL, A. W. **Effective water governance.** Stockholm: Global Water Partnership, 2003.
- ROSEN, M.; ORTIZ-OSPINA, E. **World Population Growth.** 2019. Disponível em: <https://ourworldindata.org/world-population-growth>.
- SCALON, M. G. B. Águas minerais e recursos hídricos: uma perspectiva de gestão integrada. **Revista de Direito, Estado e Recursos Naturais**, v. 1, n. 1, 2011, pp. 131-160.
- SERRA, Silvia Helena. **Águas minerais do Brasil.** Campinas, SP: Millennium, 2009. 277p.
- SOUZA-FERNANDES, L. C. S.; OLIVEIRA, E. (Orgs). **Coletânea de Legislação das Águas Subterrâneas do Brasil – Região Sudeste.** São Paulo: IAS, v. 1, 2018a.
- SOUZA-FERNANDES, L. C. S.; OLIVEIRA, E. (Orgs). **Coletânea de Legislação das Águas Subterrâneas do Brasil.** Região Norte. São Paulo: IAS, v. 5, 2018b.
- SOUZA-FERNANDES, L. C. S.; OLIVEIRA, E. (Orgs). **Coletânea de Legislação das Águas Subterrâneas do Brasil.** Região Sul. São Paulo: IAS, v. 2, 2018c.
- SOUZA-FERNANDES, L. C. S.; OLIVEIRA, E. (Orgs). **Coletânea de Legislação das Águas Subterrâneas do Brasil.** Região Centro-Oeste. São Paulo: IAS, v. 3, 2018d.
- STJ. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial nº 1.296.193-RJ** (2011/0288207-8). Relator. Ministro Herman Benjamin. Brasília. Dje: 07/11/2016a.
- STJ. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial nº 1.306.093-RJ** (2011/0145236-6). Relator. Ministro Herman Benjamin. Brasília. Dje: 07/11/2016b.
- STJ. Superior Tribunal de Justiça. **Recurso Especial nº 1.306.093-RJ.** 2^a Turma. Relator Ministro Herman Benjamin, j. 28/05/2013.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** 2. ed. Oficina de Textos, 2009. 557p.
- TOVAR, J. Conceito e propriedade das nascentes. **Revista do Serviço Público**, v. 67, n. 1, 1955, pp. 96-105. Disponível em: <https://revista.enap.gov.br/index.php/RSP/article/view/5154>.
- VIEGAS, E. C. **Visão jurídica da água.** Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2005.
- VILLAR, P. C. **Aquíferos transfronteiriços:** governança das águas e o Aquífero Guarani. Curitiba: Juruá, 2015.
- VILLAR, P. C. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. **Ambiente & Sociedade.** São Paulo, v. 19, n. 1, jan./mar. 2016, pp. 83-102. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n1/pt_1809-4422-asoc-19-01-00085.pdf.
- VILLAR, P. C.; GRANZIERA, M. L. M. **Direito de águas à luz da governança.** Brasília: ANA, 2020.
- VILLAR, P. C.; HIRATA, R. Groundwater Governance and the Construction of Legal Indicators for Brazilian States. **Ambiente e Sociedade**, v. 25, 2022.
- VILLHOLTH, K. G.; CONTI, K. I. Groundwater governance: rationale, definition, current state and heuristic framework. In: VILLHOLTH, K. G.; LOPEZ-GUNN, E.; CONTI, K. I.; GARRIDO, A.; VANDERGUN, J. (Eds.). **Advances in groundwater governance.** Leiden, Netherlands: CRC Press, 2018, pp. 3-31.
- YAN, Y.; BENDER, M. L.; BROOK, E. J.; CLIFFORD, H. M.; KEMENY, P. C.; KURBATOV, A. V.; MACKAY, S.; MAYEWSKI, P. A.; NG, J.; SEVERINGHAUS, J. P.; HIGGINS, J. A. Two-million-year-old snapshots of atmospheric gases from Antarctic ice. **Nature**, v. 574, 2019, pp. 663-666.
- YOSHIDA, C. Y. M. Água: bem privado, bem público ou bem difuso? Implicações jurídicas, econômico-financeiras e socioambientais. In: YOSHIDA, C. Y. M. (Org.). **Recursos hídricos:** aspectos éticos, jurídicos, econômicos e socioambientais. Campinas, SP: Alínea, 2007, v. 1, pp. 37-56.



Surgência de aquífero cárstico na Bacia do Pacuí
na divisa de Montes Claros com Coração de Jesus (MG)
Foto: Eduardo Gomes de Assis / Banco de Imagens ANA

CAPÍTULO 2

A ÁGUA SUBTERRÂNEA NO CICLO HIDROSSOCIAL



2.1 O CICLO HIDROLÓGICO E AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O ciclo da água, cientificamente conhecido como *ciclo hidrológico*, é uma maneira simplificada de descrever os movimentos e as transformações sofridas pela água no planeta Terra. A água está sempre em movimento, circulando pelas superfícies (geleiras, icebergs, rios, lagos, mares, etc.); pela atmosfera (nuvens); ou pelo subsolo (aquéferos, aquitardes), conforme exposto no Vídeo 1. Esse movimento cíclico está relacionado com as trocas de energia entre a atmosfera, oceano e continentes, sustentando o clima e grande parte de sua variabilidade natural (OKI; ENTEKHABI; HARROLD, 2004; COCKELL *et al.*, 2011). A luz do sol (radiação solar) e o calor do interior da Terra (emitido por reações nucleares radioativas) são as fontes de energia que promovem a transformação dos estados da água (líquido,

sólido e gasoso) e, consequentemente, a sua contínua movimentação no Planeta.

Vídeo 1 – Ciclo da Água (ciclo hidrológico)

Produção: ANA

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=vW5-xrV3Bq4>.

A quantidade de água no planeta é constante, porém, a sua distribuição na natureza se dá de forma desigual e cíclica, passando por mudanças físicas e químicas ao longo do espaço e do tempo, podendo ser encontrada nos estados líquido (mares, rios, lagos e aquíferos), sólido (neve, granizo e geleiras) e gasoso (atmosfera, fumarolas e nuvens vulcânicas) (COCKELL *et al.*, 2011). Os oceanos são os maiores reservatórios de água do Planeta, porém, os maiores volumes de água doce encontram-se nas geleiras e nos aquíferos. A Figura 7 apresenta a distribuição desses volumes e a média anual dos fluxos no ciclo hidrológico global.

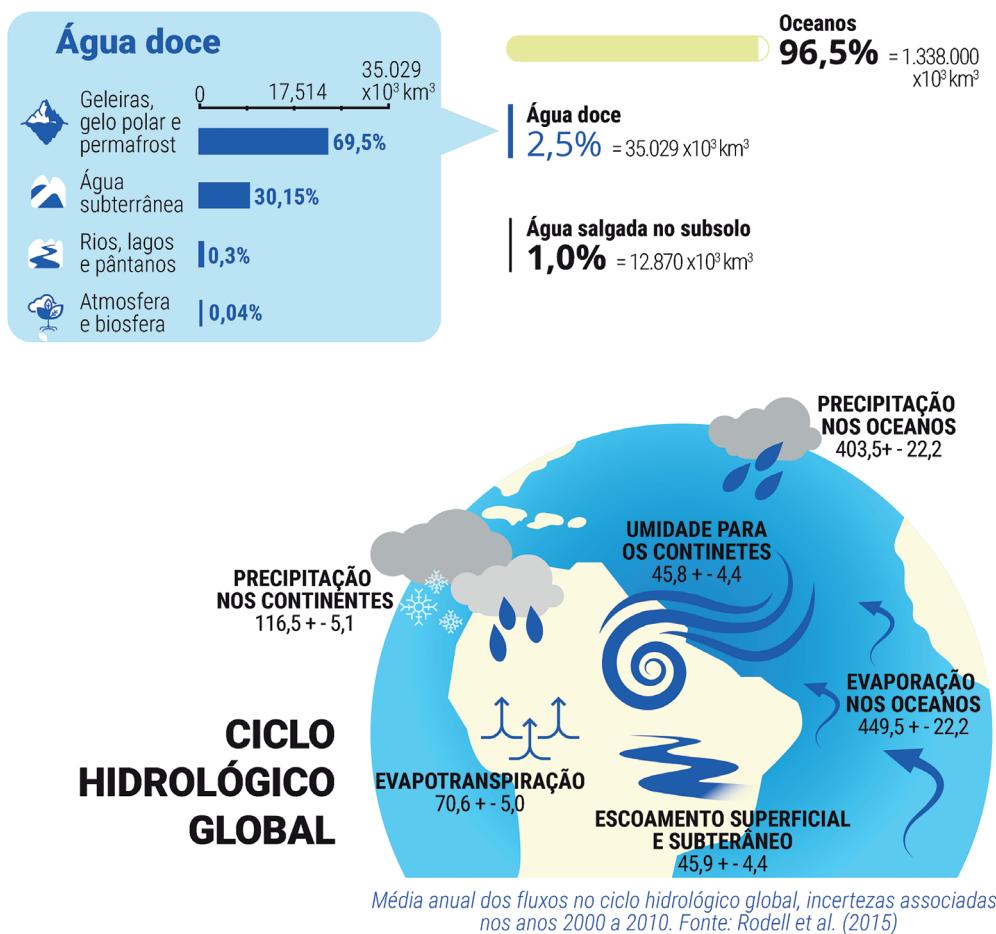


Figura 7 – Volume de água e média anual dos fluxos no ciclo hidrológico

Fonte: Shiklomanov e Rodda (2003); Rodell *et al.* (2015), adaptado por Dora Atman.

O movimento da água no Planeta foi registrado na Antiguidade, contudo, foi apenas nos séculos XVII e XVIII que se constatou a importância da evaporação da água do mar como fonte de umidade nos continentes e de abastecimento dos reservatórios de água doce (MANOEL FILHO, 2008). Essa umidade se distribui em forma de precipitação pluviométrica e neve, contribuindo para o escoamento dos rios e volumes armazenados nos lagos e aquíferos.

O funcionamento do ciclo hidrológico é influenciado por diversos fatores naturais, tais como: *a*) as

variações da incidência da radiação solar, controlada pela dinâmica interna do Sol e pelas variações da posição e trajetória do planeta Terra no Sistema Solar; *b*) as mudanças na composição da atmosfera e da água dos oceanos; *c*) os ventos e as correntes oceânicas; *d*) os vulcanismos; *e*) o tipo, o padrão e a densidade da cobertura vegetal; *f*) as variações na distribuição espacial e no número de seres vivos; e *g*) os tipos de solo e subsolos (COCKELL *et al.*, 2011; GROTZINGER; JORDAN, 2013). A Figura 8 apresenta os principais fenômenos naturais que regulam os processos de transferência da água no ciclo hidrológico.

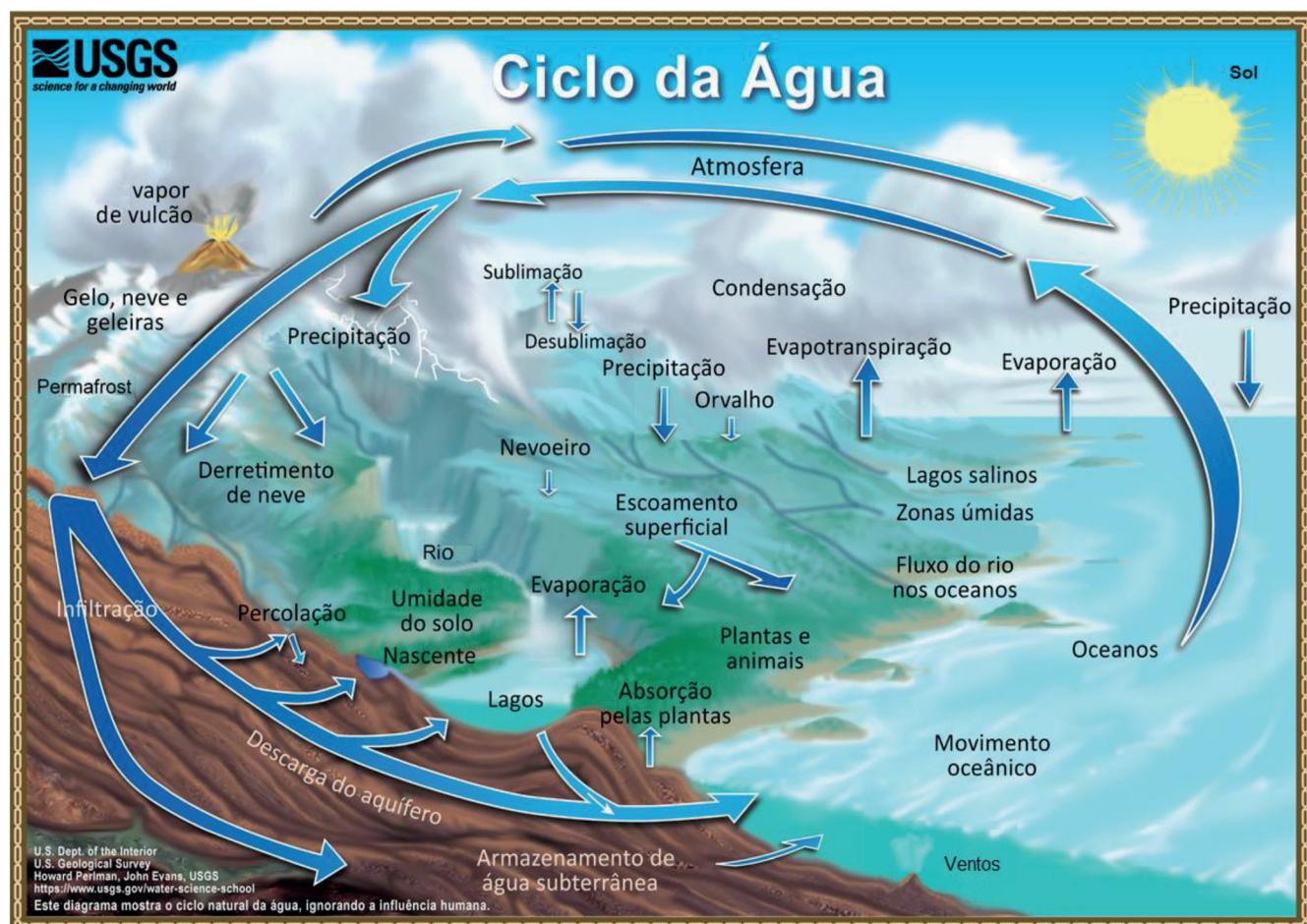


Figura 8 – Ciclo da água

Fonte: USGS (2017).

Dentre os processos que regulam a disponibilidade hídrica destacam-se os seguintes: *i)* evaporação; *ii)* evapotranspiração; *iii)* precipitação; *iv)* escoamento superficial; *v)* escoamento de base; e *vi)* infiltração. Esses processos formam as drenagens e proporcionam a recarga, a descarga e a percolação. A seguir são descritas as definições de cada termo:

- i.* **Evaporação:** a evaporação é um tipo de vaporização que ocorre na superfície de um líquido à medida que ele passa para a fase gasosa (vapor). Na Terra, a evaporação é o fenômeno físico de transferência de água e energia induzido por meio do fluxo de calor latente das superfícies d'água para a atmosfera. A taxa de evaporação depende da disponibilidade de energia, do mecanismo de transferência de massa/energia, das dimensões das superfícies d'água e dos volumes dos reservatórios e lagos. Os principais fatores meteorológicos envolvidos nesse processo são: a radiação solar, a temperatura do

ar e da água, a velocidade do vento, a umidade do ar, a pressão atmosférica, e as características do ambiente circundante (OKI; ENTEKHABI; HARROLD, 2004).

- ii.* **Evapotranspiração:** a evapotranspiração é a retirada de água da superfície para a atmosfera pela combinação de dois processos: a evaporação somada à transpiração vegetal. A transpiração vegetal é responsável pela saída d'água do interior da planta através de aberturas na epiderme vegetal, garantindo as trocas gasosas entre o vegetal e a atmosfera. Naturalmente, as plantas perdem água principalmente pelos estômatos, que são pequenas aberturas nas folhas, responsáveis por regular a saída de substâncias (gases e vapor d'água) produzidas nas folhas. Quase toda a água absorvida do solo pelas plantas se perde por transpiração, e apenas uma pequena parte é convertida aos tecidos vegetais.

Os rios voadores e a Floresta Amazônica

No caso brasileiro, a evapotranspiração da Floresta Amazônica impacta a disponibilidade hídrica de outras bacias e regiões brasileiras. A Floresta Amazônica lança “20 bilhões de toneladas de água por dia”, superando a vazão que o rio Amazonas despeja no mar (17 bilhões de toneladas), influenciando diretamente no clima (NOBRE, 2014, p. 13). A influência da floresta no clima pode ser explicada pela teoria da bomba biótica (Vídeo 2). Segundo essa teoria, os “processos de transpiração e condensação mediados e manipulados pelas árvores” modificam “a pressão e a dinâmica atmosféricas”, gerando “maior suprimento de umidade do oceano para o interior de continentes florestados” (NOBRE, 2014, p. 13). Como a Floresta Amazônica evapora tanto ou mais água que a superfície oceânica contígua, ela consegue sugar “do mar para a terra as correntezas de ar carregadas de umidade [...], o que trará chuvas para a área florestada.” O corte da floresta diminui a evapotranspiração e, consequentemente, a condensação, o que reverte os fluxos de umidade que irão da terra para o mar, gerando um deserto (NOBRE, 2014, p. 13).

A umidade gerada pela floresta forma massas de ar carregadas de vapor de água, que são levadas pelos ventos da Bacia Amazônica para o Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil, contribuindo para a formação de chuvas nessas regiões. Essas massas de ar úmido são chamadas de *rios voadores*, pois podem ser equiparadas a verdadeiros *cursos de água atmosféricos* (Vídeo 3).

Vídeo 2 – Esquema ilustrativo sobre a Bomba Biótica

<https://www.youtube.com/watch?v=0CS9y8JH2Y>

Produzido por: Rios Voadores

Vídeo 3 – Documentário Rios Voadores

<https://www.youtube.com/watch?v=0Mwo5PVB0ro>

Produzido por: Bettina Ehrhardt em colaboração com Thomas Hagenbrock e Michael Schucht

iii. **Precipitação:** é o processo de condensação do vapor d'água atmosférico que se aglutina e *precipita* ou cai sobre a superfície terrestre. A precipitação ocorre devido à ação conjunta de dois processos: resfriamento e adição de umidade, fazendo com que parte da atmosfera fique saturada com vapor d'água (atingindo 100% de umidade). A água adicionada à superfície da Terra a partir da atmosfera ocorre na forma líquida (chuva) ou sólida (neve ou gelo). A precipitação varia bastante no espaço geográfico e no tempo. A chuva tende a escoar ou infiltrar no solo. Já a neve pode ser acumulada nas geleiras e calotas polares, onde pode ficar congelada por milhares de anos ou derreter e escoar, fluindo na forma de riachos e rios ou, então, infiltrar no solo. O degelo das calotas polares aumenta o nível de água dos oceanos, enquanto o degelo acelerado de glaciares pode comprometer o fluxo de cursos d'água, importantes para o abastecimento de populações.

iv. **Escoamento superficial:** é definido pelo fluxo de água que ocorre na superfície do solo quando este se encontra saturado de umidade ou impermeável. Essas águas, geralmente oriundas de precipitações, podem formar sucessivas enxurradas, drenagens (córregos, riachos, rios), lagos, etc. Seu escoamento ocorre de forma difusa ou concentrada, e pode formar fluxos efêmeros ao longo dos vales, dependendo da intensidade das chuvas e das características das superfícies (como declividade, topografia e tipo de cobertura vegetal).

Drenagem superficial: representam os cursos e fluxos de água superficiais que formam os riachos, córregos, ribeirões e rios. Esses podem ter caráter *intermitente* (quando a água flui em seus cursos nos períodos de chuvas e secam com a estiagem), ou *perene* (quando o fluxo de água permanece ao longo de todo o ano hidrológico e não seca). Os cursos d'água *intermitentes* são formados pelo escoamento superficial e subsuperficial da água das chuvas; já os cursos *perenes* recebem, também, os fluxos subterrâneos de aquíferos. Os fluxos subterrâneos perenes mantêm constantes as nascentes e seus cursos d'água, além de contribuírem diretamente para o aumento

de vazão à jusante das nascentes através de surgências ao longo do próprio curso.

v. **Infiltração:** é a passagem de água da superfície para o interior do solo. A capacidade de infiltração de um terreno depende da sua topografia, cobertura vegetal, grau de umidade do solo, das propriedades físico-químicas e da intensidade e duração da chuva. A infiltração ocorre por vários fatores, incluindo: força da gravidade, forças capilares, adsorção e osmose. A infiltração diminui à medida que aumenta o teor de umidade do solo na camada superficial. Se a taxa de precipitação exceder a taxa de infiltração, o escoamento superficial é favorecido, de forma que cada solo possui um limite potencial de infiltração.

Percolação: processo pelo qual a água se desloca na vertical e descendente ao longo da zona não saturada (zona vadosa ou de aeração) após infiltrar nos solos e rochas. A *zona não saturada* é a porção da subsuperfície onde os espaços existentes entre as partículas dos solos e rochas são preenchidos por água e ar (umidade do solo). Durante a percolação também ocorre o processo de filtragem natural da água pelo solo e o seu enriquecimento com elementos minerais. A percolação d'água no solo ocorre quando o seu volume infiltrado é suficiente para forçar o deslocamento descendente da água.

Recarga: quando a água ingressa em subsuperfície, ela se distribui nos vazios em duas zonas principais: *zona não saturada* e *zona saturada*. A recarga ocorre quando a água que percola na zona não saturada desce e atinge a superfície do aquífero ou superfície freática (zona saturada em água). A água pode ser proveniente da infiltração das águas de chuva, degelo ou, ainda, de rios e lagos. As áreas da bacia hidrográfica que permitem a infiltração da água constituem áreas de recarga. Na zona saturada, os espaços vazios estão totalmente preenchidos pela água. O limiar entre essas duas zonas é denominado de *superfície freática* ou *nível de água subterrânea*. Na base da zona não saturada existe uma região úmida denominada *franja capilar*. Essa região tem espessura variável e representa uma transição da zona não saturada para a zona saturada, e ocorre devido às forças capilares

que ascendem água do aquífero para espaços superiores vazios dos solos vizinhos. A recarga, portanto, ocorre quando a água que percola na zona não saturada atinge o topo do aquífero (zona saturada em água).

A *infiltração*, a *percolação* e a *recarga* são parcelas de água difíceis de serem contabilizadas. A infiltração tende a ser maior que o volume percolado que, por sua vez, é maior que o volume da recarga. Isso ocorre porque parte da água fica presa ou adsorvida nas partículas do solo ou rocha ao longo do trajeto, e parte é evaporada no processo. Se a zona saturada for muito profunda e as taxas de precipitação ou infiltração forem baixas, a infiltração e percolação podem ocorrer ao longo das camadas superficiais, mas a recarga será nula. Os aquíferos, portanto, não são abastecidos de forma homogênea, havendo áreas mais favoráveis para a recarga, sendo que mudanças na ocupação do solo podem alterá-la. Assim, é importante que a gestão dos recursos hídricos leve em conta essa característica.

Descarga: é o processo de saída de água dos aquíferos, onde a água subterrânea aflora e flui na superfície (locais das nascentes) e, principalmente, ao longo de cursos de água, como rios ou lagos e oceanos. A descarga subterrânea é a responsável pela perenização de rios. A vazão das descargas relacionadas aos aquíferos que armazenam grandes volumes de água tende a ser alta e de caráter perene e pouco afetada pelos longos períodos de estiagem. Nos aquíferos do tipo cárstico, onde o fluxo de água subterrânea ocorre concentrado em condutos e cavernas, muitas vezes as nascentes são chamadas de *surgências*, pois a impressão é de que um rio *surge na superfície*. Em aquíferos rasos de pequenas dimensões, como os aquíferos das vertentes de colinas e serras, entretanto, as descargas subterrâneas são de baixas vazões e, muitas delas, podem funcionar apenas durante o período chuvoso (intermitentes) ou durante poucos dias após os eventos de chuva (efêmeras). O Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) classifica dois tipos de descarga de aquíferos como *áreas de proteção permanente*: as *nascen-*

*tes*¹ e os *olhos d'água*². É interessante que as leis dão proteção direta e necessária às nascentes de um rio e olhos d'água, porém, silenciam sobre o fluxo de base proveniente dos aquíferos, que é o responsável por manter a perenidade dos rios, graças à descarga de grandes volumes de água.

vi. **Escoamento de base ou fluxo subterrâneo:** é o movimento da água ao longo da zona saturada. A água no solo e nas rochas saturadas flui em espaços vazios como os poros, as fraturas abertas e outros vazios deixados pela dissolução de minerais. Esses espaços precisam estar interconectados para que a água possa fluir. A força da gravidade e a pressão da coluna d'água geram o movimento da água subterrânea. Seu fluxo ocorre sempre na direção da maior para a menor carga hidráulica, que é a somatória da carga de elevação altimétrica mais a carga de pressão da coluna d'água em um determinado ponto do reservatório subterrâneo. A carga hidráulica é medida por meio de poços de monitoramento distribuídos ao longo dos reservatórios subterrâneos, juntamente com um conhecimento do sistema hidrogeológico, o que permite definir a direção do fluxo.

Ao contrário do imaginário popular, na maioria dos casos as águas subterrâneas não formam rios subterrâneos ou correntes de água³, mas preenchem poros e fraturas de forma assemelhada a uma esponja que absorve a água, fluindo lentamente. Essas águas representam a dimensão oculta do ciclo hidrológico e subestimada no ciclo hidrossocial. Além de seu papel no ciclo hidrológico, essas águas influenciam os aspectos geológicos, como estabilidade de encostas, subsidência de terrenos, indução de tremores e

¹ Por ocasião do julgamento da ADIN nº 4.903, o Supremo Tribunal Federal (STF) reconheceu que as nascentes intermitentes também devem ser consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP).

² *Olhos d'água:* denominação popular sem vinculação técnica-científica que no entendimento geral é sinônimo de *nascente*. Acredita-se que sua origem vem da forma circular e pontual de algumas nascentes e do consequente aspecto visual do fluxo d'água que se assemelha a um olho, resultado da pressão d'água que surge formando uma bolha surgiante. Esse tipo de nascente é visualmente diferente de outras que são dispersas em zonas úmidas e não são visíveis pontualmente. Na prática, essa denominação não tem relação com intermitência dos fluxos das nascentes e, sim, com os aspectos visuais que caracterizam algumas nascentes pontuais.

³ Excepcionalmente, é possível encontrar algumas cavernas, condutos de lava e gelo ou nascentes horizontais que se assemelham a correntes de água.

abalos sísmicos, migração e acumulação de petróleo, bem como aspectos ecossistêmicos relacionados à manutenção de áreas úmidas (pântanos, mangues, alagados) e cursos de água superficiais (MANOEL FILHO, 2008).

2.1.1 O ciclo hidrossocial

Os seres humanos são agentes ativos nos processos do ciclo hidrológico, interferindo de forma a aumentar ou diminuir esses fluxos naturais, seja no território ou fora dele (LINTON; BUDDS, 2014). A forma de circulação da água também é influenciada pelas instituições, infraestruturas e práticas sociais dos políticos, cidadãos, empresários, usuários e consumidores. Essa ideia tem fortalecido o conceito de *ciclo hidrossocial*, que politiza a concepção biofísica dos processos do ciclo hidrológico. A água não se move apenas por meio da chuva, poros das rochas e massas de ar, mas por uma complexa rede de adutoras, encanamentos, poços, plantas de tratamento, cisternas, pivôs de irrigação, mangueiras de jardim, vazamentos, direitos jurídicos, padrões de qualidade, redes de transporte, mercados e consumidores (BUDDS; LINTON; McDONNELL, 2014).

A disponibilidade hídrica é um dado natural, mas também social que exige as seguintes análises: *a)* quem e como utiliza as águas?; *b)* quem tem acesso ou controle sobre o recurso?; *c)* como a utilização da água influencia as relações de poder no campo e na cidade?; *d)* como a sua presença ou ausência determina a conformação de uma sociedade?; *e)* como os fluxos financeiros interferem na disponibilidade hídrica, independente do ciclo hidrológico?; *f)* como a sociedade interfere nos elementos que compõem o ciclo hidrológico?; *g)* quais usos e que atores são os beneficiados pelas infraestruturas hidráulicas? (LINTON; BUDDS, 2014).

As ações humanas e o fenômeno das mudanças climáticas alteram a dinâmica natural dos elementos que compõem o ciclo hidrológico, interferindo diretamente na forma como a água circula pelo território, modificando os padrões de disponibilidade hídrica e sua distribuição territorial e temporal. Áreas que contavam com boa disponibilidade hídrica e regularidade do regime de chuvas podem enfrentar fenômenos de seca ou inundações, cujas consequências econômicas, sociais e ambientais são desconhecidas. A água subterrânea está inserida nesse ciclo hidrossocial, sendo

impactada pelas extrações, vazamentos de redes de água e esgoto, excesso de irrigação, impermeabilização das cidades, mudança do uso de solo e perda da cobertura vegetal, bem como pelos impactos causados com a variabilidade e mudanças climáticas. Se determinar as trajetórias naturais da água subterrânea já é uma tarefa complexa, na perspectiva hidrossocial ela se torna ainda mais desafiadora diante dos limitados estudos geológicos, hidrológicos e dos impactos das atividades antrópicas no ciclo hidrológico. Além disso, lida-se com a falta de informações sobre o seu uso que, no caso brasileiro, é majoritariamente desconhecido e subestimado.

2.2 O QUE SÃO E COMO FUNCIONAM OS AQUÍFEROS

Em Hidrogeologia⁴, as formações geológicas podem ser classificadas quanto à sua capacidade de armazenar e transmitir água em três categorias: *aquíferos*, *aquitardes* ou *aquicludes*:

- a) o *aquífero* é uma “formação geológica com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos.” (Res. CNRH nº 202/2018, art. 2º, inc. I). Na prática, consideram-se aquíferos apenas as unidades geológicas capazes de produzir água por meio de poços, em condições viáveis economicamente;
- b) os *aquicludes* são formações geológicas que contêm água em seu interior, contudo, não têm capacidade de transmissão;
- c) os *aquitardes* são formações semipermeáveis que podem conter água, mas sua transmissão se dá de forma muito lenta, inviabilizando a exploração econômica.

Os *aquicludes* e *aquitardes* podem ser relacionados aos aquíferos na medida em que delimitam o seu topo e/ou a sua base, contudo, possuem capacidade baixa ou nula de transferir água, sendo considerados impermeáveis ou semipermeáveis. A classificação das formações em uma dessas categorias se dá por meio da avaliação da capacidade da rocha ou sedimento em transmitir água, representada pelo parâmetro *condutividade hidráulica*.

⁴ Hidrogeologia: área da Geologia que trata da distribuição e movimentação das águas subterrâneas nos solos e rochas da crosta terrestre.

(ou coeficiente de proporcionalidade da Lei de Darcy⁵). A condutividade hidráulica nos aquíferos, ou seja, a velocidade do seu fluxo de água, é igual ou maior que 10^{-4} cm/s (ou 8,64 cm/dia).

A distribuição dos aquíferos no território depende de processos geológicos e geomorfológicos ocorridos no continente. Os aquíferos podem ser classificados conforme os seus tipos de rocha e a pressão a que estão submetidos. Essas características influenciam na capacidade de armazenamento de água, na velocidade do fluxo, nas taxas de recarga e na vulnerabilidade à contaminação. A compreensão da distribuição dos tipos de rocha no território e a forma como suas características influenciam o fluxo das águas subterrâneas auxilia a distinguir os principais aquíferos do país, ou seja, aqueles com maiores capacidades de armazenamento e transmissão de água. A relevância da rocha como aquífero é definida por meio de suas propriedades físico-químicas, dentre as quais pode-se citar a porosidade, a permeabilidade (ou condutividade hidráulica), as condições de ocorrência (extensão, espessura e estrutura) e a possibilidade técnica e econômica de captação.

Classificação dos aquíferos, conforme os tipos de rochas

O Brasil possui uma estrutura geológica antiga que foi exposta aos agentes de erosão durante longo tempo geológico (MENTE, 2008). Suas rochas, geralmente, formam a base (embasamento) impermeável que sustenta todos os tipos de aquíferos (MENTE, 2008). Essas rochas passaram por vários processos de deformação, dobramentos, fraturamentos, entre outros,

que induziram a formação de espaços livres (fraturas) e permitem a percolação e o armazenamento d'água, possibilitando a formação dos aquíferos fissurais ou fraturados. Esse embasamento, por vezes, sofre erosões, formando áreas baixas, conhecidas pelo formato topograficamente deprimido, como as bacias. Ao longo do tempo geológico, essas rochas foram soterradas por pacotes de sedimentos, formando as bacias sedimentares. Nos sedimentos, a água percola nos espaços entre os grãos (poros intergranulares) que foram constituídos junto com a deposição do pacote sedimentar, dando origem aos aquíferos intergranulares ou sedimentares. Por fim, em bacias marinhas, por precipitação química, formaram-se as rochas carbonáticas (ricas em carbonatos-CO₃), também denominadas *rochas cársticas*. Neste último caso, a água percola pela rocha através dos espaços das fraturas, fendas ou cavidades geradas por dissolução química causada pelos fluxos das águas de chuvas, dando origem aos aquíferos cársticos.

Dessa forma, de acordo com a origem da rocha ou do sedimento, bem como do seu grau de consolidação, de fraturamento ou de dissolução, os aquíferos podem ser classificados em três categorias simplificadas:

- a) fissurais ou fraturados (Box 5);
- b) granulares ou sedimentares (Box 6); e
- c) cársticos (Box 7).

Segundo a ANA (2013), os aquíferos e os sistemas aquíferos sedimentares afloram em 53,8% do território nacional, os fraturados em 44,7% e os cársticos em apenas 1,5% (Figura 9).

⁵ A Lei de Darcy é uma equação constitutiva fenomenológica que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso (DARCY, 1856). Cabral (2008, p. 77) explica essa equação de forma didática.

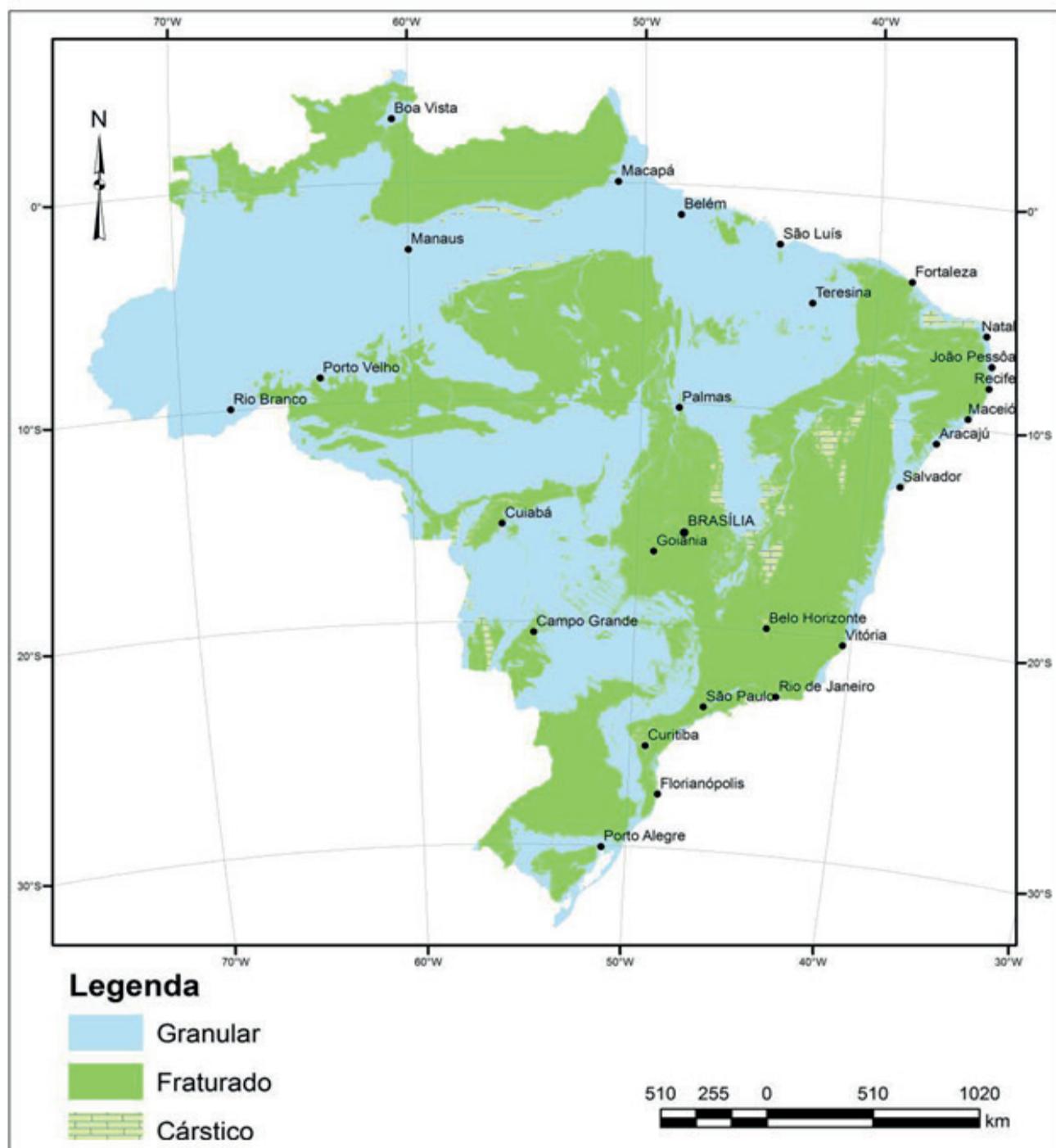


Figura 9 – Distribuição dos aquíferos fraturados, sedimentares e cársticos no Brasil

Fonte: Diniz et al. (2014, p. 25).

Os aquíferos não ocorrem de maneira homogênea ou uniforme no território brasileiro. A composição das rochas ou dos pacotes sedimentares, assim como a exposição aos diferentes climas faz com que

cada aquífero apresente condições específicas de infiltração, percolação, fluxos, armazenamento e descargas hídricas, impactando a produção e a qualidade das águas.

Box 5 – Aquíferos fraturados

Amélia João Fernandes

Aquíferos fraturados típicos são constituídos de rochas cristalinas, metamórficas e ígneas intrusivas, que são materiais geológicos de baixa permeabilidade primária. Nesse tipo de material a água subterrânea é armazenada e transmitida pelas fraturas das rochas, ou seja, a partir de sua porosidade secundária. Em muitas rochas vulcânicas, a exemplo dos basaltos, a porosidade primária pode se encontrar preenchida e o fluxo de água subterrânea ocorre predominantemente pela porosidade secundária, ou seja, através de vazios delimitados por faces de fraturas (DOMENICO; SCHWARZ, 1990; FREEZE; CHERRY, 1979; SINGHAL; GUPTA, 2010). Em rochas sedimentares de baixa permeabilidade primária, como folhelhos, siltitos, lamitos, alguns calcários e arenitos cimentados, o fluxo de água subterrânea pelas fraturas também pode ser importante.

De modo geral, as rochas possuem fraturas de várias orientações, que se conectam entre si, formando um sistema ou rede (Figura 10). Normalmente, a porosidade nesses aquíferos é baixa, mas a velocidade do fluxo da água subterrânea pode ser elevada, fazendo com que apenas uma pequena porcentagem de fraturas seja constituída de bons condutos (Figura 11).

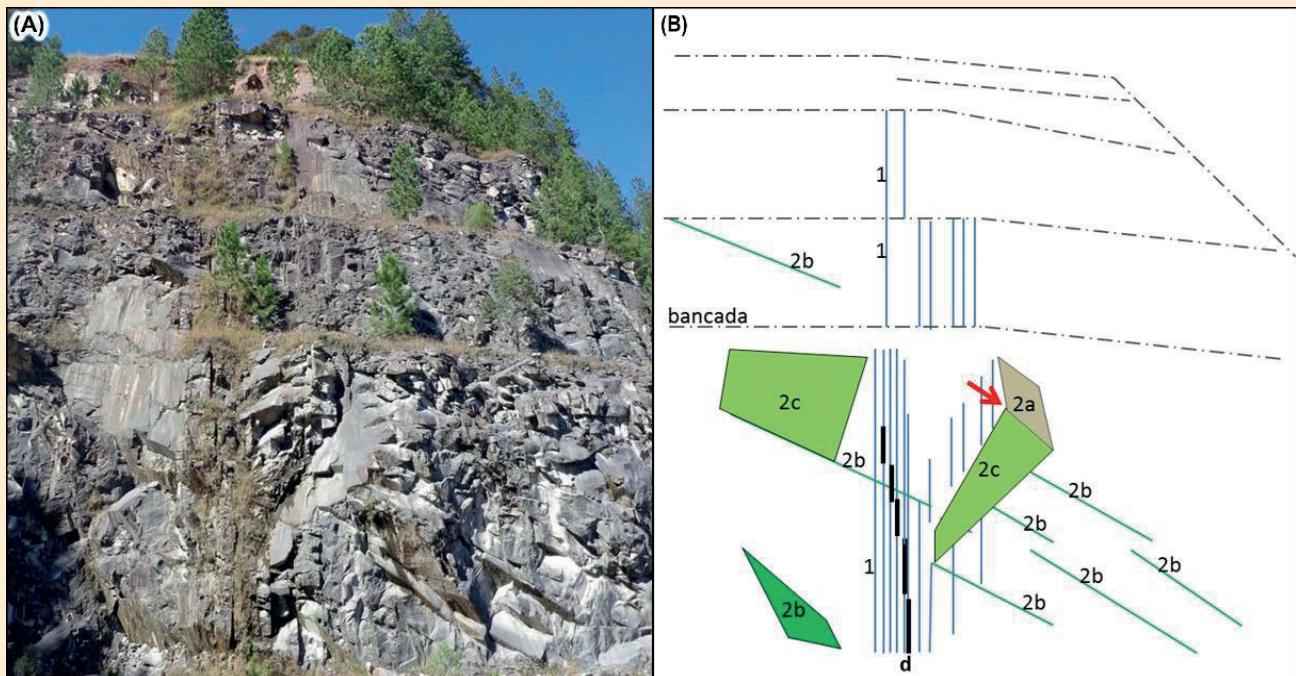


Figura 10 –(A) Parede de pedreira em granito (Itapecerica da Serra, SP), com altura total aproximada de 90 m, em que se observam várias bancadas; (B) Esquema da parede em (A) com representação de fraturas verticais (1, 2a) e fraturas inclinadas (2b, 2c)

Fonte: Fernandes et al. (2016, p. 80).

Na metade inferior da parede rochosa notam-se fraturas horizontais (traços sombreados) ao longo das quais há saída de água e cresce vegetação, mostrando que são permeáveis e que constituem bons condutos.



Figura 11 – Parede de pedreira de basalto em Ribeirão Preto (SP), com cerca de 50 m de altura

Fonte: Fernandes *et al.* (2016, p. 80).

As aberturas de fraturas são predominantemente muito pequenas e, frequentemente, variam entre 0,01 e 0,05 mm. Essas aberturas, em um meio com uma fratura/metro, proporcionam valores de condutividade hidráulica (K) entre $\sim 10^{-8}$ e $\sim 10^{-6}$ m/s. Os valores de K para rochas ígneas e metamórficas fraturadas variam em cinco ordens de magnitude, ou seja, de 10^{-8} a 10^{-4} m/s (Figura 11) (ver, por exemplo, ROULEAU *et al.*, 1996; SHAPIRO *et al.*, 2007; PARKER *et al.*, 2018). Rochas cristalinas não fraturadas têm valores de K extremamente baixos e são comparáveis ao folhelho e à argila (FREEZE; CHERRY, 1979).

Os aquíferos fraturados são importantes para o abastecimento de populações em várias regiões. Sua exploração sustentável exige estudos sobre o seu potencial de produção, assim como os casos de contaminação desses aquíferos por atividades humanas precisam ser avaliados a fim de proteger a saúde pública. Compreender as propriedades da rede de fraturas é fundamental para avaliar e prever o transporte de contaminantes através do aquífero de rocha fraturada e evitar a perda do recurso hídrico.

Outra grande motivação para estudar esses aquíferos é o aumento da demanda de água, principalmente para abastecimento público e para atividades industriais e agropecuárias. A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e o Nordeste do Brasil são exemplos de regiões cujas demandas de água dependem significativamente de aquíferos fraturados típicos, constituídos por rochas cristalinas metamórficas e ígneas. O fluxo de água subterrânea pode ocasionar instabilidades, por isso, os estudos de aquíferos fraturados, entre outras aplicações, são necessários para a realização de obras de engenharia e para avaliação de risco de desastres naturais (por exemplo, os deslizamentos de terra).

Box 6 – Aquíferos sedimentares

Ingo Wahnfried

Aquíferos sedimentares são compostos por sedimentos ou rochas sedimentares, cujos depósitos afloram em 70% da superfície emersa do Planeta (WILKINSON et al., 2009). A porosidade predominante dessa classe de unidades geológicas é primária, sendo gerada quando os sedimentos são depositados. Isso faz com que a porosidade fique distribuída em todo o seu volume, facilitando a extração da água armazenada. A porosidade total de sedimentos inconsolidados varia entre 25 e 40% para cascalho; 25 e 50% para areia; e 35 e 50% para silte (FREEZE; CHERRY, 1979), o que evidencia a tendência de diminuição da porosidade com o aumento da granulometria (tamanho dos sedimentos). Em rochas sedimentares, a porosidade é sempre inferior àquela do material com a mesma granulometria inconsolidada devido, principalmente, ao processo de compactação. Arenitos possuem porosidade de 5 a 30%; carbonatos não carstificados de 0 a 20%; e folhelhos de 0 a 10% (KRUSEMAN; RIDDER, 1994). A porosidade também é influenciada pelo grau de seleção dos grãos, sua esfericidade e a ocorrência de cimentação. Poros de dimensões muito reduzidas não permitem a saída da água por gravidade. Os valores de capacidade específica, por conta dessa característica, são sempre inferiores aos da porosidade total, com valores variando entre 1% para argilas e 30% para areias grossas (KRUSEMAN; RIDDER, 1994).

Além da porosidade, parâmetros como condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, heterogeneidade e anisotropia são definidos pelas características dos sedimentos ou rochas sedimentares que formam as unidades aquíferas. A condutividade hidráulica depende da conectividade entre os poros e, portanto, não possui correlação obrigatória com o seu volume. Dessa forma, a grande diversidade de tipos de depósitos e rochas sedimentares faz com que a sua condutividade hidráulica varie 11 ordens de magnitude. Freeze e Cherry (1979) indicam condutividades hidráulicas aproximadas que variam entre 10^{-11} m/s para argilas marinhas, e 10^{-1} m/s para cascalho, enquanto para folhelhos a condutividade mínima é de 10^{-12} m/s e a máxima é de 10^{-5} m/s para carbonatos não carstificados.

A anisotropia mais comum em aquíferos sedimentares é aquela causada pela variação granulométrica entre estratos. A condutividade hidráulica horizontal pode ser duas a dez vezes maior do que a vertical em formações aluvionares com estratificação horizontal, mas esse fator pode chegar a 100 quando há intercalação de camadas argilosas (KRUSEMAN; RIDDER, 1994).

O fluxo distribuído ao longo de todo o volume do aquífero sedimentar faz com que a velocidade real da água em poros e gargantas seja pequena em comparação com aquíferos cársticos e fraturados. O material particulado em suspensão na água fica totalmente retido neste contexto, mesmo em eventos de recargas intensas, como chuvas de tempestades.

Geralmente, a qualidade da água é boa. A grande diversidade na mineralogia dos grãos que compõe os aquíferos sedimentares influencia na hidroquímica. A presença de argilominerais facilita as trocas de cátions e ânions, o que pode tanto favorecer a retenção de contaminantes como lentamente liberar cátions de água conata, estagnada em poros isolados, por difusão (POETER et al., 2020). As exceções mais representativas são as contaminações por arsênio e fluoreto, cujas ocorrências estão associadas a locais específicos onde há presença de minerais que possuem esses elementos em sua composição, e dos contextos climáticos, geomorfológicos e hidroquímicos necessários à sua mobilização (AMINI et al., 2008; RAVENSCROFT; BRAMMER; RICHARDS, 2009).

Na Amazônia, apesar da abundância de água superficial, dois terços das sedes municipais são abastecidas total ou parcialmente por águas subterrâneas (WAHNFRIED; SOARES, 2012; ANA, 2021), com predomínio de aquíferos sedimentares (vide Figuras 12 e 13). A ANA (2015) realizou um estudo na região que apontou a existência de 14 unidades litoestratigráficas sedimentares, com continuidade hidráulica e potencial hidrogeológico variado. Essas unidades formam o *Sistema Aquífero Amazonas*, que no território brasileiro ocupa uma área de cerca de dois milhões de km² (Vídeo 4).

Vídeo 4 – Aquífero Amazonas

<https://www.youtube.com/watch?v=ro-5gvwilhQ>

Produzido por: ANA

Uma dessas unidades litoestratigráficas do Sistema Aquífero Amazonas é o Aquífero Alter do Chão (AAC) – importante fonte de abastecimento de cidades como Manaus e Santarém. O AAC é constituído por intercalações de arenitos, argilitos, siltitos e, subordinadamente, conglomerados. Sua espessura média varia entre 200 e 400 m, alcançando 1.266 m (ANA, 2015), e sua área aflorante é de 312.574 km² (ANA, 2005). O AAC é predominantemente livre, com porções semiconfinadas a confinadas, por vezes na mesma região.



Figura 12 – Água subterrânea retornando à superfície na Formação Novo Remanso, Manaus (AM).

Esta nascente contribui para o fluxo de base de um afluente do rio Tarumã-Açu

Foto de Ingo Wahnfried.



Figura 13 – Poço em escola na comunidade do Retiro, município de Humaitá (AM), à margem esquerda do rio Madeira. As marcas na parede indicam o nível alcançado pelo rio em 2014. O poço explora depósitos sedimentares quaternários

Foto de Ingo Wahnfried.

Box 7 – Aquíferos cársticos

Paulo Galvão

Os aquíferos cársticos são aqueles compostos por rochas carbonáticas que foram carstificadas, gerando redes de condutos/cavidades por onde a água é transmitida e reservada (Figura 14). Sua origem é resultado do processo de dissolução de rochas solúveis, como calcário, dolomito, quartzito, arenito com cimentação carbonática, etc., conhecido como *carstificação*. Esse fenômeno exige, no mínimo, as seguintes condições: (1) rocha com capacidade química de se dissolver; (2) água ácida (solvente), resultado do contato da água da chuva com o dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera ou no solo, captando o CO_2 da matéria orgânica; (3) gradiente hidráulico (diferenças de cargas hidráulicas que possibilitam o fluxo do solvente; e (4) descontinuidades na rocha (falha/fratura, dobra, plano de acamamento ou estratificação) que permitam o fluxo da água.

Como exemplo, a água (H_2O) infiltra no solo, capta as moléculas de dióxido de carbono (CO_2), se acidifica, gerando o ácido carbônico (H_2CO_3) que, em contato com o calcário (CaCO_3), reage formando o bicarbonato de cálcio (HCO_3^-), produto da dissolução. O processo todo pode ser resumido pela seguinte equação (WHITE, 2003): $2 \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$. Com o tempo, as descontinuidades da rocha se alargam e, de forma progressiva, se desenvolve uma estrutura hierárquica, como um sistema ou rede de condutos cársticos. Caso esteja em uma zona saturada em água, essa estrutura cárstica será considerada um aquífero cárstico. O fluxo subterrâneo, portanto, determina a estrutura hidrogeológica do meio cárstico que, em troca, cria um efeito de retroalimentação, modificando as con-

dições desse fluxo. Essas condições resultam em aquíferos nos quais pode haver caminhos inesperados de fluxo subterrâneo e pontos de drenagem que, muitas vezes, não são previstos com base no cenário topográfico e hidrológico superficiais (GOLDSCHEIDER; DREW, 2007).

Como consequência, na superfície são geradas as famosas paisagens geomorfológicas cársticas, caracterizadas por ocorrências de sumidouros ou dolinas (resultado da subsidência de solos/rochas na superfície ou próximo dela devido a zonas cársticas abaixo), uvalas (quando dois sumidouros/dolinas avançam suficientemente e se juntam), cavernas ou grutas (resultado da espeleogênese, formando uma sucessão de redes de condutos que evoluí ao longo do tempo, com dimensões que permitem o acesso a seres humanos) (Figura 15), drenagens *mortas* (quando a drenagem é desviada bruscamente para um sistema de condutos em subsuperfície) e nascentes (descarga) cársticas, por onde a água subterrânea emerge do sistema cárstico local para alimentar rios e córregos (PALMER, 2007).

Com relação à recarga cárstica, há duas categorias: (1) *recarga autogênica*, que ocorre quando a própria área cárstica se recarrega, via entrada de água direta em sumidouros, dolinas ou cavernas; e (2) *recarga alogênica*, que ocorre nas áreas adjacentes não cársticas e, indiretamente, recarregam o aquífero, como, por exemplo, quando há infiltração de água em camada arenítica sobrejacente ao carste. Essas características podem refletir no grau de vulnerabilidade intrínseca do aquífero a contaminações superficiais.

A carstificação resulta, também, em diferentes condições de permeabilidade e condutividade hidráulica no interior do aquífero, dependendo da forma, quantidade, distribuição e interconectividade dos espaços vazios ou estruturas cársticas. É nesse cenário que se discute o modelo de *permeabilidade tripla* (WHITE, 2003), que consiste em: (1) permeabilidade da matriz da rocha (porosidade primária, comum em recifes mesozoicos e calcários eólicos); (2) permeabilidade da fratura (porosidade secundária, em cársticos incipientes em mármore); e (3) permeabilidade do conduto (porosidade terciária, o carste propriamente dito). A maioria dos aquíferos cársticos, entretanto, se apresenta, pelo menos, com permeabilidade dupla (matriz-fratura, matriz-conduto ou fratura-conduto), ou permeabilidade tripla (matriz-fratura-conduto), condição vista na maioria das grandes cavernas e aquíferos do mundo (FORD; WILLIAMS, 2007). Devido a essas características, a velocidade da água subterrânea pode variar em muitas ordens de magnitude, resultando até em fluxos turbulentos. Ou seja, dependendo do desenvolvimento da rede de conduto, da altura do gradiente hidráulico e do grau de confinamento do aquífero, o fluxo da água pode até se assemelhar ao de um pequeno rio ou córrego, alcançando velocidade de até alguns quilômetros por dia, como visto nas regiões cársticas Dinárica, na Herzegovina (5.184 m/dia) (GOLDSCHEIDER; DREW, 2007), ou em Pains, em Minas Gerais (840 m/dia) (FERRARI et al., 2018).

Aquíferos cársticos são mais sensíveis e vulneráveis a contaminações. Isso se deve aos solos pouco espessos, concentração de fluxo no epicarste (camada superior, muitas vezes, intensamente fraturada e carstificada) e ao tipo de recarga, principalmente a autogênica, em que os contaminantes podem facilmente atingir o lençol freático, transportados rapidamente por condutos por grandes distâncias. Ademais, os caminhos de fluxo em um aquífero cárstico podem ser conectados à água superficial. Assim, um contaminante em uma rede de condutos, além de alcançar maiores distâncias em menor tempo, é pouco degradado ou retido por capilaridade, como seria em aquíferos fissurais e granulares (RYAN; MEIMAN, 1996).

As subsidências são bastante comuns em regiões cársticas. Esses eventos podem ser naturais (por dissolução da rocha ou desmoronamento da parte superior da caverna), geralmente ocorrendo ao longo de um período geológico, ou serem induzidos ou acelerados por atividades humanas, o que pode gerar colapsos catastróficos (GALVÃO; HALIHAN; HIRATA, 2015). Os problemas geotécnicos induzidos, geralmente, são decorrentes de: a) retirada excessiva de água subterrânea; b) por atividades de construção; e c) uma combinação de ambos, onde a agricultura, mineração, rodovias e ferrovias, construções urbanas e industriais são potenciais influenciadores. No caso da exploração de aquífero cárstico urbano, os períodos de seca são os mais perigosos, pois ocorre o aumento da demanda por água subterrânea, o que leva à formação de cones de rebaixamento com dimensões quilométricas. No interior desses cones de depressão, poços, nascentes e riachos podem secar ou ter seus fluxos significativamente reduzidos, com a direção geral do fluxo de água sendo bem alterada (GALVÃO et al., 2017).

Essas características fazem que os aquíferos cársticos sejam extremamente heterogêneos e anisotrópicos, dificultando a descrição e a quantificação das características do fluxo subterrâneo. Vários métodos podem ser aplicados na caracterização hidrogeológica em carste, desde técnicas mais simples usadas em aquíferos granulares e fraturados (mapeamento de campo, fotointerpretação, bombeamento, geofísica, etc.), até abordagens mais modernas, como isótopos e modelagem numérica. Outros métodos complementares podem ser utilizados, como: uso de traçadores fluorescentes, hidrogramas e quimiogramas de nascentes cársticas, filmagem de poços para tipificar zonas cársticas, bombeamentos (nesse caso, de longa duração), mapeamento espeleológico, etc.

Apesar da complexidade em explorar e explotar os aquíferos cársticos, é justamente pelo desafio em entender as suas peculiaridades que, a cada ano, o interesse de profissionais de diversas áreas cresce progressivamente, o que torna, atualmente, essa área da Hidrogeologia a que mais apresenta novidades técnicas e conceituais.



Figura 14 – Processo inicial de carstificação em rocha calcária em alargamento nos planos de acamamento da rocha (descontinuidades), por onde o fluxo de água acidificada circulou

Foto de Paulo Galvão.



Figura 15 – Entrada de caverna em Pains/MG, indicando o nível d’água na porção mais profunda. Um exemplo de conexão entre águas subterrâneas e superficiais

Foto de Paulo Galvão.

Classificação dos aquíferos, conforme a pressão de armazenamento da água

Os aquíferos também podem ser classificados em relação à pressão de armazenamento da água em seu interior, como: *a) livres*; e *b) confinados* (Figura 16), embora existam condições intermediárias entre esses dois tipos, como os aquíferos *semiconfinados*, *cobertos* ou *suspensos*. Nos aquíferos *livres*, o limite superior é constituído pelo nível d’água, que corres-

ponde ao topo da zona saturada (superfície freática), em equilíbrio e sob as mesmas condições de pressão atmosférica. Já os aquíferos *confinados* são delimitados na base e no topo por unidades não aquíferas (aquicludes) ou por rochas parcialmente impermeáveis (aquitardes), onde a água está armazenada sob pressão. A situação intermediária são os aquíferos *semiconfinados*, onde as camadas que os limitam têm permeabilidade baixa, condicionando que a água os atravesse, porém, de forma lenta.

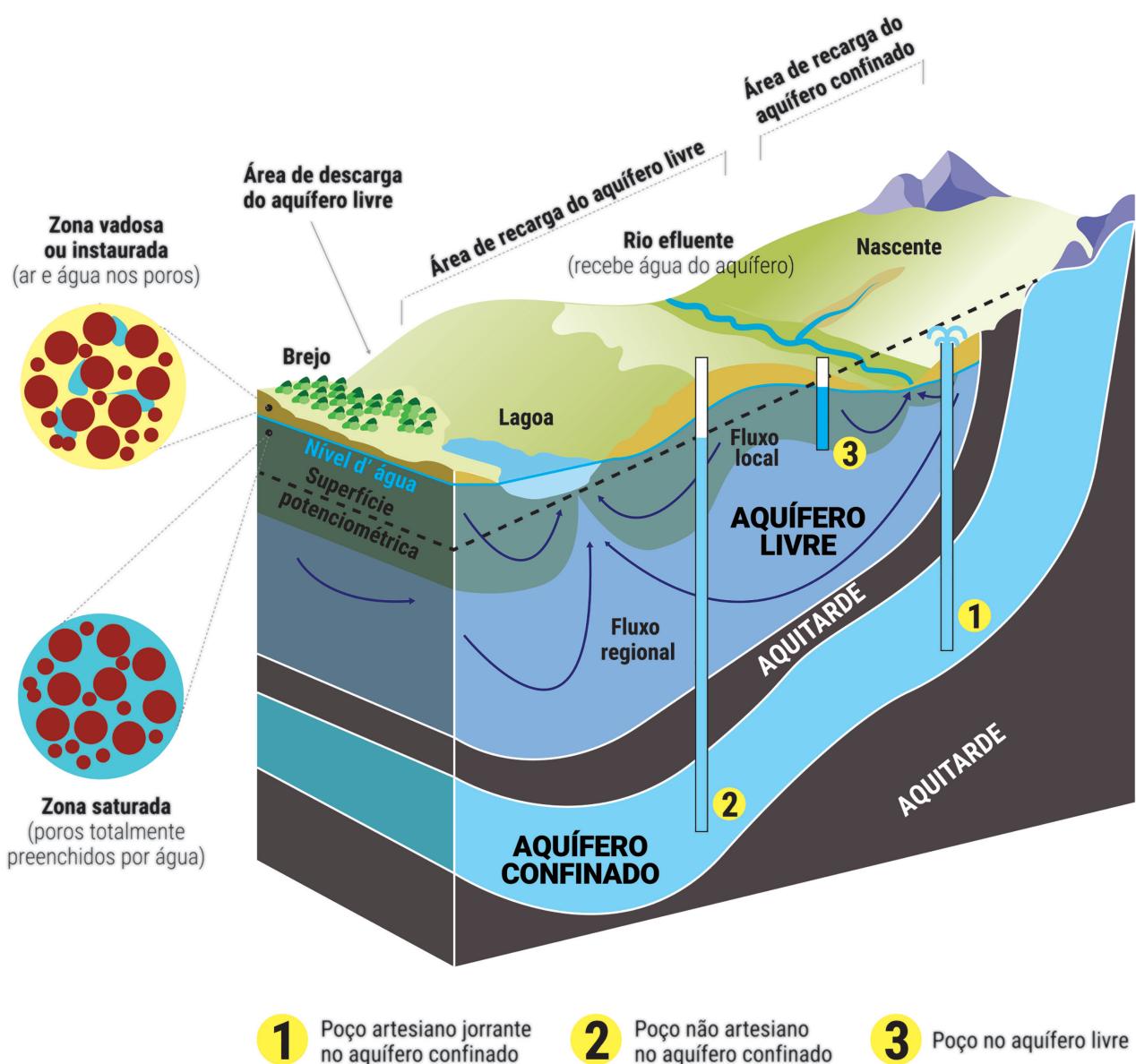


Figura 16 – Funcionamento de um aquífero

Fonte: Cabral (2008), adaptado por Dora Atman.

A água nos aquíferos *confinados* ou *semiconfinados* se encontra submetida à pressão maior do que a atmosférica. Por isso, quando o aquífero é perfurado pelo poço, a água ascende e alcança posições de equilíbrio piezométrico acima do topo da camada aquífera (reservatório) (Figura 16). Em alguns casos, dependendo da superfície topográfica e da pressão do aquífero, essa água pode subir acima da superfície, formando os poços artesianos (jorrantes).

As águas subterrâneas fluem lentamente em direção às áreas mais baixas quando percolam pela zona vadosa (Figura 16). Enquanto o fluxo de água superficial se desloca por quilômetros em poucos dias, o fluxo subterrâneo avança por milímetros ou centímetros por dia. O movimento das águas subterrâneas se dá por meio do preenchimento dos espaços vazios e conectados das rochas e do lento deslocamento na zona saturada. Essa diferença de velocidade de fluxo permite que as águas que infiltraram

há dezenas, centenas ou até mesmo milhares de anos ainda estejam em movimento no ambiente subterrâneo. Quando comparado aos rios, o aquífero se destaca pelo seu armazenamento ao invés da alta produção.

Os volumes armazenados nos aquíferos livres flutuam sazonalmente ou ao longo de ciclos plurianuais, demonstrando que parte das chuvas incidentes e infiltradas na superfície chegam até o aquífero (recarga) e saem dele (descarga) ao longo do tempo. Devido à sua dimensão e dinâmica de recarga, mesmo aquíferos pequenos podem ter águas armazena por décadas e até milhares de anos.

As flutuações do volume armazenado nos aquíferos configuram um equilíbrio dinâmico sustentado pelas variações da precipitação ao longo das sazonais climáticas e pelas mudanças internas nas taxas de recarga e descarga decorrentes das variações do gradiente hidráulico. Quando o nível d'água do aquífero se eleva ao longo do tempo, pelo aumento da recarga, existe a tendência natural de aumentar as taxas de saída de água por um incremento na descarga – por exemplo, através do aumento da vazão do fluxo subterrâneo que chega aos rios. Quando, porém, o nível d'água do aquífero diminui devido à redução da recarga, existe uma tendência de redução nas taxas de descarga. Assim, ao longo do tempo geológico, o aquífero tende a um estado de equilíbrio dinâmico, em que as taxas de descarga do *amanhã* serão proporcionadas pelas taxas de recarga *de hoje*.

A exploração por meio de poços é uma descarga imposta a um sistema que estava previamente em equilíbrio dinâmico. A intensidade do bombeamento e o tempo de exploração, aliados ao tamanho e às características hidráulicas do aquífero definirão as consequências dessa interferência nas taxas de recarga, descarga e armazenamento.

2.3 AS INTERAÇÕES DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS METEÓRICAS, SUPERFICIAIS, SUBTERRÂNEAS E COSTEIRAS

A adoção da bacia hidrográfica como a unidade de gestão das águas, transforma esse espaço na referência

para a análise das interações entre águas meteóricas, subterrâneas, superficiais e costeiras. A bacia hidrográfica é composta por um arcabouço geológico que fornece os elementos iniciais à sua análise, bem como influencia diretamente na disponibilidade hídrica. Esse arcabouço geológico é aqui entendido como um mosaico e/ou sucessão de rochas e material inconsolidado que conforma o assoalho e o subsolo de uma bacia hidrográfica, ao qual se associam formas de relevo e variações topográficas, resultantes da atuação, no tempo geológico, de dinâmicas internas (endógenas) e externas (exógenas).

O arcabouço geológico pode ser constituído por diversos tipos de rochas (ígneas, metamórficas ou sedimentares), com diferentes idades, composições e possibilidades de relação espacial (estratigrafia), bem como pela presença de estruturas geológicas (fraturas, falhas, dobrões, etc.). Pacotes rochosos mais antigos e profundos, em virtude de soerguimentos, associados ao intemperismo e à erosão, podem acabar aflorando ou serem soterrados por sequências sedimentares mais recentes, formadas nos mais diferentes ambientes geológicos. As rochas com ou sem cobertura, formadas por material inconsolidado e solos, possuem características de porosidade e permeabilidade (ou condutividade hidráulica) que podem facilitar ou impedir a percolação da água de chuva. O clima e suas variações ao longo do tempo geológico são igualmente determinantes na forma de ocorrência e dinâmica dos corpos hídricos subterrâneos, superficiais e costeiros. É ele quem controla as características do ciclo e dos balanços hidrológicos que se estabelecem em uma determinada bacia hidrográfica. Em uma bacia hidrográfica, portanto, o arcabouço geológico define a geometria dos aquíferos e suas relações com outros corpos de água superficiais (Figuras 16 e 17). As chuvas, por sua vez, influenciam na quantidade de água disponível a ser armazenada nos aquíferos.

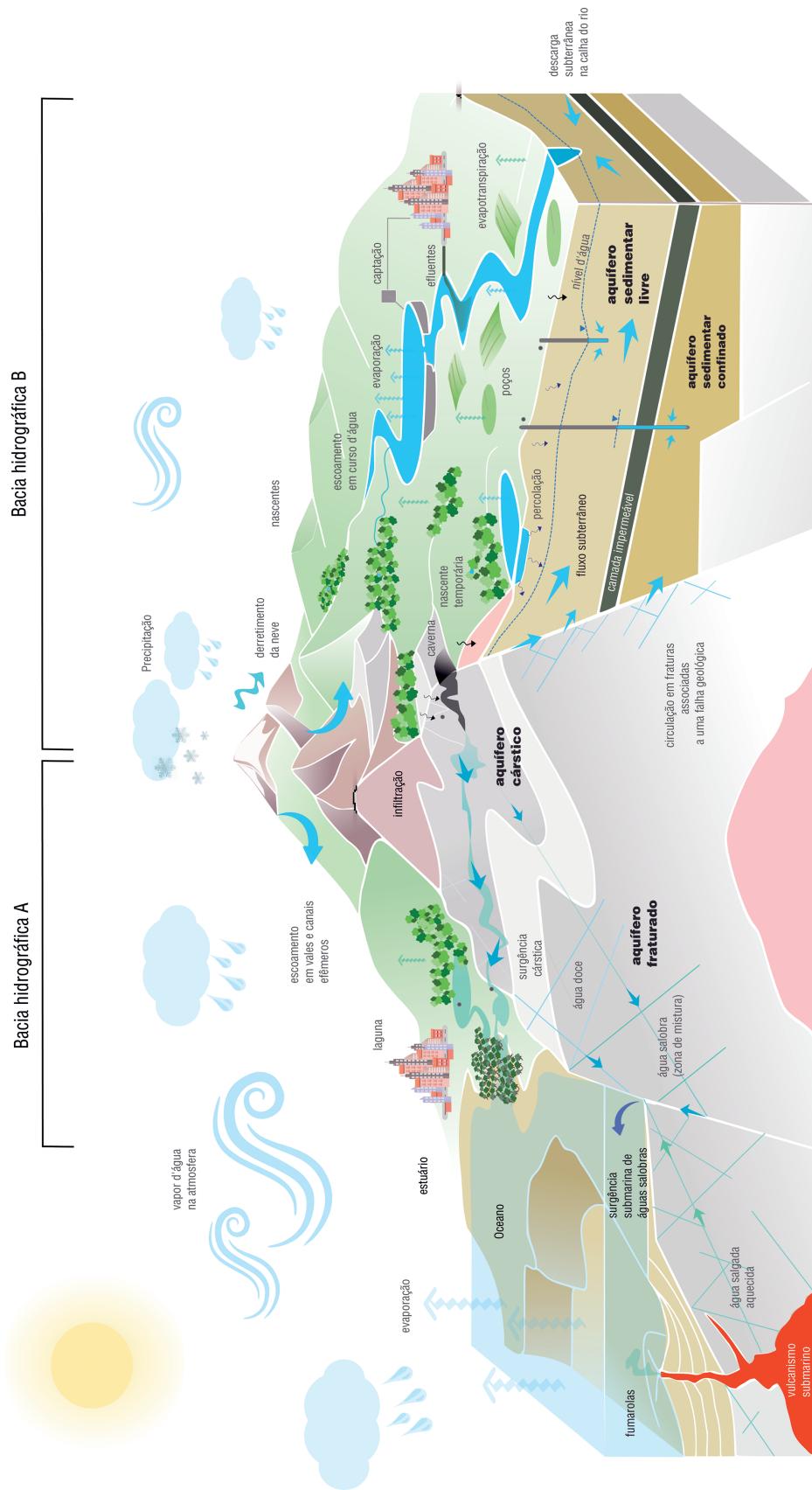


Figura 17 – O arcabouço geológico como elemento base de definição do território da bacia e do armazenamento de água

Elaborado e cedido por Dora Atman.

A interação entre o clima e o arcabouço geológico determinam a organização natural dos recursos hídricos no território (Figura 17). A chuva é o principal mecanismo de entrada de água na bacia. As rochas vão formar os diferentes tipos de aquífero e, em conjunto com a topografia serão determinantes para definir o comportamento das águas, as quais podem escoar superficialmente, infiltrar com o escoamento sub-superficial vertical e lateral ou, ainda, serem absorvidas pelas plantas e voltarem ao sistema por meio da evapotranspiração.

O escoamento sub-superficial vertical abastece o fluxo das águas subterrâneas, sendo que parte dessa corrente gera nascentes e aportes para o interior das drenagens de água superficial e ou costeira. Em outros casos pode ocorrer o contrário, e os corpos de água superficial geram as recargas para os aquíferos subjacentes. As interações entre as águas superficial e subterrânea acontecem tanto nas partes de montante como de jusante de uma bacia hidrográfica, a depender do arcabouço geológico, dos condicionantes de chuva e da topografia.

Nos terrenos cristalinos é comum as nascentes surgirem nas porções mais altas do relevo e irem formando pequenos cursos d'água, que vão se juntando a outros à medida que alcançam as porções mais baixas das drenagens, compondo córregos, riachos ou outros corpos d'água maiores. Dessa forma, constituem uma bacia hidrográfica, cujo padrão de drenagem, geralmente, é controlado pela estruturação das rochas do substrato geológico. Em toda essa trajetória ocorrem descargas subterrâneas para os cursos de água superficiais, que são responsáveis pela sua perenização. As bacias cujo arcabouço geológico é formado por rochas pouco permeáveis e com gradientes topográficos pronunciados apresentam grande parte do fluxo dependente do escoamento superficial. Apesar de as interações aquíferas com os cursos de água serem menores, devem ser consideradas na elaboração do balanço hídrico e dos planos de gestão, pois podem ter contribuições importantes. Por outro lado, em bacias hidrográficas que drenam terrenos sedimentares ou planícies aluvionares, as interações aquíferas são de alta relevância, pois os rios recebem grande volume de descargas subterrâneas, o que os torna perenes nos períodos de seca.

Entre a sua recarga e descarga, as águas subterrâneas se movem ao longo de vários caminhos, formando o que se denomina de *rede de fluxo*, cujas linhas podem conformar três situações: *local*, *intermediária* e *regional* (Figura 16) (TÓTH, 1963):

- *Linhas de fluxo local*: drenam para áreas de descarga relativamente próximas dos pontos onde ocorreram as recargas, normalmente apontando para corpos hídricos superficiais (rios e lagoas).
- *Linhas de fluxo intermediário*: apresentam um ou mais sistemas de fluxos locais entre sua área de recarga e descarga.
- *Linhas de fluxo de caráter regional*: são mais profundas no interior dos aquíferos e têm um trânsito de grandes distâncias com descargas para corpos hídricos superficiais, a saber: rios, grandes corpos lacustres ou mesmo oceanos.

Os fluxos de água subterrânea devem ser vistos tridimensionalmente, ou seja, pode haver fluxos subsuperficiais e locais sobrepondo-se a outros mais profundos, que definem os fluxos regionais. Assim, é possível que no mesmo aquífero existam fluxos locais, intermediários e regionais, sendo que a utilização desses termos depende da escala utilizada (Figura 16). Para quantificar a disponibilidade hídrica integrada da bacia é importante compreender a dinâmica desses fluxos e estimar as suas taxas de descarga.

Os sistemas aquíferos podem, inclusive, ser maiores do que as bacias hidrográficas. Suas áreas de recargas localizadas em uma bacia podem favorecer descargas em rios de outras bacias hidrográficas (Figuras 17 e 18). Por isso, um mesmo aquífero pode participar de fluxos de mais de uma bacia hidrográfica superficial (Figuras 17 e 18), bem como aportar água ao mar. Se a descarga ocorrer no mar, o fluxo de água doce proveniente do aquífero se contrapõe aos fluxos de água salgada, estabelecendo um limite dinâmico entre essas águas, que são separadas por uma zona de mistura.

Há uma conexão intrínseca entre as águas superficiais e subterrâneas, por isso a sua avaliação deve ser feita a partir de uma abordagem integrada e conjunta. A água de superfície pode se tornar água subterrânea

através da infiltração, enquanto as águas subterrâneas podem se tornar superficiais através da descarga dos aquíferos.

É necessário compreender, portanto, no espaço e no tempo, a forma como ocorrem essas relações de transferência que regulam os volumes e as flutuações da água disponível para os ecossistemas. Esse tema reforça a ideia das interações rio-aquífero, como ocorre no caso do Sistema Aquífero Urucuia e da Bacia do Rio São Francisco (ANA, 2017a) (Box 8). A extração da água subterrânea por meio de poços modifica a

condição hidráulica original do aquífero e da bacia, gerando impactos positivos e negativos. De forma geral, essa extração gera benefícios sociais pois aumenta a disponibilidade hídrica regional, permitindo o desenvolvimento e o abastecimento das comunidades que, muitas vezes, não têm outra fonte hídrica ou necessitam complementar a fonte superficial. A depender, porém, dos volumes retirados pode ocorrer superexplotação, o que reduz as descargas aquíferas aos corpos hídricos superficiais ou ao mar, culminando em efeitos ambientais e econômicos negativos.

Box 8 – Interações rio-aquífero: a importância do Sistema Aquífero Urucuia para a Bacia do Rio São Francisco

Didier Gastmans

Camila de Lima

As águas superficiais presentes nos diversos reservatórios continentais, como rios, lagos, reservatórios, áreas alagadas e estuários, etc., interagem com as águas subterrâneas armazenadas nos aquíferos. Essa interação se dá tanto pela perda de água dos corpos hídricos superficiais para os aquíferos, quanto pela descarga das águas subterrâneas, que alimentam os corpos hídricos superficiais, sendo fundamental ao equilíbrio hídrico dos reservatórios continentais (BRUNNER et al., 2017; WOESSNER, 2020). A compreensão dos processos que governam essas interações, bem como a sua quantificação, são assuntos que devem fazer parte da agenda de debates em torno do estabelecimento de políticas racionais de gestão de recursos hídricos, como forma de minimizar os efeitos causados pela escassez de água ou perda de qualidade dos corpos hídricos, superficiais e subterrâneos (MANZIONE, 2015; WOESSNER, 2020).

Normalmente, o controle na interação entre as águas subterrâneas e um curso d'água superficial depende da diferença de elevação dos níveis d'água no rio e no aquífero. Se a elevação do nível freático for maior que a elevação da água no rio, esse é denominado de **Rio Efluente** (Figura 18a e 18d), e inversamente, se a altura do nível freático for menor que a do rio, ele será um **Rio Influent** (Figura 18b e 18c). Para os **Rio Influentes** duas situações de conexão hidráulica são observadas na natureza: uma em que existe a conexão entre a superfície freática e o rio (Figura 18b), e a outra na qual o rio é desconectado dessa superfície, característica típica de **Rios Intermitentes** (Figura 18c) (HEALY, 2010; POETER et al., 2020; WINTER et al., 1999; WOESSNER, 2020).

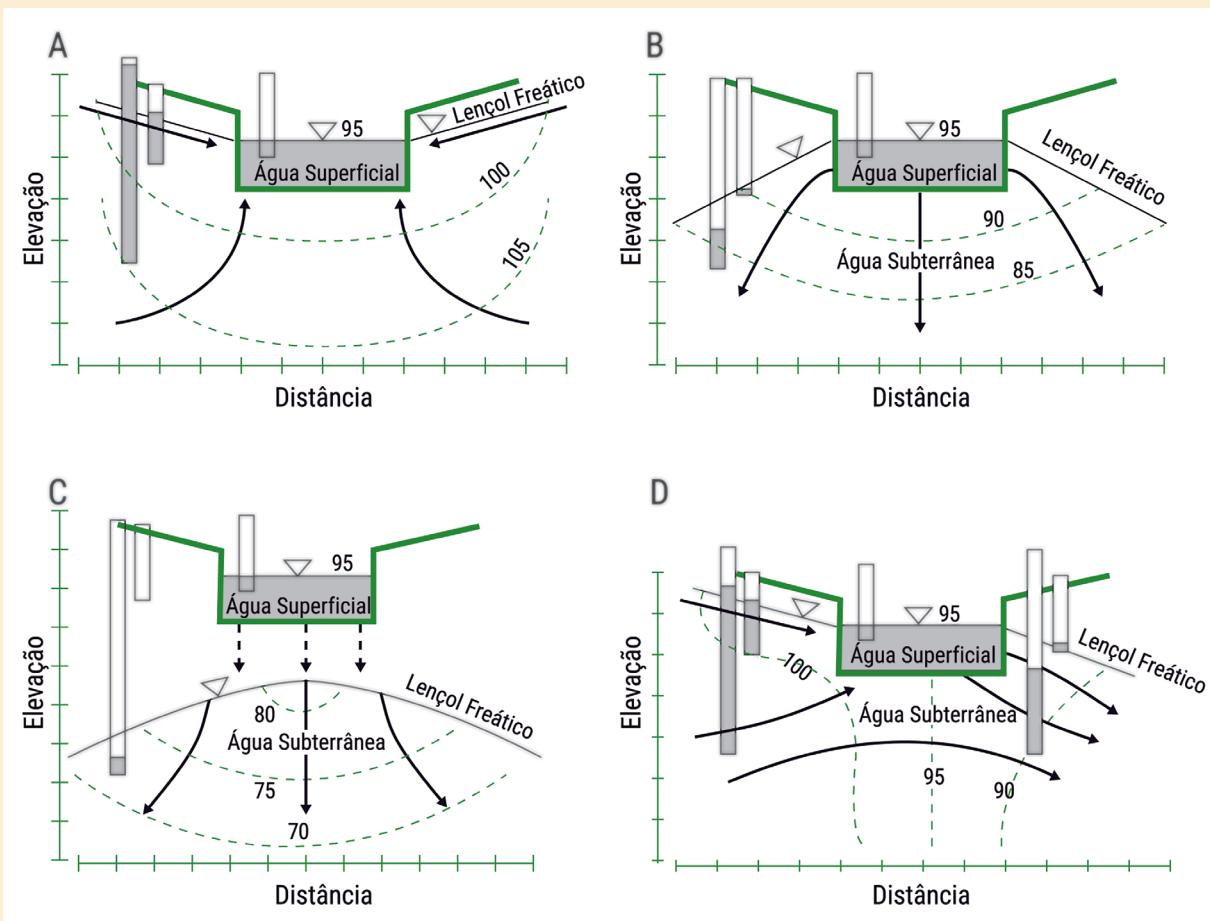


Figura 18 – (A) Modelo conceitual para rios efluentes; (B) Modelo conceitual para rios influentes, cenário em que a elevação do nível d'água que separa a zona saturada da não saturada está conectada com o rio; (C) Modelo conceitual para rios influentes, cenário em que a elevação do nível d'água que separa a zona saturada da não saturada está desconectado do rio; (D) Modelo conceitual de fluxo direto

Fonte: Woessner (2020), adaptado por Didier Gastmans e Camila de Lima.

Distintas áreas do conhecimento possuem interesse em conhecer e quantificar essas interações, que são importantes não apenas à Hidrologia, mas, também, à compreensão do funcionamento de sistemas ecológicos dependentes do ambiente aquático e à transferência de contaminantes. Devido à complexidade dessas interações, muitas vezes os estudos exigem instrumentação extensa e complexa, bem como visão interdisciplinar, de forma a promover uma avaliação de múltiplos parâmetros e a combinação de técnicas (WOESSNER, 2020; KALBUS; REINSTORF; SCHIRMER, 2006).

As conexões entre águas superficiais e subterrâneas no Brasil são importantes para diversas regiões hidrológicas, algumas delas extremamente sensíveis, como o Pantanal Matogrossense, ou as bacias hidrográficas de dimensão nacional. Esse é o caso da Bacia do Rio São Francisco, o maior curso d'água exclusivamente brasileiro, e que por meio de inúmeras obras de transposição pretende garantir a segurança hídrica a cerca de 12 milhões de pessoas, inclusive no Semiárido Nordestino, além da manutenção operacional das hidroelétricas e do crescimento populacional, estimado em até 20,5 milhões de habitantes para 2035 (CBHSF, 2016).

Na porção média da Bacia do rio São Francisco está localizado um dos principais aquíferos brasileiros – o **Sistema Aquífero Urucuia (SAU)** – que constitui um manancial estratégico de importância regional para o Nordeste brasileiro, tão atingido pela seca. Além de atender à crescente demanda de

água para o desenvolvimento econômico da região, esse aquífero contribui significativamente para o fluxo de base dos afluentes da margem esquerda do rio São Francisco, principalmente nos períodos de estiagem (Figura 19).

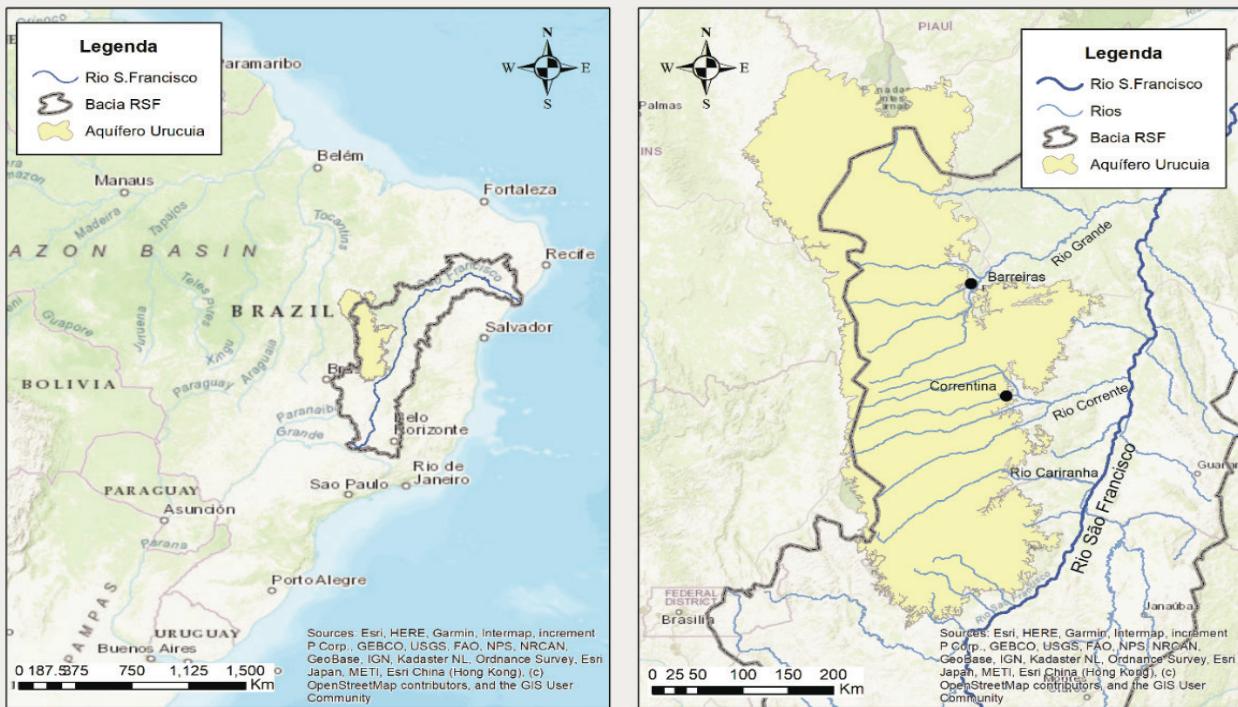


Figura 19 –A Bacia do rio São Francisco e o Sistema Aquífero Urucuia (esquerda), e as relações entre as redes de drenagem do SAU e o rio São Francisco (direita)

Fonte: Gonçalves, Engelbrecht e Chang (2016), adaptado por Didier Gastmans e Camila de Lima.

O SAU é um aquífero poroso, composto por arenitos flúvio-eólicos neocretáceos associados ao Grupo Urucuia, que ocupam uma área de 125.000 km². O aquífero constitui um extenso planalto na margem esquerda do rio São Francisco, com altitudes superiores a 900 m, que se inclina moderadamente para o leste, alcançando altitudes de aproximadamente 600 m.

Existem incertezas em relação à espessura total do pacote rochoso que forma o aquífero. Alguns autores, como Chang e Silva (2015) e ANA (2017a) estimam, a partir de dados geofísicos, que as espessuras preservadas não ultrapassam 400 m. São, entretanto, informadas espessuras superiores em poços estratigráficos perfurados na região pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) e pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (ANA, 2017a). As taxas de recarga do aquífero representam cerca de 18-20% das médias anuais de precipitação (GONÇALVES; ENGELBRECHT; CHANG, 2016), que são da ordem de 22,37 km³.ano⁻¹, e que se somam ao armazenamento da ordem de 1.327 km³ (ANA, 2017a). Tais volumes representam quase a metade de toda a disponibilidade hídrica subterrânea da Bacia do rio São Francisco (ANA, 2017a; CBHSF, 2016).

A abundância de água e as condições climáticas favoráveis na área de ocorrência do SAU fizeram com que florescesse no Oeste do estado da Bahia, a partir da década de 1980, uma importante atividade agrícola, que substituiu a vegetação nativa (Cerrado, em sua maioria) por extensas áreas de lavoura (BRANNSTROM et al., 2008). Além das alterações no uso e ocupação do solo, essa expansão agrícola exige intensa utilização dos recursos hídricos para irrigação de plantações e dessedentação animal.

A partir de alertas a respeito da diminuição nas vazões dos rios que cortam a região, a compreensão das relações entre o SAU e as águas superficiais passou à agenda dos estudos. Apesar de não haver uma conexão física entre o SAU e o rio São Francisco, suas águas se conectam por meio da descarga das águas subterrâneas na rede de cursos d'água que drena o platô (Figura 20), e são responsáveis por

aproximadamente 35% da vazão média total do rio São Francisco (CBHSF, 2016). Essas descargas são cruciais durante o período mais seco, quando as contribuições do SAU, na forma de descarga para os afluentes da margem esquerda do rio São Francisco, chegam a representar 80 a 90% do fluxo nesses rios, representando importante fonte de água para a manutenção das vazões nesse trecho do rio São Francisco, além de essencial à preservação da maioria das funções do ecossistema relacionadas às águas a jusante (GONÇALVES; ENGELBRECHT; CHANG, 2018).

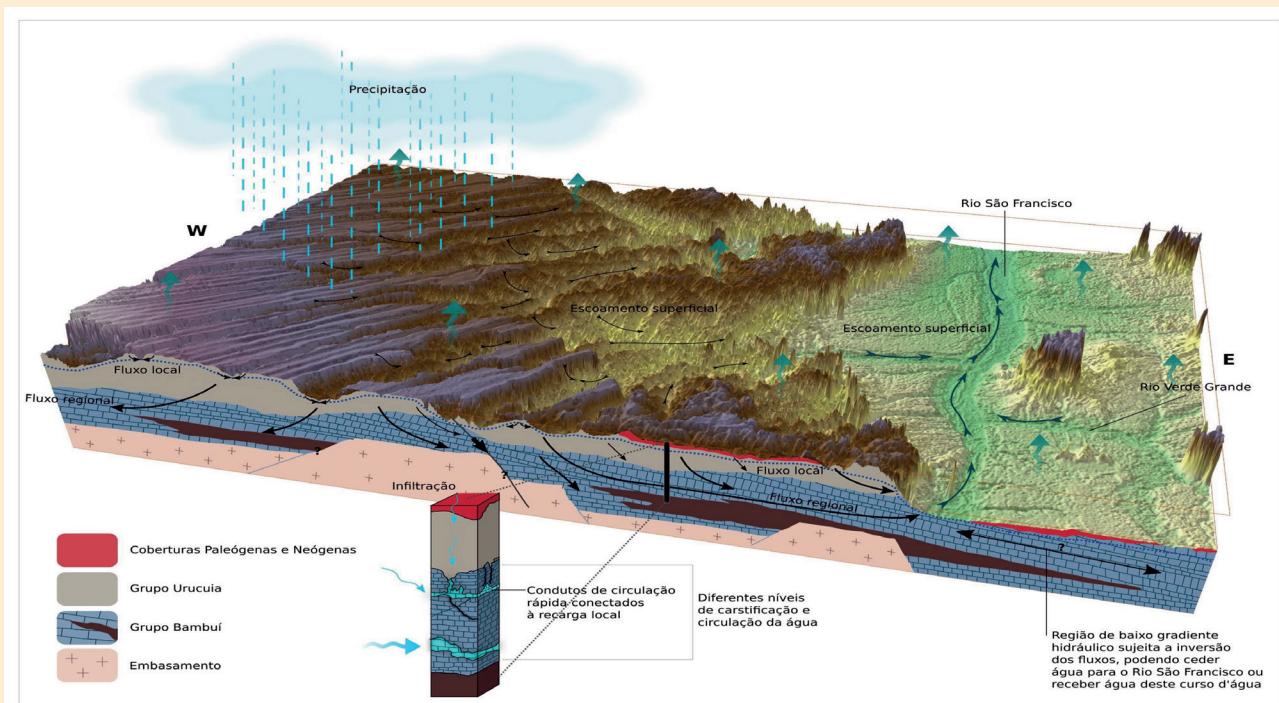
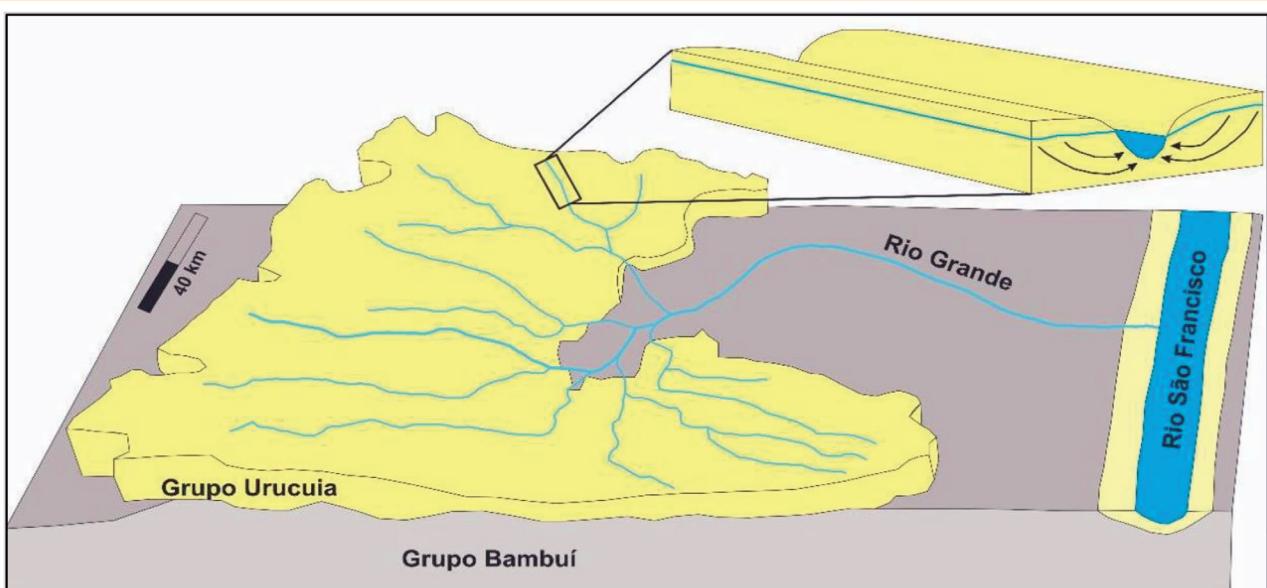


Figura 20 – Esquema de funcionamento hidráulico do SAU, a rede de drenagem do platô e a forma como essas águas alcançam o rio São Francisco

Fonte: Gonçalves, Engelbrecht e Chang (2016).

A intensificação regional do uso da terra, que leva ao aumento da área irrigada na região, aliada ao monitoramento quali-quantitativo, em construção e ampliação no SAU, limitam uma análise mais acurada da situação dos recursos hídricos e seus impactos sobre a resiliência hídrica da região, bem como o desenvolvimento de estratégias de gestão que combinem o planejamento do uso da terra à correta utilização dos recursos hídricos. O monitoramento integrado dos recursos hídricos na região vem sendo implementado por meio da instalação de poços de monitoramento pela Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS/SGB-CPRM), operada, nesse sistema aquífero pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), em parceria com a ANA. A ANA e a SGB-CPRM, inclusive, estabeleceram parceria na operação da rede integrada do Sistema Aquífero Urucuia. Assim, 63 poços da RIMAS, instalados nesse aquífero, já integram a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), consubstanciando-se na primeira região do país que contempla o monitoramento integrado (chuva-rio-aquífero). Ações de monitoramento levam tempo para permitir a compreensão das interações entre rios e aquíferos, mas são ferramenta básica à boa gestão dos recursos hídricos, que deve considerar, também, a participação de todos os atores envolvidos, inclusive os usuários da terra.

2.4 AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL

Ao contrário das águas superficiais, a determinação espacial da ocorrência das águas subterrâneas e dos aquíferos não é algo que possa ser constatado pela mera observação do território. Identificar a sua presença exige disponibilidade de dados, mapas e modelos que contemplam a interação rocha e água. A maioria dos cidadãos desconhece que vive em áreas com a presença de aquíferos, mesmo quando estas são abastecidas por fontes subterrâneas.

A invisibilidade das águas subterrâneas dificulta determinar a sua ocorrência, limites, movimento, quantidade e qualidade. Sua delimitação representa a projeção da forma como a água se organiza em um mosaico de rochas, cuja formação, transformação e configuração decorrem de diversos processos geológicos iniciados há milhões de anos. Esse processo exige a interpretação de dados, que são escassos, e de metodologias específicas, que apresentam limitações. Ressalta-se, ainda, que há pouco investimento em estudos hidrogeológicos no país. Somente a título de exemplo, o Fundo Estadual de Recursos Hídricos Paulista (FEHIDRO) investiu menos de 1% de sua verba em projetos destinados à solução de problemas que afetam as águas subterrâneas (ALBUQUERQUE FILHO, 2015). Esse desafio técnico e financeiro se soma ao social, que é difundir o conhecimento de forma a construir melhores políticas hídricas e estabelecer um vínculo entre sociedade e aquíferos.

A delimitação dos aquíferos e a análise das características e dos fluxos das águas subterrâneas estão intrinsecamente relacionadas à rocha. Por isso, a primeira ação para delimitar os aquíferos remete aos mapeamentos

geológicos. Normalmente, os aquíferos recebem o nome da formação geológica que os constitui, e que possui as melhores características aquíferas. No Brasil, alguns sistemas aquíferos receberam denominações desvinculadas ao nome das formações, como no caso do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Apesar de conhecido pelo potencial aquífero de suas formações Botucatu e Piramboia, foi renomeado como SAG para acomodar outras formações geológicas e prestar homenagem ao povo Guarani que habitava esse espaço. Outro exemplo é o Sistema Aquífero Amazonas.

A partir dos anos 1980 foram construídas as primeiras cartografias de identificação da interação rocha e água no território nacional: o *Mapa das Províncias Hidrogeológicas Brasileiras*, escala 1/2.500.000 (MENTE; PESSOA; LEAL, 1981) e escala 1/5.000.000 (DNPM/CPRM, 1983 apud DINIZ et al., 2014). Esses mapas buscaram aglutinar as regiões geológicas com “características gerais semelhantes quanto às principais ocorrências de águas subterrâneas.” (PESSOA; MENTE; LEAL, 1980, p. 461). O território foi dividido em 10 províncias hidrogeológicas (Escudo Setentrional, Amazonas, Escudo Central, Paranaíba, São Francisco, Escudo Oriental, Paraná, Escudo Meridional, Centro Oeste e Costeira) e 15 sub-províncias.

A representação dessas informações evoluiu com o avanço do conhecimento geológico. A partir da revisão do *Mapa Geológico do Brasil*, escala 1:1.000.000 (CPRM, 2004) foi elaborado *Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil*, escala 1:2.500.000 (CPRM, 2007). Os domínios hidrogeológicos são constituídos por um grupo de “unidades geológicas com afinidades hidrogeológicas”, que têm como base principal “as características litológicas das rochas.” (BOMFIM, 2010, p. 1). As 2.338 unidades litológicas foram agrupadas em sete

domínios (formações cenozóicas, bacias sedimentares, poroso/fissural, metassedimentos/metavulcânicas, vulcânicas, cristalino e carbonatos/metacarbonatos) e 30 subdomínios hidrogeológicos. A diferença entre esses produtos é que as províncias hidrogeológicas incorporam aspectos relacionados à tectônica, morfologia, fisiografia e litologia das rochas, enquanto os domínios focam na litologia (BOMFIM, 2010).

Em 2014, a partir de uma metodologia alinhada aos padrões internacionais de Cartografia Hidrogeológica, e com base em técnicas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o SGB-CPRM lançou o *Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo* (DINIZ, 2014, p. 20). Essa Cartografia incorporou amplo espectro de dados, tais como: capacidade de infiltração do solo, condutividade elétrica, domínios hidrolitológicos, relevo, hipsometria, pluviometria, densidade de poços e volumes anuais explotados. Outra característica importante dessa técnica é a promoção de informações de aquíferos confinados e não somente dos aflorantes. Nesse Mapa, as unidades hidrológicas foram reorganizadas em 202 unidades hidro-

estratigráficas ou aquíferas, das quais 164 são unidades aflorantes e 38 não aflorantes (DINIZ, 2014, p. 20).

Para visualizar esse mapa clique em:
<https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15556>.

Com base na sistematização realizada pela ANA (2013), foi gerado o *Mapa dos Sistemas Aquíferos Aflorantes do Brasil, em escala 1:1.000.000*. A ANA (2013) distribuiu o potencial brasileiro das águas subterrâneas em 181 aquíferos e sistemas aquíferos aflorantes (Figura 21), dos quais 151 são aquíferos sedimentares, considerados os mais produtivos, como é o caso do Guarani, Bauru-Caiuá, Barreiras, Urucuia/Areado, Solimões, Alter do Chão, Açu, Barreiras e Beberibe. O domínio cárstico é formado por 26 aquíferos, dentre os quais destacam-se o Bambuí e o Jandaíra. Já o domínio fraturado possui potencial hídrico reduzido e foi agrupado em quatro grandes blocos: Sistema Aquífero Fraturado Semiárido, Sistema Aquífero Fraturado Norte, Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul e o Aquífero Serra Geral (ANA, 2013, pp. 54-56).

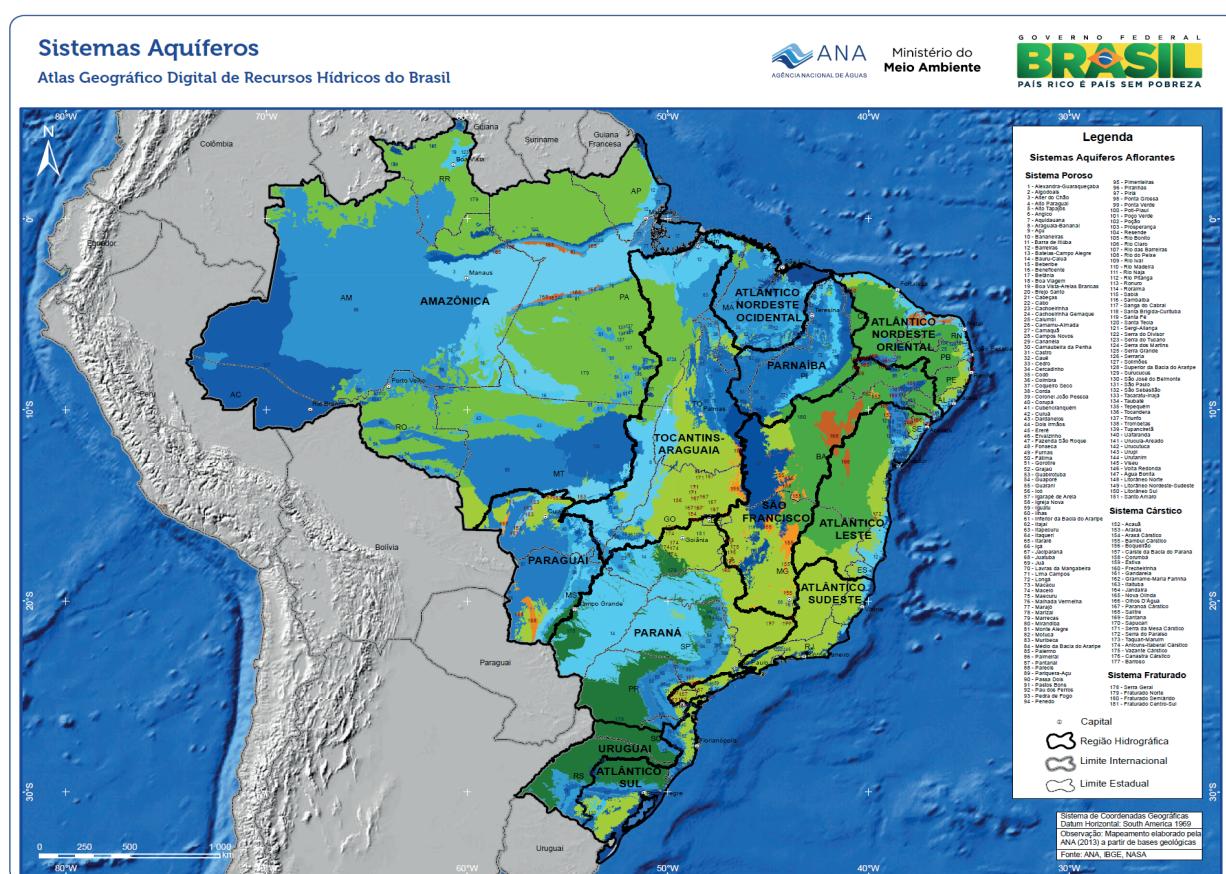


Figura 21 – Sistemas aquíferos brasileiros, segundo a ANA

Fonte: ANA (2013).

Boa parte do território brasileiro é servida por aquíferos, embora a produtividade dos poços em áreas fraturadas seja menor do que aquelas associadas às unidades sedimentares. Na Figura 22 são demonstrados os principais sistemas aquíferos brasileiros, os quais se encontram em bacias sedimentares e se destacam pelo uso e qualidade das águas.



Figura 22 – Os principais aquíferos brasileiros

Fonte: ANA (2007, p. 72).

A observação dos mapas permite compreender que a territorialidade dos aquíferos nem sempre corresponde à dos cursos d'água, das bacias hidrográficas ou das regiões hidrográficas. Os aquíferos, além de serem corpos tridimensionais também são unidades geológicas associadas às suas litologias. Assim, pode haver diferentes aquíferos sobrepostos, algumas vezes sem ou com pouca relação hidráulica entre si, como no caso dos sistemas aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani, que

têm características diferentes, mas possuem uma área de convergência territorial.

O Bauru é um aquífero sedimentar livre a semiconfinado que se sobrepõe às rochas da Formação Serra Geral. Já o Serra Geral é um aquífero fraturado quando aflora, porém quando coberto pelo Bauru-Caiuá, se configura como um aquiclude e, portanto, confina o Guarani. Em muitos casos é difícil limitar espacialmente o fluxo de

um aquífero ao outro, até porque uma mesma formação geológica pode apresentar características e comportamentos hidráulicos muito distintos. Assim, embora a estratigrafia e a classificação das unidades litológicas possam servir de base à definição de aquíferos (do ponto de vista hidroestratigráfico), eles devem ser avaliados de forma mais ampla (considerando as suas propriedades hidrogeológicas) e relacionados ao próprio ciclo hidrológico (áreas de recarga, descarga, por exemplo). Talmotivo faz com que alguns mapas hidrogeológicos tentem classificar as unidades pelo tipo de porosidade da rocha ou do sedimento (fraturado, poroso, granular ou cárstico), enquanto outros tentam caracterizar as unidades por sua produção (potencial hidrogeológico), sobretudo em representações cartográficas de caráter regional.

Esses mapas demonstram que os limites dos aquíferos ainda estão em processo de construção e, apesar de não convergirem com as bacias hidrográficas, há uma grande interação entre a água superficial e a subterrânea. Inclusive, em virtude dos fluxos locais, a maior taxa de recarga e descarga dos aquíferos costuma acontecer na bacia.

2.5 COMO E ONDE AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS SÃO USADAS NO PAÍS?

Estima-se que o Brasil possua 1,1 trilhão de m³/ano de reservas de águas subterrâneas (ANA, 2020, p. 8). A disponibilidade de águas, por sua vez, seria de aproximadamente 14.650 m³/s, contudo, a distribuição e a produtividade dos aquíferos ocorrem de forma desigual pelo território (ANA, 2020, p. 23).

No contexto global, o Brasil é o 9º maior usuário de águas subterrâneas (HIRATA *et al.*, 2019, p. 47). O número real de poços é desconhecido, apesar da obrigatoriedade da outorga de direito de uso ou o seu cadastro. Infelizmente, a esmagadora maioria dos usuários é irregular, impedindo que se estabeleça um perfil fidedigno dos usuários e das quantidades extraídas, ou da sua importância econômica.

O número de usuários de poços cresce a cada ano e, segundo estimativas da ANA (2021), existem cerca de 2,6 milhões de poços no Brasil. O Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), do SGB-CPRM, contudo, registrava, em março de 2022, apenas 348.283 poços. Por sua vez, a base de dados abastecida pelas Unidades Federativas registrava apenas 101.074 poços outorgados (ANA, 2020). Para Hirata *et al.* (2019), esses mais de 2,5 milhões de poços teriam uma capacidade de extração superior a 17.580 Mm³/ano (557 m³/s), o que corresponde ao volume necessário para abastecer toda a população brasileira no período de um ano (HIRATA *et al.*, 2019). Essa infraestrutura de poços tubulares representa um investimento aproximado de R\$ 75 bilhões em serviços de perfuração e complementação, além de equipamentos de bombeamento (HIRATA *et al.*, 2019).

As águas subterrâneas, portanto, são fundamentais para o abastecimento domiciliar e público, nos processos industriais, na prestação de diversos tipos de serviços e na atividade agropecuária.

Dentre as vantagens das águas subterrâneas em relação às superficiais, pode-se destacar:

- a boa qualidade natural das águas que, na maioria dos casos, demanda apenas cloração/fluoretação;
- menores custos relacionados à obtenção de água, extração, manutenção e operação da captação se comparados às fontes clássicas de sistemas de água superficial;
- a autonomia dos poços tubulares, que funcionam de forma automatizada, exigindo pouca manutenção;
- a exclusividade de se possuir uma fonte hídrica e seu controle de aproveitamento;
- o menor impacto ambiental da captação subterrânea. O poço tubular profundo é considerado de baixo impacto se comparado à captação superficial, que envolve estações de tratamento, adutoras e barramentos de água;
- a facilidade e rapidez da infraestrutura necessária para viabilizar a captação. O prazo de execução de um poço é de dias a semanas, por outro lado, barragens e estações de tratamento de água demandam anos;
- a implantação do sistema de extração de água subterrânea pode ser efetuada de maneira gradativa, racionalizando os investimentos em captação de água;
- não implica em desapropriação de grandes áreas, que representam vultosos gastos financeiros;

- a possibilidade de se organizar uma distribuição setorizada, com baterias de exploração, constituindo sistemas isolados ou interligados e, muitas vezes, próximos à demanda, reduzindo a construção de longas adutoras;
- menor susceptibilidade às condições climáticas, pois a capacidade de armazenamento dos aquíferos torna a vazão estável até nos períodos de estiagem.

A Figura 23 demonstra o perfil dos usuários com base nos dados do SIAGAS, segundo as seguintes classificações: agricultura e pecuária (poços dedicados à irrigação ou dessedentação de animais); abastecimento doméstico (residências urbanas); abastecimento público (prestado por concessionárias do serviço de água); industrial (poços que abastecem indústrias); uso múltiplo (poços que atendem a mais de um fim,

sendo este majoritariamente de prestação de serviços urbanos); e outros (poços para fins não listados nas outras categorias, como o lazer). Percebe-se que o abastecimento doméstico é o principal usuário (30%), seguido do uso agropecuário (24%), abastecimento público urbano (18%), abastecimento múltiplo (14%), abastecimento industrial (10%), e outros (4%) (HIRATA *et al.*, 2019).

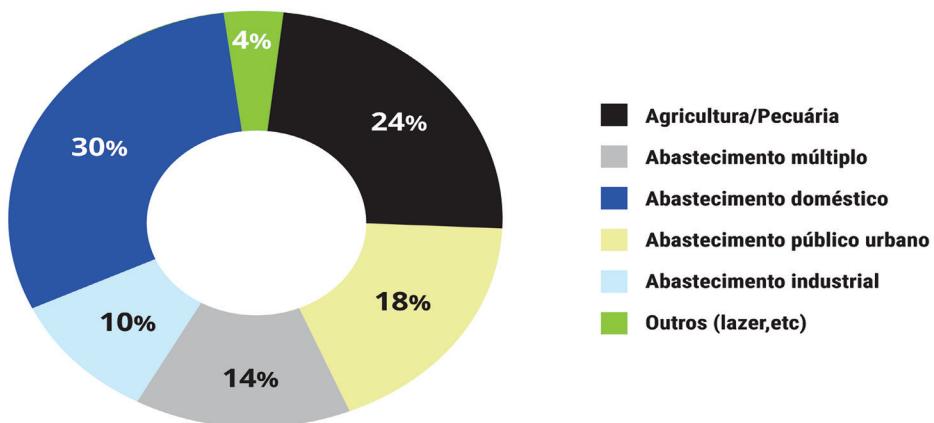


Figura 23 – Perfil dos usuários de águas subterrâneas no país

Fonte: Hirata *et al.* (2019, p. 15).

De acordo com dados de Hirata *et al.* (2019), do total da água subterrânea extraída no país ($557 \text{ m}^3/\text{s}$), apenas 10% ($53 \text{ m}^3/\text{s}$) atendem ao abastecimento público de cidades por intermédio de concessionárias e serviços municipais. Apesar dessas vazões serem reduzidas, esse recurso é imprescindível ao suprimento público de água em cidades de pequeno (< 10 mil pessoas) a médio

(< 100.000 pessoas) porte. Quase metade dos municípios com menos de 10 mil habitantes são totalmente dependentes das águas subterrâneas. Elas respondem como única fonte em 36% dos municípios brasileiros e de forma complementar (sistemas mistos) em 16%. Logo, 52% das sedes municipais dependem em algum grau desse recurso (Figura 24) (ANA, 2010).

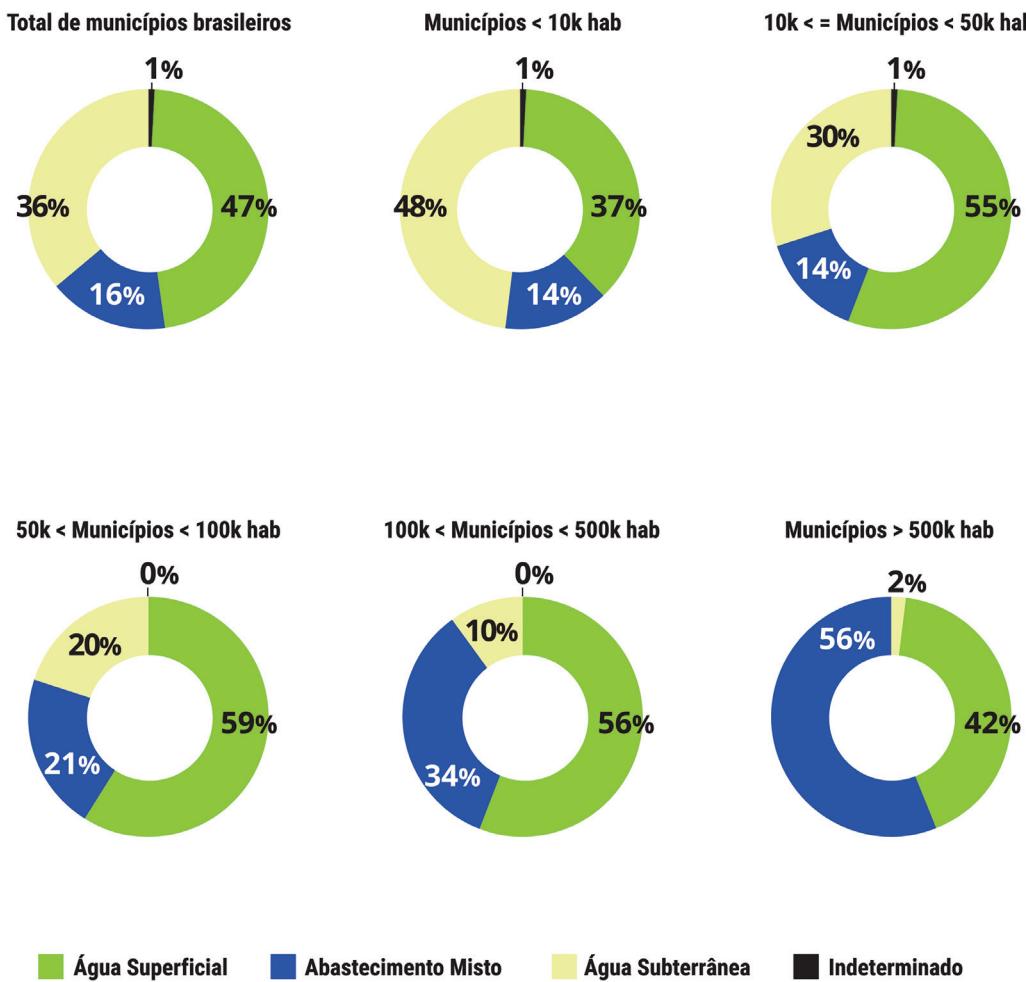


Figura 24 – Distribuição dos municípios brasileiros (total e por tamanho de população) de acordo com o tipo de fonte de abastecimento

Fonte: Hirata et al. (2019).

O novo Marco do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) tende a promover um aumento da demanda pública por água, haja vista que determina o atendimento de 99% da população com água potável até 2033 (art. 11-B da Lei nº 11.455/2007, incluído pela Lei nº 14.026/2020). As águas subterrâneas podem contribuir para alcançar esse objetivo. Elas já são usadas de forma intensa por importantes centros urbanos, como Mossoró (RN), Natal (RN), Maceió (AL), Recife (PE), Barreiras (BA) e Ribeirão Preto (SP), e são fonte alternativa em áreas que não possuem acesso à rede pública de água ou a possuem de forma precária.

As Figuras 25 A e B mostram os estados mais dependentes em relação ao uso desses recursos. Para o uso urbano, destacam-se os estados de São Paulo, Piauí, Ceará, Rio Grande do Sul, Bahia e Paraná, o que demonstra a sua importância para as Regiões Nordeste e Sul, bem como o uso intenso no estado de São Paulo. Já para o uso rural, o principal estado usuário é Minas Gerais, seguido de São Paulo, Bahia, Tocantins e Rio Grande do Sul (HIRATA et al., 2019). Apesar de o Nordeste não aparecer como grande usuário rural, essas águas são muito importantes para as populações do Semiárido, principalmente com o incentivo do uso de aquíferos salobros e tecnologias filtrantes, como ocorre no Programa Água Doce.

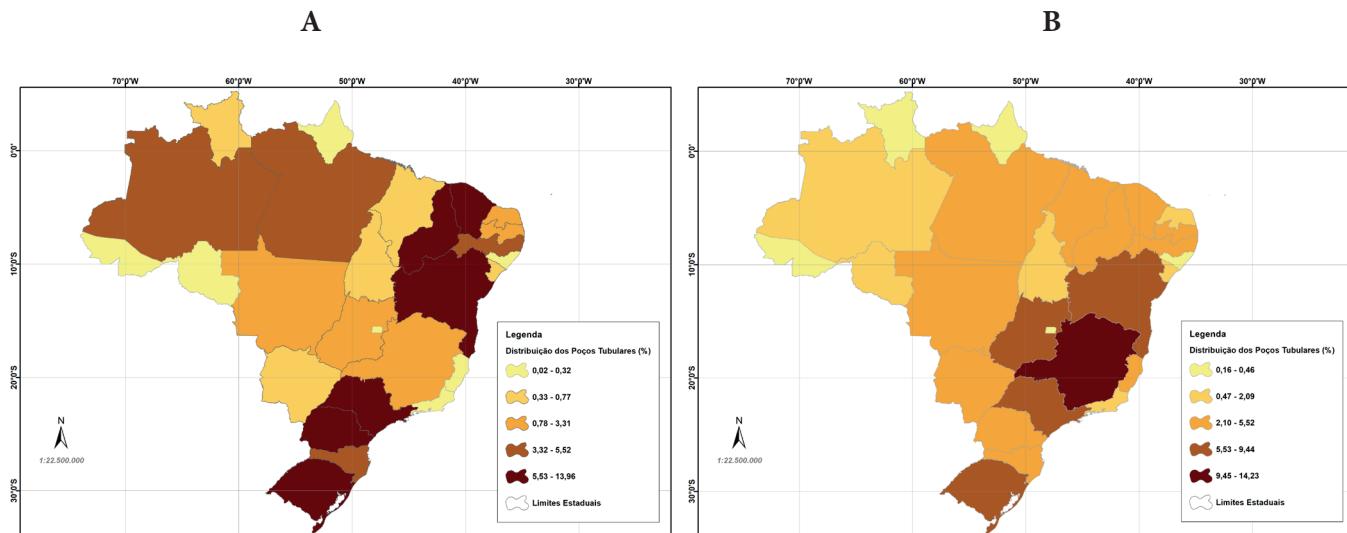


Figura 25 – Dependência dos estados brasileiros por água subterrânea, segundo a distribuição de poços tubulares (A: uso urbano; B: uso rural)

Fonte: Hirata et al. (2019, p. 17).

A água subterrânea tem uma importância ainda pouco reconhecida na área rural (ALY JÚNIOR, 2019). Essa fonte, contudo, é usada para o abastecimento das residências e empreendimentos rurais, irrigação e dessementação animal. Segundo o Censo Agropecuário do IBGE (2017), há aproximadamente três milhões de captações por poços escavados e nascentes, bem como 1,03 milhão de propriedades rurais dotadas com, pelo menos, um poço tubular. Apesar dos poços escavados e nascentes possuírem baixa vazão, eles são a principal fonte de água nas regiões periféricas das cidades que não possuem rede de água, nos povoados de montanhas e serras e nas pequenas propriedades rurais. Essa realidade deve se manter, pois a Lei nº 14.026/2020 não trouxe qualquer diretriz para a prestação de serviços públicos de saneamento no meio rural, que continuará a depender de sistemas alternativos de água, com alta dependência de poços e nascentes.

O uso dessas águas na irrigação também deve aumentar pois permite garantir um estoque perene de

água com boa qualidade, salvaguardando a produção agrícola da instabilidade crescente do regime climático (HIRATA; VARNIER, 1998). Esse uso já é importante, o que fica explícito ao se analisar os usos disponíveis nos bancos de dados oficiais. Em 2015, o maior número de outorgas válidas pertencia ao setor de abastecimento urbano e rural, seguido pela indústria (Figura 26 A) (ANA, 2016). Ao se analisar, contudo, as vazões médias captadas entre os usuários (relação de número de outorgas/vazão), percebe-se que o principal usuário foi a agricultura ($48,6 \text{ m}^3/\text{h}$), seguido da indústria ($20,86 \text{ m}^3/\text{h}$) e do abastecimento ($17,89 \text{ m}^3/\text{h}$) (Figura 26 B) (ANA, 2016). Ou seja, proporcionalmente, os usuários rurais utilizam maiores quantidades de águas subterrâneas que os outros setores. A irrigação intensa pode comprometer o fluxo de base de rios e prejudicar diversos serviços ecossistêmicos, o que demonstra a necessidade de promover estudos sobre esse tema, ainda pouco explorado pela literatura nacional (ALY JÚNIOR, 2019).

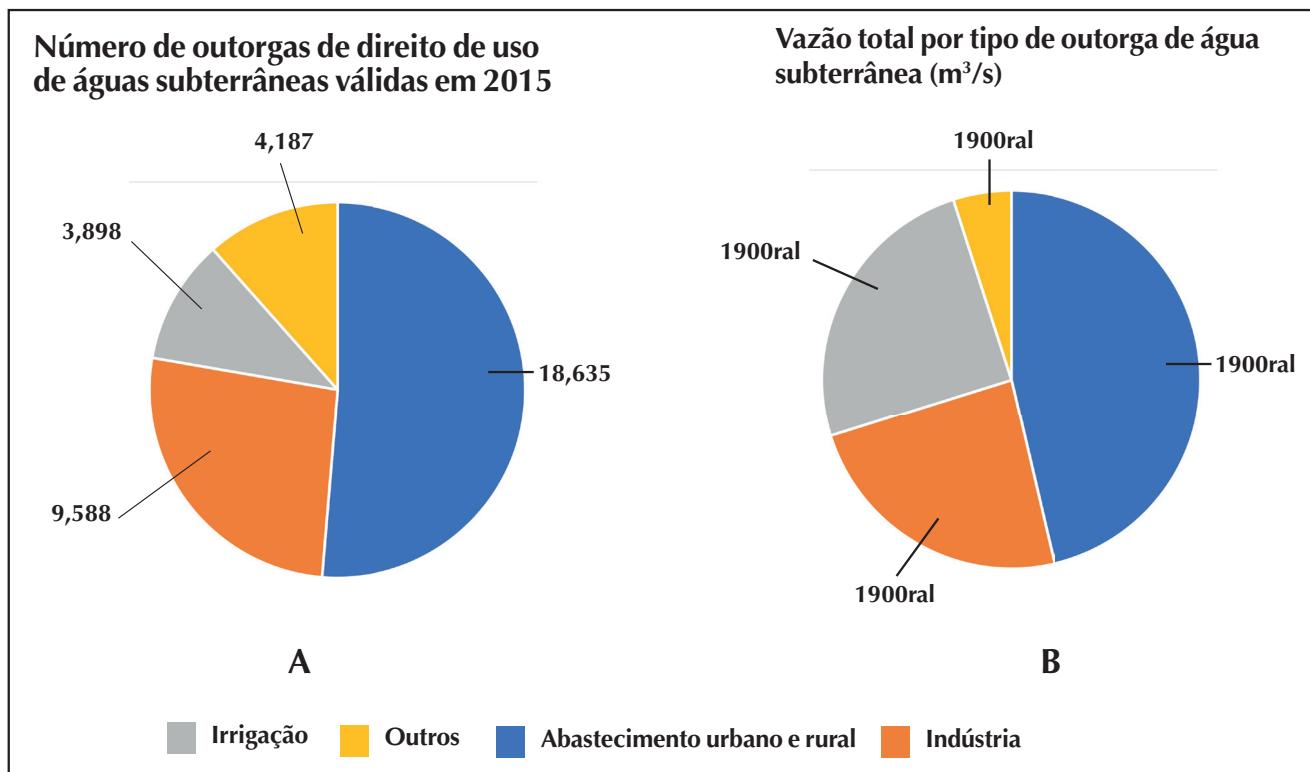


Figura 26 – (A) Número de outorgas de direito de uso das águas subterrâneas válidas; (B) Vazão total por tipo das outorgas de direito de uso das águas subterrâneas (m³/s) (2015)

Fonte: Hirata et al. (2019, p. 50).

As águas subterrâneas também são fundamentais à indústria. No conjunto de poços do Siagas esse setor representa apenas 10% dos usuários, porém, no âmbito dos usos outorgados constitui 25%, com vazão média levemente superior ao do abastecimento. Várias indústrias recorrem a essa fonte, mesmo em áreas dotadas de infraestrutura de rede de água, como forma de economizar e ter uma fonte própria do bem (HIRATA et al., 2019). Além disso, não se pode esquecer do seu uso pela indústria de bebidas e de águas minerais e potáveis de mesa.

O uso das águas subterrâneas tende a se intensificar devido ao aumento da demanda de água decorrente do crescimento do consumo, aumento da população, incremento das exportações de *comodities* agrícolas, degradação dos mananciais superficiais, aumento dos períodos de seca, da necessidade de cumprir a meta da universalização da água e dos problemas decorrentes das

mudanças climáticas globais, que tendem a afetar mais as águas superficiais (HIRATA; CONICELLI, 2012).

2.6 AS FUNÇÕES AMBIENTAIS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CICLO HIDROLÓGICO

As águas subterrâneas no ciclo hidrológico provêm diversos serviços ecossistêmicos, já que estão ligadas aos processos que regulam o volume, a distribuição e a qualidade da água disponível no Planeta. O conceito de serviços ecossistêmicos e sua relação com os aquíferos e águas subterrâneas são expostos no Box 9. A importância desses recursos vai muito além do suprimento de água para os seres humanos. Dentre as suas múltiplas funções ecossistêmicas destacam-se as seguintes: a) armazenamento, regularização e perenização do ciclo hidrológico no planeta; b) tratamento do sistema solo-aquífero e qualidade das águas subterrâneas; e c) manutenção da vida e de ecossistemas.

Box 9 – Serviços Ecossistêmicos (SE) de aquíferos e águas subterrâneas*Osvaldo Aly Júnior*

O termo *Serviços Ecossistêmicos* foi introduzido por Erlich e Erlich (1981), sendo adotado pela ecologia ecológica e ambiental a partir dos anos 1990 (GÓMEZ-BAGGETHUN et al., 2010). Os SE são definidos como bens e benefícios proporcionados gratuitamente pelos ecossistemas aos seres humanos, promovendo o seu bem-estar (BERGKAMP; CROSS, 2015). Sua origem se fundamenta nas diferentes funções de sistemas naturais que formam uma complexa relação de suporte à vida humana. Este conceito considera que existe uma correlação positiva entre o bem-estar humano e o bem-estar ambiental. Diversos estudos buscam identificar e quantificar monetariamente a sua importância e o seu papel.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) lançou o Relatório de Avaliação Ecossistêmica do Milênio (MEA, 2005) que considerou o “ecossistema (como) um complexo de comunidades vegetais, animais, microrganismos e seu respectivo meio que interagem como uma unidade funcional.” Os SE resultam das interações entre as diferentes funções dos ecossistemas e podem decorrer de uma ou mais funções, ademais uma função ecossistêmica pode gerar mais de um serviço ecossistêmico (CONSTANZA et al., 1997).

O MEA considera o ser humano aquele que integra e interage com os ecossistemas, interferindo direta e/ou indiretamente no seu funcionamento. O conceito de SE pode ser subdividido em quatro categorias: *i) regulação*, relacionado às características regulatórias dos ecossistemas; *ii) provisão*, relativo aos “produtos fornecidos, obtidos ou extraídos dos ecossistemas”, inclusive a água; *iii) suporte*, entendido como “serviços necessários para a produção dos demais serviços ecossistêmicos”; e *iv) cultural*, que compreende os “benefícios imateriais que as pessoas obtêm, incluindo a diversidade cultural, valores religiosos e espirituais, o conhecimento, valores educacionais e estéticos, etc.” (MEA, 2005).

As águas subterrâneas são indispensáveis à manutenção da boa saúde dos ecossistemas e da qualidade de vida humana. Além de constituírem fonte de abastecimento e insumo produtivo para indústria, serviços e agricultura, muitos SE possuem ligação direta com o armazenamento de águas subterrâneas, sua recarga e afloramento ou descarga. Essas águas permitem a estocagem da água da chuva e do degelo, além de cumprirem importante função ambiental ao prover o fluxo de base de rios, lagos e áreas úmidas, garantindo a integridade desses ecossistemas terrestres, aquáticos e estuarinos, principalmente nos períodos de seca. Essas águas ainda estão associadas à cultura e ao turismo e são reconhecidas por suas propriedades terapêuticas, medicinais ou mesmo de beleza cênica.

Dessa maneira, as águas subterrâneas garantem a estabilidade geológica, pois ao manterem a estrutura dos poros dos aquíferos, impedem a subsidência dos terrenos e dos ecossistemas das cavernas. Os aquíferos, por sua vez, sustentam parte da paisagem, da biodiversidade e das bacias hidrográficas, o que inclui as áreas ribeirinhas, ecossistemas terrestres e os topos das bacias hidrográficas. Além disso, em algumas regiões eles permitem a produção de energia geotermal. A Figura 27 sintetiza os principais SE prestados por essas águas (GRIEBLER; AVRAMOV, 2015).

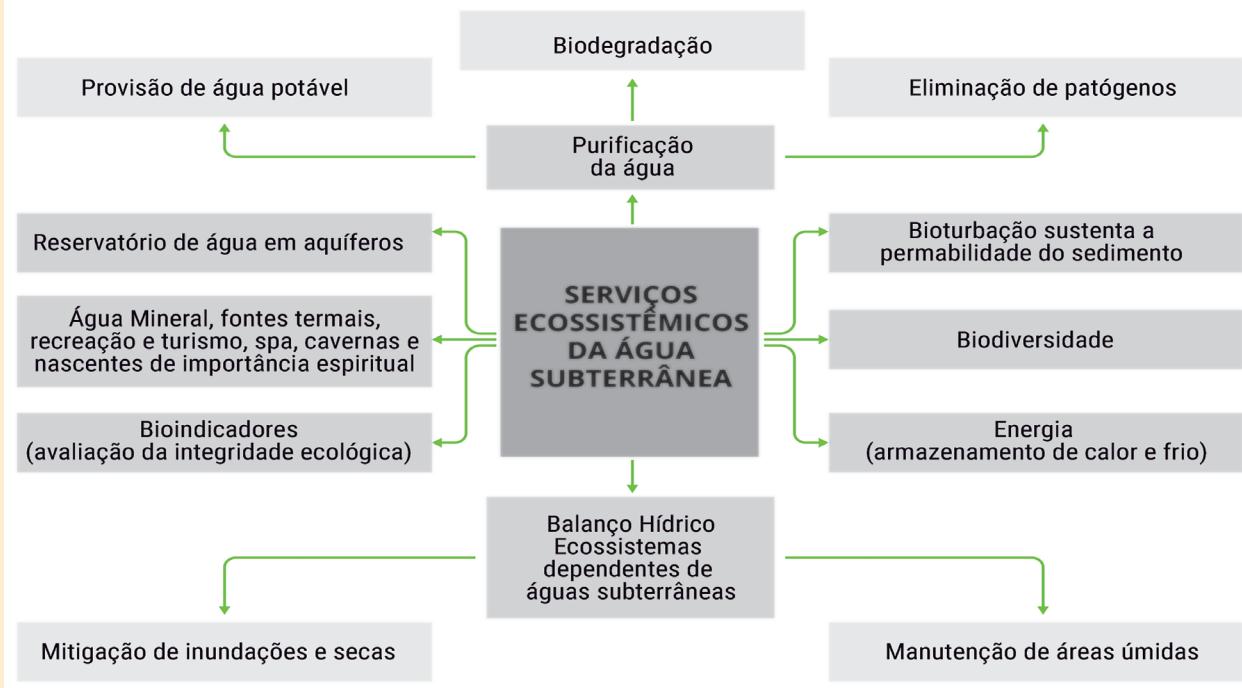


Figura 27 – Principais serviços ecossistêmicos prestados pelas águas subterrâneas

Fonte: Griebler e Avramov (2015, p. 356).

As águas subterrâneas sustentam SE imprescindíveis à vida e ao bem-estar da população e dos ecossistemas. Apesar disso, as atividades antrópicas têm gerado graves impactos (contaminação, superexploração, impermeabilização, alterações no regime do clima, etc.), que ameaçam a sua continuidade. Quanto mais complexas e tecnologicamente avançadas são as sociedades humanas, mais se desenvolve a noção irreal da sua independência em relação aos sistemas naturais. Atualmente, o consumo de SE está em escala não sustentável e interfere no funcionamento dos ecossistemas.

Os cenários estudados pela MEA (2005) revelam a necessidade de aprimorar as políticas públicas, as instituições e a forma de mitigar as consequências negativas da pressão sobre os ecossistemas. O Brasil deve estimar a importância dos SE prestados pelos aquíferos para os diferentes tipos de uso, bem como intensificar as ações para a sua conservação e uso sustentável, de forma a garantir que tais SE sejam mantidos.

2.6.1 Perenização e regularização do ciclo hidrológico no Planeta

As águas subterrâneas funcionam como reservas de água para os rios e lagos, já que estão continuamente contribuindo para a manutenção do fluxo superficial, que sustenta grande parte dos cursos d'água. As taxas de descarga dos aquíferos são mais regulares do que a distribuição da precipitação, o que garante um fluxo mínimo constante aos cursos d'água em superfície, dando estabilidade aos sistemas hídricos. Por isso, possuem função reguladora do ciclo hidrológico nas bacias hidrográficas e até em escala planetária. No Brasil, mais de 90% das bacias hidrográficas têm rios alimentados pela descarga de água subterrânea (ANA, 2017b, p. 37), a qual é a responsável pela sua perenização, mesmo naqueles locais onde há regimes climáticos com períodos secos. Esse serviço se estende aos lagos, pântanos e mangues. Apesar dessas características, é necessário avaliar a forma como as mudanças climáticas podem afetar esses recursos (Box 10).

2.6.2 Tratamento do sistema solo-aquífero e a excelente qualidade das águas subterrâneas

A água que percola até o aquífero passa por um processo semelhante ao de um filtro ao longo de sua trajetória subterrânea. Durante a infiltração e percolação nos solos, parte da água e das substâncias dissolvidas é absorvida pelas raízes das plantas e adsorvidas às partículas sólidas. A água, ao longo do ciclo hidrogeológico, ganha características químicas diferentes, que variam conforme a proporção e o tipo dos sólidos dissolvidos. As quantidades de elementos químicos nas águas subterrâneas dependem do clima nas áreas de recarga, das condições químicas da zona vadosa e da geologia do sistema de águas subterrâneas através do qual ela flui. A interação da água com as partículas dos solos e rochas, normalmente, permite seu enriquecimento em virtude da dissolução dos minerais. Esse processo tende a aumentar com o tempo de interação entre água-rocha e a reatividade do próprio material sólido. Em muitos casos, a trajetória até os pontos de descarga resulta em águas de excelente qualidade e ricas em sais minerais. Em outros, porém, a dissolução desses minerais pode gerar problemas de qualidade, incluindo anomalias naturais que podem comprometer a potabilidade da água.

2.6.3 Mantenedora da vida e de ecossistemas

O aporte de água dos aquíferos é fundamental à manutenção dos ecossistemas, sobretudo nas áreas em que há interação entre as águas subterrâneas e superficiais. As descargas de água subterrânea nos corpos hídricos superficiais contribuem para a manutenção dos fluxos hídricos superficiais, a regulação da temperatura da água, a troca de nutrientes e de outros parâmetros hidroquímicos, influenciando no equilíbrio das condições que permitem a vida das espécies animais e vegetais.

A água subterrânea não apresenta alterações bruscas de temperatura ou de suas qualidades físico-químicas, por isso, o influxo subterrâneo fornece um habitat estável para plantas aquáticas e animais. Além disso, a descarga dos aquíferos é imprescindível para manter lagoas costeiras e manguezais, pois permite diluir a salinidade das influências marinhas, distribuir nutrientes e regular condições físico-químicas.

Mesmo nos casos em que não há afloramentos, as águas subterrâneas são relevantes para os ecossistemas. Por exemplo, apesar da ausência de cursos d'água e nascentes, é comum encontrar vegetação exuberante nos fundos dos vales. Isso se explica porque o lençol freático em um vale está mais próximo da superfície e o nível d'água não oscila tanto. Na ausência das chuvas, o nível d'água nas partes mais elevadas reduz bastante, mas nos vales pode não haver variação, pois a água infiltrada em chuvas anteriores ainda está se deslocando vagarosamente em sua direção (POETER *et al.*, 2020). Desse modo, a vegetação tem acesso à água durante todo o ano.

Essas águas também sustentam extensos ecossistemas terrestres semiáridos e úmidos sem espelhos d'água, mas com vegetação de raízes profundas, que extraem umidade diretamente do lençol freático. No cerrado são encontradas diversas espécies que desenvolveram raízes profundas para absorver a água dos aquíferos. Há, também, toda uma flora e fauna associada às fontes hidrotermais, que são os locais onde as águas aquecidas e enriquecidas em minerais emergem de uma longa trajetória subterrânea.

Por fim, as águas subterrâneas contribuem para a estabilidade geológica, pois garantem a manutenção da estrutura dos poros das rochas, impedindo ou reduzindo o risco de subsidência dos terrenos ou dos ecossistemas de cavernas.

Box 10 – Mudanças climáticas e águas subterrâneas

Adivane Terezinha Costa

As Mudanças Climáticas Globais (MCG) referem-se a alterações significativas do ciclo hidrológico, do regime de chuvas, temperatura, evaporação e umidade em relação aos valores históricos de uma região (HIRATA et al. 2019). Essas mudanças estão associadas ao aquecimento que o Planeta vem experimentando como resultado das crescentes emissões de gases de efeito estufa, oriundas de atividades antrópicas, sobretudo nas últimas três décadas (IPCC, 2018). As alterações no ciclo hidrológico causadas pelas MCG interferem em todo o processo de recarga dos mananciais, sejam eles superficiais ou subterrâneos, e podem gerar impactos diretos nas águas subterrâneas, como a redução da recarga dos aquíferos, e indiretos, por meio da redução da oferta de água superficial, induzindo a uma maior exploração da água subterrânea (maior perfuração de poços), o que pode culminar na superexploração dos aquíferos, caso não haja um planejamento estratégico eficiente.

Smerdon (2017) apresenta uma sinopse de artigos publicados entre 2011 e 2016, onde faz várias menções sobre o estado das mudanças climáticas e das águas subterrâneas, considerando as previsões futuras das condições de recarga. Os estudos indicam que a incerteza de distribuição e a tendência na precipitação futura dos modelos climáticos mais utilizados, a exemplo dos Modelos de Circulação Geral (GCMs), resultam em previsões variadas de recarga. Os estudos de modelagem, muitas vezes, não são capazes de prever a magnitude e a direção (aumento ou diminuição) das condições futuras de recarga porque os próprios GCMs não concordam. Apesar disso, esses estudos indicam que as regiões mais sensíveis às mudanças climáticas serão as áreas de montanhas e zonas áridas, onde alterações sutis no tempo e na duração do clima sazonal poderão alterar significativamente os níveis de recargas.

O Brasil é vulnerável às mudanças climáticas atuais e mais ainda às que se projetam ao futuro, especialmente quanto aos extremos climáticos, com previsões de chuvas fortes e intensas durante o período úmido, e chuvas reduzidas e espacialmente irregulares nos períodos secos (HIRATA et al., 2019). Segundo Marengo (2008), as projeções do clima indicam que na Amazônia e no Nordeste a chuva pode sofrer uma redução de até 20% no final do século XXI, num cenário de altas emissões. Em decorrência, o Sul do Brasil terá um aumento extremo de chuvas.

Essas mudanças do clima podem funcionar como fonte adicional de pressão pela demanda de água de consumo e irrigação, o que impacta o setor socioeconômico. Nesse contexto, as cidades dependentes do recurso subterrâneo são mais resilientes à estiagem e têm mais condições de enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas globais (HIRATA et al., 2019), embora se ressalte o risco de superexploração.

Em regiões sujeitas a longos períodos secos, como o Semiárido brasileiro, a situação crítica de esvaziamento de açudes vem sendo contornada com a implementação de fornecimentos alternativos de águas, principalmente da subterrânea. Em resposta aos sete anos de seca, o estado do Ceará perfurou mais de três mil poços entre 2015 e 2018, exclusivamente para o abastecimento das populações das cidades e da zona rural (TEIXEIRA, 2018). As previsões para 2050, segundo os relatórios do IPCC e do Inpe (MARENKO, 2008), indicam que o Semiárido tende a se tornar mais árido com as mudanças climáticas, aumentando a frequência e a intensidade das secas e reduzindo a disponibilidade de recursos hídricos.

Vale ressaltar que no Brasil ainda são escassos os estudos de previsões referentes aos impactos de mudanças climáticas sobre águas subterrâneas, inclusive quanto à forma como elas afetarão a relação entre as águas superficiais e os aquíferos, que são hidráulicamente conectados (KUNDZEWICZ et al., 2007; PBMC, 2014).

De acordo com o relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2014), as perspectivas futuras com relação aos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos subterrâneos no Brasil indicam que o Nordeste poderá ter redução de 70% na recarga até 2050 (DÖLL; FLÖRKE, 2005; PBMC, 2014). No Sistema Aquífero Guarani, as previsões indicam que quase 70% dos cenários climáticos geraram variações dos níveis freáticos abaixo daqueles medidos no monitoramento entre 2004 e 2011 (MELO, 2013).

Estudos realizados apontam as mudanças climáticas como possíveis causas dos problemas relacionados à variabilidade, disponibilidade, quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Nesse contexto, projeta-se que as populações mais pobres são as mais vulneráveis, pois estão expostas à escassez hídrica.

Diante das incertezas futuras quanto à disponibilidade e demanda de água subterrânea e da possibilidade de eventos hidrológicos extremos mais frequentes e severos, cresce a importância de contar com capacidades técnicas que visam à elaboração de um mapa integrado de vulnerabilidade às mudanças climáticas, planejamento adequado e instrumentos de cooperação entre entidades de diferentes esferas e setores, além de ampla divulgação da temática para a sociedade.

2.7 AS AMEAÇAS AOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS BRASILEIROS

Os aquíferos, embora mais protegidos que os corpos hídricos superficiais, também estão sujeitos aos impactos decorrentes do uso excessivo de água e das atividades antrópicas, apresentando problemas ligados à quantidade, como superexplotação ou redução de recarga; e na qualidade, como a contaminação.

2.7.1 Superexplotação de aquíferos

A extração de água de um aquífero gera o seu rebaixamento e modificação no fluxo hidrodinâmico de recarga e descarga e, em alguns casos, modificações na geoquímica de suas águas. As consequências da superexplotação não são imediatamente perceptíveis, mas surgem no decorrer de um espaço de tempo, que varia conforme as dimensões do aquífero, a capacidade de armazenamento e o cenário de uso. O potencial de armazenamento dos aquíferos faz com que sejam possíveis longos períodos de extração de água subterrânea, mesmo em períodos de estiagem, sem gerar um quadro de superexplotação.

Alterações hidráulicas e químicas nos aquíferos demoram anos ou décadas para serem percebidas pelos usuários ou pelo Poder Público. Por essa razão, é necessário acompanhar essas extrações a fim de evitar que gerem externalidades, cuja recuperação pode ser complexa, onerosa e de demorada reversibilidade.

O rebaixamento do nível d'água do aquífero por si só não caracteriza um quadro de superexplotação, mas se materializa quando os impactos da extração causam prejuízos financeiros, ecológicos ou sociais que não podem ser compensados pelos benefícios da exploração. Esse termo comprehende vários fenômenos e impactos gerados pela extração ou por alterações na recarga, que reduzem a disponibilidade hídrica, prejudicando os usuários ou as funções ambientais e sociais das águas subterrâneas. Apesar de ser considerado impreciso pela comunidade científica, o termo *superexplotação* é amplamente utilizado pelos gestores em virtude de sua capacidade de transmitir à sociedade a ideia de que o aquífero está em risco (CUSTÓDIO; LLAMAS, 2001).

A superexplotação pode afetar parte de um aquífero ou todo o sistema. Esse fenômeno vai além de um problema entre balanço e retirada de água superior à recarga, pois compreende uma série de efeitos negativos. Em virtude da baixa velocidade do fluxo subterrâneo, a avaliação dos efeitos da superexplotação pode levaranos para se manifestar, apesar de suas causas terem ocorrido há muito tempo.

No caso dos aquíferos fósseis, ou seja, naqueles onde a restituição da água na porção explorada é superior a dezenas de milhares de anos, a superexplotação é inevitável, pois a perda do nível será determinada pelo ritmo da extração. Sendo assim, é necessário planejar o seu uso, ponderando se os ganhos socioeconômicos da água extraída compensam a exaustão do aquífero no longo prazo e sua perda para as gerações futuras (FOSTER *et al.*, 2002).

Se a superexplotação é um problema, o abandono de poços e sua exploração também pode gerar impactos negativos relacionados à ascensão do nível freático. Quando se diminui a exploração de um aquífero, os níveis de água recuperam a situação original ou até o ultrapassam, pois as cidades podem aumentar os níveis de recarga devido a perdas de água da rede de água e esgoto. Muitos prédios, canais, túneis, galerias e rede de metrô têm estruturas subterrâneas que foram construídas quando aquelas porções eram secas (zona não saturada), exigindo que a água fosse drenada. Se as fundações de edificações foram construídas em terreno seco, a retomada do nível freático causa a sua movimentação vertical, o que pode impactar a estabilidade estrutural. O reestabelecimento dessa condição natural acaba gerando uma série de prejuízos que recairão sobre os proprietários do bem ou infraestrutura.

Ao contrário das águas superficiais, não é possível visualizar diretamente os processos que ocorrem no interior do aquífero. Dessa forma, o desafio de sua gestão é mensurar e estabelecer quando a sua exploração for considerada danosa o suficiente para enquadrá-lo nessa situação. De forma geral, a superexplotação é entendida como as alterações do ciclo hidrológico que causem um ou mais dos seguintes impactos:

- a) **redução dos níveis dos aquíferos pela extração das águas.** A retirada de águas pode exaurir o aquífero, ou seja, criar uma redução tão pronunciada dos níveis potenciométricos que não permita mais o seu aproveitamento, quer pelo excessivo desnível hidráulico (altura manométrica) a servido pelas bombas de poços, quer pela reduzida espessura saturada do aquífero, o que impede o seu bombeamento, ou mesmo pela eliminação de fontes e surgências naturais;
- b) **redução na contribuição hídrica dos fluxos de base em corpos de água superficial.** A diminuição dos aportes de água prejudica a disponibilidade de água superficial e os ecossistemas dependentes, como rios, lagos, pântanos, brejos e mangues;
- c) **incremento dos custos da exploração das águas devido ao rebaixamento dos níveis dinâmicos dos poços e/ou à readequação de obras de captação.** Neste caso, a origem pode ser: a) o desbalanço entre a recarga do aquífero e a sua extração a longo prazo (décadas); ou b) as interferências entre poços, cuja proximidade causa interferências hidráulicas e fortes rebatimentos. Os custos da extração estão mais associados ao bombeamento, que requer energia para trazer a água do aquífero à superfície, do que a obra em si. Apesar disso, o desenho de um poço deve ser compatível com as vazões a serem explotadas, portanto, reduções do nível de água podem tornar as captações inadequadas para tal propósito. Se os custos da extração se sobreponem aos níveis economicamente aceitáveis para uma dada situação, considera-se que o aquífero está superexplotado;
- d) **perda de poços com menor profundidade ou nascentes impedindo o acesso equitativo à água.** O aproveitamento das águas subterrâneas por meio de poços escavados ou mesmo tubulares de pouca profundidade por populações pobres e socialmente vulneráveis é prática comum em áreas rurais ou regiões periurbanas. Em muitos casos, eles constituem a única fonte de água disponível para garantir a segurança hídrica e alimentar dessas populações. A depender da hidráulica do aquífero, a instalação de poços profundos de alta produção pode causar o rebaixamento do nível de água e secar os poços mais rasos e nascentes. Na maioria dos casos, o poço mais profundo é legalizado, ao contrário dos outros usuários de poços, entretanto, esse uso pode gerar um problema de inequidade social e ferir o princípio dos usos múltiplos da água. É comum os proprietários dos poços que secaram não fazerem a correlação da perda do poço com a superexploração do aquífero;
- e) **subsidiência de terrenos.** O aproveitamento de alguns aquíferos, como os associados aos sistemas cársticos ou sedimentares, pode criar abatimentos do terreno e impactar obras civis, causando prejuízos sociais e econômicos, como o colapso de edificações e modificações de fluxos de água urbanas;
- f) **infiltração de águas contaminadas ou salinas no aquífero em virtude do bombeamento excessivo ou redução da recarga.** As extrações de água de um aquífero ou mesmo a ocupação humana na superfície alteram o ciclo hidrológico, modificando as taxas de recarga e as direções do fluxo subterrâneo. Em alguns casos, essas alterações podem trazer águas de baixa qualidade para áreas de uso do aquífero. Por exemplo, o bombeamento de poços induz que águas contaminadas de aquíferos freáticos ou rios adentrem o aquífero. A contaminação pela indução de águas de baixa qualidade por meio do bombeamento deve ser enfrentada com o controle da operação e exploração de poços; e
- g) **intrusão salina em aquíferos costeiros.** Nos aquíferos costeiros, em situação de equilíbrio, existe um gradiente hidráulico condicionando um fluxo de água doce do continente para o oceano. Esse fluxo pode se inverter devido às características de variações da maré e do clima, por exemplo, misturando as águas doces e salgadas. Essa mistura de águas é condicionada pela dispersão hidrodinâmica, sendo que a água doce, menos densa, tende a fluir mais próxima à superfície, enquanto a água salgada, mais densa, avança em direção ao aquífero, formando uma cunha salina (FEITOSA *et al.*, 2008). A extração excessiva dos aquíferos costeiros permite o avanço da cunha salina para o continente, pois o bombeamento inverte as direções de fluxo dessas águas, causando desequilíbrio hidrodinâmico do sistema e o comprometimento da qualidade das águas do aquífero. Esse processo é detalhado no Box 11.

Box 11 – Intrusão salina em aquíferos costeiros

Roberto Eduardo Kirchheim

As excessivas extrações de águas subterrâneas em áreas costeiras, próximas à linha da costa, podem promover a diminuição das descargas de água doce nos ecossistemas litorâneos e o avanço de intrusões salinas (na forma de cunhas) para o interior dos aquíferos. A existência da descarga de água doce em direção ao mar é o que limita o avanço dessas intrusões continentais.

A intrusão salina é definida como o movimento de água salgada para o interior dos aquíferos saturados de água doce. Esse cenário é reportado em várias regiões costeiras, sendo objeto de estudos em todo o mundo ao longo dos últimos 50 anos. Trata-se de uma situação de complexa e dispendiosa reversibilidade que, inevitavelmente, leva ao abandono da infraestrutura de extração. A água salgada possui altas concentrações de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e constituintes inorgânicos, o que a torna imprópria ao consumo humano e outros usos antrópicos.

Em condições naturais do aquífero costeiro, observa-se um equilíbrio hidrodinâmico entre as águas doces que se justapõem sobre as águas salgadas e densas. De forma muito simplificada, a espessura da coluna de água doce acima da interface da água salgada pode ser estimada em função da razão entre as respectivas densidades (relação de Ghyben e Herzberg) (KRESIC, 2006) (Figura 28). Esta expressão pode ser sintetizada pela igualdade ($z=40h$), ou seja, para cada 1 m de coluna de água doce acima do nível do mar existem outros 40 m de coluna de água entre o nível do mar e a interface com a água salgada. Se a altura (h) diminuir, torna-se evidente que a linha que limita essa interface acaba ascendendo, de forma a manter esse equilíbrio.

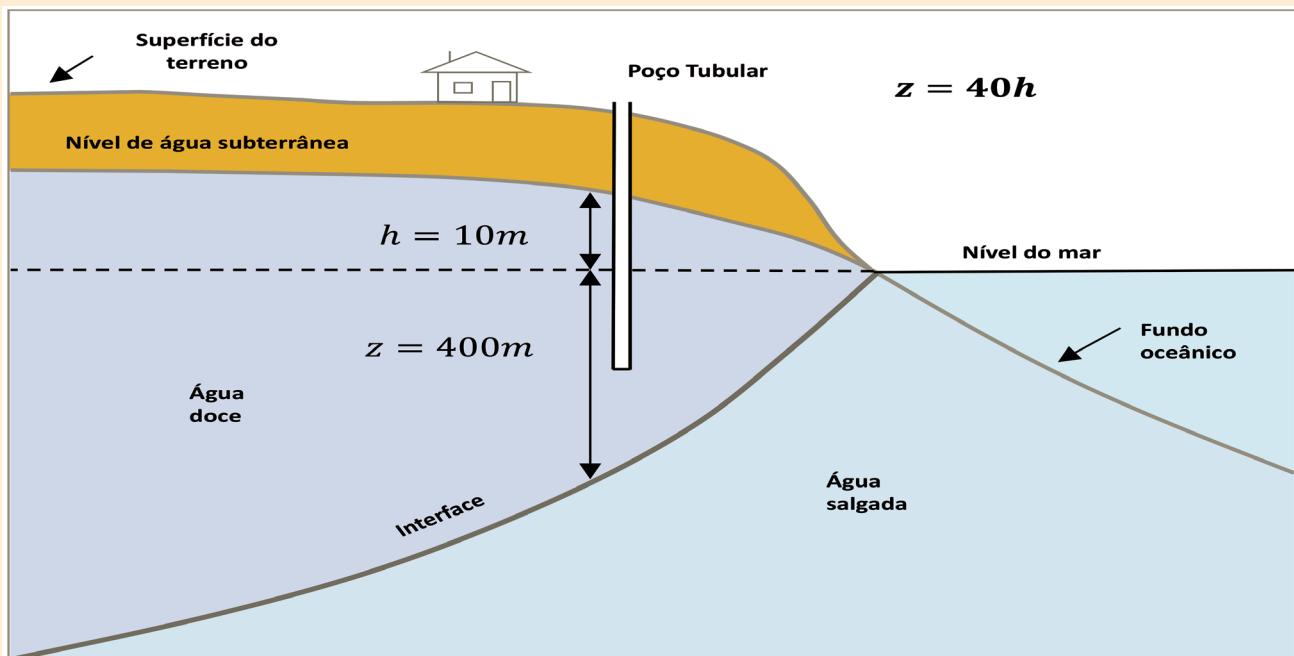


Figura 28 – Ilustração esquemática da relação hidrostática entre água doce e água salgada em aquífero costeiro

Fonte: Kresic (2006), adaptado por Roberto Eduardo Kirchheim.

Embora bastante válida como uma primeira aproximação matemática, essa equação adota um cenário simples de equilíbrio isostático e sem movimento advectivo da água. A verdadeira dinâmica das águas subterrâneas em regiões costeiras, entretanto, implica em descarga de água subterrânea doce com velocidade de percolação, criando verdadeira zona de transição na qual as águas se misturam por meio

de mecanismos de dispersão e difusão molecular. Esta mistura é causada e influenciada pelas heterogeneidades na geometria e propriedades hidráulicas do aquífero, assim como por forças dinâmicas que operam em várias escalas temporais, tais como efeitos diários de marés, variações sazonais e ou anuais de taxas de recarga nos aquíferos costeiros, ou variações na posição da linha de costa. Estas forças dinâmicas vão deslocando toda a faixa de mistura entre águas doces e salgadas de um lado a outro. Quando as condições naturais de um aquífero costeiro são alteradas devido ao bombeamento, a posição e a forma da interface doce-salgada, assim como as propriedades geométricas da zona de mistura, se modificam nas três dimensões, resultando em intrusões salinas. A presença de aquíferos multicamadas e de aquitardes descontínuos, associada a extrações de distintos aquíferos com diferentes profundidades faz com que as relações espaciais e temporais entre água doce e salgada sejam complexas.

A literatura técnica sugere uma série de metodologias que visam a diagnosticar cenários de intrusões, desde levantamentos geológicos, geoquímicos e geofísicos para demarcar a interface água salgada e doce até o uso de traçadores isotópicos e técnicas de modelagem matemática. Todas elas prescindem de resultados de monitoramento sistemáticos de níveis e qualidade. Diversas técnicas de mitigação podem ser empregadas, envolvendo recargas artificiais, rearranjo dos poços de produção e conformação de barreiras hidráulicas.

A zona costeira do Brasil possui as maiores densidades demográficas e alta demanda de recursos hídricos, mesmo assim, estudos diagnósticos, monitoramento e mitigação de cunhas salinas são incipientes. A zona costeira no estado do Rio de Janeiro e algumas capitais da Região Nordestina possuem estudos que, minimamente, envolveram etapas de diagnóstico e modelagem de avanço da cunha salina. O caso de Recife se destaca, sendo avaliado no Projeto Coqueiral, que envolveu vários atores institucionais nacionais e internacionais, tais como: CEPAS (IGC-USP), EESC-USP, UFPE, SGB-CPRM, Geohyd, CeRIES e BRGM (Figura 29).

A extração de água para o abastecimento da Região Metropolitana do Recife (RMR), que forma o quarto maior aglomerado populacional brasileiro, com 3,7 milhões de habitantes, acarretou a queda significativa dos níveis potenciométricos dos aquíferos, a sua salinização e contaminação (HIRATA et al., 2012). A degradação está ligada ao aumento da demanda de água, pontualmente amplificada por períodos de seca, bem como o fato de milhares de poços tubulares não serem legalizados e operados por usuários privados (HIRATA et al., 2012).

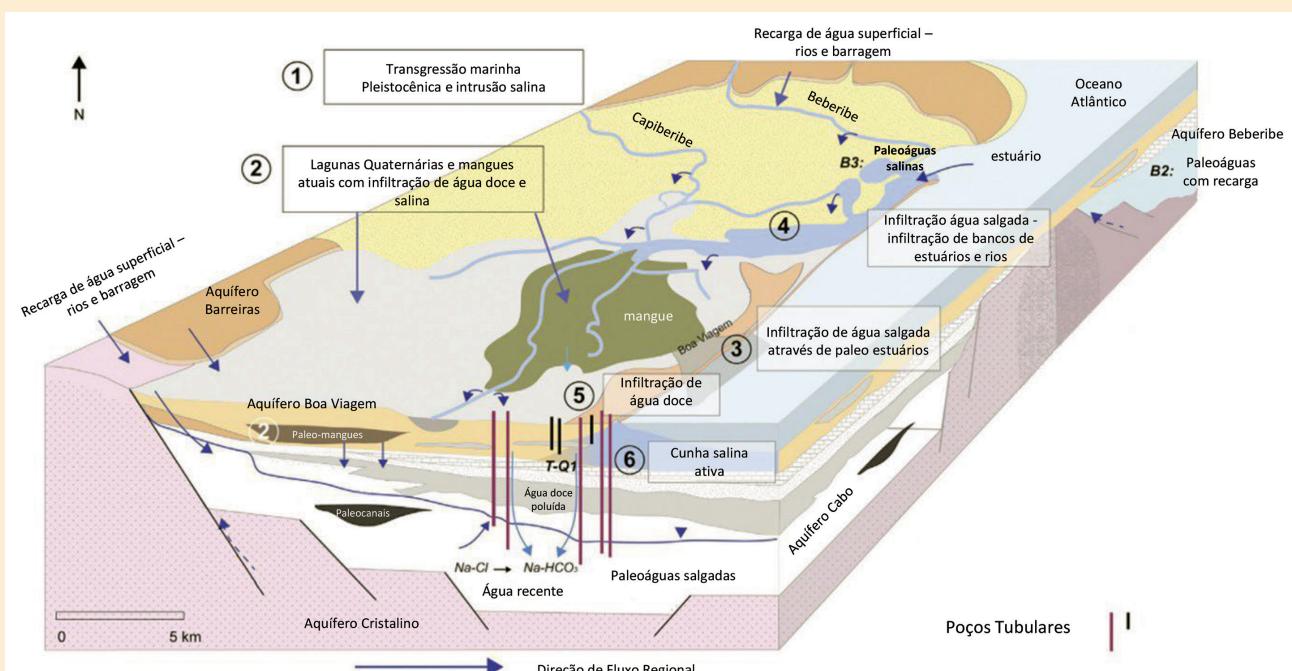


Figura 29 – Modelo conceitual dos aquíferos da RMR e seus vários processos de salinização

Fonte: Cary et al. (2015).

A dependência das águas subterrâneas na região é conhecida, com poços perfurados no Sistema Aquífero da Planície do Recife (SAPRe), composto pelo Beberibe e Cabo (confinados) e Boa Viagem (freático, sobreposto aos anteriores). Desde 1970 tem-se notado um incremento nos teores de sais no SAPRe (COSTA FILHO *et al.*, 1998; COSTA; COSTA FILHO; MONTEIRO, 2002; MONTENEGRO *et al.*, 2010). Os principais processos de salinização regional (Figura 29) encontrados na região são: *i*) transgressões marinhas pretéritas; *ii*) presença de manguezais quaternários onde a água do mar e a água doce evaporam e se misturam antes da infiltração e interação com argilas e matéria orgânica; *iii*) paleo-estuários como vias preferenciais para a intrusão de água do mar atual no aquífero superficial; *iv*) estuário atual que favorece a mistura de água do mar e água doce e a infiltração das margens do rio; *v*) infiltração de água doce da superfície; e *vi*) atual intrusão de água do mar no aquífero superficial de Boa Viagem.

2.7.2 Contaminação de solo e das águas subterrâneas

A contaminação do solo e dos aquíferos ocorre, principalmente, pela destinação incorreta de efluentes e resíduos sólidos, manuseio e estocagem de substâncias perigosas ou acidentes. A zona não saturada representa a primeira linha de defesa natural contra a poluição, e tem certa capacidade para atenuar e eliminar poluentes (FOSTER; HIRATA, 1988). Apesar disso, diversas atividades geram cargas contaminantes que superam a capacidade de retenção e degradação da zona não saturada, acarretando a contaminação do solo e das águas subterrâneas. Segundo Foster e Hirata (1988), a contaminação pode ser:

- a) **pontual**: quando a fonte de contaminação está restrita a uma pequena área, o que facilita a sua identificação, extensão e monitoramento, pois, geralmente, causa plumas de reduzida extensão e com elevadas concentrações. São os casos típicos de áreas de aterros sanitários e lixões, tanques enterrados, lagoas de efluentes, pilhas e depósito de produtos perigosos, entre outros; e
- b) **difusa ou multipontual**: quando a fonte de contaminação se estende pelo território e os poluentes são lançados de forma esparsa, dificultando a sua identificação, pois não se percebem plumas de contaminação bem definidas. Nesse caso, tem-se áreas agrícolas com aplicação excessiva de agrotóxico e fertilizantes, áreas urbanas com vazamentos nas redes de esgoto ou que utilizam fossas rudimentares e sépticas, entre outros.

As fontes potenciais de contaminação podem estar relacionadas às atividades da região urbana, periurbana ou rural, incluindo as decorrentes do processo de urbanização, da deposição de resíduos sólidos e líquidos, industriais, mineração, agricultura e pecuária. A princípio, todas as atividades antrópicas que geram, manuseiam ou estocam produtos perigosos

podem contaminar as águas subterrâneas. Dentre essas atividades, porém, há aquelas que podem ocasionar maiores impactos ou são de ocorrência mais frequente (FOSTER; HIRATA, 1988; FOSTER *et al.*, 2002). Cabe à gestão identificar, distinguir e classificar essas atividades antrópicas, permitindo que os órgãos públicos e a sociedade estabeleçam suas políticas.

Há poucas publicações sobre o tema, contudo, Foster e Hirata (1988) e Foster *et al.* (2002) ressaltam que as atividades contaminantes não necessariamente estão vinculadas aos grandes empreendimentos. Ocionalmente, os pequenos empreendimentos podem, inclusive, gerar maior preocupação, pois manuseiam produtos perigosos sem o controle necessário, sendo responsáveis por grandes impactos. É o caso do Distrito Industrial de Jurubatuba (São Paulo), exposto na galeria de casos do Capítulo 4. Nessa região, um empreendimento com pouco mais de centenas de metros quadrados gerou uma série contaminação, pois manejava solventes clorados (como desengraxantes para a produção de baterias) sem os devidos cuidados. Por essa razão, o potencial contaminante das atividades deve ser analisado, principalmente, sob dois aspectos: *a*) o tipo de produto produzido, manuseado e estocado; e *b*) se o ingresso no solo se faz com alguma carga hidráulica associada, pois não há como um contaminante ingressar no aquífero se não for via fluido.

Os contaminantes devem ser analisados com base em sua toxicidade, mobilidade e persistência em subsuperfície. Solventes clorados reúnem essas características e, por isso, são problemáticos. O nitrogênio, embora apresente baixa toxicidade, tem ampla ocorrência, o que o torna um desafio à gestão. Ele está presente nos fertilizantes utilizados na agricultura e nos efluentes domésticos que infiltram no aquífero, via fossas sépticas ou rudimentares, e via vazamentos da rede de esgoto.

O Brasil tem uma situação particularmente vulnerável em relação à falta de esgotamento sanitário, sendo que

39% do esgoto gerado não é coletado; 12% são destinados para sistemas individuais de tratamento *in situ* (fossas sépticas); e 27% são lançados majoritariamente no solo por meio de fossas rudimentares e sumidouros (99%) ou nas águas superficiais (1%) (HIRATA *et al.*, 2019, ANA, 2017b, IBGE, 2008). Nas áreas dotadas de infraestrutura sanitária, falta manutenção das redes de esgoto, permitindo o vazamento de volumes expressivos que podem superar 10% do total de esgoto coletado (HIRATA *et al.*, 2019).

Apesar de o Brasil ser um país com atividade agrícola pujante e utilizar grande quantidade de fertilizantes inorgânicos e agrotóxicos, não existem estudos sistemáticos de avaliação de impactos ou de ocorrência desse tipo de contaminação, mesmo no meio acadêmico. A aplicação de fertilizantes nitrogenados é a principal causa de contaminação agrícola na América do Norte e Europa, que reportam inúmeros casos de extensas áreas contaminadas.

Outro problema é que os poços ou captações são construídos sem seguir as normas técnicas, sua localização é inadequada (próximos às fontes potenciais de contaminação) ou não recebem a devida manutenção, o que pode induzir à contaminação do aquífero. A diligência técnica evita, por exemplo, a poluição microbiológica, muito comum em poços instalados próximos a fossas. O poço, portanto, deve estar localizado a distâncias seguras em relação às fontes potencialmente poluentes, recomendando-se a adoção dos perímetros de proteção de poços, bem como a realização periódica de análises químicas.

No Brasil, as informações sobre a situação das áreas contaminadas são escassas. No Banco de Dados Nacional sobre Áreas Contaminadas (BDNAC)⁶ há informações somente dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

2.7.3 Redução da recarga dos aquíferos em virtude da alteração do uso e ocupação da terra

As mudanças dos padrões de cobertura do solo urbano e rural interferem diretamente na recarga das águas subterrâneas, pois influenciam na distribuição das precipitações, na temperatura, no escoamento superficial, na evapotranspiração e na recarga dos aquíferos (TANG *et al.*, 2005). As principais causas dessas alterações na recarga dos aquíferos se correlacionam aos seguintes aspectos: *a)* selamento por superfícies impermeáveis (JACOBSON, 2011); *b)* compactação (PITT *et al.*, 2003); e *c)* redução da cobertura vegetal arbórea (ANDJELKOVIC, 2001). As áreas seladas são mais presentes nas zonas urbanas e incluem todos os espaços pavimentados e com edificações que impedem a infiltração da água. A compactação é a afetação das propriedades físicas do solo, de forma a diminuir a sua porosidade, sendo causada, por exemplo, pela movimentação de terra ou pela passagem de maquinários pesados. A redução da cobertura vegetal arbórea causa impactos relacionados à perda de evapotranspiração, às alterações no albedo da superfície terrestre, ao aumento de temperaturas e à intensificação de processos erosivos e de desertificação (TANG *et al.*, 2005). Além disso, as florestas evitam perturbações no solo, e suas raízes e ecossistemas associados contribuem para melhorar a porosidade da terra (ARTAXO, 2014; AZEVEDO, 2019). Nas cidades, eventualmente, pode haver compensação da perda de recarga natural em virtude dos vazamentos na rede de água, esgoto e drenagem de águas pluviais (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015).

⁶ O BDNAC foi instituído pela Res. Conama nº 420/2009. Para mais informações, consultar: <http://ibama.gov.br/residuos/areas-contaminadas/banco-de-dados-nacional-sobre-areas-contaminadas-bdnac>.

Box 12 – A importância da cobertura florestal na recarga de aquíferos: lições aprendidas no Sistema Aquífero Alter do Chão

Júlio Henrichs de Azevedo

José Eloi Guimarães Campos

Os ecossistemas tropicais mantêm relação com o controle das taxas de infiltração, evapotranspiração e de recarga sob diversas condições de pluviosidade em regiões tropicais (KRISHNASWAMY et al., 2013), sendo um tema que precisa ser melhor estudado no Brasil, em particular na região Amazônica (CARVALHO, 2012). A floresta Ombrófila Densa, que cobre mais de 80% da formação do Aquífero Alter do Chão, demonstra ter importante papel na manutenção do regime de precipitação pluviométrica, na regulação da infiltração e na manutenção das taxas de recarga desse aquífero (CARVALHO, 2012). A perda de água por evapotranspiração, normalmente subtraída do balanço da taxa de recarga de um aquífero (HEALY, 2010), acaba sendo compensada pela floresta tropical, que tem o papel de otimizar os processos de infiltração (fluxo rápido) em detrimento do escoamento superficial, e manter o regime pluviométrico.

A pesquisa de Azevedo, Freitas-Silva e Campos (2020) e Azevedo e Campos (2021) sobre os padrões de circulação e quantificação da recarga das águas do Sistema Aquífero Alter do Chão, a partir de platôs lateríticos bauxíticos, desenvolvidas na Floresta Nacional Saracá-Taquera, em Porto Trombetas, Oriximiná/PA (Figura 30), baseada em estudos potenciométricos, hidroquímicos, isotópicos, pedológicos e de geologia estrutural, que são ferramentas consagradas para os estudos de fluxos subterrâneos (JIE et al., 2011; GASTMANS; CHANG; HUTCHEON, 2010; HEALY, 2010; FEITOSA et al., 2008), corrobora substancialmente a importância da cobertura vegetal no controle da recarga do Aquífero Alter do Chão.

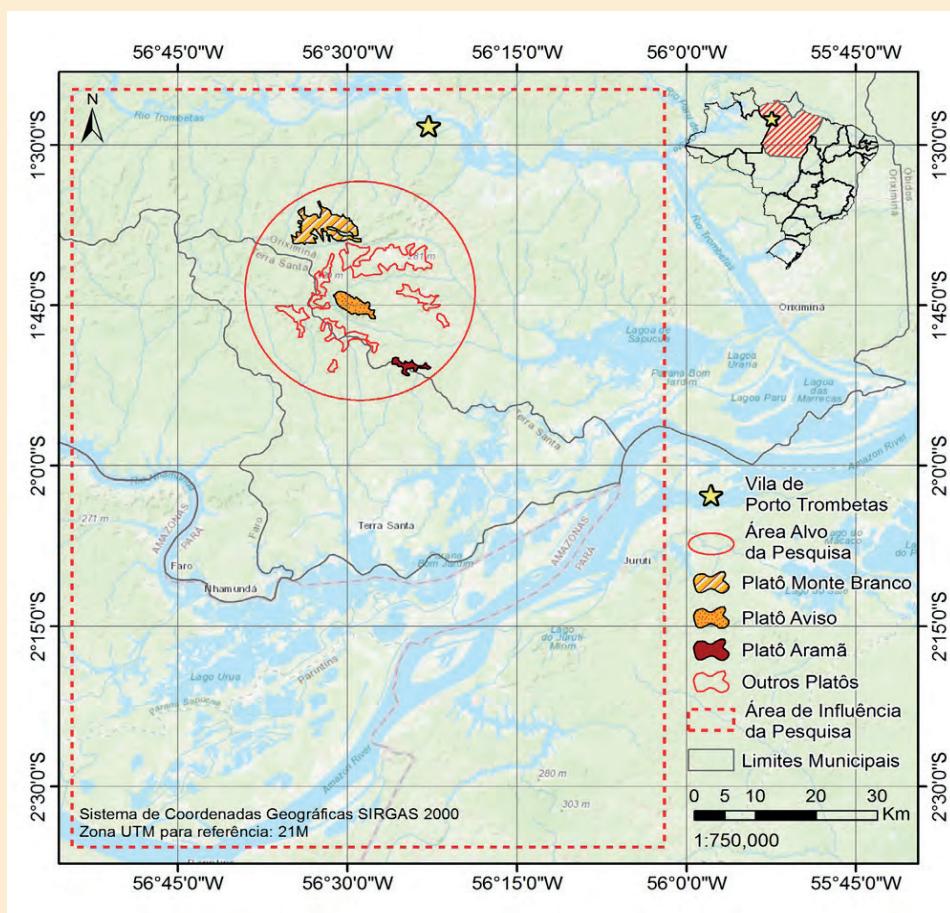


Figura 30 – Áreas pesquisadas em ambientes de platôs lateríticos da Formação Alter do Chão
Fonte: Azevedo, Freitas-Silva e Campos (2020).

As camadas minerais desses platôs mantêm alternância nos valores de condutividade hidráulica, o que, em princípio, limitaria o fluxo vertical de água no perfil e, consequentemente, a recarga das águas subterrâneas. As bioturbações promovidas pelas raízes interagem com as camadas dos perfis lateríticos e provocam zonas de fluxos preferenciais, contribuindo para o aumento da permeabilidade. A Figura 31 demonstra o efeito de bioturbação das raízes, que podem chegar até 15 m de profundidade. Nessa faixa, o material geológico apresenta baixa condutividade hidráulica (da ordem de grandeza de 10^{-7} m/s).

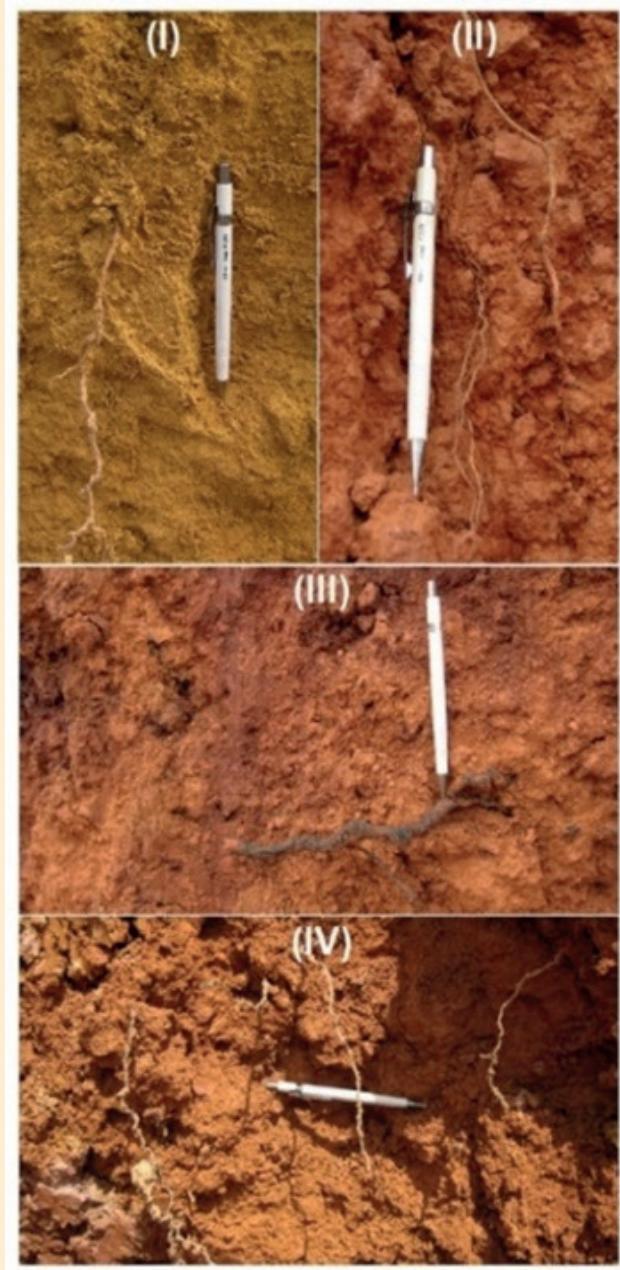


Figura 31 – Detalhe das raízes atravessando as diversas camadas do perfil laterítico: I – Latossolo Amarelo \pm 4 m; II – Nódulos de Bauxita \pm 6 m; III – Bauxita Sólida \pm 7 m; e IV – Argila Variegada \pm 15 m

Fonte: Azevedo e Campos (2021, p. 8).

A interpretação dos efeitos positivos da cobertura vegetal e da bioturbação dela decorrente provém da comparação dos níveis potenciométricos de três áreas de pesquisa e com distintos usos, a saber: *i*) área com cobertura vegetal original de Floresta Ombrófila Densa; *ii*) área desmatada para fins de atividade mineral (extração de bauxita); e *iii*) área minerada em etapa inicial de recuperação ambiental (Figura 32). A área com cobertura vegetal original foi a que manteve a maior regularidade nos níveis do aquífero (menor variação sazonal) quando comparada com as demais áreas. Em relação à taxa de recarga não houve diferença significativa entre a área com cobertura florestal original e a área recentemente desmatada para fins de mineração. Os dados, no entanto, indicam redução dessa taxa em quase 50% nas áreas alteradas há mais tempo (mineração). E, apesar de estarem em processo inicial de recuperação ambiental (reconformação do terreno e reflorestamento), elas ainda não alcançaram o reestabelecimento esperado dos processos hidrológicos e hidrogeológicos da zona vadosa (GRIGG, 2016).



Figura 32 – (I) Área com cobertura vegetal original; (II) Área desmatada para o início de atividade de mineração de bauxita; e (III) Área em recuperação ambiental pós-lavra

Fonte: Azevedo (2019).

Os estudos hidrogeológicos realizados na Floresta Nacional Saracá-Taquera contribuem para a consolidação do entendimento de que os processos de recarga das águas subterrâneas não são, necessariamente, dependentes das respostas das propriedades físicas do ambiente subterrâneo e dos padrões geomorfológicos das condições climáticas, mas, sim, das relações que se estabelecem entre os componentes ambientais de natureza abiótica, biótica e antrópica. A cobertura vegetal e as bioturbações em subsuperfícies devem ser adequadamente consideradas. A Figura 33 ilustra algumas dessas relações nos ambientes de platôs lateríticos bauxíticos desenvolvidos sobre a Formação Alter do Chão.

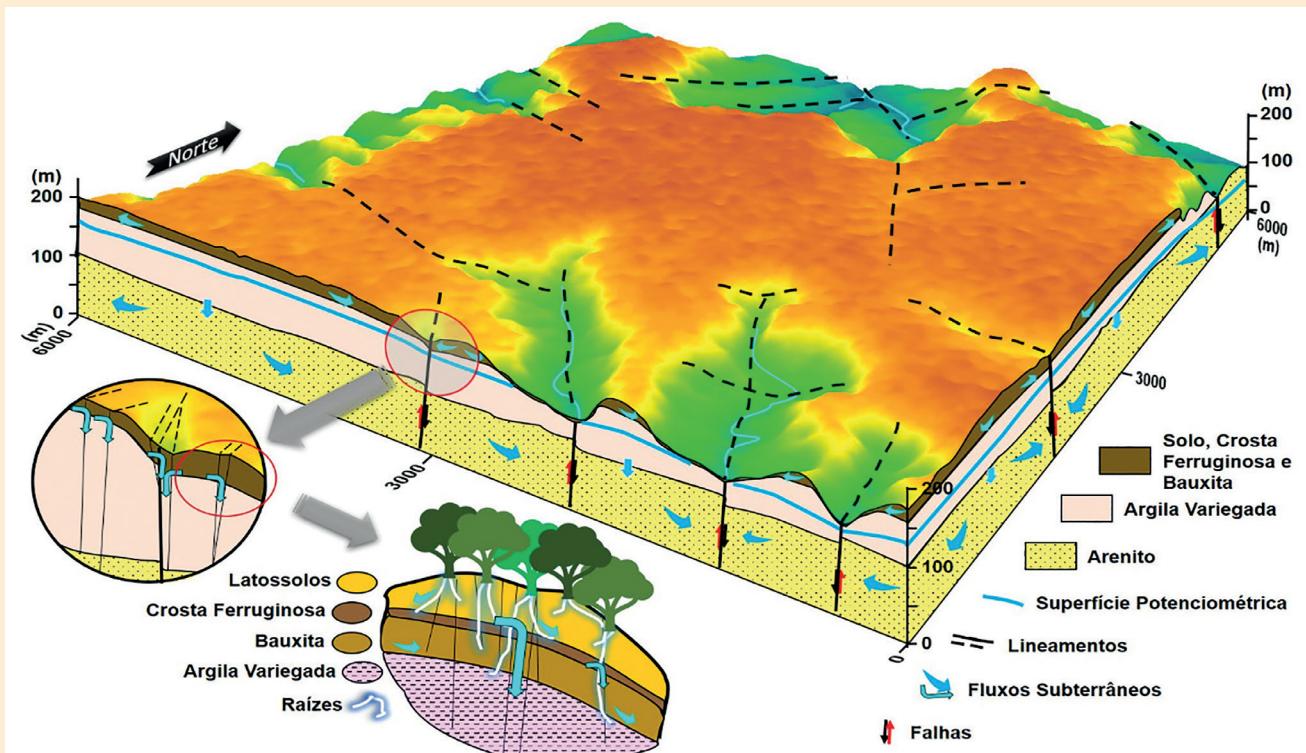


Figura 33 – Bloco diagrama ilustrando relações de fatores abióticos (solo e geologia) e bióticos (cobertura vegetal, sistemas radiculares) com efeitos na conexão hidráulica e nos padrões de fluxo subterrâneo em platôs lateríticos da Formação Alter do Chão

Fonte: Azevedo, Freitas-Silva e Campos (2020, p. 59).

Há muitas lacunas no conhecimento dos processos de recarga em ambientes tropicais que, além de terem notável relevância científica, devem ser compreendidas como estratégicas para o estabelecimento de melhores práticas de conservação e manejo das áreas de recarga dos aquíferos, bem como para a instauração de mecanismos de gestão cada vez mais sustentáveis das reservas hídricas subterrâneas. Tudo indica que a preservação da vegetação nativa e a recomposição de ecossistemas modificados contribuem para a produção hídrica não apenas dos cursos de água superficiais, mas, também, para os aquíferos livres ou com baixo grau de confinamento.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Gestão e gerenciamento das águas subterrâneas. Fórum “Olhares sobre nossas águas: seus usos, qualidade, aspectos, gestão e saneamento”. Mesa Redonda II – Qualidade das águas e a importância das águas subterrâneas para a provisão de água. Campinas, SP, 11 de maio de 2015 (Apresentação oral).
- ALY JÚNIOR, O. **O valor da água subterrânea.** Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Campinas, SP, 2019.
- AMINI, M.; MUELLER, K.; ABBASPOUR, K. C.; ROSENBERG, T.; AFYUNI, M.; MØLLER, K.N.; SARR, M.; JOHNSON, C. A. Statistical modeling of global geogenic fluoride contamination in groundwaters. *Environmental Science & Technology*, v. 42, n. 1, 2008, pp. 3662-8. doi: 10.1021/es071958y.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil.** Brasília, 2005 (Cadernos de Recursos Hídricos). Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VFDisponibilidade Demanda.pdf>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil.** Brasília, 2007.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil:** abastecimento urbano de água – panorama nacional. Brasília: ANA/Engenheiros/Cobraper, 2010.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Geográfico de Recursos Hídricos do Brasil.** Sistemas Aquíferos. Mapa das Áreas Afloantes dos Aquíferos e Sistemas Aquíferos do Brasil (escala 1:1.000.000). Hidrografia. 2013. Disponível em: <http://portal1.snh.gov.br/atlasrh2013/>.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazônicas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000).** Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da PHA no Brasil, t. I, v. III, 2015. 330p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório Técnico de séries históricas e outorgas vigentes em julho de 2016 emitidas pela ANA e Unidades da Federação.** 2016. Disponível em: <https://metadados.snh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog-search#/ metadata/a13c9093-34bd-403f-88db-6ffbad2069e6>
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada compartilhada:** resumo executivo. Brasília, 2017a. 100p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017:** relatório pleno. Brasília, 2017b.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020:** informe anual. Brasília, 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas Águas:** segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília, 2021. 332p., il. ISBN: 978-65-88101-19-3.
- ANDJELKOVIC, I. Guidelines on non-structural measures in urban flood management. *International Hydrological Programme (IHP)*. Paris, France: [s.n.], 2001.
- ARTAXO, P. Uma nova era geológica em nosso planeta: o antropoceno? *Revista USP*, v. 103, 2014.
- AZEVEDO, J. H. **Fluxos subterrâneos e recarga do Sistema Aquífero Alter do Chão em lateritos amazônicos:** estudo de caso em Porto Trombetas, Pará. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2019. 139p.
- AZEVEDO, J. H.; FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. Atividade neotectônica na região de Porto Trombetas, Pará, Brasil: evidências, cinemática e influências na hidrogeologia. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 43, n. 3, 2020, pp. 47-62.
- AZEVEDO, J. H.; CAMPOS, J. E. G. Flow patterns and aquifer recharge controls under Amazon rainforest influence: The case of the Alter do Chão aquifer system. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 112, 103596, 2021.
- BERGKAMP, G., CROSS, K. **Groundwater and Ecosystem Services:** towards their sustainable use. Switzerland: IUCN (The World Conservation Union)/ISGWAS, 2015.
- BRANNSTROM, C.; JEPSON, W.; FILIPPI, A. M.; REDO, D.; XU, Z.; GANESH, S. Land change in the Brazilian Savanna (Cerrado), 1986-2002: comparative analysis and implications for land-use policy. *Land Use Policy*, v. 25, n. 4, 2008, pp. 579-595.
- BRUNNER, P.; THERRIEN, R.; RENARD, P.; SIMMONS, C. T.; FRANSSEN, H.-J. H. Advances in understanding river-groundwater interactions. *Reviews of Geophysics*, v. 55, 2017, pp. 818-854.
- BUDDS, J.; LINTON, J.; McDONNELL, R. The hydrosocial cycle. *Geoforum*, v. 57, 2014, pp. 167-169.
- CABRAL, J. S. P. Movimento das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Orgs.). **Hidrogeologia** – conceitos e aplicações. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, pp. 77-91.
- CARVALHO, J. S. Caracterização hidrogeológica da região ao norte da cidade de Manaus, com base em informações geofísicas (resistividade elétrica), geológicas e geomorfológicas. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Universidade Estadual do Amazonas. Manaus, 2012. 157p.
- CARY, L.; PETELET-GIRAUD, E.; BERTRAND, G.; KLOPPMANN, W.; AQUILINA, L.; MARTINS, V.; HIRATA, R.; MONTENEGRO, S.; PAUWELS, H.; CHATTON, E.; FRANZEN, M.; AUROUET, A. Origins and processes of groundwater salinization in the urban coastal aquifers of Recife (Pernambuco, Brazil): a multi-isotope approach. *Science of the Total Environment*, v. 530-531, 15 Oct. 2015, pp. 411-429.
- CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025.** Belo Horizonte, 2016.
- CHANG, H. K.; SILVA, F. P. Contribuição ao arcabouço geológico do sistema aquífero Urucuia. *Revista Geociências*. São Paulo, v. 34, n. 4, 2015, pp. 872-882.

- COCKELL, C.; CORFIELD, R.; EDWARDS, N.; HARRIS, N. **Sistema Terra-Vida** – uma introdução. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 360p.
- CONSTANZA, R.; DARGE, R.; GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; ONEILL, R. V.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, 1997, pp. 253-260.
- COSTA FILHO, W. D.; SANTIAGO, M. F.; MENDES FILHO, J.; COSTA, W. D. Concentração salina das águas subterrâneas na planície do Recife. III Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste. **Anais...**, Recife, PE, 1998, pp. 124-131.
- COSTA, W. D.; COSTA FILHO, W. D.; MONTEIRO, A. B. A sobre-exploração dos aquíferos costeiros em Recife-PE. In: BOCANEGRÁ, MaM (Ed.) **Groundwater and Human Development**, 2002.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, escala 1:2.500.000**. 2007. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/10323>.
- CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa Geológico do Brasil, escala 1:1.000.000**. 2004.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. 2. ed. Barcelona: Omega, 2001. 274p.
- DARCY, H. **Les fontaines publiques de la Ville de Dijon**. Dalmont, Paris, 1856.
- DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. C.; PAULA, T. L. F. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo**. Nota técnica. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15556/1/rel_mapa_hidrogeo_brasil.pdf.
- DÖLL, P.; FLÖRKE, M. Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. **Frankfurt Hydrology**. Institute of Physical Geography, Frankfurt University. Frankfurt am Main, Germany. Paper 3, 2005.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and chemical hydrogeology**. New York: John Wiley and Sons. Inc., 1990.
- EHRLICH, P. R.; EHRLICH, A. H. **Extinction**: the causes and consequences of the disappearance of species. New York: Random House, 1981.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Orgs.). **Hidrogeologia – conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812p.
- FERNANDES, A. J.; FIUME, B.; BERTOLO, R.; HIRATA, R. C. A. Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP). **Geologia USP**, v. 16, n. 3, 2016, pp. 71-88 (Série Científica).
- FERRARI, J. A. et al. **Identificação e caracterização hidrológica da área de influência da Gruta do Éden – Pains, MG**. Relatório final. São Paulo: Instituto Geológico, 2018. 36p.
- FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst geomorphology and hydrology**. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2007. 562p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas**. Una metodología basada en datos existentes. Lima, Peru: CEPIS, Technical Report (OPS-OMS-HPE), 1988.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection**. A guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Washington: The World Bank, 2002. 103p.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice Hall, 1979. 604p.
- GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 23, n. 7, 2015, pp. 1499-1513.
- GALVÃO, P.; HIRATA, R.; HALIHAN, T.; TERADA, R. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, 2017, 159p.
- GASTMANS, D.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. **Applied Geochemistry**, v. 25, n. 1, 2010, pp. 16-33.
- GOLDSHEIDER, N.; DREW, D. **Methods in karst hydrology**. London: Taylor & Francis Group, 2007.
- GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; GROOT, R.; LOMAS, P. L.; MONTES, C. The history of ecosystem services in economic theory and practice: from early notions to markets and payment schemes. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, 2010, pp. 1209-1218.
- GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Evolução da contribuição do Sistema Aquífero Urucuia para o rio São Francisco, Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, 2018. 10p.
- GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Análise hidrológica de séries históricas da Bacia do Rio Grande (BA): contribuição do Sistema Aquífero Urucuia. **Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 2, 2016, pp. 190-208. 190p. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v30i2.28514>.
- GRIEBLER, C.; AVRAMOV, M. Groundwater ecosystem services: a review. **Freshwater Science**, v. 34, n. 1, mar./2015, pp. 355-367.
- GRIGG, A. H. Hydrological response to bauxite mining and rehabilitation in the jarrah forest in south west Australia. **Journal of Hydrology (Regional Studies)**, n. 12, 2016, pp. 150-164.
- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 738p.
- HEALY, R. W. **Estimating groundwater recharge**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010. 244p.
- HIRATA, R.; FOSTER, S.; OLIVEIRA, F. **Águas subterrâneas urbanas no Brasil**: avaliação para uma gestão sustentável. São Paulo: Fapesp/IGC-USP, 2015. 111p.
- HIRATA, R.; MONTENEGRO, S.; PETELET, E.; WENDLAND, E.; MARENKO, J.; MARTINS, V.; BERTOLO, R.; CARY, L.; MEDEIROS, E.; FRANZEN, M.; PIERRE, D.; AQUILINA, L.; GIGLIO-JACQUEMONT, A.; BATISTA, J. Coqueiral: uma proposta metodológica para solucionar o problema de salinização do Sistema Aquífero da Planície do Recife (PE). XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. **Anais...** Bonito, MS, 23 a 26 de outubro de 2012.

- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.** São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 2019.
- HIRATA, R.; VARNIER, C. **Águas subterrâneas e agronegócios.** Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: ABAS, 1998. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22325>.
- HIRATA, R.; CONICELLI, B. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, 2012, pp. 297-312.
- IBGE. Instituto de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017.** Disponível em: <https://censo.ibge.gov.br/agro/2017/>.
- IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **The Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>.
- JACOBSON, C. R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 6, 2011, pp. 1438-1448.
- JIE, Z.; BENDEL, D.; BARTHEL, R.; HEYDEN, J. Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge Calculations. **Hydrogeology Journal**, n. 19, 2011, pp. 1487-1502.
- KALBUS, E.; REINSTORF, F.; SCHIRMER, M. Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 10, n. 6, 2006, pp. 873-887.
- KRESIC, N. **Hydrogeology and Groundwater Modelling.** 2. ed. Flórida, EUA: CRC, 2006.
- KRISHNASWAMY, M.; BONELL, B.; VENKATESH, B. K.; PURANDARA, K. N.; RAKESH, S.; LELE, M. C.; KIRAN, V.; REDDY, S.; BADIGER. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”. **Journal of Hydrology**, n. 498, 2013, pp. 191-209.
- KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. **Analysis and evaluation of pumping test data.** 2nd ed. Wageningen, The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement, publication 47, 1994. 370p.
- KUNDZEWCZ, Z. W. et al. Freshwater resources and their management. **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability.** Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). PARRY, M.L. (Eds.). Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press, 2007, pp. 173-210.
- LINTON, J.; BUDDS, J. The hydrosocial cycle: defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. **Geoforum**, v. 57, 2014, pp. 170-180.
- MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Orgs.). **Hidrogeologia – conceitos e aplicações.** 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, pp. 53-75.
- MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas.** Jundiaí, SP: Paco, 2015.
- MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Revista Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, 2008.
- MEA. Avaliação Ecossistêmica do Milênio. **Ecossistemas e bem-estar humano:** estrutura para uma avaliação (Resumo). 2005. Disponível em: <https://www.Millenniumassessment.Org/Documents/Document.63.Aspx.pdf>.
- MELO, D. C. D. **Estimativa de impacto de mudanças climáticas nos níveis do Sistema Aquífero do Guarani.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2013.
- MENTE, A. A água subterrânea no Brasil. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Orgs.). **Hidrogeologia – conceitos e aplicações.** 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM, 2008, pp. 31-48.
- MENTE, A.; PESSOA, M. D.; LEAL, O. **Projeto Mapa Hidrológico do Brasil na escala de 1:2.500.000.** Relatório final. CPRM. Superintendência Regional de Recife, v. II, 1981. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/6688>.
- MONTENEGRO, S.; PAIVA, A.; CABRAL, J.; CAVALCANTI, G.; SCALIA, E. **Investigation of Seawater Intrusion in Recife Coastal Plain (Pernambuco, Brazil).** 21st SWIM Conference. Açores, 2010, pp. 254-257.
- NOBRE, A. D. **O futuro climático da Amazônia.** São José dos Campos, SP: ARA/INPE/ INPA, 2014.
- OKI, T.; ENTEKHABI, D.; HARROLD, T. I. The global water cycle. In: SPARKS, R. S. J.; HAWKESWORTH, C. J. (Eds.). State of the planet: frontiers and challenges in geophysics. **Geophysical Monograph Series.** AGU Publications, v. 150, n. 414, 2004, pp. 225-257.
- PALMER, A. N. **Cave geology.** Dayton, OH: Cave Books, 2007. 288p.
- PARKER, B. L.; BAIROS, K.; MALDANER, C. H.; CHAPMAN, S. W.; TURNER, C. M.; BURNS, L. S.; CHERRY, J. A. Metolachlor dense non-aqueous phase liquid source conditions and plume attenuation in a dolostone water supply aquifer. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 479, n. 1, 2018, pp. 207-236.
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudança Climática. **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas.** Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas.
- ASSAD, E.D.; MAGALHÃES, A. R. (Eds.).] COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.
- PESSOA, D. M.; MENTE, A.; LEAL, O. Províncias Hidrogeológicas adotadas para o Mapa Hidrogeológico do Brasil na escala 1:2.500.000. 1º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais...** Recife, nov. 1980. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23940>.
- PITT, R. et al. **Infiltration through compacted urban soils and effects on biofiltration design.** [S.l: s.n.], v. 6062, 2003.
- POETER, E.; FAN, Y.; CHERRY, J.; WOOD, W.; MACKAY, D. **Groundwater in our water cycle – Getting to know Earth's most important fresh water source.** Guelph, Ontario, Canada: The Groundwater Project, 2020, 136p. ISBN: 978-1-7770541-1-3.

- RAVENCROFT, P.; BRAMMER, H.; RICHARDS, K. S. **Arsenic pollution:** a global synthesis. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2009. 579p.
- RODELL, M.; BEAU DOING, H. K.; L'ECUYER, T. S.; OLSON, W. S.; FAMIGLIETTI, J. S.; HOUSER, P. R.; ADLER, R.; BOSILOVICH, M. G.; CLAYSON, C. A.; CHAMBERS, D.; CLARCK, E.; FETZER, E. J.; GAO, X.; GU, J. G.; HILBURN, K.; HUFFMAN, G. J.; LETTENMAIER, D. P.; LIU, W. T.; ROBERTSON, F. R.; SCHLOSSER, I. C. A.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. The Observed state of the water cycle in the early twenty-first century. **Journal of Climate.** American Meteorological Society, 2015. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00555.1.
- ROULEAU, A.; DENIS, C.; COUSINEAU, P.; LAPCEVIC, P. The estimation of hydraulic parameters of a fractured orthoquartzite formation at the laboratory and field scales. In: AUBERTIN, M.; HASSANI, F.; MITRI, H. (Eds.). **Rock mechanics:** tools and techniques Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium. Montreal: A.A. Balkema, 1996, pp. 1359-1366.
- RYAN, M.; MEIMAN, J. An examination of short-term variation in water quality at the karst spring in Kentucky. **Ground Water,** v. 34, n. 1, 1996, pp. 23-30.
- SHAPIRO, A. M.; HSIEH, P. A.; BURTON, W. C.; WALSH, G. J. Integrated multi-scale characterization of ground-water flow and chemical transport in fractured crystalline rock at the Mirror Lake Site, New Hampshire. **Geophysical Monograph-American Geophysical Union,** v. 171, 2007.
- SHIKLOMANOV, I. A.; RODDA, J. C. **World water resources at the beginning of the twenty-first century.** Unesco International Hydrology Series. Cambridge: University Press, 2003.
- SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. **Applied hydrogeology of fractured rocks.** Springer Science & Business Media, 2010.
- SMERDON, B. D. A synopsis of climate change effects on groundwater recharge. **Journal of Hydrology,** v. 555, 2017, pp. 125-128.
- TANG, Z. et al. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. **Journal of Environmental Management,** v. 76, n. 1, 2005, pp. 35-45.
- TEIXEIRA, F. **Água subterrânea e a convivência com o semiárido.** Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2018 (Apresentação oral). Disponível em: http://www.abas.org/xxcabas/apresentacoes/t2_16-30_francisco-teixeira.pdf.
- TÓTH, J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. **Journal of Geophysical Research,** v. 68, 1963, pp. 4795-4812.
- USGS. United States Geological Survey. **O ciclo d'água.** The water cycle. Portuguese. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/o-ciclo-d-gua-water-cycle-portuguese>.
- WAHNFRIED, I. D.; SOARES, E. A. A. Água subterrânea na Amazônia: importância, estado atual do conhecimento e estratégias de pesquisa. **Ciência e Ambiente,** n. 44, 2012, pp. 29-40.
- WHITE, W. B. Conceptual models for karstic aquifers. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers,** v. 1, n. 1, jan. 2003.
- WILKINSON, B. H.; MCELROY, B. J.; KESLER, S. E.; PETERS, S. E.; ROTHMAN, E. D. Global geologic maps are tectonic speedometers – Rates of rock cycling from area-age frequencies. **Geological Society of America Bulletin,** v. 121, n. 5-6, 2009, pp. 760-779. Disponível em: http://strata.geology.wisc.edu/reprints/Wilkinson_et.al2009.pdf. doi:10.1130/B26457.1.
- WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. **Groundwater and surface water: a single resource.** Denver, Colorado: US Geological Survey Circular, v. 1139, 1999. 79p.
- WOESSNER, W. W. **Groundwater-Surface Water Exchange.** Ontario, Canada: The Groundwater Project, 2020. 136p.



Rio Roda Velha formado por nascentes do Aquífero
Urucuia, São Desidério (BA)
Foto: Vagney A. Augusto / Banco de Imagens ANA

CAPÍTULO 3

A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DA TEORIA À PRÁTICA



3.1 PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS

Os planos de recursos hídricos foram previstos pela Lei nº 9.433/1997, e constituem o principal instrumento para a “construção de consensos na bacia hidrográfica” (PORTO; PORTO, 2008, p. 51). A aplicação desses planos extrapola o planejamento tradicional, posto que a sua construção se dá mediante processos participativos que aglutinam Poder Público, sociedade civil e agentes econômicos (PORTO; PORTO, 2008). São, portanto, definidos pela lei como “planos diretores que visam a fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos.” (art. 6º da Lei nº 9.433/1997).

Sua aplicação se dá em três escalas de atuação: nacional, estadual e bacia hidrográfica (art. 8º da Lei nº 9.433/1997). Dessa forma, tem-se: *a*) o Plano Nacional de Recursos Hídricos; *b*) os Planos Estaduais de Recursos Hídricos; e *c*) os Planos de Bacias Hidrográficas, que se subdividem em duas categorias, segundo o tipo de bacia (estadual e interestadual): Planos de Bacia Hidrográfica de Rios sob domínio estadual, e Planos de Bacia Hidrográfica de Rios sob domínio federal (LANNA; PEREIRA; HUBERT, 2002). Cada um desses planos incorpora os aquíferos correlacionados à respectiva bacia hidrográfica. A Figura 34 sintetiza os tipos de planos conforme a política (nacional ou estadual), o seu escopo geográfico e as entidades colegiadas responsáveis por aprovar o planejamento de recursos hídricos no Brasil.

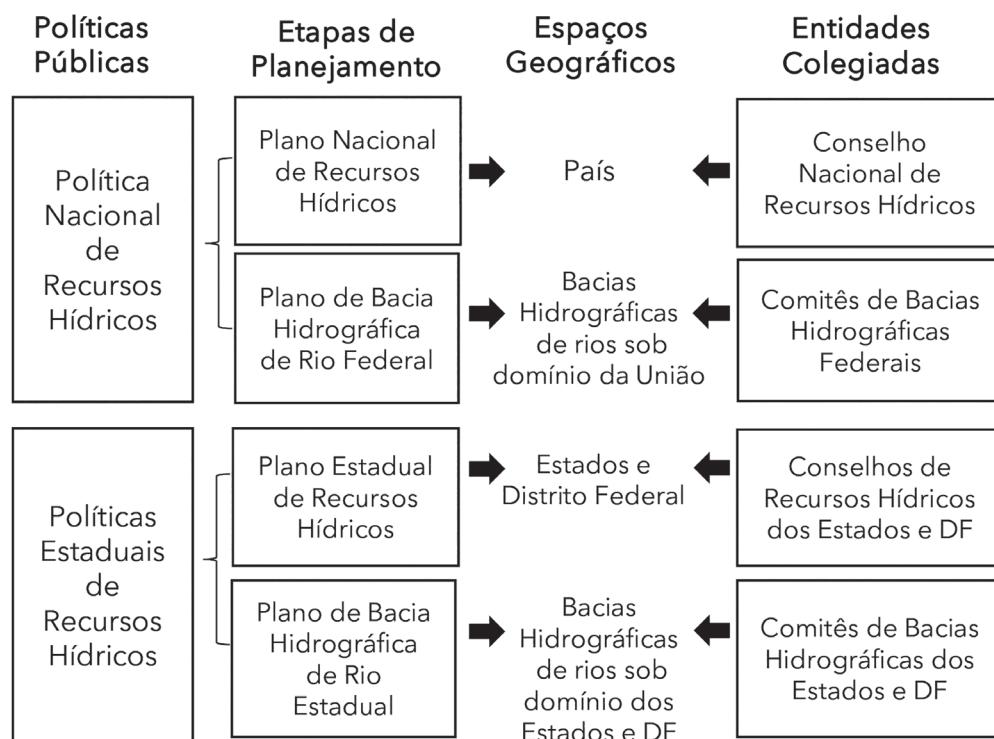


Figura 34 – Políticas públicas, tipos de planos, âmbitos geográficos e entidades coordenadoras do processo de planejamento de recursos hídricos no Brasil

Fonte: Lanna, Pereira e Leite (2002, p. 110).

Em uma mesma bacia hidrográfica podem coexistir diversas escalas de planos de recursos hídricos, a exemplo do caso da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHRSF). O Plano Nacional de Recursos Hídricos e os Planos Estaduais de Recursos Hídricos, respectivamente, trazem diretrizes específicas à bacia interestadual e às sub-bacias estaduais do Rio São Francisco. Essas diretrizes devem ser observadas pelos planos de recursos hídricos da bacia hidrográfica interestadual e pelas unidades de gerenciamento de recursos hídricos estaduais. A BHRSF está sob a tutela do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (federal) e da Agência Peixe Vivo, que elaboraram o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016 a 2025¹. Em paralelo, funcionam os CBHs estaduais, compostos por sub-bacias da BHRSF, como é caso do CBH Velhas, que foi instituído pelo estado de Minas Gerais e organizou o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio das Velhas².

3.1.1 Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH)

O primeiro Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) foi aprovado em 2006 pela Res. CNRH nº 58, de 30 de janeiro de 2006, com vigência até 2020 e revisões periódicas a cada quatro anos, doravante denominado PNRH 2006-2020. Desde a sua concepção foram realizadas duas revisões que estabeleceram as prioridades para os ciclos 2012-2015 e 2016-2020. A Res. CNRH nº 216, de 11 de setembro de 2020, postergou a vigência desse último ciclo de implementação para dezembro de 2021.

A Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (SNSH), vinculada ao MDR, com apoio técnico da ANA e em articulação com o CNRH, tem debatido o novo Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH 2022-2040), cuja função é orientar a elaboração dos Planos Plurianuais (PPAs) federal, estaduais ou distrital e seus respectivos orçamentos anuais. A estrutura do PNRH 2006-2020 é composta por quatro volumes: *i*) Panorama e estado dos Recursos Hídricos do Brasil (v. 1), que trata do diagnóstico das águas; *ii*) Águas para o futuro: cenários para 2020 (v. 2), que traça os cenários de referência para o planejamento; *iii*) Diretrizes (v. 3);

e *iv*) os Programas Nacionais e Metas (v. 4) (art. 1º Res. CNRH nº 58/2006).

Em paralelo ao PNRH 2006-2020, a ANA elabora, anualmente, o relatório denominado *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*. Esse relatório serve como subsídio para diversas ações governamentais que incluem o acompanhamento do PNRH 2006-2020, o monitoramento do Plano Plurianual do governo federal e as análises do Sistema de Contas Econômicas Ambientais da Água. O referido Relatório sintetiza os principais dados sobre águas no país, contudo, a disponibilidade de informações sobre águas subterrâneas é reduzida quando comparada à das águas superficiais.

O PNRH 2006-2020 possui diversos programas e subprogramas que são discriminados em seu volume 4. Ao todo, são previstos sete programas nacionais e seis regionais. Os programas nacionais são: Programa I – Estudos Estratégicos de Recursos Hídricos; Programa II – Programa de Desenvolvimento Institucional da GIRH no Brasil; Programa III – Desenvolvimento e Implementação de Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos; Programa IV – Desenvolvimento Tecnológico, Capacitação, Comunicação e Difusão de Informações em GIRH; Programa V – Programa de Articulação Intersetorial, Interinstitucional e Intrainstitucional da Gestão de Recursos Hídricos; Programa VI – Programa de Usos Múltiplos e Gestão Integrada de Recursos Hídricos; e Programa VII – Programas Setoriais voltados aos Recursos Hídricos. As águas subterrâneas são contempladas nos subprogramas e ações prioritárias desses programas, bem como fazem parte do Programa Nacional de Águas Subterrâneas (Programa VIII) que, embora tenha abrangência nacional e transfronteiriça, foi incluído no componente de programas regionais de recursos hídricos. O Programa VIII foi dividido em três subprogramas: *i*) Ampliação do Conhecimento Hidrogeológico Básico; *ii*) Desenvolvimento dos Aspectos Institucionais e Legais; e *iii*) Capacitação, Comunicação e Mobilização Social (CARDOSO, 2009).

O Quadro 4 apresenta as ações consideradas prioritárias para cada região hidrográfica.

1. O plano está disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/plano-de-recursos-hidricos-da-bacia-hidrografica-do-rio-sao-francisco/>.

2. O plano está disponível em: <https://cbhvelhas.org.br/plano-diretor-cbh-velhas/>.

Região Hidrográfica e Estados	Ações prioritárias às Regiões Hidrográficas previstas no Programa de Águas Subterrâneas
Região Hidrográfica do Uruguai (RS e SC)	<ul style="list-style-type: none"> – Implantação dos Planos de Bacia, enquadramento e cobrança; – programas de revitalização de bacias e conservação do solo; – rede de monitoramento hidrometeorológico; – cadastramento de usuários.
Região Hidrográfica do Tocantins – Araguaia (GO, MT, TO, MA, PA e DF)	<ul style="list-style-type: none"> – Implantação/incremento do Siagas nos estados; – programa de gestão de AS para os aquíferos transfronteiriços; – expansão e consolidação da rede de monitoramento de AS; – critérios de outorga de águas subterrâneas; – implementação e divulgação da Rimas e ampliação da rede de monitoramento de qualidade e quantidade de AS; – cadastramento dos usuários de AS; – elaboração e divulgação dos mapas hidrogeológicos estaduais; – estabelecimento de convênios e termos de cooperação técnica; – projetos de proteção de áreas de recarga de aquíferos; – revisão da política sobre água mineral e recursos hídricos; – desenvolvimento de estudos sobre águas termais.
Região Hidrográfica do Paraguai (MT e MS)	<ul style="list-style-type: none"> – Ampliação da rede de monitoramento da qualidade das AS; – desenvolvimento de mapas hidrogeológicos; – estabelecimento de convênio e termo de cooperação; – projetos de proteção de áreas de recarga de aquíferos; – cadastramento dos usuários de águas subterrâneas; – desenvolvimento do inventário de AS; – uniformização das normas de gestão de águas subterrâneas; – implantação da outorga de águas subterrâneas; – estudos de AS, priorizando o aquífero pantanal; – campanhas de adequação técnica das obras de captação de AS.
Região Hidrográfica do Atlântico Oriental (AL, CE, PB, PE e RN)	<ul style="list-style-type: none"> – Incentivo à elaboração da legislação específica das AS; – avaliação das reservas, potencialidade e disponibilidade das AS; – monitoramento de AS e suas áreas de proteção; – estudos de vulnerabilidade de aquíferos; – desenvolvimento de tecnologias de dessalinização de AS; – capacitação de pessoal para gestão das obras hídricas subterrâneas; – promoção da gestão compartilhada dos aquíferos; – estudos de capacidade de suporte (quantidade e qualidade) das AS; – articulação da gestão hídrica com os planos de uso e ocupação do solo; – regulação do uso da água na agricultura, pecuária e carnicultura.
Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste (ES, RJ, SP, MG e PR)	<ul style="list-style-type: none"> – Desenvolvimento de estudos para implementação de rede de monitoramento das águas subterrâneas na bacia do Ribeira.
Região Hidrográfica do Atlântico Sul (SC, RS, PR e SP)	<ul style="list-style-type: none"> – Execução dos planos, programas e ações propostos no Projeto Aquífero Guarani; – zoneamento do uso do solo e avaliação da sua interferência nos principais aquíferos (Serra Geral, Alto Tietê, Guarani e sedimentares costeiros); – implantação de rede de monitoramento estadual; – sistemas de informação para mananciais subterrâneos.
Região Hidrográfica Amazônica (AC, AM, AP, MT, PA, RO e RR)	<ul style="list-style-type: none"> – Implantação e ampliação da rede integrada de monitoramento de AS; – diretrizes e medidas contra a supereexploração e contaminação de AS; – desenvolvimento de mapas hidrogeológicos estaduais; – estabelecimento de convênios e termos de cooperação técnica; – promoção de programas de capacitação para perfuradores de poços rasos.

Região Hidrográfica e Estados	Ações prioritárias às Regiões Hidrográficas previstas no Programa de Águas Subterrâneas
Região Hidrográfica Atlântico Leste (BA, SE, MG e ES)	<ul style="list-style-type: none"> – Cadastramento de poços e integração dos bancos de dados; – realização e ampliação de estudos hidrogeológicos; – estudos de disponibilidade de AS; – criação de redes de monitoramento da AS e fortalecimento da fiscalização; – identificação, mapeamento e divulgação das fontes de degradação das AS; – estratégias para uso sustentável da AS; – criação de sistemas de suporte à decisão para auxiliar o planejamento e a gestão de AS; – capacitação de profissionais na área de perfuração e operacionalização de poços tubulares profundos e na medição de vazão de córregos e rios; – fortalecimento da gestão de AS; – fiscalização de poços e realização de campanhas de educação e conscientização.
Região Hidrográfica Atlântico Oeste (MA e PA)	<ul style="list-style-type: none"> – Intercâmbio com países experientes na gestão de AS; – diretrizes para regulamentação e definição de áreas de recarga; – estudos de viabilidade para implantação da cobrança de AS; – programas de capacitação no uso, conservação e gestão das AS.
Região Hidrográfica do Paraná (DF, GO, MG, MS, PR, SC e SP)	<ul style="list-style-type: none"> – Diretrizes e medidas contra superexplotação e contaminação das AS; – zoneamento de áreas potenciais de restrição e controle de AS; – rede de monitoramento de AS e sua articulação com os estados; – ampliação do conhecimento hidrogeológico: a) aquíferos transfronteiriços e interestaduais; b) estudos de escala local; e c) monitoramento quali-quantitativo das águas subterrâneas.
Região Hidrográfica do São Francisco (AL, BA, DF, GO, MG, PE e SE)	<ul style="list-style-type: none"> – Estudos sobre as potencialidades, disponibilidades, demandas e vulnerabilidades dos aquíferos; – base de dados de poços; – ampliação da rede de monitoramento quali-quantitativo de AS; – elaboração do Atlas das AS da Bacia do Rio São Francisco; – construção de sistema de suporte à decisão para auxiliar na gestão das AS; – cadastramento de usuários; – estudos para recuperação e remediação de aquíferos; – estudos para definição de critérios para a recarga artificial de aquíferos; – enquadramento de AS em classes de uso; – capacitação de pessoal para gerir, monitorar e fiscalizar as; – estudos de viabilidade para implantação da cobrança pelo uso das AS; – definição das áreas de perímetros de proteção de recarga; – estudos para definir as distâncias de interferência entre os poços.
Região Hidrográfica do Parnaíba (MA, PI e CE)	<ul style="list-style-type: none"> – Programas voltados ao uso e conhecimento das reservas explotáveis; – programa para o controle e uso racional de AS e proteção das zonas de recarga; – estudos para proteção e exploração sustentável dos aquíferos.

Quadro 4 – Ações prioritárias às Regiões Hidrográficas previstas no Programa Nacional de Águas Subterrâneas

Fonte: BRASIL (2011, p. 58 a 120).

Essas ações estão entre as prioridades e metas previstas pelo PNRH 2006-2020, relacionadas às águas subterrâneas, que atuam tanto nos cenários nacional e regional como em bacias específicas. Há recomendação para que várias dessas ações sejam continuadas no PNRH 2022-2040. A ampliação da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS) em 100% era uma das metas nacionais, mas não foi atingida por limitações orçamentárias. Apesar disso, a Rede foi ampliada de 369 para 409 poços (MDR, s.d.). Parte desses poços de monitoramento passou a ser operado conjuntamente entre o SGB-CPRM e a ANA, com inclusão desses dados piezométricos na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), o que contribuiu para promover a gestão inte-

grada das águas superficiais e subterrâneas, permitindo análises da relação aquífero e rio, como foi o caso do Sistema Aquífero Urucuia e do Rio São Francisco.

A elaboração de estudos sobre os aquíferos da Região Amazônica foi uma das metas regionais atingidas e que deu origem à execução do projeto *Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (Escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (Escala 1:50.000)* (ANA, 2015). São exemplos de iniciativas nas bacias federais a implantação do projeto *Estudos para a Implementação da Gestão Integrada de Águas Superficiais e Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Sub-Bacias dos Rios Verde Grande*

e Carinhanha (BA/MG), com término previsto para meados de 2023, numa parceria entre ANA e SGB-CPRM. Pode-se citar, também, o levantamento de dados técnicos sobre as águas subterrâneas nas bacias do rio Verde Grande e do Paranapanema, executados pela ANA (MDR, s.d.).

3.1.2 Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH)

Os Planos Estaduais de Recursos Hídricos (PERHs) têm jurisdição circunscrita ao âmbito de cada Estado-Membro e do Distrito Federal, cabendo-lhes retratar a situação dos recursos hídricos de domínio estadual. Seu principal objetivo é nortear a gestão das águas por meio de diretrizes e critérios em escala estadual, de forma a contemplar as necessidades expressas nos planos de bacia. Sua elaboração, atualização e implementação são de competência dos órgãos que integram os Sistemas Estaduais de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, conforme previsto pela legislação estadual.

Cada estado, com base na sua Política Estadual de Recursos Hídricos, estabelece as diretrizes e critérios para a elaboração do PERH, contemplando os seguintes aspectos:

- diretrizes, objetivos, critérios e metas da gestão hídrica estadual;
- prioridades financeiras no fomento a programas regionais para o gerenciamento dos recursos hídricos;
- estratégias para a coordenação de questões interbacias;
- diagnóstico e monitoramento da situação macro dos recursos hídricos no estado (disponibilidade, qualidade, demanda, usos e conflitos);
- programas, projetos e ações estaduais para os recursos hídricos;
- diretrizes para aplicação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos no âmbito das bacias hidrográficas estaduais.

Devido ao domínio estadual das águas subterrâneas, os PERHs são peças-chave no estímulo à gestão dos aquíferos. Dentre as informações a serem contempladas por esse instrumento, incluem-se: dados sobre a disponibilidade, demanda e qualidade das águas subterrâneas; propositura de áreas para a exploração dessas águas ou de medidas protetivas, tais como áreas de restrição ao uso das águas subterrâneas; identificação de pontos prioritários para o seu monitoramento; estímulo aos mecanismos de coordenação entre os CBHs que compartilham um mesmo

aquéfero; definição de programas estaduais específicos para as águas subterrâneas, etc. (VILLAR; HIRATA, 2022).

3.1.3 Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas

Como o nome indica, esse instrumento tem a bacia hidrográfica como unidade territorial. Trata-se do principal instrumento de gestão previsto pelas políticas de recursos hídricos, sendo aplicado para pequenas, médias e grandes bacias hidrográficas. Também é chamado de *Plano Diretor de Água*, *Plano Diretor de Recursos Hídricos*, *Plano Integrado de Recursos Hídricos* e *Plano de Bacia Hidrográfica*, cuja denominação passou a ser comum a partir da implementação das Políticas Estaduais de Recursos Hídricos (PERH) que iniciaram em 1991 (SÃO PAULO, 1991), e da edição da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

O Plano de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas é assim definido no art. 2º da Resolução nº 145, de 12 de dezembro de 2012:

[...] instrumentos de gestão de recursos hídricos de longo prazo, previstos na Lei nº 9.433, de 1997, com horizonte de planejamento compatível com o período de implantação de seus programas e projetos, que visam fundamentar e orientar a implementação das Políticas Nacional, Estaduais e Distrital de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos no âmbito das respectivas bacias hidrográficas.

O documento estabelece o planejamento estratégico da gestão hídrica, com previsão legal e regulamentação amparadas na Lei nº 9.433/1997 e em diversas Resoluções do CNRH, especialmente nos artigos 10 a 13 da Res. CNRH nº 145/2012, que estabelecem suas etapas e conteúdo mínimo: *i) Diagnóstico de Situação dos Recursos Hídricos*; *ii) Prognóstico*; e *iii) Plano de Ação* (Figura 35). Os planos de bacias hidrográficas devem contemplar as diretrizes dos outros planos de recursos hídricos (nacional, estaduais ou outros planos de bacia hidrográfica que eventualmente se sobreponham).

O Plano de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas deve conter o programa de ação plurianual, cujo período normalmente é de 12 anos. O documento estabelece o programa de investimento (curto, médio e longo prazos), e contém: denominação da ação planejada; linhas programáticas do colegiado gestor; meta estabelecida; prazo (ano) de execução; área de abrangência da ação; prioridade de execução; previsão de responsável pela execução; executor da ação; custo estimado para a ação; e fontes dos recursos financeiros necessários.



Figura 35 – Diretrizes para elaboração de Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas

Fonte: CNRH (Res. nº 145/ 2012).

3.1.4 Conteúdo dos Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas

O roteiro metodológico para elaboração de um Plano de Recursos Hídricos se dá pela definição do método de trabalho, das atividades, dos resultados e dos produtos a serem gerados. Esses pontos são inclusos em um *Termo de Referência*, definido a partir da articulação entre a entidade gestora de recursos hídricos e o Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH), conforme as especificidades da bacia. Tais produtos são elaborados sequencialmente, de acordo com as etapas de *diagnóstico, prognóstico e plano de ação*. Cada uma dessas etapa deve contemplar os conteúdos apresentados na Figura 35, estabelecendo metas (de curto, médio e longo prazos) e ações para sua implementação, conforme preconiza a Res. CNRH nº 145/2012.

A etapa do *Diagnóstico* caracteriza a situação dos recursos hídricos, baseada prioritariamente em dados e informações disponíveis (dados secundários), sem prejuízo da possibilidade de usar dados primários (vide art. 11 da Res. CNRH nº 145/2012). Importante esclarecer que a Res. CNRH nº 145/2012 apresenta a estrutura mínima dos planos, porém, no âmbito da competência concorrente e comum, os estados podem incorporar elementos adicionais, como no caso do estado de São Paulo. O diagnóstico estabelece o quadro geral de referência da unidade de estudo e constitui a base para identificação de aspectos críticos à gestão, bem como subsidia o desenvolvimento das atividades subsequentes.

O art. 12 da Res. CNRH nº 145/2012 define o conteúdo mínimo da etapa do *Prognóstico*, que comprehende a caracterização de cenários a serem construídos com base em aspectos vinculados, direta e indiretamente, à situação dos recursos hídricos, conforme os horizontes de planejamento adotados (Figura 35). Dessa forma, é possível priorizar as intervenções para a melhoria das condições dos recursos hídricos.

Por fim, tem-se o *Plano de Ações* que, segundo o art. 13 da Res. CNRH nº 145/2012, visa a “mitigar, minimizar e se antecipar aos problemas relacionados aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos”, com vistas a atender as diretrizes e princípios, bem como atingir objetivos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos.

3.1.4.1 Diagnóstico e Prognóstico de um Plano de Bacia no estado de São Paulo

Os estados podem regulamentar o conteúdo dos seus planos de bacia hidrográfica desde que observem as diretrizes nacionais, podendo, inclusive, estabelecer exigências adicionais em decorrência da realidade regional. No caso do estado de São Paulo, o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH) editou a Deliberação CRH nº 146/2012, que estabelece as orientações para elaboração dos planos de bacias hidrográficas, determinando o conteúdo mínimo das etapas de *Diagnóstico e Prognóstico*. O *Diagnóstico* deve conter, no mínimo, os seguintes tópicos:

- Caracterização Geral da Bacia
- Caracterização Física
- Disponibilidade de Recursos Hídricos
- Demanda por Recursos Hídricos
- Balanço: Demanda *versus* Disponibilidade
- Qualidade das Águas
- Saneamento Básico
- Abastecimento de Água Potável
- Esgotamento Sanitário
- Manejo de Resíduos Sólidos
- Drenagem e Manejo de Águas Pluviais
- Gestão do Território e de Áreas Sujeitas a Gerençamento Especial
- Uso e Ocupação do Solo
- Remanescentes de Vegetação Natural e Áreas Protegidas
- Áreas Suscetíveis à Erosão, Voçoroca, Escorregamento e Assoreamento.
- Áreas Suscetíveis à Enchente, Inundação ou Alagamento
- Poluição Ambiental
- Avaliação do Plano de Bacia Hidrográfica
- Síntese do Diagnóstico

No conteúdo proposto pelo CRH foram incluídos aspectos que visam a avaliar o Plano de Bacia Hidrográfica existente e sua implementação pela unidade de gestão hidrológica, bem como solicitou-se uma síntese do

diagnóstico efetuado. Esses elementos são importantes para consubstanciar o quadro atual de planejamento e sua implementação na unidade de gestão, o que possibilita revisões, redirecionamentos e aprimoramento do planejamento com vistas ao seguimento das ações a serem desenvolvidas subsequentemente.

A Deliberação CRH nº 146/2012 também estabelece procedimentos detalhados à etapa do *Prognóstico*. O objetivo é estabelecer o estado da arte do conhecimento acerca de instrumentos de planejamento existentes e em implementação (planos, programas, projetos, ações e empreendimentos, etc.), vinculados direta e indiretamente aos aspectos de interesse à gestão e ao gerenciamento dos recursos hídricos (superficiais, subterrâneos ou costeiros), nas três esferas de governo (federal, estadual e municipal). Ainda de acordo com Deliberação CRH nº 146/2012, a etapa de *Prognóstico* deverá conter, no mínimo, os seguintes tópicos:

- I. Planos, Programas, Projetos e Empreendimentos com Incidência na UGRHI
- II. Cenário de Planejamento:
 - 1 Dinâmica socioeconômica
 - 2 Demandas por recursos hídricos
 - 3 Disponibilidade de recursos hídricos
 - 4 Balanço: demanda *versus* disponibilidade
 - 5 Qualidade das águas
 - 6 Saneamento básico:
 - 6.1 Abastecimento de água potável
 - 6.2 Esgotamento sanitário
 - 6.3 Manejo de resíduos sólidos
 - 6.4 Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas
- III. Gestão dos Recursos Hídricos da UGRHI:
 - 1 Legislação pertinente aos recursos hídricos
 - 2 Outorga de uso dos recursos hídricos
 - 3 Licenciamento ambiental
 - 4 Cobrança pelo uso dos recursos hídricos
 - 5 Enquadramento dos corpos d'água
 - 6 Monitoramento quali-quantitativo dos recursos hídricos
 - 7 Sistema de informações sobre recursos hídricos

IV. Áreas Críticas e Prioridades para Gestão dos Recursos Hídricos:

- 1 Delimitação de áreas críticas à gestão dos recursos hídricos
- 2 Estabelecimento de prioridades à gestão dos recursos hídricos

V. Propostas de Intervenção para Gestão dos Recursos Hídricos da UGRHI

As etapas de *Diagnóstico* e de *Prognóstico* permitem construir cenários e identificar áreas críticas à gestão dos recursos hídricos, bem como aprimorar a sinergia de ações, independentemente da responsabilidade pela execução, a fim de integrar um plano de ação para a unidade hidrológica.

3.1.5 Conteúdo mínimo sobre Águas Subterrâneas nos Planos de Recursos Hídricos

As Resoluções CNRH nº 15/2001, 22/2002, 92/2008, 145/2012 e 202/2018 estabelecem as diretrizes para inclusão das águas subterrâneas nos Planos de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas. A Figura 36 demonstra o conteúdo mínimo que deve ser incluído nos planos de bacia em relação às águas subterrâneas.

O plano de recursos hídricos deve adotar uma visão holística, integrando as águas subterrâneas, superficiais e atmosféricas. A inclusão das águas subterrâneas nesse instrumento exige procedimentos metodológicos que promovam o conhecimento e a caracterização dos aspectos físicos (natureza do meio, arquitetura das unidades componentes, distribuição espacial, interconexões hidráulicas entre unidades adjacentes, padrões de fluxos, parametrização hidrodinâmica, reservas, dentre outros); das propriedades químicas (qualidade da água, contaminações, vulnerabilidade à poluição, dentre outros); e dos aspectos socioambientais regionais (demanda, tipos de uso, ocupação do solo, marcos regulatórios, dentre outros). Além disso, devem estabelecer diretrizes para a sua gestão integrada, considerando a dimensão ambiental e social da água, bem como buscar formas de garantir uso sustentável, proteção, prevenção, remediação ou mitigação de situações de risco, tais como a superexploração e a contaminação. O Brasil necessita de estudos que avaliem se os planos de bacia incorporaram as exigências previstas pelas Resoluções CNRH para águas subterrâneas.

Conteúdo mínimo dos Planos de Bacia para as Águas Subterrâneas (AS)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Caracterização espacial. ➤ Cômputo das AS no balanço hídrico. ➤ Estimativa das recargas e descargas e das reservas explotáveis. ➤ Caracterização físico, química e biológica das AS. ➤ Medidas de uso e proteção de aquíferos.
Monitoramento da quantidade e qualidade, com resultados apresentados em mapas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rede de monitoramento dos níveis d'água dos aquíferos e sua qualidade. ➤ Densidade dos pontos de monitoramento. ➤ Frequência de monitoramento dos parâmetros.
Ações potencialmente impactantes e proteção ou mitigação, incluindo medidas emergenciais	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Descrição e previsão da estimativa de pressões socioeconômicas e ambientais sobre a disponibilidade. ➤ Estimativa das fontes pontuais e difusas de poluição. ➤ Avaliação das características e usos do solo. ➤ Análise de outros impactos da atividade humana relacionadas às AS.
Delimitação das áreas de recarga de aquíferos e definição das zonas de proteção	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Áreas de Proteção Máxima ➤ Perímetros de Proteção de Poços ➤ Áreas de restrição e controle de uso de AS <ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilidade de RH considerando a descarga de base dos rios. ▪ Risco de instabilidade geotécnica e o uso e ocupação do solo ▪ Sustentabilidade da exploração em áreas costeiras
Avaliações hidrológicas integradas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Delimitação das áreas de recarga e de contribuição dos aquíferos para os rios diretamente conectados ➤ Contribuição dos aquíferos para a vazão de base dos rios ➤ Recarga e reservas explotáveis e renováveis ➤ Disponibilidade hídrica integrada subterrânea e superficial para os diversos uso

Figura 36 – As águas subterrâneas nos planos de bacia, com base nas Resoluções CNRH

Fonte: CNRH (Resoluções nº 15/2001, 22/2002, 92/2008, 145/2012 e 202/2018).

Os planos de bacia precisam incorporar análise detalhada dos aquíferos e de sua relação com os recursos hídricos superficiais. Sem esses dados, a extração desordenada das águas subterrâneas pode comprometer o fluxo de base dos rios, reduzindo a disponibilidade dos corpos superficiais e gerando prejuízos ao ambiente e aos usuários. Os planos de

bacias interestaduais têm buscado construir essa abordagem por meio dos Planos Integrados de Recursos Hídricos (PIRH), contudo, ainda há longo caminho a ser percorrido diante da falta de dados ou problemas relacionados à implementação dos instrumentos de gestão. O Box 13 discorre sobre essa experiência na Bacia do Paranapanema.

Box 13 – Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH) da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema (PIRH Paranapanema)

Malva Andrea Mancuso

O Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH) da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema (PIRH Paranapanema) é um instrumento de planejamento e de gestão fortemente pactuado e de integração, desenvolvido com o principal objetivo de permitir a gestão efetiva dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos em benefício das gerações presentes e futuras (ANA, 2016).

Foi necessário um consistente arranjo institucional para consolidar a visão integradora que norteou a elaboração do PIRH Paranapanema e as diretrizes dos Instrumentos de Gestão que respeitam as dominialidades e os contextos sociopolíticos, bem como as especificidades da legislação vigente dos estados de São Paulo, Paraná e da União. O Plano apresenta, nesse sentido e quando necessário, abordagens distintas para as instâncias federal e estaduais. A ANA foi a responsável por sua elaboração e, para tanto, contou com o acompanhamento dos órgãos gestores estaduais: Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE/SP), Águas Paraná, CBH-Paranapanema (com os comitês das unidades estaduais de gestão) e com o apoio da empresa de consultoria Profill Engenharia e Ambiente Ltda, que executou os estudos e relatórios técnicos. O acompanhamento da elaboração do Plano teve a coordenação do Grupo de Trabalho (GT-Plano) e das Câmaras Técnicas de Integração (CTIPA) e Institucional e Legal (CTIL) (ANA, 2016).

O PIRH Paranapanema foi concluído em 2016 e busca constituir elementos para a gestão dos usos múltiplos da água, considerando as metas a serem alcançadas e integradas com a conservação dos recursos hídricos existentes. De acordo com o *Diagnóstico*, não há problemas generalizados quanto aos recursos hídricos, mas, em termos de quantidade foram indicados déficits relacionados à irrigação (principal usuário). Em relação à qualidade das águas superficiais, a vertente paranaense apresenta maior ocorrência de trechos com piores padrões de qualidade (classes 3 e 4) em relação aos usos da água. Tal situação está configurada pelos menores índices de coleta de esgoto em relação ao estado de São Paulo (ANA, 2016).

A Bacia do Paranapanema possui elevado potencial hídrico subterrâneo, ainda não explorado, porém, foram indicadas ações específicas diante da necessidade de superar várias lacunas de conhecimento. Entre as ações estão a realização de estudos para identificar áreas com potencial hídrico subterrâneo a partir do mapeamento de áreas críticas, assim como para definir as condições de exploração dos aquíferos. Indicam-se, nesse sentido, ações para ampliar e consolidar a rede de monitoramento de dados qualitativos subterrâneos. Uma das metas dos estudos sobre as águas subterrâneas é o refinamento da informação sobre a disponibilidade (integrada às águas superficiais) e sobre as demandas por meio da ampliação do cadastro de poços. A necessidade de concepção e proposição de incentivos à utilização dos mananciais subterrâneos, em caso de disponibilidade, para atender as demandas hídricas atuais ou projetadas, está presente em ação específica. O *Diagnóstico* também apontou a necessidade localizada da criação de Unidades de Conservação (UCs) e atenção especial ao controle da erosão em áreas urbanas e periurbanas e à conservação dos solos em áreas rurais (ANA, 2016).

Como *Prognóstico* dos Recursos Hídricos foram apresentados três cenários, sendo um deles tendencial e dois alternativos (acelerado e estagnado). Os cenários permitiram inferir que, caso não ocorram intervenções de melhoria e controle, problemas ou situações existentes podem gerar ou agravar conflitos, tanto em aspectos quantitativos como qualitativos (ANA, 2016).

A estratégia proposta para atingir a sustentabilidade hídrica do sistema, e que embasou o *Plano de Ações*, foi estruturada em três linhas de ação: Aumento da Disponibilidade Hídrica; Regulação sobre as Demandas Hídricas; e Regulação das Cargas Poluidoras (ANA, 2016).

Em relação aos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos, para o seu enquadramento foram determinadas diretrizes às águas superficiais de domínio da União e recomendações gerais às águas superficiais de domínio dos estados, contudo, não há recomendação às águas subterrâneas. Entre as diretrizes para a Outorga, destaca-se a unificação da vazão de referência para a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRH) Paranapanema e, em relação à Cobrança, foram contempladas diretrizes

e recomendações comuns aos corpos de água dos domínios dos estados e da União. Além disso, foi proposta a implantação progressiva da Agência de Água (ANA, 2016).

Os Programas (12 ao todo, com 37 subprogramas) e Ações (123 ao todo) estruturam seus eixos em dois componentes: a) Gestão de Recursos Hídricos; e b) Intervenções e Articulações com Planejamento Setorial. Seu foco é a gestão integrada e participativa da oferta e da demanda hídrica (considerando aspectos quantitativos e qualitativos dos mananciais superficiais e subterrâneos). O orçamento previu recursos a serem investidos em 20 anos (ANA, 2016). O PIRH Paranapanema teve como principal legado aglutinar os esforços das instituições e atores que atuavam direta ou indiretamente na gestão de recursos hídricos da UGRH Paranapanema, definindo objetivos comuns e tecnicamente balizados, e fortalecendo a premissa de que a gestão de recursos hídricos deve ser marcada pela integração dos diversos entes e comitês (ANA, 2016).

3.1.6 Instrumentos de gestão específicos para as águas subterrâneas

A Resolução Conama nº 396/2008 determina que os órgãos ambientais, em conjunto com os órgãos gestores de recursos hídricos, estabeleçam Áreas de Proteção de Aquíferos, Perímetros de Proteção de Poços de Abastecimento e Áreas de Restrição e Controle do Uso das Águas Subterrâneas (arts. 20 e 21). A Res. CNRH 22/2002, por sua vez, afirma que os Planos de Bacia devem prever medidas de uso e proteção dos aquíferos (art. 3º, inc. VI), enquanto a Res. CNRH nº 92/2008 prevê a definição de zonas de proteção de aquíferos, áreas de restrição e controle, e perímetros de proteção de poços com base em estudos hidrogeológicos (art. 2º, incs. I, II e III).

As Áreas de Proteção de Aquíferos (APA) se destinam a proteger as zonas de recarga das águas subterrâneas, porém, como pressupõem restrições ao uso e ocupação do solo, o instrumento não foi utilizado, inclusive se indaga se este poderia ser aplicado sem o apoio dos municípios, que detêm a competência exclusiva para o ordenamento territorial municipal.

Os Perímetros de Proteção de Poços (PPP) se destinam a proteger a captação de águas subterrâneas e foram regulamentados por vários Estados. A legislação mineral obriga que as águas classificadas como minerais ou potáveis de mesa estabeleçam áreas ou perímetros de proteção, conforme estabelecido nos arts. 12 e 13 do Código de Águas Minerais e na Portaria DNPM nº 231/1998. Os PPPs são explicados no Box 14.

As Áreas de Restrição e Controle (ARCs) são medidas de caráter excepcional e temporário, que visam a restringir o uso ou a captação da água em situações em que há o comprometimento da sua qualidade ou quantidade. As áreas de restrição ao uso das águas subterrâneas podem ser utilizadas com base nos seguintes critérios: densidade de poços de captação; número de empreendimentos potencialmente poluidores; criticidade da disponibilidade hídrica subterrânea; ocorrência de alteração da qualidade natural; e presença de áreas contaminadas. O Box 15 apresenta o caso da ARC de uso de águas subterrâneas de Ribeirão Preto-SP.

Box 14 – Perímetros de Proteção de Poços (PPP)

Mara Akie Iritani

A experiência de outros países, especialmente da Europa, mostra que o estabelecimento de uma área de proteção no entorno dos poços de abastecimento público, principalmente aqueles localizados em aquíferos livres, é uma estratégia eficiente para minimizar o perigo de contaminação da água subterrânea fornecida à população (NAVARRETE; GARCÍA, 2003).

O conceito de Perímetros de Proteção de Poços (PPP) é baseado no controle das atividades potencialmente contaminantes e na aplicação de restrições ao uso do solo no entorno do poço, onde ocorre a área de recarga do aquífero. As medidas com maior nível de restrição são aplicadas nas zonas delimitadas pelos perímetros mais internos, localizados mais próximos à captação (Figura 37). Em alguns casos, o PPP pode ter como objetivo não somente a proteção da qualidade, mas, também, da quantidade de água, de forma a garantir a sustentabilidade da reserva destinada ao abastecimento da população (NAVARRETE; GARCÍA, 2001).

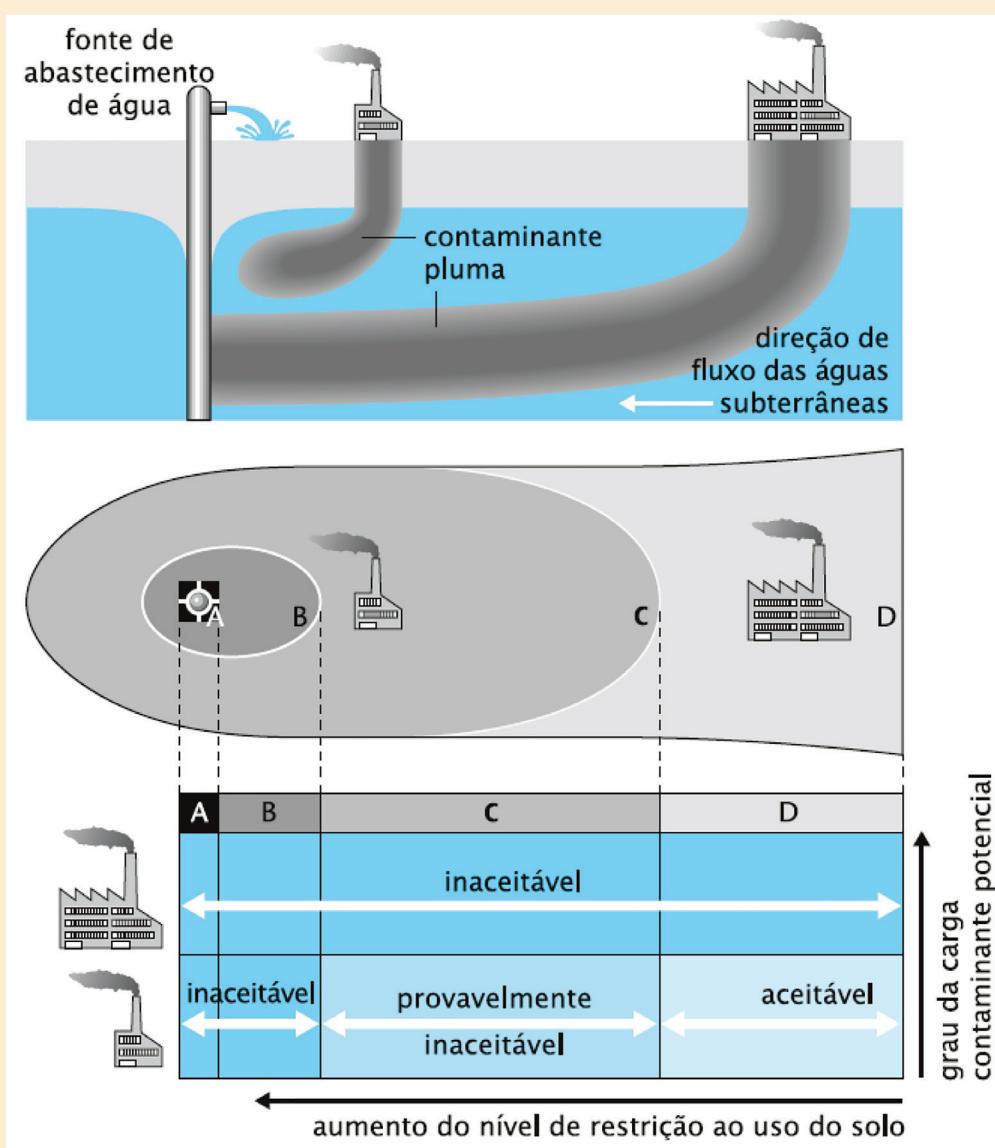


Figura 37 – Conceito de Perímetro de Proteção de Poços

Fonte: Foster et al. (2006, p. 9).

Os PPPs são estabelecidos na Zona de Contribuição (ZC) do poço, e levam em consideração os contaminantes não conservativos (sofrem degradação ao longo do tempo) e os contaminantes conservativos (não há degradação, e a diminuição da concentração se dá, principalmente, pela diluição ao longo do fluxo subterrâneo) (FOSTER et al. 2002).

A ZC é a área onde ocorre a recarga do aquífero e o fluxo da água subterrânea converge para o poço (Figura 38A). Sua extensão depende das características do aquífero (permeabilidade, porosidade, espessura e recarga) e das condições construtivas e operacionais do poço (profundidade de penetração no aquífero, vazão e tempo de funcionamento). A delimitação dos perímetros de proteção pode ser baseada em diferentes critérios, tais como: a) distância longitudinal a partir do poço; e b) tempo percorrido pela água no aquífero até atingir o poço (denominado de *tempo de trânsito*). Os pontos com um mesmo tempo de trânsito da água no aquífero desenham uma isócrona, que é utilizada para a delimitação do perímetro de proteção. A zona interna à isócrona é denominada de *Zona de Transporte* (Figura 38B).

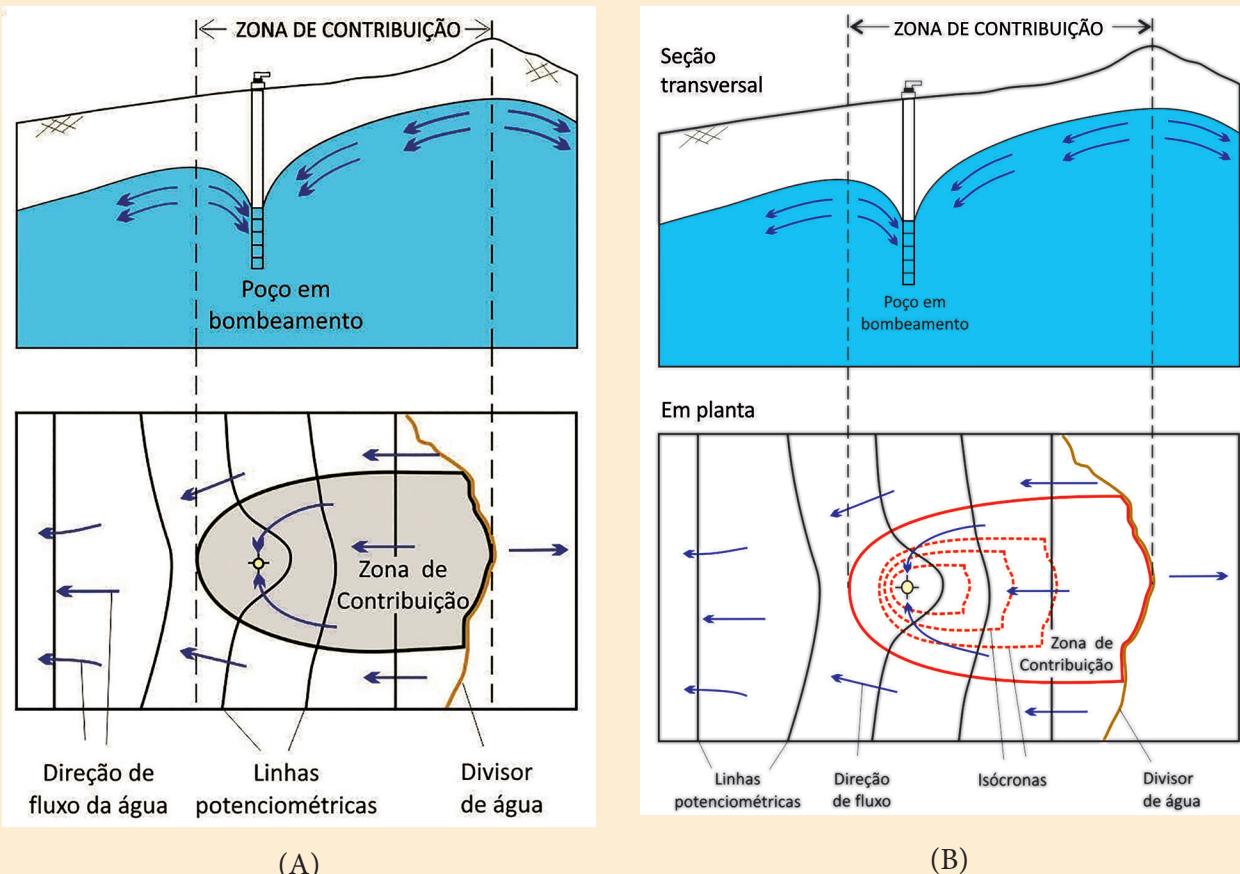


Figura 38 – Zona de contribuição e zona de transporte de um poço em aquífero livre

Fonte: Iritani e Ezaki (2012, p. 3 e 5).

Esses critérios podem ser associados às feições hidrogeológicas que afetam o fluxo da água no aquífero, tais como a presença de um divisor de águas, falhas ou contatos entre formações geológicas e outros.

Há vários métodos para delimitar os perímetros de proteção, que podem ser encontrados em USEPA (1987, 1994), Navarrete e García (2003), Strobl e Robillard (2005), Environmental Agency (2019) e Liu, Weisbrod e Yakirevich (2019). O método a ser adotado deve considerar a complexidade do aquífero, as características construtivas e de exploração do poço, as interferências hidráulicas e o uso do solo. Essa escolha depende, também, da quantidade e da qualidade dos dados existentes, da importância da captação para o abastecimento da população atendida e dos recursos financeiros disponíveis.

A identificação da ZC pode ser dificultada e, consequentemente, agregar maior incerteza à delimitação dos PPPs devido à presença de complexidades (FOSTER; SKINNER, 1995; FRANKE et al., 1998; PARIS et al., 2019), tais como: a) aquíferos sedimentares multicamadas, fraturados ou cársticos; e b) áreas com interferência de poços ou influência de corpos hídricos superficiais. Nessas situações, a modelagem numérica apresenta melhor precisão (GÁRFIAS; EXPÓSITO; LLANOS, 2008; CARVALHO; HIRATA, 2012), porém, implica maior custo, tempo e dados necessários à sua aplicação. Deve-se considerar, também, o objetivo do PPP a ser estabelecido. Por exemplo, para pequenos tempos de trânsito, as incertezas associadas aos métodos mais simplificados podem ser aceitáveis, pois o perímetro abrange área pouco extensa e o resultado não apresenta grande variação em relação a métodos mais complexos (FOSTER et al., 2002; CARVALHO; HIRATA, 2012).

Delimitação dos perímetros de proteção de poços

Os perímetros de proteção de poços de abastecimento público e as medidas de restrição e controle a serem adotadas devem estar respaldadas por normativas legais. Nos países da Comunidade Europeia, por exemplo, a base legal é a Diretiva 2000/60/EC (DOVERI; MENICHINI; SCOZZARI, 2015). No Brasil, o respaldo para a delimitação de áreas de proteção de poços está vinculado às legislações estaduais que versam sobre a gestão dos recursos hídricos ou a legislações específicas sobre as águas subterrâneas, como, por exemplo, em Minas Gerais (Lei nº 13.771/2000), Acre (Lei nº 1.117/1994), Pernambuco (Decreto nº 20.423/1998); Piauí (Lei nº 5.165/2000), Roraima (Lei nº 547/2006), São Paulo (Decretos nº 32.955/1991 e 63.261/2018) e Distrito Federal (Decreto nº 22.358/2001). Carvalho e Hirata (2012) e García e Navarrete (2005) realizaram um levantamento dos perímetros de proteção de poços adotados em vários países e mostraram que, comumente, são adotadas entre três e quatro zonas de proteção.

A zona mais interna do poço é denominada *zona operacional*, onde apenas são permitidas as atividades associadas à operação do poço (FOSTER et al., 2002) (Figura 39). Para a proteção integral de uma captação em aquífero livre, os autores sugerem a delimitação de outros perímetros (Figura 39) e destacam, na questão da saúde pública, a importância da zona de proteção voltada aos contaminantes não conservativos. Na Alemanha, Holanda e Reino Unido, o critério para delimitação desse perímetro é o tempo de trânsito de 50 dias (GARCÍA; NAVARRETE, 2005; ENVIRONMENTAL AGENCY, 2019).

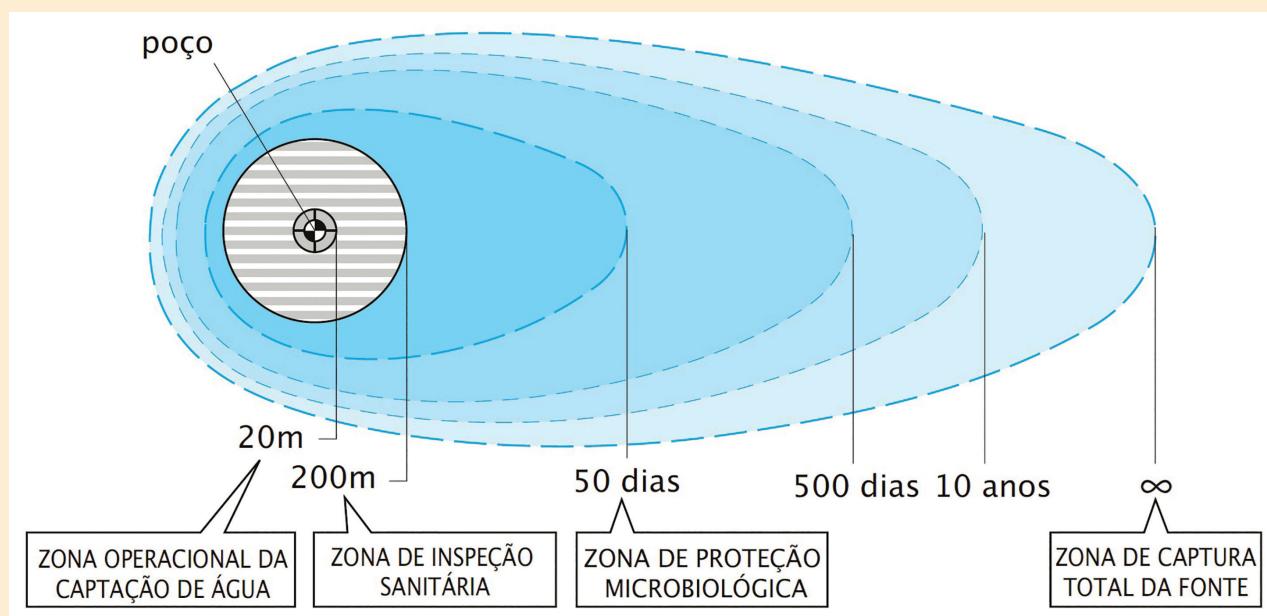


Figura 39 – Esquema idealizado para a delimitação dos perímetros de proteção de poço em aquífero livre

Fonte: Foster et al. (2006, p. 35).

Este critério também é adotado para o Perímetro de Alerta, estabelecido na legislação relativa à proteção da água subterrânea dos estados de São Paulo e Pernambuco. Iritani e Ezaki (2012) elencaram métodos simples para subsidiar o cálculo do Perímetro de Alerta, que foi aplicado no estado de São Paulo (2016), em um estudo desenvolvido no Sistema Aquífero Bauru (SÃO PAULO, 2016).

O controle e a restrição às atividades antrópicas dependem do perigo que essas impõem ao poço (Figura 37). A abordagem e as metodologias propostas por Foster *et al.* (2002) auxiliam na identificação do perigo de contaminação e na definição das medidas a serem impostas em cada perímetro de proteção do poço.

Além dos fundamentos técnicos, a implantação de áreas de proteção de poços precisa ser um processo participativo que envolva usuários e a sociedade em geral. No estado de São Paulo, por exemplo, a legislação exige que tais ações sejam embasadas em estudos e aprovadas pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos.

Box 15 – Estabelecimento de Áreas de Restrição e Controle do Uso das Águas Subterrâneas como Instrumento de Gerenciamento da Exploração do Sistema Aquífero Guarani (SAG), em Ribeirão Preto, SP

José Luíz Albuquerque Filho

A Deliberação nº 052, de 15 de abril de 2002, do Conselho de Recursos Hídricos (CRH) do estado de São Paulo instituiu “[...] no âmbito do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH) diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas”.

Esse instrumento de gerenciamento foi previsto pela Lei nº 6.134, de 02 de junho de 1988 (art. 7º), que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas, e regulamentado pelo Decreto nº 32.955, de 7 de fevereiro de 1991, e pela Deliberação CRH nº 52, de 15 de abril de 2005. As Áreas de Restrição e Controle (ARCs) do uso das águas subterrâneas são “[...] aquelas onde existe a necessidade de disciplinar as atividades que possam causar alterações ou efeitos negativos sobre a quantidade ou qualidade das águas subterrâneas” (art. 1º da Deliberação CRH nº 52/2005).

A cidade de Ribeirão Preto, situada na Região Nordeste do estado de São Paulo, com população de 676.440 habitantes, depende exclusivamente do manancial subterrâneo constituído pelo Sistema Aquífero Guarani (SAG), conforme o *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos* (CBH PARDO, 2020). Segundo o professor e pesquisador Osmar Sinelli, hidrogeólogo que há longa data desenvolve trabalhos na região, o uso das águas subterrâneas do SAG datam dos anos 1930. A demanda crescente de água evidencia um desequilíbrio entre os volumes extraídos, a redução das reservas subterrâneas disponíveis e os rebaixamentos nos níveis d'água subterrânea do aquífero.

A partir desse cenário, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Pardo (CBH Pardo) propôs a Deliberação CBH Pardo nº 04/06 (aprovada em 09/06/2006), que estabeleceu “Áreas de Restrição e Controle da Captação e Uso das Águas Subterrâneas na zona urbana de Ribeirão Preto”. A ARC de Ribeirão Preto visa a conter o cone de rebaixamento do nível da água subterrânea causado pelo bombeamento intensivo dos poços existentes. Essa deliberação foi submetida ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH) e homologada por meio da Deliberação CRH nº 065/06 (aprovada em 04/09/2006). A deliberação tem sido revalidada pelas instâncias do CBH Pardo e do CRH, com base em estudos técnicos hidrogeológicos. A última versão é a Deliberação CBH Pardo nº 300, de 17 de setembro de 2021, que foi ratificada pela Deliberação CRH nº 260, de 16 de dezembro de 2021.

A Figura 40 mostra a delimitação da Área de Restrição e Controle do Uso de Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Município de Ribeirão Preto (SP), que estabelece as seguintes zonas e seus critérios técnicos em relação à perfuração de novos poços e aproveitamento das águas subterrâneas:

- **Zona 1 – Área urbana na zona interna do cone de rebaixamento:** somente são permitidas novas perfurações de poços tubulares profundos em substituição de poços existentes, destinados ao sistema de abastecimento de água para consumo humano, sob a responsabilidade do Poder Público do Município;
- **Zona 2 – Área urbana adensada:** são permitidas substituições de poços tubulares profundos, tais como na Zona 1, ou perfuração de novos poços destinados ao sistema de abastecimento de água para consumo humano, sob a responsabilidade do Poder Público municipal; e substituições de poços existentes com o subsequente tamponamento do poço existente, ou aprofundamento de poços tubulares profundos já existentes para qualquer finalidade, sob a responsabilidade do usuário privado; e

- Zona 3 – Área de expansão urbana:** são permitidas substituições de poços tubulares profundos, tais como na Zona 1; aprofundamento ou substituição de poços tubulares profundos já existentes, para qualquer finalidade, sob a responsabilidade de usuários privados; e novas perfurações de poços tubulares profundos para qualquer finalidade de uso.

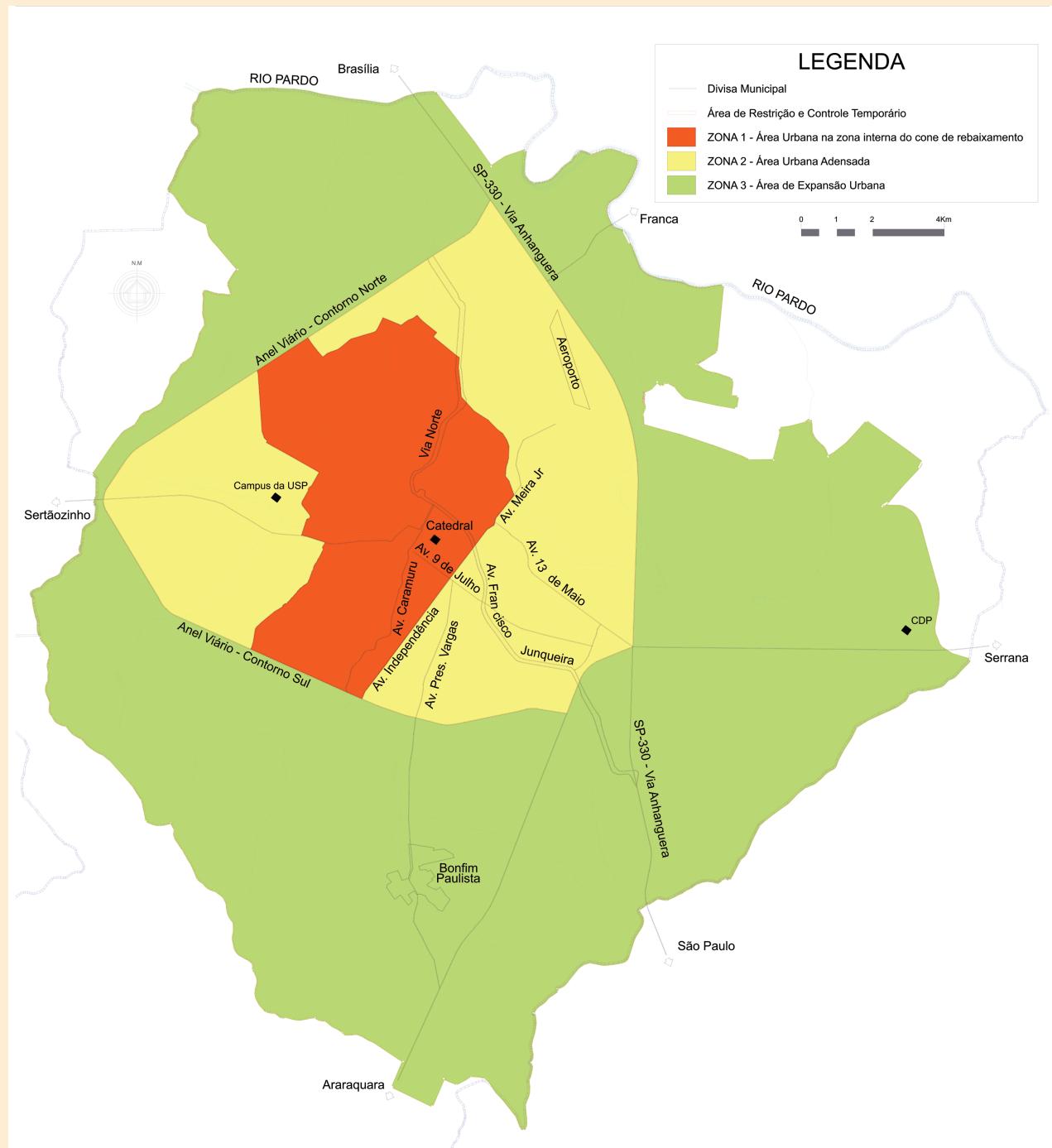


Figura 40 – Área de Restrição e Controle do Uso de Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Município de Ribeirão Preto, SP

Fonte: CBH Pardo (Deliberação nº 04/06).

As ARCs são um instrumento de gerenciamento de recursos hídricos dedicado a corrigir distorções no uso dos aquíferos, que possam comprometer a qualidade ou a quantidade das águas. A reversão dessas situações é um processo complexo, que demanda o acompanhamento da evolução da situação identificada, bem como a articulação dos colegiados gestores (Comitês e Conselhos de Recursos Hídricos) com o Poder Público e a negociação e ações entre os atores envolvidos.

3.2 ENQUADRAMENTO DOS CORPOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA, CONFORME OS USOS PREPONDERANTES

O enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água dos aquíferos, é regulamentado pela Res. Conama nº 396/2008 e pela Res. CNRH nº 91/2008. O art. 29 da Res. Conama nº 396/2008, determina que o enquadramento dos corpos de água subterrânea deverá considerar, pelo menos, os seguintes aspectos:

- I. a caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica;
- II. a caracterização da vulnerabilidade e dos riscos de poluição;

- III. o cadastramento de poços existentes e em operação;
- IV. o uso e a ocupação do solo e seu histórico;
- V. a viabilidade técnica e econômica do enquadramento;
- VI. a localização das fontes potenciais de poluição;
- VII. a qualidade natural e a condição de qualidade das águas subterrâneas.

Com base nesses critérios, as águas subterrâneas são enquadradas em classes, conforme definido no art. 3º da Res. Conama nº 396/2008, e demonstrado no Quadro 5.

Classes	Usos
Classe Especial	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses destinadas à preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral e as que contribuem diretamente para os trechos de corpos de água superficial enquadrados como Classe Especial.
1	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que não exigem tratamento para quaisquer usos preponderantes devido às suas características hidrogeoquímicas naturais.
2	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais.
3	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, para as quais não é necessário o tratamento em função dessas alterações, mas que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais.
4	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que somente possam ser utilizadas, sem tratamento, para o uso preponderante menos restritivo.
5	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, que possam estar com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, destinadas a atividades que não têm requisitos de qualidade para uso.

Quadro 5 – Classes para o enquadramento de águas subterrâneas

Fonte: Conama (Res. nº 396/2008).

A Res. Conama nº 396/2008 determina que as águas subterrâneas enquadradas na Classe Especial devem “ter suas condições de qualidade naturais mantidas” (art. 5º). Já os padrões das Classes 1 a 4 são baseados nos Valores de Referência de Qualidade (VRQs) e nos Valores Máximos Permitidos (VMPs) para cada uso preponderante (art. 4º), observados os

Limites de Quantificação Praticáveis (LQPs), apresentados no Anexo I da Res. Conama nº 396/2008. Os VRQs devem ser definidos pelo órgão competente, que pode ser o Conama ou os órgãos estaduais, contudo, tais padrões ainda não foram determinados. O Quadro 6 apresenta os padrões de cada uma das classes:

Classes	Usos
Classe Especial	Devem manter suas condições de qualidade natural.
1	Apresentam, para todos os parâmetros, Valor de Referência de Qualidade (VRQ) abaixo ou igual aos Valores Máximos Permitidos mais Restritivos (VMPr+) dos usos preponderantes (art. 7º da Res. Conama nº 396/2008).
2	Apresentam, em pelo menos um dos parâmetros, Valor de Referência de Qualidade (VRQ) superior ao seu respectivo Valor Máximo Permitido mais Restritivo (VMPr+) dos usos preponderantes (art. 8º da Res. Conama nº 396/2008).
3	Devem atender ao Valor Máximo Permitido mais Restritivo (VMPr+) entre os usos preponderantes, para cada um dos parâmetros, exceto quando for condição natural da água (art. 9º da Res. Conama nº 396/2008).
4	Devem atender aos Valores Máximos Permitidos menos Restritivos (VMPr-) entre os usos preponderantes, para cada um dos parâmetros, exceto quando for condição natural da água (art. 10 da Res. Conama nº 396/2008).
5	Não terão condições e padrões de qualidade, conforme os critérios utilizados na Resolução Conama nº 396/2008 (art. 11).

Quadro 6 – Padrões para o enquadramento de classe da água subterrânea

Fonte: Conama (Res. nº 396/2008).

O procedimento de enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos é definido pela Res. CNRH nº 91/2008. As etapas desse procedimento se dividem em: *i*) diagnóstico; *ii*) prognóstico; *iii*) proposta de metas relativas às alternativas de enquadramento; *iv*) deliberação do Comitê e do Conselho de Recursos Hídricos; e *v*) efetivação do programa de enquadramento (Figura 41).

As três primeiras etapas possuem natureza técnica, o que exige a participação social por meio de

consultas públicas, encontros técnicos, oficinas de trabalho e outros (art. 3º, § 2º da Res. CNRH 91/2008). O processo de edição das deliberações e a efetivação do programa de enquadramento, por sua vez, apresentam caráter mais político/decisório, e devem ser conduzidos pelo CBH juntamente com a sua Agência Técnica (COSTA *et al.*, 2019, p. 45). Até o momento, esse instrumento ainda não foi utilizado em relação às águas subterrâneas.



Figura 41 – Etapas do procedimento de enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos, definidas pela Res. CNRH nº 91/2008

Fonte: CNRH (Res. nº 91/2008).

3.3 OUTORGA DE DIREITO DE USO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

A Lei nº 9.433/1997, no art. 5º, inc. III, estabeleceu a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, definida como “o ato administrativo mediante o qual a autoridade outorgante faculta ao outorgado previamente ou mediante o direito de uso de recurso hídrico, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato, consideradas as legislações específicas vigentes” (art. 1º da Res. CNRH nº 16/2001). Esse instrumento permite compatibilizar o caráter público da água com o seu uso particular, por intermédio do papel de gestor do Estado (ANA, 2007). As prioridades para a outorga são incluídas como requisito do conteúdo mínimo dos Planos de Bacia Hidrográfica (art. 7º, inc. VIII, da Lei nº 9.433/1997), a serem aprovados pelos CBHs.

Lanna (2000, p. 89) afirma que a “função da outorga será ratear a água disponível entre as demandas existentes ou potenciais, de forma a que os melhores resultados sejam gerados para a sociedade.” Esse instrumento é reflexo do Poder de Polícia do Estado, pois disciplina o uso dos recursos hídricos por meio da concessão de autorização formal ao usuário que pretenda utilizá-los de forma privativa, por um prazo determinado e de acordo com as condições estabelecidas (PORTO; PORTO, 2008).

O prazo máximo de vigência da outorga de direito de uso de recursos hídricos é de 35 anos, contados da data da publicação do respectivo ato administrativo (art. 16 da Lei nº 9.433/1997). Esse prazo, contudo, pode ser prorrogado pela autoridade outorgante desde que sejam respeitadas as prioridades estabelecidas nos Planos de Bacia Hidrográfica (art. 6º § 1º da Res. CNRH nº 16/2001).

A concessão da outorga não implica na alienação das águas, mas, sim, em direito de uso (art. 18 da Lei nº 9.433/1997). Dessa forma, busca equilibrar a disponibilidade hídrica com as demandas, permitindo ao Poder Público controlar o uso da água de forma a garantir os objetivos da gestão e, ao mesmo tempo, garantir ao usuário o acesso à água (LEAL, 1998). Trata-se de um instrumento de “controle quantitativo e qualitativo dos usos da água” e uma condição para o “exercício dos direitos de acesso à água” (Lei nº 9.433/1997, art. 11). Os usos que dependem de outorga foram elencados no art. 12 da Lei nº 9.433/1997, que assim determina:

Art. 12. Estão sujeitos à outorga pelo Poder Público os direitos dos seguintes usos de recursos hídricos:

I - derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;

II - extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;

III - lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;

IV - aproveitamento dos potenciais hidrelétricos;

V - outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

A Lei nº 9.433/1997 incluiu, expressamente, a necessidade de outorga de direito de uso para a “extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo” (art. 12, inc. II). Em virtude do domínio estadual das águas subterrâneas, os estados e o Distrito Federal são os responsáveis por regulamentar a outorga de direito de uso desses recursos, observando sempre as normas nacionais. Além da extração de água por poços, alguns estados, com base no art. 12, inc. V, exigem esse instrumento para os casos de rebaixamento de lençol freático em edificações e obras de construção civil ou do nível d’água em atividades de mineração (neste caso, vide Res. CNRH nº 29/2002). Nessas duas situações, o foco não é a utilização da água subterrânea, mas, sim, o efeito que essas atividades podem gerar ao aquífero.

Em virtude da competência privativa da União em legislar matéria de águas, a exigência desse instrumento só pode ser dispensada pelos estados e Distrito Federal nos casos previstos no art. 12, parágrafo 1º da Lei nº 9.433/1997:

§ 1º Independem de outorga pelo Poder Público, conforme definido em regulamento:

I - o uso de recursos hídricos para a satisfação das necessidades de pequenos núcleos populacionais, distribuídos no meio rural;

II - as derivações, captações e lançamentos considerados insignificantes;

III - as acumulações de volumes de água consideradas insignificantes.

Nos casos do art. 12, § 1º, fica dispensada a solicitação da outorga de direito de uso, porém, é necessário atender a outras condicionantes administrativas impostas pelos estados, tais como: a) inscrição no cadastro de poços ou usuários; e b) obtenção de documento que ateste o caráter de uso isento ou insignificante. Cabe aos CBHs propor diretrizes e critérios para estabelecer os usos considerados insignificantes, e aos CERHs aprovar-los. No caso de ausência de determinação desses critérios pelo CBH ou ausência desse ente, a autoridade outorgante estadual fará a definição em caráter provisório (vide Res. CNRH nº 184/2016). Os volumes

considerados isentos, portanto, podem variar entre as bacias ou em regiões específicas de uma mesma bacia.

A definição dos usos considerados insignificantes deve levar em conta os seguintes critérios: *a) o “percentual da referência volumétrica de determinada porção de aquífero como limite individual de captação”;* *b) o “limite percentual de comprometimento coletivo quantitativo de porções de aquífero”;* e *c) o “efeito cumulativo, em um mesmo corpo hídrico, de todas as derivações, captações, lançamentos ou acumulações de volumes de água de pouca expressão, considerados insignificantes”* (art. 6º da Res. CNRH nº 184/2016).

A concessão da outorga de direito de uso de águas subterrâneas deve assegurar a gestão integrada das águas de forma a “evitar o comprometimento qualitativo e quantitativo dos aquíferos e dos corpos de água superficiais a eles interligados” (art. 3º, inc. III da Res. CNRH nº 15/2011). Para tanto, a decisão deve ser fundamentada nos estudos hidrogeológicos descritos no art. 2º da Res. CNRH nº 92/2008 (representados na Figura 42), os quais constituem as bases dos planos de bacia. Importante frisar que não há diretrizes no país para a concessão de outorgas em aquíferos fósseis.

Estudos Hidrogeológicos e outorga de direito de uso das águas subterrâneas

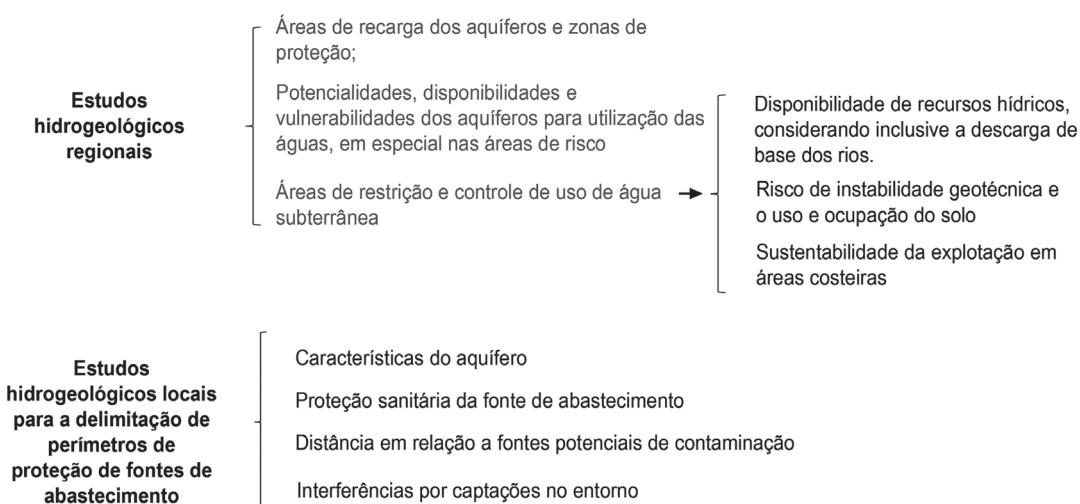


Figura 42 – Estudos hidrogeológicos e outorga de direito de uso das águas subterrâneas

Fonte: CNRH (Res. nº 92/2008), elaborado pelos autores.

Percebe-se que a outorga de direito de uso das águas subterrâneas deveria levar em conta não apenas as características dos aquíferos e as necessidades dos usuários, mas, também, os seguintes critérios: *i) interferência entre poços e níveis máximos de rebaixamentos permitidos;* *ii) intrusão salina;* e *iii) gestão da demanda entre os usuários de água subterrâneas e superficiais, bem como a articulação com a gestão do solo* (COSTA *et al.*, 2011).

O problema mais sério, contudo, remonta à baixíssima adesão dos usuários ao instrumento. Estima-se que a maioria absoluta dos poços é ilegal ou irregular. Poços ilegais “são aqueles cuja perfuração e uso das águas subterrâneas não encontra amparo na lei, por-

tanto, sua existência é proibida e, consequentemente, se o interessado solicitasse um pedido de outorga, este seria negado” (VILLAR; HIRATA, 2019). Já os poços irregulares “são aqueles cuja perfuração e uso das águas subterrâneas encontra respaldo na lei, porém, se exige o cumprimento de determinados trâmites ou se impõem restrições ou condicionantes para esse uso, que não foram atendidas pelo proprietário do poço” (VILLAR; HIRATA, 2019).

Segundo a base de dados da ANA (2021), existem 115.354 captações subterrâneas regularizadas pelas Unidades da Federação, incluindo as modalidades de outorga de direito de uso e usos insignificantes. Esse

número é muito inferior ao encontrado em outras bases, como nas do SGB-CPRM ou do IBGE. O Poder Público desconhece o número real de poços existentes ou o uso do recurso, o que compromete todo o processo de gestão (HIRATA *et al.*, 2019; ANA, 2020).

O uso irregular das águas “permite a apropriação de um bem de uso comum do povo e desvia os recursos hídricos de seus legítimos usuários, alterando o regime de propriedade da água e causando diversos impactos ambientais e sociais” (VILLAR, 2016, p. 92). A condição irregular também prejudica a aplicação de outros instrumentos. Sem uma estimativa da demanda real pelo uso dos recursos hídricos subterrâneos, os diagnósticos, prognósticos e programas de ação dos planos de bacia hidrográfica ficam prejudicados. Além disso, sem a outorga, não há como aplicar a cobrança pelo uso desses recursos.

Infelizmente, no caso dos usos legalizados, boa parte das outorgas são emitidas sem as avaliações hidrológicas necessárias ou não se fundamentam em metodologias apropriadas. A ANA (2013, p. 64) recomenda que o cálculo da disponibilidade hídrica subterrânea seja orientado pelos conceitos de:

- **Recarga Potencial Direta (RPD):** parcela da precipitação pluviométrica média anual que infiltra e efetivamente chega aos aquíferos livres, constituindo, assim, a reserva renovável ou reguladora;
- **Coeficiente de Sustentabilidade (CS):** percentual máximo recomendado para explotar a RPD,

de forma a evitar efeitos adversos no aquífero ou diminuição das vazões de base dos rios interconectados;

- **Reserva Potencial Explotável estimada (RPE):** corresponde à parcela da RPD indicada pelo CS.

O estado do Mato Grosso do Sul utiliza essa metodologia para delimitar os volumes disponíveis à outorga, porém, há outras formas para determinar esses valores. A precariedade da implementação desse instrumento coloca em risco os objetivos da política de águas, pois sem o controle do seu uso não há como assegurar a disponibilidade hídrica para as presentes e futuras gerações ou a utilização racional e integrada, muito menos prevenir e mitigar eventos hidrológicos críticos decorrentes do uso inadequado das águas. Dessa forma, é prioritário investir em campanhas de conscientização dos usuários, em mecanismos de incentivo à outorga e em ações de fiscalização.

O Box 16 busca explicar os motivos da ilegalidade de poços, enquanto o Box 17 explica os critérios mais frequentes utilizados para determinar as vazões outorgáveis. A falta de dados técnicos e da aplicação de metodologias adequadas à concessão de outorgas, aliada ao alto número de poços irregulares, cria uma situação de vulnerabilidade às águas subterrâneas, e dificulta que sejam traçados diagnósticos, prognósticos e programas de ação para os aquíferos.

Box 16 – Por que temos tantos poços irregulares?

Antonio Luiz Pinhatti

Os poços irregulares superam os regulares no Brasil, o que leva a questionar: por que existem tantos poços irregulares? A invisibilidade do recurso e o conhecimento limitado por parte dos usuários, perfuradores de poços e dos órgãos gestores contribui para essa situação. Os usuários não têm a percepção de que o uso irregular das águas subterrâneas pode interferir e prejudicar o seu poço ou o dos demais, muito menos que pode impactar o meio ambiente.

Os usuários buscam na água subterrânea uma solução individual para o seu problema de abastecimento. Esse coletivo desconhecido de usuários individuais que busca suprir a sua demanda particular pode causar a superexploração de um aquífero. O número de poços irregulares no Brasil retrata o caso típico da *Tragédia dos Comuns* (HARDIN, 1968), no qual se tem “uma situação em que indivíduos agindo de forma independente e racionalmente de acordo com seus próprios interesses se comportam em contrariedade aos melhores interesses de uma comunidade, esgotando um recurso comum.”

O desconhecimento sobre a obrigação legal ou a falta de incentivos para buscar a regularização por meio da outorga, aliado à falta de fiscalização tanto dos órgãos de gestão de recursos hídricos quanto dos órgãos de controle da atividade de perfuração de poços (os Conselhos Regionais de Engenharia e

Agronomia – CREA) contribuem para a perfuração de poços irregulares e o uso de água subterrânea sem autorização. Os métodos de perfuração de poços são rápidos e de custo relativamente baixo, possibilitando manter e operar um poço irregular de forma despercebida, o que dificulta eventuais ações fiscalizadoras. Nesse sentido, as empresas de perfuração são responsáveis por suas obras e pelo atendimento dos requisitos legais. Por questões comerciais, muitas vezes, o poço é construído sem a devida autorização, o que transforma as empresas de perfuração em facilitadoras do uso irregular das águas subterrâneas.

O uso irregular coloca em xeque a gestão dos recursos hídricos no Brasil e exige a adoção de ações com os *stakeholders*, de forma a reverter esse cenário. O Quadro 7 faz uma síntese dos principais fatores que levam à existência de poços irregulares e suas ações mitigadoras.

Atores sociais	Fatores facilitadores	Ações mitigadoras
Usuários	<ul style="list-style-type: none"> – Falta de conhecimento em relação aos aspectos técnicos e jurídicos das águas subterrâneas. – Não veem problemas nem consequências em utilizar as águas de forma irregular. – Desconhecimento sobre os benefícios de ter o poço regularizado. – Não há incentivos ou compensações financeiras ou de serviços que tornem a regularização do poço atrativa para o usuário. – Não há disposição do usuário em pagar taxas de captação, sem ver retorno desse pagamento. – Resistência em aceitar o pagamento da taxa de esgoto proporcional ao volume de água captado no poço. – Há o entendimento de que ter um poço irregular é um delito menor e não traz prejuízo à sociedade ou ao ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> – Conscientizar os usuários da necessidade e dos benefícios de regularizar os poços. – Disponibilizar informações técnicas e de disponibilidade de água subterrânea para auxiliar o usuário na prospecção e captação do recurso. – Oferecer compensações pelo uso regularizado. Por exemplo, por meio da orientação técnica operacional, sobre eficiência energética e de bombas, qualidade de água, etc. – Buscar formas de incluir o proprietário do poço como um parceiro na gestão de águas subterrâneas.
Órgãos Gestores	<ul style="list-style-type: none"> – Falta de vontade política para fiscalizar e controlar os poços irregulares e fazer cumprir a lei. – Ausência de tradição institucional e estabilidade organizacional. – Conhecimento e dados limitados sobre o comportamento dos aquíferos. – Cadastros de poços pouco consistentes e informações de disponibilidade de água subterrânea insuficientes para auxiliar os usuários ou promover a boa gestão. – Baixa capacidade operacional de campo, o que prejudica a fiscalização efetiva. – Raramente há aplicação de sanções aos usuários de poços irregulares, em muitos casos se obriga apenas a realizar a regularização. – Os recursos hídricos subterrâneos não são vistos como uma prioridade pelos gestores ou pela sociedade. – Os processos de outorga costumam ser complexos, burocráticos e morosos. 	<ul style="list-style-type: none"> – Realizar a efetiva fiscalização, identificando os poços irregulares, promovendo a regularização e aplicando a lei e suas penalidades. – Utilizar a fiscalização e a aplicação de penalidades de forma exemplar, inclusive divulgando essas ações para demonstrar a atuação estatal. – Criar programas de regularização de poços, principalmente em áreas com uso intenso das águas subterrâneas, indícios de superexploração e conflitos entre usuários vizinhos.
Perfuradores	<ul style="list-style-type: none"> – Omissão sobre a obrigatoriedade da outorga e dos riscos e consequências decorrentes da falta de autorização – Conhecimento limitado sobre hidrogeologia para compreender os impactos do uso irregular. – Há perfuradores atuando sem registro no órgão de controle da atividade (CREA) ou cujo responsável técnico dedica menos tempo que o mínimo estabelecido. – Falta de relações sólidas entre os órgãos gestores e os de controle da atividade de perfuração, o que poderia reduzir o número de poços irregulares. 	<ul style="list-style-type: none"> – Estabelecer uma relação entre o órgão gestor dos recursos hídricos e o CREA, inclusive com o intercâmbio de informações. – Realizar a efetiva fiscalização e o controle da atividade de perfuração de poços. – Conscientizar os perfuradores a executarem somente as perfurações autorizadas e de acordo com as normas técnicas.

Quadro 7 – Principais fatores que levam à existência de poços irregulares e ações mitigadoras

Fonte: Foster, Hirata e Custodio (2021), adaptado pelo autor.

Box 17 – Critérios para determinação de vazões outorgáveis em mananciais subterrâneos

Vagney Aparecido Augusto

José Eloi Guimarães Campos

A determinação de critérios para emissão de outorga ou autorização de uso das águas subterrâneas visa a definir, principalmente, parâmetros técnicos relacionados aos sistemas hídricos subterrâneos que favoreçam o seu uso adequado, definindo limites aceitáveis para a sua exploração, de forma a não trazer danos aos aquíferos. São, também, importantes para permitir, de forma equilibrada, os diferentes tipos de usos das águas subterrâneas no curto, médio e longo prazos, garantindo que os usuários não sejam prejudicados em função dos usos desequilibrados. Para alcançar tais objetivos, as ações devem incluir todos os aspectos envolvidos no sistema hídrico, inclusive o próprio ambiente e o arcabouço natural que constituem os aquíferos.

A Lei nº 9.433/1997 define a bacia hidrográfica como unidade-base de gerenciamento dos recursos hídricos. Essa definição legal considera o relevo como fator delimitador dos fluxos das águas superficiais e da sua acumulação, entretanto, as águas subterrâneas não seguem as mesmas premissas de delimitação, fluxos e acumulação. Muitos aquíferos extrapolam as áreas de bacias hidrográficas, apresentando fluxos subterrâneos desconexos aos superficiais, e seguem padrões, forma e tempo totalmente diferentes para fluxos e acumulação. Nesse sentido, a definição de unidade-base para a gestão dos recursos subterrâneos deve considerar, no mínimo, três condicionantes ambientais: o clima, a hidrogeologia e os aspectos da hidrologia superficial que a afetam, segundo o conceito de domínios hidrogeoclimáticos (AUGUSTO; CAMPOS, 2021).

Os critérios para a emissão de outorga de direito de uso, necessariamente, precisam respeitar as diferenças entre os tipos de aquíferos. Esses diferentes aquíferos recebem, armazenam e permitem fluxos de água em seus espaços livres de formas, volumes e velocidades muito distintas, o que deveria implicar em critérios também diferentes para os seus usos e, consequentemente, para o processo de outorga. Nesse contexto, os critérios que visam à outorga de águas subterrâneas devem levar em conta as condições atuais de exploração dos aquíferos, os fatores climáticos que disponibilizam água no tempo e todas as interferências superficiais que afetam ou são afetadas pelos aquíferos.

Na escala de aquífero, o termo *vazão de segurança* foi descrito pela primeira vez por Lee (1915) como uma taxa de água que pode ser removida anualmente, sem perigo de depleção das reservas armazenadas. O autor, portanto, já reconhecia que o bombeamento excessivo em um aquífero afetaria as águas superficiais. Meinzer (1920) e Conkling (1946) afirmam que a quantidade de água a ser extraída dos aquíferos deve ser igual à taxa de sua recarga natural. Meinzer (1920) defende que as taxas seguras de extração de um aquífero, sem esgotar a sua oferta, são as limitações da viabilidade econômica na extração. Apesar de a definição não objetivar a sustentabilidade, ela reflete bem o ocorrido com os aquíferos americanos exauridos. Theis (1940) incorporou o balanço hídrico e definiu a *vazão de segurança perene*. Para tanto, adicionou na vazão disponível para o uso, um volume de recarga induzida por bombeamento, mais uma parte das descargas naturais. Bear e Levin (1967) propuseram a *vazão ótima* com base em fins econômicos, sociais, culturais e bióticos, sendo os recursos hídricos uma das variáveis. A *vazão ótima* poderia sobrexplotar aquíferos por não objetivar a manutenção do sistema hídrico no tempo. No Brasil, a *vazão ótima* poderia trazer conflitos entre os usos prioritários previstos em lei ou, então, favorecer o uso econômico em detrimento de usos essenciais e de baixos retornos econômicos. Sophocleous (1997) definiu a *vazão de segurança* como a obtenção e manutenção de um equilíbrio de longo prazo entre a quantidade de água subterrânea retirada e a quantidade anual de recarga natural. Para o autor, a *vazão sustentável* difere e deve ser menor do que a recarga natural, considerando, ainda, que as descargas naturais sustentem as drenagens, zonas úmidas e ecossistemas dependentes. Fetter (2004) considera que *reservas explotáveis* referem-se a uma taxa de extração regular e permanente sem causar danos de depleção das reservas permanentes. Kalf e Woolley (2005) ressaltam que é necessário separar o conceito de *sustentabilidade* do sistema aquífero da *performance* de produção do sistema. A sustentabilidade deve ser baseada em volume de recarga e descarga do sistema, podendo considerar

os volumes de recarga induzida com o processo de bombeamento. Já a vazão de segurança pode ser sustentável se a soma das vazões da recarga natural for maior do que a soma das vazões de descargas/retiradas do sistema. Em regiões de climas árido ou semiárido ou em aquíferos com elevado grau de confinamento, a recarga é restrita e pode levar ao uso não sustentável, todavia, ainda assim existem aquíferos com grandes volumes de água armazenados com alta produtividade hídrica. Nesses casos, o uso de volumes maiores que a recarga, mesmo que justificado, estaria esgotando um volume não renovável, o que seria um processo de mineração do recurso hídrico armazenado ao longo do tempo geológico. Em países onde a água é um bem público, o uso do recurso hídrico não renovável justificaria uma análise mais profunda da relação dos custos socioambientais em detrimento dos benefícios privados gerados pelos seus usos.

Em condições naturais, antes da produção das águas subterrâneas, os aquíferos estão em estado de equilíbrio dinâmico (ZHOU, 2009). A retirada de água leva a um novo equilíbrio, seja pelo aumento da recarga, por diminuição da descarga, por perda de armazenamento ou pela combinação de todos esses fatores. O bombeamento pode reduzir a evapotranspiração com rebaixamento dos níveis d'água e induzir à recarga adicional quando os aquíferos apresentam superfície freática rasa sobre clima úmido chuvoso ou, também, via indução de recarga pelos corpos d'água superficiais adjacentes. As respostas dinâmicas de um aquífero ao bombeamento são relativas e dependem das condições do cone de rebaixamento gerado, e suas distâncias em relação às áreas de recarga e descarga naturais. Se um novo equilíbrio dinâmico for estabelecido com taxa de bombeamento menor do que a recarga natural, ou seja, supostamente segura, isso ainda pode causar a depleção dos níveis, e não ser suficiente para manter ecossistemas dependentes. Além disso, o bombeamento pode causar intrusão de águas de má qualidade e subsidência da terra mesmo sem sobreexploração dos aquíferos.

A sustentabilidade das águas subterrâneas está baseada no seu desenvolvimento e uso, podendo ser mantidas por uma quantidade infinita de tempo sem causar consequências ambientais, econômicas ou sociais inaceitáveis, de acordo com o contexto do sistema hidrológico completo e no longo prazo (ALLEY; REILLY; FRANKE, 1999; ALLEY; LEAKE, 2004). A quantidade de água subterrânea disponível para uso depende da forma como as mudanças na recarga e na descarga afetam o ambiente circundante e o compromisso aceitável entre os usos das águas subterrâneas e essas mudanças. O equilíbrio dessas variáveis de longo prazo é o tema central do conceito evolutivo de sustentabilidade.

No Brasil, o termo *vazão de segurança* é visto como *reserva renovável ou reguladora* (m^3/ano). Essas reservas são renovadas anualmente com o ciclo hidrológico e têm relação direta com as chuvas, o que as torna variáveis ao longo dos anos. Campos e Correia (2013) indicam que as *reservas explotáveis e outorgáveis*, cujo volume se pode extrair sem causar danos, podem ser maiores do que as reservas renováveis, considerando a soma da reserva renovável anual com parte da reserva permanente. A *reserva permanente* refere-se ao volume de água subterrânea armazenada nos aquíferos ao longo do tempo geológico, e não se altera significativamente no ciclo anual. Essas são importantes não só como reservas estratégicas, mas por constituírem a base de sustentação das reservas renováveis e do arcabouço do aquífero, permitindo descargas naturais relacionadas com ciclos pluviométricos.

Dentre os *principais critérios técnicos* utilizados para a determinação das vazões a serem outorgadas às águas subterrâneas, destacam-se: *i)* vazão média do aquífero; *ii)* percentual da vazão do poço; *iii)* vazão de base da drenagem superficial; *iv)* vazão de segurança; e *v)* rebaixamento disponível e análise qualitativa dos dados de ensaios de bombeamento (CAMPOS; CORREA 2013). Roedel (2017) e Campos e Correa (2013), com base em modelos numéricos e aplicação de sistema de informação geográfica, propuseram que a outorga deve considerar a favorabilidade e a potencialidade hídrica subterrânea, interferências entre poços e recursos hídricos superficiais, a vazão média do aquífero e análises de impacto da vazão requerida, sendo a vazão máxima outorgável inferior a 90% da recarga natural.

É evidente que a determinação de vazões outorgáveis a aquíferos deve ser embasada em estudos hidrogeológicos prévios, contudo, os critérios podem ser considerados como base de aplicação em diferentes condições na escala de aquíferos e de poços. Para a sua aplicação, todavia, deve-se considerar as limitações e os impactos locais:

- **Vazão Média dos Poços do Aquífero:** determinada a partir dos valores de vazões de poços que foram alcançados mediante diferentes características construtivas, mas dentro do mesmo aquífero. Essa vazão pode ser obtida por média aritmética ou ponderada das profundidades, diâmetro dos poços ou pelo comprimento das seções filtrantes. Baseia-se na capacidade produtiva média do aquífero, portanto, sua aplicação depende das condições de recarga e das reservas renováveis para definição dos limites aceitáveis de uso.
- **Percentual da Vazão Individual do Poço:** é uma fração da vazão máxima obtida a partir de testes de bombeamento nos poços a serem outorgados. Essa fração deve variar em função do comprometimento da região em que a outorga é requerida e das condições de circulação (recarga e descarga). Deve-se considerar os riscos de sobreexplotação e de contaminação a que os aquíferos estejam submetidos. No caso da existência de poços vizinhos com interferências mútuas, a vazão outorgável deve considerar os sistemas de poços como sistema único.
- **Vazão de Segurança:** são os valores de reservas renováveis multiplicadas por um fator de segurança. O fator é definido com base nas particularidades hídricas de cada unidade de gestão (Domínios Hidrogeoclimáticos). A vazão de segurança pode ser representada em unidade de área (km^2 ou hectare) dos aquíferos e visa a representar as reservas explotáveis com base na proporcionalidade de sua ocorrência. Em alguns casos, pode representar valores acima da reserva renovável, outros, valores inferiores.
- **Vazão de Base das Drenagens Superficiais:** as vazões de outorga são definidas com base em um percentual da vazão do fluxo de base das drenagens, aplicável somente em drenagens perenes e onde os fluxos subterrâneos representam a única fonte hídrica nos períodos de estiagem. Esse critério é de difícil aplicação, principalmente, em função: *i*) da falta de dados em muitas drenagens; *ii*) da inaplicabilidade em drenagens intermitentes; *iii*) em casos em que a existência de barragens altera o padrão de vazão natural dos rios; *iv*) da existência de captações e lançamentos que alteram as vazões de recessão naturais; *v*) do uso e ocupação do solo que favorecem mudança de escoamento superficial, dentre outros aspectos. Em função dessas dificuldades, esse critério, quando aplicável, permite apenas aproximações.
- **Rebaixamento Disponível:** é obtido a partir do ensaio de bombeamento, sendo relacionado à espessura dos aquíferos, profundidade de instalação da bomba, profundidade do nível estático, variações anuais do nível freático e potencial interferência entre poços. O rebaixamento máximo disponível é aquele que alcança a submergência da bomba. Do ponto de vista da sustentabilidade, esse rebaixamento máximo disponível deve ser limitado a um percentual da espessura do aquífero, de forma a preservar a maior parte de sua zona saturada.
- **Análise Qualitativa dos Dados de Ensaios de Bombeamento:** utilizam-se os dados de bombeamento com foco na capacidade específica (razão da vazão explotada pelo rebaixamento produzido no nível d'água no poço). É um critério relativo quanto ao talento produtivo com capacidades específicas baixas, em que se outorga vazão inferior à vazão do ensaio. Para valores elevados, a vazão outorgada pode ser próxima à obtida no teste de bombeamento. Outros dados hidráulicos também devem ser considerados na emissão de outorgas, incluindo: *i*) capacidade específica média do aquífero; *ii*) o valor nominal do rebaixamento; e *iii*) o tempo de recuperação do nível estático após o término do bombeamento de 24 horas. Quanto à disponibilidade, deve-se considerar a favorabilidade do aquífero nos seguintes aspectos: condições de recarga e circulação das águas, e estimativa das reservas hídricas explotáveis. Para as estimativas da disponibilidade podem ser aplicados diferentes métodos e critérios, entretanto, o mais importante é que os parâmetros aplicados sejam conservadores, isto é, otimistas com relação aos sistemas naturais, e pessimistas com relação aos projetos humanos.

3.4 COBRANÇA PELO USO DE RECURSOS HÍDRICOS: RECURSOS FINANCEIROS PARA PROMOVER A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A cobrança pelo uso de recursos hídricos está prevista no art. 5º, inc. IV da Lei nº 9.433/1997. O art. 19 da referida Lei e a Resolução CNRH nº 48/2005 definem que seus objetivos são:

- I. reconhecer a água como bem público limitado, dotado de valor econômico, e dar ao usuário uma indicação de seu real valor;
- II. incentivar a racionalização do uso da água e a sua conservação, recuperação e manejo sustentável;
- III. obter recursos financeiros para o financiamento de estudos, projetos, programas, obras e intervenções, contemplados nos Planos de Recursos Hídricos, promovendo benefícios diretos e indiretos à sociedade;
- IV. estimular o investimento em despoluição, reuso, proteção e conservação, bem como a utilização de tecnologias limpas e poupadouras dos recursos hídricos, de acordo com o enquadramento dos corpos de águas em classes de usos preponderantes; e,
- V. induzir e estimular a conservação, o manejo integrado, a proteção e a recuperação dos recursos hídricos, com ênfase nas áreas inundáveis e de recarga dos aquíferos, mananciais e matas ciliares, por meio de compensações e incentivos aos usuários. (art. 2º da Res. CNRH nº 48/2005).

Esse instrumento econômico e de controle se baseia nos princípios do poluidor-pagador e do usuário-

-pagador, sendo que os valores arrecadados possuem natureza de preço público, pois se trata de uma contrapartida paga pelo uso de um bem de domínio público (GRANZIERA, 2015; VILLAR; GRANZIERA, 2020). A cobrança pode ser federal ou estadual, a depender do domínio sobre o recurso hídrico e da área do Comitê em questão. No caso dos CBHs interestaduais, a cobrança foi aplicada nas seguintes bacias: Bacia do Rio Paraíba do Sul; nas Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí; na Bacia do Rio São Francisco; na Bacia do Rio Doce; na Bacia do Rio Paranaíba; e na Bacia do Rio Verde Grande (ANA, 2019).

As águas subterrâneas são recursos de domínio estadual, cabendo aos estados regulamentar e aplicar o instrumento. Com base na legislação, de forma participativa, os CBHs estabelecem os mecanismos de cobrança e sugerem os valores, que serão aprovados pelo CERH. Em alguns estados, além dessa aprovação é necessário um decreto governamental que permita efetivar a cobrança (VILLAR; GRANZIERA, 2020). Somente os usuários que detêm outorga de direito de uso de recursos hídricos são cobrados.

A aplicação da cobrança pelos Comitês Estaduais tem muito a avançar, pois não foi aplicada em boa parte do território nacional (Figura 43). Além disso, a situação de irregularidade dos usuários de água subterrânea prejudica a sua efetividade nas bacias que cobram pelo uso. Regiões com alto índice de exploração das águas subterrâneas e dotadas de CBHs ainda não implementaram o instrumento, como é o caso do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás. A cobrança poderia contribuir para implementar diversos programas e projetos destinados à melhoria da gestão hídrica, bem como fortalecer a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas.

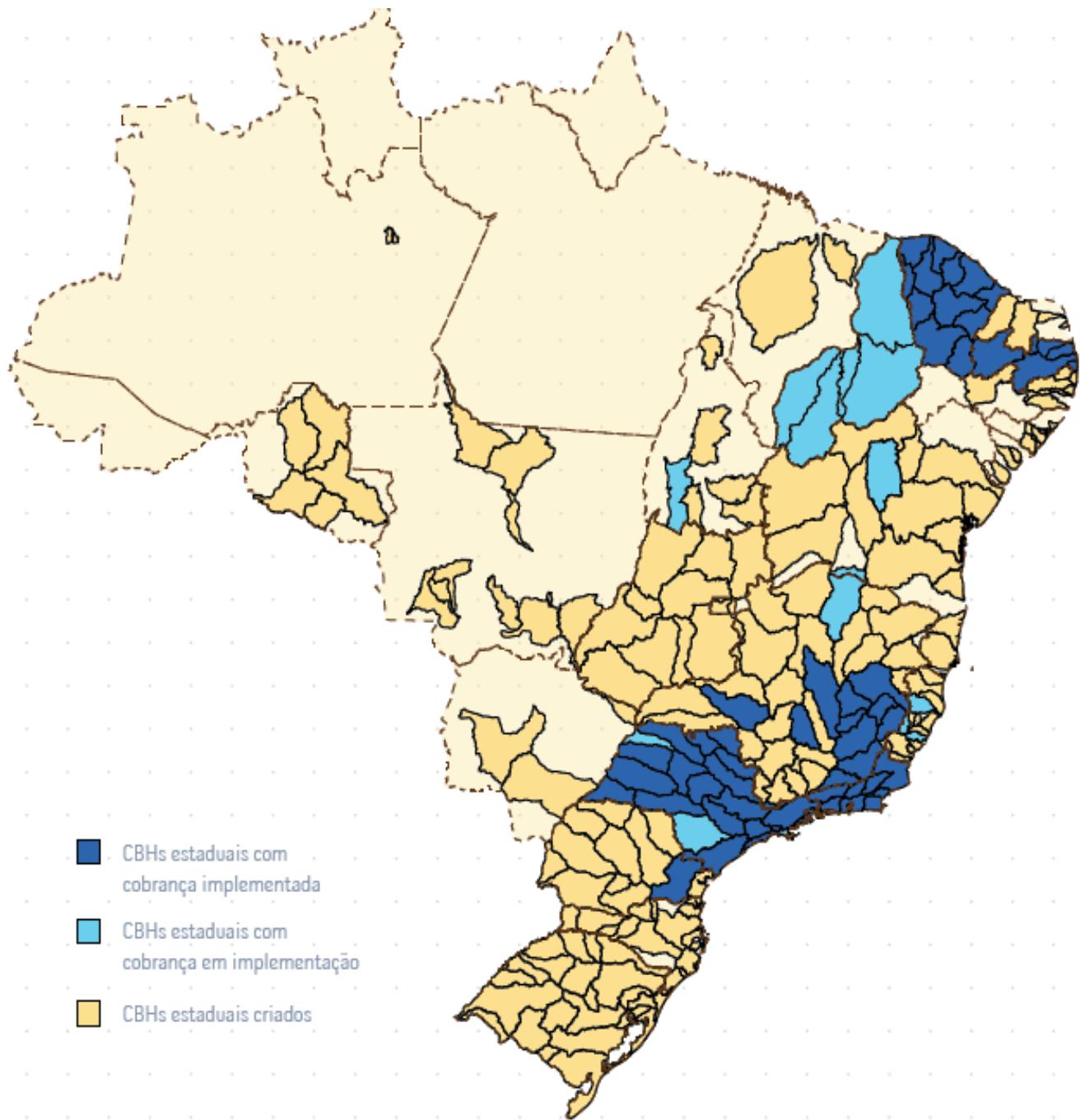


Figura 43 – Cobrança pelo uso de recursos hídricos no Brasil – Comitês Estaduais

Fonte: ANA (2019, p. 26).

O Quadro 8 apresenta o Preço Unitário Básico (PUB) aplicado em algumas bacias estaduais.

Bacia	UF	Valor cobrado pela água	Fundamentação legal
Bacia Hidrográfica do Coreaú; Bacia Hidrográfica do Litoral; Comitê de Bacia Hidrográfica do Curu; Bacias Hidrográficas Metropolitanas, etc.	CE*	<ul style="list-style-type: none"> – As bacias têm cobrança uniforme regulada pelo Estado. – Os valores variam de R\$ 0,00192 a R\$ 2,93208/m³, dependendo do usuário e tipo de captação. – Há um valor específico para captação de águas minerais de R\$ 0,85233/m³. 	Comunicado nº 01/2021/GECOM/DIAFI/COGERH, de 16/02/2021.
Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas	MG	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01415/m³ captado de água superficial e subterrânea; – R\$ 0,0283/m³ consumido; – R\$ 0,09905/kg de DBO lançado. 	Deliberação Normativa CBH-Velhas nº 3, 03/08/2020.
Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Pomba e Muriaé	MG	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ captado de água superficial e subterrânea; – R\$ 0,02/m³ captado consumido; – R\$ 0,07/kg de DBO lançado. 	Deliberação do Comitê da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos Rios Pomba e Muriaé nº 37/2014.
Bacia Hidrográfica do Rio Araguari	MG	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ captado de águas superficiais; – R\$ 0,0115/m³ captado de águas subterrâneas; – R\$ 0,02/m³ captado consumido. 	Resolução CBH-Araguari nº 12, 25/06/2009.
Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira	PR	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ captado de águas superficiais; – R\$ 0,02/m³ captado de águas subterrâneas; – R\$ 0,02/m³ captado consumido; – R\$ 0,10/kg/ano de DBO lançado. 	Resolução nº 5 do Comitê das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira, de 11/07/2013.
Bacia do Alto Tietê	SP	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ de água captada, extraída ou derivada; – R\$ 0,02/m³ de água consumida; – R\$ 0,10/kg de DBO 5,20 lançado. 	Anexo 1 - Decreto no 56.503, de 9 de dezembro de 2010.
Bacia do Rio Pardo	SP	<ul style="list-style-type: none"> – R\$ 0,01/m³ de água captada, extraída ou derivada; – R\$ 0,02/m³ de água consumida; – R\$ 0,10/kg de DBO 5,20 lançado. 	Decreto nº 58.771, de 20 de dezembro de 2012.

(*) No estado do Ceará os valores da cobrança são decretados pelo Governador para todas as bacias, após manifestação do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH/CE). Não há manifestação dos CBHs estaduais quanto à cobrança (ANA, 2019).

Quadro 8 – Preço Unitário Básico (PUB) da água aplicado na cobrança pelo uso dos recursos hídricos em alguns Comitês Estaduais de Bacias Hidrográficas

Fonte: elaborado pelos autores.

O PUB não é o preço final pago pelo usuário, o qual é obtido por meio de fórmulas matemáticas que aplicam diversos coeficientes ponderadores a esse valor. Apesar, porém, da aplicação desses coeficientes, os preços cobrados são baixos e não ne-

cessariamente estimulam o uso racional do recurso hídrico (OCDE, 2015). O valor da água subterrânea é muito mais amplo do que o preço cobrado por ela. O Box 18 apresenta os diversos tipos de valores dos recursos ambientais.

Box 18 – Os diferentes tipos de valor dos recursos ambientais*Osvaldo Aly Júnior*

A valoração ambiental utiliza diferentes métodos para quantificar economicamente um bem ambiental, “estimando” a importância (e os custos) dos serviços ecossistêmicos impactados ou perdidos em razão da ação antrópica. Ao estimar os custos e os valores dos impactos ambientais, é possível avaliar as consequências positivas e negativas das políticas públicas e das ações privadas, e entender até onde as pessoas estão dispostas a aceitar a preservação ou a recomposição do ambiente natural, e quanto isso impactará as gerações futuras. Infelizmente, a valoração ambiental das águas subterrâneas é um assunto pouco explorado no Brasil.

Uma das formas de estimar o valor do recurso ambiental é por meio do cálculo do Valor Econômico Total (VET). O cálculo inclui o *valor de uso* (*direto*, *indireto* e de *opção*) e *valores de não uso* (valor de existência). O primeiro conjunto refere-se ao uso potencial (atual ou futuro), enquanto o último está relacionado à existência do bem, independente do seu uso.

O *valor de uso direto* é atribuído a um recurso ambiental onde ocorre a apropriação direta via extração ou consumo. Por exemplo: extração de água potável para consumo humano (engarrafada/encanada); consumo de água não potável (irrigação, lavagem de carros e jardins); fluxo de base que pereniza rios e garante irrigação, aquicultura, transporte fluvial e geração de energia; turismo e lazer: estâncias hidrominerais, contemplação de cavernas e paisagens.

Por sua vez, o *valor de uso indireto* estima os benefícios indiretos oriundos da dinâmica ecossistêmica e do funcionamento dos aquíferos. Por exemplo: diluição de esgoto e transporte de sedimentos que evitam assoreamento e enchentes, filtragem, depuração e attenuação de contaminantes (sistema aquífero-solo e margens de rios), recarga/infiltração artificial e reserva subterrânea, suporte para biodiversidade, ciclagem de nutrientes.

O *valor de opção* é atribuído à preservação dos recursos naturais e dos ecossistemas para o uso direto ou indireto no futuro. Todos os serviços anteriormente apresentados e não utilizados no momento possuem valor de opção, pois poderão ser utilizados em algum momento futuro.

Já os *valores de não uso*, como o valor de existência, buscam estimar valores que não estão associados ao uso direto ou indireto do recurso, mas, sim, aos aspectos intangíveis. O seu valor é oriundo de aspectos de ordem moral, cultural, ética ou altruísta em relação ao direito de existência de espécies que não a humana ou de riquezas naturais, mesmo que não tenham uso atual ou futuro. Sua mensuração tem elevado grau de subjetividade, pois geralmente são obtidas por meio de pesquisas de opinião.

3.4.1 Ações para as águas subterrâneas que poderiam ser custeadas com a cobrança

Na maioria dos casos, as águas subterrâneas não são prioridade dos planos de ação e dos investimentos. O Quadro 9 busca demonstrar possíveis temas centrais para a elaboração e execução de programas e ações que contribuiriam para promover a gestão das águas pelos órgãos gestores de recursos hídricos.

Temas centrais para a realização de PDGAS	Ações para a gestão das Águas Subterrâneas (AS)
Bases Técnicas para a Gestão das Águas Subterrâneas	<ul style="list-style-type: none"> – Cadastramento dos usuários de águas subterrâneas em toda a bacia. – Adequar, aperfeiçoar e regulamentar os critérios de outorga de AS. – Avaliação hidrogeológica, técnico-econômica, acompanhamento e controle da perfuração de poços tubulares profundos para evitar a superexplotação de aquíferos. – Desenvolvimento de estudos voltados à inovação e modernização tecnológica aplicadas à segurança hídrica dos mananciais subterrâneos. – Estudos para a proposição ou atualização da legislação afeta às AS ou diretrizes para o disciplinamento do uso e ocupação do solo que afetem áreas de ocorrência de aquíferos. – Desenvolvimento de estudos sobre águas termais (hidrotermalismo). – Revisão da política sobre água mineral e recursos hídricos. – Elaboração de projetos de gestão de águas subterrâneas para os aquíferos transfronteiriços. – Estabelecimento de subsídios para AS no Plano Estadual de Recursos Hídricos, Planos de Bacias Hidrográficas e Relatórios de Avaliação dos Sistemas Estaduais de Gerenciamento de Recursos Hídricos e Singreh.
Melhoria da Qualidade e Proteção dos Aquíferos	<ul style="list-style-type: none"> – Cadastramento das fontes reais ou potenciais de poluição dos aquíferos e das zonas de recarga. – Cadastramento, estudo e caracterização das fontes difusas de poluição urbana e por insumos agrícolas. – Desenvolvimento de projetos de proteção de áreas de recarga de aquíferos por meio da recuperação e/ou conservação de drenagens e cabeceiras. – Elaboração da cartografia contendo o zoneamento da vulnerabilidade natural dos aquíferos. – Execução de mapeamentos de vulnerabilidade e perigo à intrusão de cunhas salinas em aquíferos costeiros.
Desenvolvimento de Sistemas de Informação de Aquíferos	<ul style="list-style-type: none"> – Implantação/incremento do Siagas nos estados e Distrito Federal. – Desenvolvimento e implementação de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) para subsidiar as análises de pedidos de perfuração de poços profundos e de outorgas de direito de uso de águas subterrâneas nos estados e no Distrito Federal.
Implementação, operação e manutenção de Rimas	<ul style="list-style-type: none"> – Expansão e consolidação da rede de monitoramento de águas subterrâneas (por exemplo: Rimas). – Ampliação da rede de monitoramento de qualidade e quantidade de águas subterrâneas.
Capacitação e divulgação em Águas Subterrâneas	<ul style="list-style-type: none"> Estabelecimento de convênios e termos de cooperação técnica com instituições públicas de pesquisa e ensino (SGB-CPRM, Universidades Federais e Estaduais, Centros Federais de Tecnologia, dentre outros), de fomento acadêmico (Fundações de Amparo à Pesquisa, CNPq) e associações que atuam em águas subterrâneas (ABAS, ABRH, ABGE, APG, ABES, dentre outras), bem como organizações não governamentais que atuam nos temas vinculados às águas subterrâneas. Elaboração, publicação e divulgação da cartografia hidrogeológica básica dos estados e do Distrito Federal. Formação dos participantes em geral dos Comitês de Bacia Hidrográfica acerca dos aspectos gerais das águas subterrâneas e aquíferos. Campanhas publicitárias de divulgação e valorização dos mananciais subterrâneos, destacando a conectividade das águas subterrâneas e a necessidade da regularização dos poços.

Quadro 9 – Proposta de organização de Programas para o Desenvolvimento e Gestão das Águas Subterrâneas (PDGAS)

Fonte: elaborado pelos autores.

3.5 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES E AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os sistemas de informação são essenciais para instruir o processo de tomada de decisão. A aplicação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos, previstos pela Lei nº 9.433/1997, depende da disposição de dados que permitam avaliar as condições das bacias hidrográficas e seus respectivos aquíferos (PORTO; PORTO, 2008). Os sistemas de informação de recursos hídricos podem ser nacionais ou estaduais. No caso das águas subterrâneas destacam-se três sistemas de informações: o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), o Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH), que é um subsistema do SNIRH, e o Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Os dois primeiros estão sob a tutela da ANA, sendo que o SNIRH busca agrupar informações gerais sobre os recursos hídricos, enquanto o CNARH foca nos usos regularizados dos recursos hídricos. O SIAGAS, que é anterior à Lei nº 9.433/1997, dedica-se exclusivamente aos poços, analisando os dados construtivos, geológicos e hidrogeológicos (vide Box 19).

O SIAGAS opera de forma independente dos sistemas coordenados pela ANA. Embora a sua integração seja desejável, conectá-los é um desafio técnico diante das diferentes interfaces utilizadas. A coordenação facilitaria o trabalho institucional e contribuiria para gerar um banco de dados consolidado com informações relacionadas à pesquisa, uso e gestão, porém, ainda não há previsão para realizar essa integração. A Moção CNRH nº 038, de 7 de dezembro de 2006, recomendou a adoção do SIAGAS pelos órgãos gestores estaduais, Secretarias dos Governos Estaduais, Agência Nacional de Águas (ANA) e Usuários dos Recursos Hídricos Subterrâneos, como base nacional compartilhada para armazenagem, manuseio, intercâmbio e difusão de informações sobre águas subterrâneas.

Além desses sistemas de informação relacionadas às águas, destaca-se, ainda, o Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA) e o Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS), sendo que a Moção CNRH nº 039, de 7 de dezembro de 2006, também recomendou a integração entre esses sistemas.

3.5.1 Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)

O SNIRH está previsto nos arts. 5º, inc. VI, e 25 a 27 da Lei 9.433/1997, e visa a “coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos

hídricos e fatores intervenientes em sua gestão.” (art. 25). A ANA é a responsável pela organização, implantação e gestão desse sistema que se destina aos entes do SINGREH, aos usuários, à comunidade científica e à sociedade em geral³. Os dados armazenados fornecem as bases para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos, podendo ser encontrados dados sobre: divisão hidrográfica, quantidade e qualidade das águas, usos de água, disponibilidade hídrica, eventos hidrológicos críticos, planos de recursos hídricos, regulação e fiscalização dos recursos hídricos e programas voltados à conservação e gestão dos recursos hídricos. No caso das águas subterrâneas é possível, por exemplo, encontrar os sistemas aquíferos nacionais⁴ e transfronteiriços⁵.

3.5.2 Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH)

O CNARH foi estabelecido pela Res. ANA nº 317, de 26 de agosto de 2003, com o objetivo de “conhecer a demanda pelo uso da água no país para dar suporte à implementação dos instrumentos das políticas nacional e estaduais de recursos hídricos, e à fiscalização dos usos e interferências nos recursos hídricos” (art. 1º, § 2º). Esse cadastro materializa um “registro dos usuários de recursos hídricos, usos e interferências regularizados pelos Estados e pela União” (art. 1, § 1º). Desenvolvido pela ANA, em conjunto com as autoridades gestoras estaduais de recursos hídricos, o CNARH também faz parte do SNIRH.

A Res. CNRH nº 126/2011 estabeleceu as diretrizes para o cadastro de usuários de recursos hídricos e para a integração das bases de dados referentes aos usos de recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Em seu Anexo, a referida Resolução determina todos os dados que devem ser integrados pela ANA e pelas Unidades da Federação.

A ideia é que os Estados insiram nesse Cadastro Nacional as suas bases de dados relacionadas aos usos dos recursos hídricos, permitindo divulgar os seus usuários e usos, tendo como base as distintas territorialidades (local, regional ou nacional). Esse Cadastro faz uma ponte entre o Sistema Nacional e os Sistemas Estaduais de Informação de Recursos Hídricos no que diz respeito aos diversos tipos de usos de recursos hídricos. Os órgãos ou entidades gestoras

3. Esse sistema pode ser acessado em: <https://www.snirh.gov.br/>.

4. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/3ec60e4f-85ea-4ba7-a90c-734b57594f90>.

5. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/54891117-5f06-4cdc-b929-fc-d4b50eec08>.

de recursos hídricos e outorgantes estaduais e da União são responsáveis por inserir o registro dos usuários, dos usos e das interferências, acrescidos dos atos de regularização, conforme estabelecido na Res. CNRH nº 126/2011. Classificam-se como usuários desse Cadastro, todas as “pessoas

físicas ou jurídica, de direito público ou privado, fazendo uso ou interferência nos recursos hídricos, passíveis ou não de outorga, nos termos do art. 12 da Lei nº 9.433/1997, e das normas estaduais vigentes” (art. 3º, inc. III, da Res. CNRH nº 126/2011)⁶.

Box 19 – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS)

Valmor Freddo

Criado em 1996 pelo SGB-CPRM, o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) se destaca na temática de gestão das informações, sendo o principal acervo das informações dos poços existentes no Brasil. Os principais parceiros que apoiam e contribuem com a sua alimentação e consistência de dados são os órgãos gestores e intervenientes em recursos hídricos dos estados da Federação, empresas perfuradoras de poços e usuários de recursos hídricos.

O SIAGAS tem como objetivo coletar, consistir, armazenar e disponibilizar dados e informações hidrogeológicas georreferenciadas. Inicialmente, sua atuação visa a dar suporte à elaboração de mapas hidrogeológicos e, posteriormente, atender às demandas dos usuários, oriundos da área de Recursos Hídricos e correlatas. Apresenta mecanismos que facilitam a coleta, a consistência e o armazenamento de dados hidrogeológicos, atuando de forma articulada com os órgãos gestores estaduais e empresas parceiras (públicas e/ou privadas).

Uma das preocupações prioritárias, desde o início do desenvolvimento desse Sistema, foi fornecer aos gerentes e tomadores de decisões, informações cada vez mais qualificadas e relevantes. Daí que a filosofia adotada foi de abordagem de um banco de dados, estruturado em um modelo de dados com conteúdo abrangente, de modo a permitir maior flexibilidade, racionalização e intercâmbio com outras bases de dados.

O SIAGAS constitui importante instrumento de apoio à decisão, e possui como missão:

- dar subsídios à pesquisa, estudo e projetos de Hidrologia e Hidrogeologia desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil, no âmbito de sua atuação;
- formar uma base de dados nacional de poços para subsidiar a Política Nacional de Recursos Hídricos; e
- fornecer informações para a tomada de decisão, visando ao aumento da oferta hídrica, e servir de instrumento para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Entre os principais benefícios gerados a partir do Projeto SIAGAS, pode-se citar:

- agregação de valor à Base de Dados de Poços;
- instrumento de apoio à gestão racional dos recursos hídricos subterrâneos;
- insumo para a elaboração dos Mapas Temáticos em Hidrogeologia;
- apoio à Política Nacional de Recursos Hídricos.

Com sistema interativo e totalmente aberto ao público, o SIAGAS permite o acesso a dados cadastrais, construtivos, geológicos, hidrogeológicos, testes de bombeamento e análises químicas de diversos poços por todo o território nacional. Seu conteúdo pode ser encontrado na plataforma eletrônica SIAGAS Web, com fácil acesso à informação, possibilitando pesquisas hierarquizadas, tanto pontuais como espaciais, além de viabilizar aos usuários a sua utilização numa ampla gama de aplicações, desde a gestão, monitoramento das águas subterrâneas, estudos de avaliação hidrogeológica e de oferta de água⁷.

6. O sistema pode ser consultado em: <http://www.snhirh.gov.br/cnarh-histo/publico/index.jsf>.

7. Todos os dados encontram-se disponíveis no site: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>.

3.6 IMPLICAÇÕES JURÍDICAS PELO USO IRREGULAR DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A legislação nacional e estadual de recursos hídricos impõe uma série de obrigações àquele que deseja usar os recursos hídricos subterrâneos. Dentre elas, destacam-se as seguintes (VILLAR; GRANZIERA, 2020, pp. 128-129):

- licença ou autorização para perfuração de poços;
- outorga de direito de uso de recursos hídricos, concedida pela autoridade competente, e uso compatível com os seus termos prescritos;
- no caso dos usos previstos no art. 12 da Lei nº 9.433/1997, observância aos trâmites previstos na legislação estadual, tais como obtenção da declaração de uso isento ou insignificante junto ao órgão gestor de recursos hídricos competente e utilização das águas dentro dos limites previstos;
- as captações de águas subterrâneas deverão ser projetadas, construídas e operadas de acordo com as normas técnicas vigentes;
- as captações de águas subterrâneas deverão ser dotadas de dispositivos que permitam a coleta de água, medições de nível, vazão e volume captado para permitir o monitoramento quantitativo e qualitativo;
- os usos de águas subterrâneas sujeitos à outorga são passíveis de cobrança, caso esse instrumento esteja vigente na bacia;
- qualquer atividade ou empreendimento deve tomar medidas preventivas para evitar danos aos aquíferos;
- o proprietário de poços abandonados ou improdutivos, ou cuja operação cause alterações prejudiciais à qualidade das águas subterrâneas, deve tomar providências, conforme procedimento aprovado pelo órgão gestor de recursos hídricos.

No caso das águas subterrâneas que são utilizadas como águas minerais, termais, potáveis de mesa ou fins balneários, destacam-se as seguintes obrigações (VILLAR; GRANZIERA, 2020, p. 129):

- obtenção de autorização de pesquisa e de portaria de lavra junto à ANM com o fim de explorar o potencial das águas subterrâneas relacionadas às características de água mineral, termal, potável de mesa ou fins balneários;
- obedecer aos termos constantes na autorização de pesquisa e na portaria de lavra emitida pela ANM;

- estabelecer perímetros de proteção de águas minerais;
- alguns estados exigem a obtenção de outorga de direito de uso ou declaração de uso isento para esse tipo de exploração.

O descumprimento de qualquer uma dessas obrigações pode gerar responsabilidade civil, penal e administrativa, nos termos do art. 14, § 1º da Lei nº 6.938/81, e do art. 225, § 3º da Constituição Federal de 1988. Há farta jurisprudência nos Tribunais Estaduais, que: *a)* autoriza o tamponamento de poços desprovidos de outorga de direito de uso ou comprovação de sua dispensa; *b)* obriga poluidores ou proprietários a remediar áreas contaminadas; e *c)* condena usuários irregulares de águas minerais a pagar indenizações à União como compensação financeira pelo uso sem autorização de recurso federal (VILLAR; HIRATA, 2019; VILLAR; GRANZIERA, 2020). Não se localizou, contudo, na jurisprudência, o pagamento de indenizações ao Poder Público estadual ou terceiros afetados pelo uso de água subterrânea sem outorga de direito de uso, porém, em tese, essa compensação seria viável do ponto de vista jurídico.

A responsabilidade civil se materializa toda vez que ocorre um dano a um aquífero, e se desdobra em duas vertentes: *a)* reparação, remediação ou indenização pela alteração indesejável causada ao ambiente e seus elementos, ao aquífero e a suas águas; e *b)* compensação pelos prejuízos que essa alteração gerou à saúde e aos interesses das pessoas afetadas, como por exemplo, os usuários legítimos que perderam seus poços.

A responsabilidade administrativa e penal exige condutas assim tipificadas. O Quadro 10 demonstra as principais infrações administrativas, elencadas pela Lei nº 9.433/1997 e pelo Decreto Federal nº 6.514/2008, relacionadas ao uso das águas subterrâneas. Os estados também detêm competência para estabelecer outras infrações administrativas relacionadas ao uso e proteção dessas águas. Destaca-se, ainda, que o Código de Águas Minerais estabelece diversas obrigações e infrações administrativas pertinentes ao comércio das águas minerais (art. 24 a 34). A maioria dessas infrações administrativas são punidas por meio de: *a)* advertência por escrito, na qual são estabelecidos prazos para a correção das irregularidades; *b)* multa, simples ou diária; *c)* embargo provisório do poço para execução de serviços e obras necessárias ao efetivo cumprimento das condições de outorga ou para o cumprimento de normas referentes ao uso, controle, conservação e proteção dos recursos hídricos; e *d)* embargo definitivo do poço ou seu tamponamento.

Lei nº 9.433/1997:

Art. 49. Constitui infração das normas de utilização de recursos hídricos superficiais ou subterrâneos:

- I.derivar ou utilizar recursos hídricos para qualquer finalidade, sem a respectiva outorga de direito de uso;
- II.iniciar a implantação ou implantar empreendimento relacionado com a derivação ou a utilização de recursos hídricos, superficiais ou subterrâneos, que implique alterações no regime, quantidade ou qualidade dos mesmos, sem autorização dos órgãos ou entidades competentes;
- III.(VETADO)
- IV.utilizar-se dos recursos hídricos ou executar obras ou serviços relacionados com os mesmos em desacordo com as condições estabelecidas na outorga;
- V.perfurar poços para extração de água subterrânea ou operá-los sem a devida autorização;
- VI.fraudar as medições dos volumes de água utilizados ou declarar valores diferentes dos medidos;
- VII.infringir normas estabelecidas no regulamento desta Lei e nos regulamentos administrativos, compreendendo instruções e procedimentos fixados pelos órgãos ou entidades competentes;
- VIII.obstar ou dificultar a ação fiscalizadora das autoridades competentes no exercício de suas funções.

Decreto Federal nº 6.514/2008:

Art. 61. Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da biodiversidade:
Parágrafo único. As multas e demais penalidades de que trata o *caput* serão aplicadas após laudo técnico elaborado pelo órgão ambiental competente, identificando a dimensão do dano decorrente da infração e em conformidade com a graduação do impacto.

Art. 62. In corre nas mesmas multas do art. 61 quem:

[...]
III - causar poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade;
[...].

Art. 63. Executar pesquisa, lavra ou extração de minerais sem a competente autorização, permissão, concessão ou licença da autoridade ambiental competente ou em desacordo com a obtida:
Multa de R\$ 1.500,00 (mil e quinhentos reais) a R\$ 3.000,00 (três mil reais), por hectare ou fração.

Art. 66. Construir, reformar, ampliar, instalar ou fazer funcionar estabelecimentos, atividades, obras ou serviços utilizadores de recursos ambientais, considerados efetiva ou potencialmente poluidores, sem licença ou autorização dos órgãos ambientais competentes, em desacordo com a licença obtida ou contrariando as normas legais e regulamentos pertinentes:

Multa de R\$ 500,00 (quinhentos reais) a R\$ 10.000.000,00 (dez milhões de reais).

Art. 82. Elaborar ou apresentar informação, estudo, laudo ou relatório ambiental total ou parcialmente falso, enganoso ou omisso, seja nos sistemas oficiais de controle, seja no licenciamento, na concessão florestal ou em qualquer outro procedimento administrativo ambiental:

Multa de R\$ 1.500,00 (mil e quinhentos reais) a R\$ 1.000.000,00 (um milhão de reais).

Quadro 10 – Infrações administrativas relacionadas ao uso das águas subterrâneas

Fonte: Villar e Granziera (2020, p. 130).

O Quadro 11 apresenta os crimes ambientais relacionados ao uso das águas subterrâneas, estabelecidos pela Lei nº 9.605/1998. Além disso, o uso de águas minerais sem autorização da ANM tem sido considerado por diversos julgados como crime de usurpação de patrimônio da União, previsto no art. 2º da Lei nº 8.176/1991.

Lei nº 9.605/1998:

Art. 54. Causar poluição de qualquer natureza em níveis tais que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, ou que provoquem a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora:

Pena - reclusão, de um a quatro anos, e multa.

§ 1º. Se o crime é culposo:

Pena - detenção, de seis meses a um ano, e multa.

§ 2º. Se o crime:

[...]

III - causar poluição hídrica que torne necessária a interrupção do abastecimento público de água de uma comunidade;

[...]

Art. 55. Executar pesquisa, lavra ou extração de recursos minerais sem a competente autorização, permissão, concessão ou licença, ou em desacordo com a obtida:

Pena - detenção, de seis meses a um ano, e multa.

Art. 60. Construir, reformar, ampliar, instalar ou fazer funcionar, em qualquer parte do território nacional, estabelecimentos, obras ou serviços potencialmente poluidores, sem licença ou autorização dos órgãos ambientais competentes, ou contrariando as normas legais e regulamentares pertinentes:

Pena - detenção, de um a seis meses, ou multa, ou ambas as penas, cumulativamente.

Art. 68. Deixar, aquele que tiver o dever legal ou contratual de fazê-lo, de cumprir obrigação de relevante interesse ambiental:

Pena - detenção, de um a três anos, e multa.

Parágrafo único. Se o crime é culposo, a pena é de três meses a um ano, sem prejuízo da multa.

Art. 69-A. Elaborar ou apresentar, no licenciamento, concessão florestal ou qualquer outro procedimento administrativo, estudo, laudo ou relatório ambiental total ou parcialmente falso ou enganoso, inclusive por omissão:

Pena - reclusão, de 3 (três) a 6 (seis) anos, e multa.

§ 1º. Se o crime é culposo:

Pena - detenção, de 1 (um) a 3 (três) anos.

§ 2º. A pena é aumentada de 1/3 (um terço) a 2/3 (dois terços), se há dano significativo ao meio ambiente, em decorrência do uso da informação falsa, incompleta ou enganosa.

Lei nº 8.176/1991:

Art. 2º. Constitui crime contra o patrimônio, na modalidade de usurpação, produzir bens ou explorar matéria prima pertencentes à União, sem autorização legal ou em desacordo com as obrigações impostas pelo título autorizativo.

Pena: detenção, de um a cinco anos, e multa.

Quadro 11 – Crimes ambientais relacionados às águas subterrâneas

Fonte: Villar e Granziera (2020, p. 131).

3.7 INSTRUMENTOS DE OUTRAS POLÍTICAS QUE CONTRIBUEM PARA A GOVERNANÇA DAS ÁGUAS

A ideia de gestão integrada dos recursos hídricos pressupõe não apenas políticas específicas para uso e aproveitamento dos recursos hídricos, mas, também, a coordenação com as políticas relacionadas ao uso e ocupação do território, aos setores de usuários e à proteção ambiental. A centralidade da água para as atividades econômicas, ecossistemas e qualidade da vida humana faz com que essa substância seja (ou deveria ser) uma variável importante na aplicação de instrumentos de gestão de outras políticas públicas, com destaque àquelas relacionadas ao meio ambiente, saneamento, agricultura e urbanismo.

São exemplos de leis nacionais que preveem instrumentos de gestão correlacionados à gestão hídrica: a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981), a Política Agrícola (Lei nº 8.171/1991), o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (Lei nº 9.985/2000), a Política Urbana (Lei nº 10.257/2001), a Política Federal de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007), a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009), a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a Resolução Conama nº 420/2009 (áreas contaminadas), o “Novo Código Florestal” (Lei nº 12.651/2012) e a Política Nacional de Irrigação (Lei nº 12.787/2013).

De acordo com as suas competências, os estados e municípios devem regulamentar e implementar esses instrumentos, incluindo os aspectos relacionados às águas (superficiais e subterrâneas) e a promoção da segurança hídrica. Os principais instrumentos de gestão que podem ter influência positiva ou negativa sobre as águas, são (VILLAR; HIRATA, 2022):

- Plano Diretor;
- Legislação relacionada ao parcelamento, uso e ocupação do solo;
- Zoneamento Ambiental;
- Licenciamento Ambiental de Atividades Potencialmente Poluidoras;
- Licenciamento ou autorização administrativa para sondagem e perfuração de poço;
- Zoneamento Econômico Ecológico (ZEE);
- Unidades de Conservação;
- Programa Estadual de Regularização Ambiental (PRA);

- Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal;
- Sistema Nacional de Informações de Meio Ambiente (Sinima);
- Planos de Mudança Climática;
- Planos de Resíduos Sólidos;
- Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos;
- Gerenciamento de Áreas Contaminadas;
- Relatório de áreas contaminadas;
- Planos de Saneamento Básico;
- Sistema de Informações sobre os Serviços Públicos de Saneamento Básico;
- Programas para Recuperação de Nascentes;
- Programa para o Manejo Adequado de Dejetos de Animais;
- Planos de Irrigação (PEI);
- Zoneamento Agroecológico (ZA);
- Sistema de Informações sobre Irrigação.

Esses instrumentos têm potencial para promover a gestão das águas subterrâneas à medida que norteiam e otimizam a atuação dos usuários, protegem as águas ou elementos relacionados ao ciclo hidrológico, impõem restrições ou limitam o uso e ocupação do solo, ou condicionam a implementação de atividades potencialmente poluidoras ou utilizadoras de recursos naturais. O grande desafio, contudo, é que sejam implementados de forma efetiva e eficaz, bem como contemplam as águas subterrâneas. O Poder Público apresenta dificuldades em elaborar ou implementar importantes instrumentos de planejamento, como é o caso dos Planos Estaduais de Irrigação, do Zoneamento Agroecológico e do Zoneamento Econômico Ecológico. Essa situação é particularmente preocupante pois o Brasil figura entre os dez países com a maior área equipada para irrigação, sendo a agricultura o principal usuário em termos quantitativos (ANA, 2021).

Outro problema é a inclusão da proteção dos aquíferos no ordenamento territorial municipal. As águas subterrâneas são fundamentais para o abastecimento público, principalmente dos pequenos municípios. Não é usual, contudo, que os municípios utilizem os instrumentos de política urbana para proteger as áreas de recarga que contribuem para garantir o abastecimento local, ou realizem um zoneamento que leve em conta a vulnerabilidade dos aquíferos.

REFERÊNCIAS

- ALLEY, W. M.; LEAKE, S. A. The journey from safe yield to sustainability. National
- ALLEY, W. M.; REILLY, T. E.; FRANKE, O. L. Sustainability of ground-water resources. *US Geological Survey Circular*, v. 1186, 1999.
- ANA. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: 2013. Brasília: ANA, 2013. Disponível em: http://conjuntura.ana.gov.br/docs/conj2013_rel.pdf. Acesso: 29/04/2015.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil e fiscalização dos usos de recursos hídricos no Brasil**. Supervisão geral de João Gilberto Lotufo Conejo; Coordenação geral de Francisco Lopes Viana e Gisela Damm Forattini. Brasília: ANA, 2007.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Avaliação dos aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazônicas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000)**. Hidrogeologia e Modelo Numérico de Fluxo da PHA no Brasil, t. I, v. III, 2015. 330p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH) da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema**. Paranapanema, SP, set. 2016.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Cobrança pelo uso dos recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2019.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020**: informe anual. Brasília: ANA, 2020.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021.
- AUGUSTO, V. A.; CAMPOS, J. E. G. Domínios Hidrogeoclimáticos no Semiárido Brasileiro, Estado da Bahia: Unidades-Base para Gestão Sustentável das Águas Subterrâneas. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, 2021.
- Bear, J.; Levin, O. The optimal yield of an aquifer. I.A.S.H. Symposium on Artificial Recharge and Management of Aquifers, *IASH Publ.* n. 72, pp. 401-412. 1967.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos... Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**: Prioridades 2012-2015. Brasília, dez. 2011. Disponível em: <https://bibliotecadigital.seplan.planejamento.gov.br/bitstream/handle/iditem/435/PNRH%202012-2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- CAMPOS, J. E. G.; CORREA, P. M. **Critérios para determinação de vazões outorgáveis em mananciais subterrâneos: aplicação no Distrito Federal**. São Paulo: UNESP, Geociências, v. 32, n. 1, 2013, pp. 23-32.
- CARDOSO, I. **Programa Nacional de Águas Subterrâneas – PNAs**. Meio Ambiente Brasil. 2009. Disponível em: <https://sites.google.com/site/aabrasilma/Home/planos-de-acao/ds/>
- dsrh/recursos-hidricos/programanacionaldeaguassubterraneas-pnas.
- CARVALHO, A. M.; HIRATA, R. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. *Geologia USP*, v. 12, n. 1, 2012, pp. 53-70 (Série Científica).
- CBH PARDO. Comitê da Bacia Hidrográfica do Pardo. **Deliberação nº 04, de 9 de junho de 2006**.
- CBH PARDO. Comitê da Bacia Hidrográfica do Pardo. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica 2020**. Grupo de Trabalho Permanente do Relatório Anual de Situação dos Recursos Hídricos e Plano de Bacia/UGRHI-4 Pardo. Ribeirão Preto, SP, 2020. 114p. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-PARDO/19583/relatorio-situacao-2020-ab2019-versao-final.pdf>.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 145, de 12 de dezembro de 2012**. Estabelece diretrizes para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e dá outras providências. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%20145.pdf>.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 15, de 11 de janeiro de 2001**. Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/61-resolucao-n-15-de-11-de-janeiro-de-2001/file>.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 202, de 28 de junho de 2018**. Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos que contemplam a articulação entre a União, os Estados e o Distrito Federal com vistas ao fortalecimento dessa gestão. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/2437-resolucao-n-202-de-28-de-junho-de-2018/file>.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002**. Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/67-resolucao-n-22-de-24-de-maio-de-2002/file>.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 48, de 21 de março de 2005**. Estabelece critérios gerais para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/2436-resolucao-cnrh-48/file>.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 91, de 05 de novembro de 2008**. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CNRH%20n%C2%BA%2091.pdf>.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 92, de 5 de novembro de 2008**. Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=107829>.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/>.

- gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf.
- CONKLING, H. Utilization of groundwater storage in stream system development. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, v. 111, 1946, pp. 275-305.
- COSTA, D. A.; ASSUMPÇÃO, R. S. F. V.; AZEVEDO, J. P. S.; SANTOS, M. A. **Dos instrumentos de gestão de recursos hídricos – o Enquadramento – como ferramenta para reabilitação de rios.** Rio de Janeiro, v. 43, n. especial 3, dez. 2019, pp. 35-50.
- COSTA, M. L. M.; RIBEIRO, M. M. R.; REGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T. Proposição de critérios de outorga para Águas Subterrâneas. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, jan./mar. 2011, pp. 105-113.
- DOVERI, M.; MENICHINI, M.; SCOZZARI, A. Protection of groundwater resources: worldwide regulations and scientific approaches. In: SCOZZARI, A.; DOTSIKA, E. (Eds.). **Threats to the Quality of Groundwater Resources: prevention and control**, Handbook of Environmental Chemistry, Berlin, Springer-Verlag, chapter 1, 2015 (doi 10.107/698_2015_421).
- ENVIRONMENTAL AGENCY. **Manual for the production of groundwater source protection zones.** Bristol: Environment Agency, 2019, 112p.
- FETTER C.W. **Applied Hydrogeology.** Upper Saddle River. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2004.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; CUSTODIO, E. Waterwells: why is legality not more attractive? *Hydrogeology Journal*, v. 29, 2021, pp. 1365-1368. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02319-x>.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection.** A guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Washington: The World Bank, 2002, 103p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea:** um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Washington: Banco Mundial, 2006, 104p.
- FOSTER, S.; SKINNER, A. C. Groundwater protection: the Science and practice of land surface zoning. *Groundwater Quality, Remediation and Protection*, Prague Conference, Proceedings. **IAHS Publication**, n. 225, 1995, pp. 471-482.
- FRANKE, O. L.; REILLY, T. E.; POLLOCK, D. W.; LABAUGH, J. W. **Estimating áreas contributing recharge to wells.** Lessons from previous studies. Denver, US: Geological Survey, 1998. 14p. (Circular n. 1174).
- GARCÍA, A. G.; NAVARRETE, C. M. Protection of groundwater intended for human consumption in the water framework directive: strategies and regulations applied in some european countries. *Polish Geological Institute Special Papers*, v. 18, 2005, pp. 28-32.
- GÁRFIAS, J.; EXPÓSITO, J. L.; LLANOS, H. Delimitación de las zonas de protección mediante métodos analíticos y um modelo numérico de agua subterránea, acuífero Margarita, Cuba. **Boletín Geológico y Minero**, v. 119, n. 1, 2008, pp. 7-20.
- GRANZIERA, M. L. M. **Direito ambiental.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015.
- Ground Water Association. **Groundwater Journal**, v. 42, 2004.
- HARDIN, G. The tragedy of the commons. *Science*, v. 162, 1968, pp. 1243-1248.
- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.** São Paulo: Instituto de Geociências (USP) e Trata Brasil, 2019.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço. 2. ed. **Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos.** São Paulo: Instituto Geológico, n. 2, 2012.
- KALF, F. R.; WOOLEY, D. R. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. *Hydrogeology Journal*, v. 13, 2005, pp. 295-312.
- LANNA, A. E. L. A gestão dos recursos hídricos no contexto das políticas ambientais. In: MUÑOZ, H. R. (Coord.). **Interfaces da gestão dos recursos hídricos: desafios da Lei de Águas.** Brasília: MMA/SRH, 2000, pp. 75-108.
- LANNA, A. E. L.; PEREIRA, J. S.; HUBERT, G. Os novos instrumentos de planejamento do Sistema Francês de Gestão de Recursos Hídricos: II - Reflexões e Propostas para o Brasil. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 2, abr./jun. 2002, pp. 109-120.
- LEAL, M. S. **Gestão ambiental de recursos hídricos: princípios e aplicações.** Rio de Janeiro: CPRM, 1998.
- LEE, C. H. **The determination of safe yield of underground reservoirs of the closed basin type.** Transactions of American Society of Civil Engineers, paper n. 1315, 1915, pp. 48-251.
- LIU, Y.; WEISBROD, N.; YAKIREVICH, A. Comparative study of methods for delineating the wellhead protection area in an unconfined coastal aquifer. *Water*, v. 11, 2019. 1168p.
- MDR. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Plano Nacional de Recursos Hídricos.** Informe de Implementação das Prioridades e Metas para 2016-2020/21. Brasília, 2016. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1/Pag_02_Informe_Prioridades_PNRH_2016_2020.pdf.
- MEINZER, O. E. Quantitative methods of estimating ground-water supplies. *Geological Society of America Bulletin*, v. 31, 1920, pp. 329-338.
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Informe de Implementação das Prioridades e Metas para 2016-2020/21. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1/Pag_02_Informe_Prioridades_PNRH_2016_2020.pdf.
- NAVARRETE, C. M.; GARCÍA, A. G. Methodology for wellhead protection área implementation. Application to urban water supply catchments in carbonated and detritic formations in Spain. **Protecting Groundwater.** Birmingham, UK: Environment Agency NC/00/10/Conference Proceedings, 2001, pp. 198-209.
- NAVARRETE, C. M.; GARCÍA, A. G. **Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano.** Metodología y aplicación al território. Madrid:

- IGME, 2003, 273 p. (Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas).
- OECD. Water Resources Governance in Brazil, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, 2015.
- PARIS, M. C.; D'ELIA, M.; PÉREZ, M.; PACINI, J. Wellhead protection zones for sustainable groundwater supply. *Sustainable Water Resources Management*, v. 5, 2019, pp. 161-174.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, 2008, pp. 43-60. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10292>.
- ROEDEL, R. M. **Proposição de critérios técnicos para outorga de águas subterrâneas**. Estudo de caso: polo industrial de Camaçari. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Salvador, 2017.
- SÃO PAULO. Deliberação CRH nº 146, de 11 de dezembro de 2012.** Aprova os critérios, os prazos e os procedimentos para a elaboração do Plano de Bacia Hidrográfica e do Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica. Disponível em: https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/deliberation//CRH/10742/deliberacao_crh_146_2012_pbh.pdf.
- SÃO PAULO. Lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991.** Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1991/lei-7663-30.12.1991.html#:~:text=Artigo%20.%C2%BA%20%D%20A%C2%ADtica,pelas%20gera%C3%A7%C3%B5es%20futuras%2C%20em%20todo.>
- SÃO PAULO. Sistema Aquífero Bauru.** Delimitação de perímetros de proteção de poços de abastecimento público. São Paulo: Instituto Geológico/Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Coord. Geral José Luiz Albuquerque Filho e Mara Akie Iritani. *Cadernos do Projeto Aquíferos*, n. 6, 2016 (texto e anexos).
- Disponível em: <http://igeologico.sp.gov.br/noticias/caderno-do-projetos-aquiferos-no6>.
- SOPHOCLEOUS, M. A. Managing water resources systems: why safe yield is not sustainable. *Ground Water*, v. 35, 1997.
- STROBL, R. O.; ROBILLARD, P. D. Review of USEPA-recommended and German wellhead protection area delineation methods. *Journal of Environmental Hydrology*, v. 13, paper 3, 2005.
- THEIS, C. V. The source of water derived from wells: essential factors controlling the response of an aquifer to development. *Civil Engineer*, v. 10, 1940, pp. 277-280.
- USEPA – U.S. **Ground water and wellhead protection**. Handbook. Washington: USEPA, Office of Research and Development (EPA/625/R-94/001), 1994.
- USEPA – US. **Guidelines for delineation of wellhead protection areas**. Washington: USEPA, Office of Groundwater Protection (EPA/440/6-87-010), 1987.
- VILLAR, P. C; GRANZIERA, M. L. M. **Direito de águas à luz da governança**: Brasília: ANA, 2020.
- VILLAR, P. C. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. *Ambiente & Sociedade*. São Paulo, v. 19, n. 1, jan./mar. 2016, pp. 83-102. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/asoc/v19n1/pt_1809-4422-asoc-19-01-00085.pdf.
- VILLAR, P. C.; HIRATA, R. A interpretação dos tribunais frente ao artigo 45 da Lei 11.445/2007 e a perfuração de poços como fontes alternativas de abastecimento de água. *Águas subterrâneas*. 2019. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29420>.
- VILLAR, P. C.; HIRATA, R. Groundwater Governance and the Construction of Legal Indicators for Brazilian States. *Ambiente e Sociedade*, v. 25, 2022.
- ZHOU, Y. A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrogeology*, v. 370, 2009, pp. 207-213.



Poço Violeta nos Aquíferos Cabeças e Serra Grande
em Alvorada do Gurguéia (PI)
Foto: Vagney A. Augusto / Banco de Imagens ANA

CAPÍTULO 4

GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E O FORTALECIMENTO DA GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS



4.1 ESTABELECENDO UMA AGENDA DE IMPLEMENTAÇÃO DA GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Historicamente, a governança das águas no Brasil sempre concentrou seus esforços nas águas superficiais. O Poder Público, nesse contexto, enfrenta dificuldades para inserir as águas subterrâneas na gestão, enquanto a integração com as águas estuarinas e costeiras segue no plano dos debates, e a das águas meteóricas não é sequer

discutida. A integração água superficial e subterrânea é o primeiro passo rumo à gestão integrada dos recursos hídricos. Esse tipo de gestão demanda ações conjuntas que contemplam esse movimento cíclico da água, mas, também, ações específicas que considerem as particularidades de cada dimensão, sob pena de a sociedade perder oportunidades sociais, ecológicas e econômicas. O Quadro 12 apresenta as principais distinções entre as águas superficiais e subterrâneas.

Aspecto	Águas subterrâneas	Águas superficiais
Armazenamento	Grande	Pequeno e médio
Área do recurso	Relativamente irrestrita	Restrita aos corpos de água
Velocidade do fluxo	Muito baixa	Média e alta
Tempo de residência	Geralmente décadas/séculos	Geralmente semanas/meses
Propensão a secas	Baixa	Alta
Perdas por evaporação	Baixa e localizada	Alta
Avaliação do recurso	Alto custo e incerto	Baixo custo e certo
Impactos da extração	Longo e disperso	Imediato
Qualidade da água	Geralmente boa	Variável
Vulnerabilidade à poluição	Proteção natural variável	Sem proteção
Persistência da poluição	Geralmente extrema	Geralmente transitória

Quadro 12 – Principais distinções entre as águas superficiais e subterrâneas

Fonte: Tuinhof et al. (2006, p. 2).

As águas subterrâneas não são recursos acessórios às águas superficiais, pelo contrário, elas mantêm a disponibilidade hídrica superficial. Além disso, independentemente do cenário das mudanças climáticas ou de crises hídricas, essas águas são fundamentais para o abastecimento público, usos econômicos e para grupos vulneráveis que não dispõem de outra fonte hídrica. Por fim, seu tempo de residência faz com que parte delas não seja considerada um recurso renovável, o que exige um debate sobre a forma de maximizar o seu uso e o direito das futuras gerações ao recurso.

A falta de conhecimento sobre as águas subterrâneas ou sobre os seus usos e papel estratégico é uma ameaça

aos recursos hídricos (subterrâneos e superficiais), ecossistemas, seres humanos e às futuras gerações. Além disso, perde-se a oportunidade de estimular o desenvolvimento de áreas que poderiam se favorecer desse potencial hídrico.

O Brasil enfrenta períodos de secas cada vez mais frequentes e, consequentemente, redução da vazão dos rios e da disponibilidade hídrica de reservatórios, o que pode comprometer a segurança hídrica, energética, alimentar e econômica. Esse cenário provoca o incremento do uso dos aquíferos, seja para fins de abastecimento, irrigação ou indústria. Nesse contexto, há três problemas centrais que ameaçam as águas subterrâneas (CONTI, 2017):

- a) **Falta ou ineficiência da gestão e de controle das extrações dos aquíferos.** As extrações desordenadas geram prejuízos socioambientais e podem comprometer a única fonte de água disponível, principalmente no caso de populações vulneráveis.
- b) **Falta ou ineficiência das ações para manter a qualidade do aquífero ou para recuperá-lo.** As atividades antrópicas podem contaminar os aquíferos e inviabilizar importantes reservas hídricas.
- c) **Falta de planejamento estratégico na gestão dos aquíferos que incorpore as pressões decorrentes da relação global-local e local-global.** As mudanças climáticas, a perda das grandes florestas e o mercado internacional formam novas realidades de oferta e demanda das águas subterrâneas que precisam ser enfrentadas. Conforme a estruturação desse planejamento, as águas subterrâneas podem ser utilizadas como estratégia para adaptação e mitigação ou, então, serem degradadas.

A solução desses problemas advém de uma governança pautada no conhecimento, na coordenação interinstitucional e na participação dos múltiplos atores (institucionais e sociais) envolvidos no uso e na gestão do recurso hídrico, e no planejamento territorial, ambiental e socioeconômico. As particularidades das águas subterrâneas reforçam a importância da governança, principalmente diante da necessidade de avançar para além das ações setorizadas de gestão e no engajamento dos usuários.

O conhecimento hidrogeológico existente no Brasil é incipiente frente às necessidades impostas pela gestão de recursos hídricos, contudo, é somente ele que permite a “visualização” dos aquíferos. As águas subterrâneas se movimentam por estruturas geológicas heterogêneas e complexas, o que dificulta o acesso à informação e à formação de um processo de tomada de decisão participativo e fundamentado. A invisibilidade e o desconhecimento também ocorrem em relação aos conflitos entre os usuários e entre as políticas públicas de recursos hídricos, ambiente, agricultura, saneamento, mineração e desenvolvimento econômico. Os usuários não correlacionam que perdas de produtividade de poços ou a sua contaminação possam ser causadas por terceiros, que estão utilizando poços de maneira incorreta (ou irregular), ou pela proximidade de atividades capazes de contaminar o solo e os aquíferos. Sem a compreensão do que causa esses problemas não há

pressão social frente ao Poder Público gestor (VILLAR, 2016; CONICELLI *et al.*, 2021).

No Brasil, os instrumentos de comando e controle são a base da gestão das águas, todavia, no caso dos recursos subterrâneos, esses mostram limitações. A prova contundente é o elevado grau de poços irregulares. Se o descumprimento da lei é, em si, um problema, outro é o desconhecimento da existência do número real de poços. No Brasil, 90% das captações são particulares e apenas 10% abastecem as redes públicas urbanas (HIRATA *et al.*, 2019). A maioria das captações é invisível às políticas públicas, e os estados não têm ideia da dimensão econômica e do papel socioambiental dessas águas.

Em virtude da facilidade de exploração, essa fonte se torna cada vez mais popular para o abastecimento de diversas atividades no campo e na cidade, e se fundamenta nos seguintes pontos: baixo custo de exploração; rapidez na perfuração de poços (em alguns casos em menos de uma semana); novas tecnologias associadas à operação de poços, que permitem às captações funcionarem quase autonomamente; e disponibilidade em praticamente todo o território brasileiro. O poço é a solução no local onde está o problema, prescindindo de adutoras.

Nesse contexto, a governança precisa elaborar, de forma conjunta, as respostas para as seguintes perguntas: como proteger um recurso invisível e não conhecido pela sociedade? Quem extraí essas águas, e como controlar essa extração de forma a compatibilizar o uso individual com os interesses coletivos? Como estimular ações de proteção dos aquíferos? Como revelar e equacionar os conflitos existentes pelo seu uso? Não há respostas certas para essas questões, pois em cada aquífero, dentro do contexto da própria bacia hidrográfica, há necessidade de um processo de governança que defina a forma como se dará o seu uso frente às funções socioeconômicas e ecossistêmicas desempenhados.

O Poder Público e os órgãos de gestão de recursos hídricos têm papel fundamental nesse processo, porém, é necessário mobilizar outros atores e interessados. A boa governança propicia avançar de forma mais holística em relação aos desafios enfrentados pela gestão das águas subterrâneas. Muito mais do que as águas superficiais, o uso das águas subterrâneas se pulveriza em centenas a milhares de captações em apenas uma localidade. Não haverá, portanto, uma gestão adequada se os usuários não tiverem consciência de suas responsabilidades e direitos e, sobretudo, se não participarem desse processo. Dessa forma, a governança das águas subterrâneas precisa superar as seguintes fragilidades:

- Falta de conhecimento hidrogeológico e/ou dificuldade de incorporar esse conhecimento na aplicação da governança das águas.**

A Hidrogeologia tem papel fundamental na governança dos aquíferos na medida em que essa ciência é a responsável por espacializar os aquíferos e determinar os aspectos centrais da gestão: *a)* quanto de água pode ser outorgada; *b)* como a extração impacta o aquífero e os recursos hídricos dependentes; *c)* qual a qualidade da água; *d)* como conservar o aquífero; *e)* como recuperar um aquífero. Em muitos casos, mesmo com a existência de dados demonstrando situações de risco, há dificuldades de incorporar os aquíferos nas políticas públicas e nos instrumentos de gestão.

- Falta de estudos sobre as dimensões social, econômica e política da governança, gestão, apropriação, uso e importância das águas subterrâneas.**

O debate deve ir além das questões técnicas de Geologia e Engenharia, e incorporar temas como: *a)* arquitetura institucional e jurídica da governança das águas subterrâneas; *b)* o valor dessas águas; *c)* as relações sociais e estruturas de poder por trás da lógica da clandestinidade, desconhecimento e invisibilidade; *d)* os processos de participação social em relação a essas águas; *e)* os conflitos sociais e a apropriação desigual do recurso; *e f)* estratégias de educação ambiental, etc.

- Fragilidades institucionais e jurídicas para promover a governança das águas subterrâneas.**

As instituições responsáveis por organizar a gestão dos recursos hídricos enfrentam problemas relacionados à falta de recursos para promover estudos técnicos e campanhas institucionais, bem como dificuldades operacionais e técnicas para implementar os instrumentos de gestão ou ações de fiscalização. Paralelamente, a falta de regulação ou as suas limitações, dificultam a implementação da gestão e de seus instrumentos, criando conflitos jurídicos ou simplesmente impedindo a sua operacionalização.

- Falta de coordenação horizontal e vertical¹ entre os órgãos gestores para a implementação**

- das políticas públicas relacionadas às águas subterrâneas.**

O federalismo brasileiro e a repartição de competências em matéria de águas, solo, exploração mineral e desenvolvimento econômico exige a coordenação entre os diversos setores e escalas de governo para promover políticas efetivas à gestão das águas subterrâneas. Apesar disso, faltam iniciativas que promovam essa coordenação entre União, Estados, Distrito Federal e municípios, e que correlacionem os recursos hídricos subterrâneos com as agendas de meio ambiente, ordenamento territorial, águas minerais e políticas setorizadas, como é o caso de saneamento, agricultura e desenvolvimento.

- Falta de engajamento e participação dos usuários na gestão das águas subterrâneas.**

Os usuários de águas subterrâneas não se envolvem de forma proativa na gestão e monitoramento do aquífero, pelo contrário, a grande maioria deles está à margem dessa gestão, pois utiliza as águas de forma irregular. A legislação brasileira não incentiva a formação de organizações de usuários, como ocorre em outros países, restringindo o papel dos usuários à participação nos colegiados (CBH, CERH e CNRH). Na maioria das vezes esses usuários não participam ou são sub-representados.

- Desconhecimento social sobre as águas subterrâneas.**

A sociedade civil, usuários e até o Poder Público não promovem o debate sobre os aquíferos. Nos órgãos colegiados, as discussões e investimentos priorizam os recursos hídricos superficiais. A maioria das organizações não governamentais que atua no setor foca a sua atuação nas águas superficiais. O desconhecimento sobre as águas subterrâneas impede a participação, já que os atores sociais não entendem a importância de gerir o recurso ou as consequências de não fazê-lo. O desconhecimento não permite que se estabeleça na coletividade um senso de relevância, urgência ou prioridade para essas águas.

A governança, a governabilidade e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos passam pela seguinte agenda mínima:

- reconhecimento regional dos potenciais aquíferos e suas principais funções ecossistêmicas

1. Coordenação horizontal se dá entre “organizações e atores políticos burocráticos que compõem o mesmo nível de governo”, enquanto a vertical é composta por “diferentes níveis de governo” (SOUZA, 2018, p. 16).

por meio de estudos que incorporem os vários papéis desempenhados pelas águas subterrâneas, inclusive a sua importância econômica (quantificando-a) e ecológica (reconhecendo-a). Os trabalhos para este reconhecimento devem considerar a cartografia hidrogeológica, baseada no cadastro de poços tubulares, mapa geológico de superfície, mapa da rede hidrográfica, áreas de pântanos, mangues e lagos, balanços hídricos regionais (em bacias hidrográficas), entre outros;

- estudo sobre a relação dos aquíferos com outros corpos hídricos, quantificando as descargas de águas subterrâneas na perenidade dos rios, lagos, mangues e pântanos, mediante análises em bacias hidrográficas e modelações numéricas regionais;
- identificação das áreas críticas dos recursos hídricos subterrâneos, ou seja, aquelas com maior uso das águas subterrâneas, tanto para o abastecimento público como para o privado, ou aquelas onde se identifica maior perigo de contaminação (na acepção de Foster e Hirata, 1988), a partir do cadastramento de fontes potenciais de contaminação e vulnerabilidade à contaminação;
- identificação dos atores envolvidos no uso e na gestão dos recursos hídricos, territorial e ambiental;
- identificação das comunidades e grupos vulneráveis que dependem das águas subterrâneas;
- criação de grupos específicos de Hidrogeologia em Comitês de Bacia e outras instâncias que contribuam para planejar o aproveitamento das águas nas bacias, sobretudo nas áreas críticas. Esses grupos devem definir uma agenda particular de investimentos a fim de identificar as áreas prioritárias e os estudos que busquem as soluções;
- realizados os estudos hidrogeológicos básicos, os órgãos de gestão de recursos hídricos, especialmente os colegiados, deveriam estabelecer grupos interdisciplinares com o objetivo de propor ações estratégicas abrangentes à uma gestão comprometida com as necessidades da sociedade e do ambiente, que leve em consideração, inclusive, temas como equidade e responsabilidade social;
- criação de linhas de pesquisa interdisciplinares de fomento das águas subterrâneas às universi-

dades e centros de pesquisa, empresas privadas e de consultoria, além de grupos organizados da sociedade civil;

- realização de treinamento técnico em vários níveis para diversos públicos, sempre alinhado às políticas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos e de governança;
- promoção de iniciativas de Educação Ambiental e Comunicação Social sobre águas subterrâneas e aquíferos nas escolas, sindicatos, associações de bairro, etc., priorizando as áreas críticas, de forma a reduzir a irregularidade das captações e o risco de utilização de águas subterrâneas contaminadas. Entidades como o CREA e a Vigilância Sanitária deveriam ser envolvidas nessas iniciativas;
- inclusão de cláusulas contratuais para os prestadores de serviço de saneamento, prevendo ações de Educação Ambiental relacionadas às águas subterrâneas, sobretudo identificar o usuário privado irregular, conscientizando-o da importância do bom uso e da proteção e manutenção da sua captação;
- busca por mecanismos de incentivo para promover a regularização de poços;
- fomento ao estabelecimento de organizações de usuários que ajudem o Poder Público no monitoramento e na fiscalização das águas;
- fomento às parcerias com universidades e centros de pesquisa, Ordem dos Advogados do Brasil (OAB) e Ministério Público, no sentido de monitorar o avanço das políticas públicas estaduais relacionadas às águas subterrâneas;
- integração dos sistemas de informação relacionados à água, ambiente e setores de usuários, dando mais visibilidade às águas subterrâneas;
- inclusão das águas subterrâneas nas políticas urbanas, planos de saneamento, planos de irrigação, planos de gestão de resíduos sólidos e planos de irrigação;
- produção de indicadores de águas subterrâneas que alimentem um processo de comunicação com a sociedade sobre os avanços e falhas na gestão de águas, bem como as ações realizadas, ponderando o planejado, o executado e os cursos de longo prazo para a melhora do uso dos recursos hídricos, inclusive dos subterrâneos.

Box 20 – O uso conjuntivo dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos como estratégia de enfrentamento das mudanças climáticas*Bruno Conicelli*

As águas subterrâneas são fundamentais para enfrentar as crises hídricas. Com base nos dados oficiais, Hirata et al. (2019) constataram que as cidades abastecidas somente com água superficial foram duas vezes mais atingidas pela crise do que aquelas abastecidas somente por águas subterrâneas. Tais diferenças poderiam ser maiores se houvesse o uso planejado e gerenciado das águas subterrâneas, o que não ocorre na maioria das cidades.

Em virtude de sua capacidade de armazenamento, os aquíferos podem fornecer água mesmo após longos períodos de estiagem, em que a recarga é limitada ou mesmo nula. As quedas de nível em um aquífero sob exploração são lentas, o que permite recompor o armazenamento nos períodos em que há abundância de chuva. Essa característica contribui no enfrentamento de longos períodos secos, podendo a cidade ou o empreendimento, quando necessário, se valer dessa “poupança” de água do ciclo hidrológico, e deixar a fonte superficial para o período de chuvas ou mesmo criar mecanismos para que o excedente hídrico possa recarregar o aquífero, compensando as retiradas do período seco. Esse tipo de aproveitamento é conhecido na Hidrogeologia como *uso conjuntivo das águas superficiais e subterrâneas* (FOSTER; STEENBERGEN, 2011).

O uso conjuntivo permite melhor e mais equilibrado uso do ciclo hidrológico (e não apenas de um recurso), buscando a água mais disponível, mais barata economicamente e aquela que cause menor prejuízo ao ambiente. Outro ponto importante é que em uma cidade há diversos tipos de fontes hídricas que podem servir a diferentes usos. Aquíferos urbanos profundos têm águas potáveis e podem ser diretamente usadas para o abastecimento público, com pouco ou nenhum tratamento. Já os aquíferos rasos, que em alguns lugares têm as águas extraídas somente para drenar e manter secas as construções civis subterrâneas, podem ser aproveitados para usos menos nobres, como limpeza, rega de áreas verdes ou, quando o empreendimento permitir, no uso sanitário (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015).

A recarga artificial manejada de aquíferos é um aliado importante do uso conjuntivo, que pode auxiliar efluentes tratados a garantir a restituição de aquíferos superexplotados. Assim, a estratégia de aproveitamento conjuntivo de águas é a chave para permitir a sustentabilidade tanto de cidades como da agricultura irrigada.

4.2 ESTRATÉGIAS DE PROTEÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUAS E A SUPEREXPLORAÇÃO DE AQUÍFEROS

Os aquíferos têm como principal característica o grande armazenamento de água. Assim, retiradas de volumes superiores à recarga poderiam ser permitidas desde que houvesse compensações no futuro. Isso, porém, exige planejamento de longo prazo, com regras claras de exploração, baseadas em estudos técnicos e no acompanhamento por meio de uma rede de monitoramento integrada, além de engajamento dos usuários. As extrações nos aquíferos não devem ser reduzidas a uma simples aritmética de entradas e saídas, que desconsidera a sua capacidade de armazenamento ou o fato de que as extrações podem induzir maiores disponibilidades de águas subterrâneas (FOSTER et al., 2006). Ignorar essas ponderações significa perder a oportunidade que

os aquíferos oferecem de prover mais água ou de regular o equilíbrio entre produção e demanda, sobretudo em períodos de estiagens e secas prolongadas.

A formação de um planejamento de longo prazo é prejudicada pelos baixos investimentos em estudos, que permitiriam avaliar com precisão a potencialidade dos aquíferos. Adicionalmente, o problema de superexploração está associado ao grande número de poços irregulares ou desconhecidos, o que dificulta o estabelecimento de um programa realista de gestão dos recursos hídricos.

O gerenciamento adequado das extrações e o aproveitamento de um aquífero, um sistema aquífero ou parte específica de um aquífero, deve compor-se, inicialmente, pela identificação das áreas críticas, ou seja, aquelas onde o uso das águas subterrâneas é mais intenso ou onde os seus serviços ecossistêmicos desempenhados se mostrem

imprescindíveis. O reconhecimento das áreas críticas deve ter caráter regional, idealmente na escala 1:100.000 – 1:250.000, e abranger bacias hidrográficas específicas, a fim de verificar os recursos superficiais que podem ser impactados. Isso permitirá o planejamento de ações de uso da água subterrânea e, sobretudo, possibilitar aos gestores a identificação de prioridades entre as áreas críticas.

Os métodos de identificação das áreas críticas devem se basear em: *a)* cartografias hidrogeológicas de reconhecimento dos aquíferos e suas características hidráulicas, baseadas em um cadastro de poços, com testes e dados hidráulicos; *b)* identificação de áreas ecologicamente frágeis (pântanos, rios e mangues) do fluxo subterrâneo; *c)* cadastro de núcleos urbanos dependentes de água subterrânea para o abastecimento público e privado; *d)* registros de conflitos entre usuários; *e)* inventário de áreas com registro de grandes perdas de níveis potenciométricos do aquífero, reportados pelas empresas perfuradoras de poços, usuários ou operadores de sistemas de abastecimento de água; *e f)* histórico de redução de vazão em rios, drenagens e pântanos secos ou perda de nascentes e lagos.

O estudo da caracterização das áreas críticas deve ser desenvolvido em semidetalhe, preferencialmente na escala 1:50.000 ou maior. O foco é identificar as áreas de maior uso do recurso hídrico, quer pela grande densidade de poços, pela somatória de vazões elevadas ou pela presença de rebaixamentos pronunciados do nível potenciométrico, bem como nos casos de situações de conflito entre usuários ou onde o uso do recurso envolva populações vulneráveis.

O método de detalhamento das áreas críticas pode ser o MetQ (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015), em que uma área é quadriculada em tamanhos de 500 m x 500 m ou 250 m x 250 m, e os poços são localizados. As áreas com maior densidade de poços ou onde a soma de vazão é maior serão consideradas de maior criticidade. Tal ferramenta pode subsidiar a outorga, pois permite que o gestor do recurso estabeleça as áreas onde o uso da água subterrânea pode ser incentivado ou proibido, ou mesmo onde a outorga deve ser condicionada às exigências específicas.

A partir da identificação e caracterização das áreas críticas é necessário transformar esse conhecimento em ações institucionais, políticas e jurídicas. Normalmente, a ação mais frequente é a criação de áreas de restrição e controle de águas subterrâneas, cujo objetivo é limitar os volumes captados ou novas perfurações. Esse é o caso da área de restrição e controle de captação e uso de águas subterrâneas em Ribeirão Preto (SP), exposto no capítulo

anterior. A opção pela regulamentação de áreas de restrição e controle é uma política de gestão prevista em vários estados brasileiros e, inclusive, internacionalmente. O caso do aquífero do Valle de Santo Domingo (México) ilustra a forma como essa medida pode estabilizar as extrações, embora alerte sobre a dificuldade de reverter os prejuízos de uma extração sem controle prolongada por anos. Além disso, esse tipo de medida exige o envolvimento do Poder Público e usuários. Os órgãos de gestão precisam monitorar a evolução dos níveis de água do aquífero, engajar os usuários no processo de definição das metas e formas de alocação da água e fiscalizar o cumprimento da medida. Para cumprir essas obrigações é necessário firmar parcerias entre os vários níveis de governo (local, estadual e federal). Os usuários, por sua vez, precisam se comprometer a reduzir as captações a fim de atingir as metas, monitorar os seus poços e trabalhar em conjunto com o Poder Público para recuperar o aquífero.

Outra opção para recuperar o aquífero é a adoção de mecanismos para a recarga artificial do aquífero, detalhada no Box 21. Nesse caso, a estrutura pode ser implantada pelo Poder Público, pelos usuários ou por modelos mistos entre Poder Público e usuários. No Brasil, a recarga artificial não é usada como uma política pública, embora esteja prevista na Res. CNRH 153/2013. Os estados não regulamentaram esse tema com o detalhamento necessário, por exemplo, especificando os estudos e procedimentos a serem implementados.

A Galeria de Casos apresenta o Aquífero Genebra, que é um aquífero transfronteiriço compartilhado entre França e Suíça, que implantou um sistema conjunto de recarga artificial. Embora o aquífero seja transfronteiriço, esse arranjo institucional se deu por iniciativa das localidades afetadas (Cantão de Genebra, na Suíça, e o Departamento da Alta Savoia, na França), independentemente de qualquer atuação dos governos federais ou órgãos de Ministério das Relações Exteriores. Esse esquema de paradiplomacia² é posto como a principal experiência de sucesso na gestão de aquíferos transfronteiriços. Os governos locais dividiram o custo da implementação do sistema de recarga artificial e criaram uma comissão técnica composta por hidrogeólogos de ambos os países. Suas determinações técnicas em relação às taxas de exploração são vinculantes aos órgãos gestores e aos usuários de abastecimento público, principais responsáveis pela superexploração do aquífero.

2. Paradiplomacia são ações internacionais conduzidas por entes subnacionais, tais como estados da federação, ONGs, empresas e os municípios.

Box 21 – Recarga artificial dos aquíferos: uma alternativa para o aumento da disponibilidade hídrica*José Eloi Guimarães Campos**Vagney Aparecido Augusto**Júlio Henrichs de Azevedo**Drielly Sousa Rodrigues*

O processo mais comum de recarga natural das águas subterrâneas é aquele originário da infiltração das águas de chuva a partir da superfície e por sua percolação no perfil dos solos até a zona saturada dos aquíferos (VRIES; SIMMERS, 2002; SCANLON; HEALY; COOK, 2002). Apenas parte da água infiltrada na superfície resulta em efetiva recarga, uma vez que esse balanço é afetado pelo processo de evapotranspiração, pela retenção de água no solo na forma de umidade e, por vezes, pelo interfluxo de subsuperfície, que ocorre em razão de contrastes de permeabilidade na seção de infiltração.

A recarga artificial dos aquíferos corresponde a qualquer ação humana que resulte na ampliação da recarga natural, intencionalmente ou não (FETTER, 2001). Historicamente, o termo *recarga artificial dos aquíferos* (*artificial recharge of the aquifers*) foi usado para fazer referência aos projetos que visam a aumentar a infiltração e elevar o topo da zona saturada dos aquíferos. Nos últimos anos, essa terminologia vem sendo substituída por *recarga gerenciada dos aquíferos* (*Managed Aquifer Recharge – MAR*).

A recarga artificial pode ser realizada em três situações com relação aos reservatórios subterrâneos: *i*) na superfície, por meio do espalhamento e indução de infiltração das águas de chuva, utilizando-se bacias, tanques, curvas de nível e terraços ou, ainda, com o direcionamento de drenagens para depressões naturais no terreno (Figura 44); *ii*) na zona não saturada dos aquíferos (em geral, no interior dos solos), a partir de caixas de infiltração (preenchidas ou revestidas), trincheiras de recarga, drenos subsuperficiais ou por galerias drenantes (Figura 45); e *iii*) diretamente na zona saturada dos aquíferos, por poços rasos ou profundos (Figura 46).

Seus objetivos principais são: aumentar a disponibilidade hídrica subterrânea; elevar os níveis potenciométricos; e recuperar aquíferos submetidos à superexploração. A prática, contudo, pode resultar em outras vantagens, tais como: mitigação dos efeitos da intrusão de cunha salina em aquíferos costeiros; diluição *in situ* de contaminantes ou de salinidade naturais de aquíferos; minimização do escoamento superficial das águas de chuva (com redução de riscos de ocorrência de enchentes e inundações); e regulação/estabilização das características físico-químicas das águas subterrâneas.

As águas utilizadas para a recarga podem ter as seguintes origens: águas de chuvas (em geral captadas em coberturas de edificações); água de corpos hídricos superficiais (rios ou lagos); água de outros aquíferos (em geral bombeados de maiores profundidades); águas servidas ou de reuso. A principal condicionante a ser observada é que a água empregada na recarga artificial não comprometa, efetiva ou potencialmente, a qualidade ambiental das águas do aquífero para o qual é direcionada (CONAMA, 2008; CNRH, 2013).

A implantação da recarga artificial envolvendo uma grande área deve ser precedida de estudos, com a construção de sistemas-piloto e monitoramento quali-quantitativo. Somente depois de conhecida a efetividade do sistema proposto deve-se ampliar a sua implantação em maiores áreas.

Para que os projetos de recarga artificial dos aquíferos alcancem os resultados esperados é importante conhecer os mecanismos e a dinâmica da recarga natural, uma vez que a recarga induzida deve simular os mesmos caminhos do fluxo natural. A implantação dos sistemas-piloto deve ser precedida pelos seguintes estudos: avaliação hidráulica dos aquíferos (determinação dos parâmetros hidráulicos); determinação das condições de contorno dos aquíferos (espessura, porosidade e limites); verificação da qualidade das águas dos aquíferos e de recarga; aplicação de estudos geofísicos (para determinação dos locais ideais à implantação dos sistemas-piloto); e outras técnicas hidrogeológicas (estudos isotópicos, traçadores, realização de testes hidráulicos no aquífero e ensaios de infiltração *in situ*).

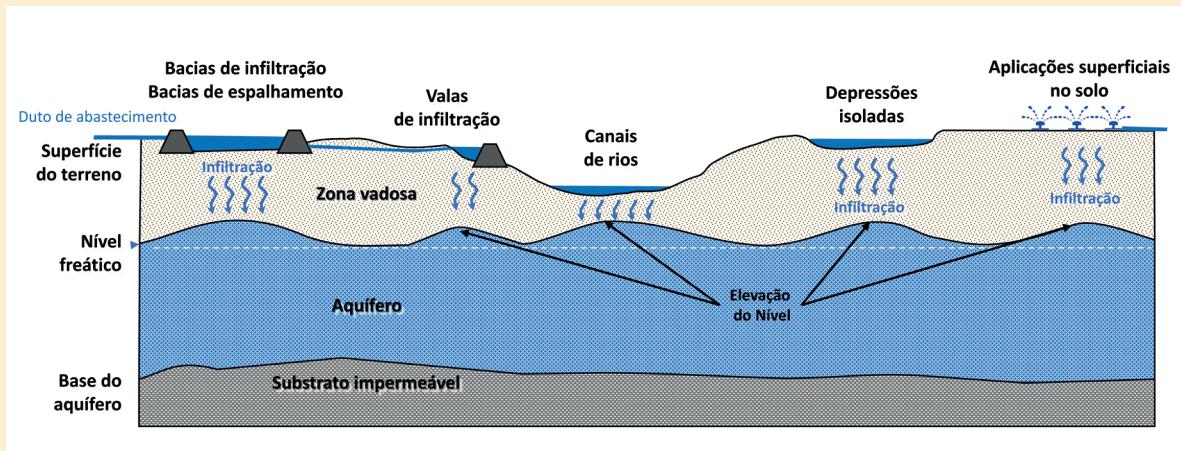


Figura 44 – Exemplos de métodos de recarga à superfície

Fonte: adaptado de Topper et al. (2006, p. 77).

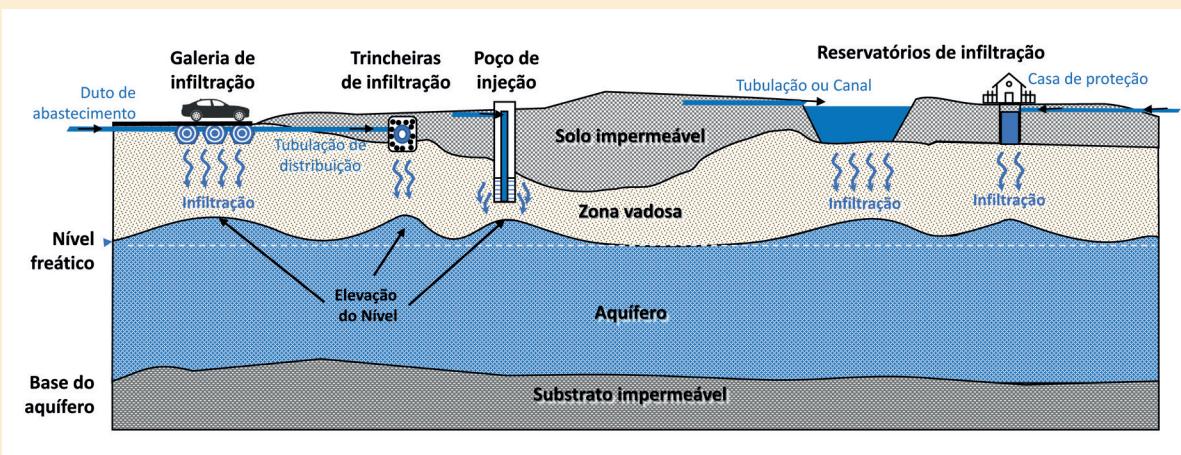


Figura 45 – Exemplos de métodos de recarga artificial em profundidade na zona não saturada

Fonte: adaptado de Topper et al. (2006, p. 81).

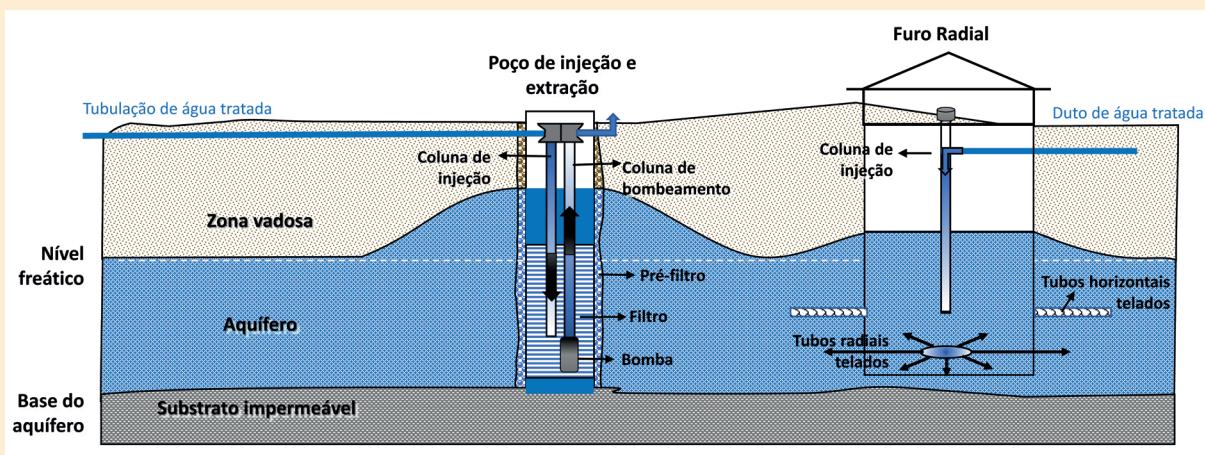


Figura 46 – Esquema de métodos de injeção direta

Fonte: adaptado de Topper et al. (2006, p. 82).

A recarga natural dos aquíferos é fortemente controlada pelos solos (espessura e razão areia/argila) e pelo clima (precipitação total e regime de distribuição das chuvas no tempo e no espaço). Em regiões com maior superávit hídrico, com chuvas mais regulares e abundantes, a presença de solos espessos favorece à recarga. Já regiões com forte sazonalidade climática, com amplo período sem eventos chuvosos (mesmo com elevado volume médio de chuvas) apresentam ampla perda de águas, pois a recarga natural requer que condições adequadas sejam alcançadas antes que as plumas de umidade se transformem em recarga efetiva (principalmente a reposição de água na zona não saturada dos solos). Por outro lado, em regiões semiáridas, com chuvas concentradas em alguns meses do ano, a presença de solos mais espessos (quando existirem) constitui barreira à recarga natural.

A recarga artificial, portanto, pode ser uma forma de minimizar as perdas naturais de água devido à sazonalidade climática e às feições intrínsecas dos solos. Nesse sentido, se a indução da infiltração for realizada em maiores profundidades, ou seja, abaixo da zona de maior desenvolvimento de raízes, as perdas por evapotranspiração, reposição da umidade dos solos e interfluxo são minimizadas com a consequente ampliação da efetividade da recarga.

O desenvolvimento da recarga gerenciada de aquíferos é uma prática comum à gestão dos recursos hídricos em diferentes países no mundo (DILLON et al., 2019). A Índia e os Estados Unidos são os países que mais praticam esse tipo de técnica, seguidos por países da Europa e da Austrália. No Brasil, esta prática é incipiente, sendo aplicada apenas em pesquisas acadêmicas e em iniciativas isoladas.

Os principais projetos que avançaram no conhecimento desse tipo de técnica no Brasil incluem: *i*) prática de recarga artificial em condomínios no Distrito Federal (CADAMURO, 2002; CADAMURO; CAMPOS, 2005); *ii*) recarga em área urbana de Recife (PE) para recuperação dos níveis potenciométricos (MONTENEGRO et al., 2005); *iii*) recarga de aquíferos termais na região de Caldas Novas (GO) com uso de águas após circulação em piscinas (ALMEIDA, 2011); *iv*) recarga visando à otimização da qualidade de águas subterrâneas no sul do estado do Tocantins (AZEVEDO, 2012); *v*) recarga de aquíferos cristalinos na região semiárida de Petrolina (PE) visando à diluição dos sais dissolvidos (SILVA, 2016); e *vi*) recarga de aquíferos contaminados em condomínios do Distrito Federal, visando ao tratamento *in situ* por diluição (NUNES, 2016).

A crescente urbanização (impermeabilização dos solos), a conversão de áreas naturais para fins agrícolas e pecuários (supressão de vegetação e compactação de solos por pisoteio de rebanho e moto mecanização), dentre outros, são fatores antrópicos de diminuição da recarga natural. Adicionalmente, a tendência apontada na diminuição das chuvas ou, no mínimo, de mudança nos padrões históricos de pluviometria, assim como os cenários de aumento da temperatura global (potenciais alterações nas taxas de evapotranspiração), também convergem para a diminuição da recarga natural dos aquíferos.

Diante das mudanças previstas nos padrões do clima e na intensificação do uso e ocupação das terras, a adoção de tecnologias de recarga artificial pode contribuir para amenizar as crises hídricas, principalmente em ambientes urbanos.

Nesse contexto, é necessário que a gestão hídrica avance nas discussões sobre questões legais e técnicas relativas ao desenvolvimento de projetos de recarga artificial ou recarga gerenciada de aquíferos. Tais discussões devem ser transversais e envolver órgãos ambientais e de gestão de águas, companhias de saneamento, prefeituras municipais (responsáveis pelo ordenamento territorial), instituições representativas do setor agropecuário, comunidades acadêmicas e sociedade civil. Além do estabelecimento de diretrizes gerais para a recarga artificial no país, é importante a determinação da obrigatoriedade na adoção dessa técnica quando ela for caracterizada como medida de mitigação em situações específicas, a exemplo de diluição de contaminantes em águas subterrâneas, de compensação pelos efeitos da impermeabilização de terrenos, de diminuição dos riscos de enchentes/inundação por excesso de escoamento superficial, e de reposição por conta de rebaixamento do aquífero por bombeamento.

4.3 ESTRATÉGIAS PARA A PROTEÇÃO DA QUALIDADE DOS AQUÍFEROS

As estratégias para a proteção da qualidade dos aquíferos não devem ser dissociadas daquelas que objetivam a proteção da quantidade das suas águas. A extração de água subterrânea pode influenciar o ingresso de águas salobras de aquíferos profundos ou do mar, bem como de águas contaminadas de cursos de água superficiais ou aquíferos freáticos, degradando o aquífero. Nesse sentido, as áreas de restrição e controle de uso de águas subterrâneas também podem ser consideradas instrumentos de proteção da sua qualidade, pois ao restringir a exploração das águas subterrâneas evita-se que a contaminação ingresse ou se espalhe pelo aquífero.

Os programas de concessão de uso da água devem considerar a qualidade do recurso e o perigo de poluição, de forma a evitar problemas e riscos à saúde dos usuários e facilitar a identificação de áreas contaminadas no aquífero. A prevenção contra a perda da qualidade dos recursos hídricos foca em duas estratégias distintas (FOSTER *et al.*, 2002): *a)* ações voltadas à proteção do aquífero como um todo; e *b)* ações que visam à proteção das fontes de água para abastecimento público.

Prioritariamente, a proteção do aquífero se dá pelo controle do uso e ocupação do solo, de forma a evitar que sejam geradas cargas contaminantes ou que essas atinjam o aquífero (zona saturada). Esse tipo de proteção exige a aplicação de instrumentos que: *a)* restrinjam determinados usos em áreas de recarga; *b)* solicitem autorização ou permissão para o uso e ocupação do solo, levando em conta a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos; e *c)* adotem procedimentos de gestão do perigo para evitar ou mitigar acidentes. A legislação brasileira estabeleceu vários instrumentos com tais finalidades, a exemplo do caso do Licenciamento Ambiental, do Zoneamento Ambiental e das leis de uso e ocupação do solo municipal.

Segundo Foster e Hirata (1988) e Foster *et al.* (2002), a prevenção da contaminação pode se dar pela redução do perigo de contaminação de uma área. O maior perigo ocorre quando há elevadas cargas contaminantes em áreas de alta vulnerabilidade, como, por exemplo, os afloramentos de um aquífero livre sedimentar arenoso e permeável. Em contraste, o menor perigo está associado aos casos em que há uma carga contaminante reduzida ou inexistente localizada em uma área de baixa vulnerabilidade.

A vulnerabilidade do aquífero pode ser mapeada e, para tanto, há vários métodos disponíveis. As técnicas GOD (FOSTER; HIRATA, 1988) e DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) são bastante populares no Brasil e na América Latina. Ambas permitem gerar mapas de caráter regional (1:100.000) a semirregional (1:50.000). Mais recentemente, Foster, Hirata e Andreo (2013) revisaram os alcances práticos de métodos de vulnerabilidade e concluíram que tais mapas servem para identificar três classes de aquíferos: *a)* os aquíferos com alta vulnerabilidade, onde um amplo espectro de atividades pode contaminar as águas subterrâneas; *b)* os aquíferos de baixa vulnerabilidade, ou seja, aqueles onde uma atividade antrópica dificilmente os contaminaria; e *c)* os aquíferos de média vulnerabilidade, que abarcariam todos aqueles que não se enquadram nas duas primeiras categorias. Neste terceiro caso, o perigo estaria mais condicionado ao tipo de atividade e sua operação do que propriamente à característica hidrogeológica do aquífero (FOSTER; HIRATA; ANDREO, 2013).

Outro enfoque de gestão é a proteção das fontes de água mais importantes, como por exemplo, aquelas usadas para o abastecimento público ou de usuários mais sensíveis à questão da qualidade, como hospitais, clínicas de saúde e escolas. Neste caso, a estratégia é traçar os Perímetros de Proteção de Poços ou mananciais (PPP) por meio do mapeamento das áreas ao redor da captação, que estejam associadas à sua recarga, e impedir a instalação de fontes potenciais de contaminação (CARVALHO; HIRATA, 2012; FOSTER *et al.*, 2002).

4.3.1 Gerenciamento de áreas contaminadas e as águas subterrâneas

Quando acontece a contaminação é necessário recorrer ao Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC), que é um procedimento regulamentado pela Res. Conama nº 420/2009 e pelas legislações estaduais. O termo *contaminação* é definido no art. 6º, inc. V, da Resolução Conama nº 420/2009 como:

a presença de substância(s) química(s) no ar, água ou solo, decorrentes de atividades antrópicas, em concentrações tais que restrinjam a utilização desse recurso ambiental para os usos atual ou pretendido, definidas com base em avaliação de risco à saúde humana, assim como aos bens a proteger, em cenário de exposição padronizado ou específico; [...].

Na perspectiva do GAC, a degradação se torna juridicamente relevante quando ultrapassa parâmetros de contaminação previamente estabelecidos pela

legislação. Segundo a Res. Conama nº 420/2009, esse procedimento é norteado pelos Valores Orientadores (VOs), que se subdividem nas seguintes categorias:

Valor de Referência de Qualidade (VRQ): é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos (art. 6º, XXII);

Valor de Prevenção (VP): é a concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais de acordo com o art. 3º (art. 6º, XXIII);

Valor de Investigação (VI): é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado (art. 6º, XXIV).

A caracterização da contaminação, portanto, pressupõe a existência de determinadas concentrações no solo ou nas águas subterrâneas que, segundo a legislação, gerariam um risco potencial ou efetivo à saúde humana ou ecossistemas. Constatada essa situação, torna-se obrigatória a adoção de uma série de medidas para restringir o uso do solo e das águas subterrâneas, bem como para recuperar e remediar a área contaminada. A Res. Conama nº 420/2009 regulamenta os Valores Orientadores (VOs), porém, os estados devem regulamentar o GAC, definindo seus procedimentos, o órgão competente para realizá-los e os Valores de

Referência de Qualidade (VRQ), além de estabelecer VOs mais restritivos.

A proteção das águas subterrâneas deve se orientar pela prevenção, pois o dano costuma ser irreversível, podendo, inclusive, inviabilizar o uso da água, haja vista que o custo da sua recuperação ou remediação pode ser superior ao das ações para evitar o estrago. Em muitos casos, mesmo com altos investimentos e aplicação das melhores técnicas disponíveis não é possível despoluir o aquífero, mas apenas reduzir os níveis de contaminação. Essa situação gerou no estado de São Paulo diversas ações judiciais que discutiram se a recuperação das áreas contaminadas deve ser pautada pelos critérios dos Valores Orientadores ou pelo dever da reparação ambiental integral (Box 22). O cerne desse debate jurídico diz respeito à análise de custo e benefício promovida pelo GAC frente ao dano ambiental e à capacidade técnica de descontaminar um aquífero. Ou seja, o que seria uma recuperação aceita do ponto de vista ambiental, econômico e social? Infelizmente, há limitações tecnológicas e/ou econômicas que impedem a reparação integral do dano, isto é, restaurar as características geoquímicas naturais do aquífero, principalmente no caso dos aquíferos hidrogeologicamente complexos (como os fraturados, sedimentares, multicamadas ou profundos) ou quando há presença de contaminantes muito tóxicos ou persistentes, como os solventes organoclorados.

Box 22 – Remediação de áreas contaminadas: valores orientadores versus reparação ambiental integral

Ana Carolina Corberi Famá Ayoub e Silva

A remediação de aquíferos é complexa. Na maioria das vezes, mesmo aplicando o procedimento de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (GAC) não se promove a restauração integral do solo ou da água, mas, sim, apenas a remediação dos recursos para atingir os padrões legais. O fato ensejou o ajuizamento de ações por parte do Ministério Público do estado de São Paulo (MPSP) que, inclusive, questionou a constitucionalidade da Lei Paulista nº 13.577/09, considerada precursora no tema. A principal discussão judicial diz respeito ao alcance do GAC, ou seja, se ele deve promover a remediação mediante a aplicação de Valores Orientadores ou a reparação ambiental integral (um dos princípios do Direito Ambiental).

Para entender esse embate é necessário esclarecer o significado e o objetivo dos termos *remediação* e *reparação*. A Res. Conama nº 420/2009 conceitua a remediação como “uma das ações de intervenção para reabilitação de área contaminada, que consiste em aplicação de técnicas, visando à remoção, contenção ou redução das concentrações de contaminantes” (art. 6º, inc. XVII). Em sentido semelhante, a Lei Estadual nº 13.577/09, que “dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas” define *remediação de área contaminada* como “adoção de medidas para a eliminação ou redução dos riscos em níveis aceitáveis para o uso declarado” (art 3º, inc. XVIII). O termo *reparação ambiental integral*, que visa à restauração do ambiente, é conceituado pela Lei nº 9.985/2000, como a “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais

próximo possível da sua condição original” (art. 2º, inc. XIV). No mesmo sentido, a Constituição Federal de 1988, em seu art. 225, parágrafo 1º, inc. I, ao determinar que os processos ecológicos essenciais sejam restaurados, visa a alcançar a situação anterior ao dano – *status quo ante*. Sendo assim, a reparação ambiental integral objetiva à restauração do equilíbrio ecológico (PINHO, 2010; SILVA, 2019).

No caso concreto de contaminação, a premissa para se definir a aplicação da reparação integral ou da remediação depende da forma como o dano é tratado. Ou seja, do ponto de vista ecológico, o dano ambiental “fere as chamadas ‘leis da ecologia’”, destacando-se a interdependência, a autorregulação, a autorregeneração e a função ecológica. Já o dano jurídico ocorre quando há ofensa ou ameaça a bens jurídicos determinados, no caso o meio ambiente (SILVA, 2012, 2019).

A reparação de um dano ecológico parece ser ideal, uma vez que visa à restauração do ambiente, permitindo o reestabelecimento integral das “leis da ecologia”. Leite e Ayala (2010), porém, expõem que “a natureza, ao ter suas composições física e biológica modificadas por agressões que ela não consegue tolerar, não pode jamais ser verdadeiramente restabelecida, do ponto de vista ecológico.” Desse modo, passa-se a adotar com maior frequência a visão puramente jurídica, em que a remediação se dá seguindo os critérios e limites dos parâmetros viáveis definidos por norma.

O conflito de posicionamentos sobre áreas contaminadas foi intensificado com a propositura da Ação Direta de Inconstitucionalidade (ADI) nº 0210197-50.2011.8.26.0000, pelo MPSP, pleiteando a declaração de inconstitucionalidade do art. 10 e parágrafo único da Lei Paulista nº 13.577/09, que admite a possibilidade de serem ultrapassados os Valores de Prevenção mediante avaliação do órgão ambiental e monitoramento dos impactos decorrentes. Na visão do MPSP, o dispositivo transformaria o Licenciamento Ambiental de preventivo à corretivo, afrontando a Constituição Estadual e o princípio da precaução.

Apesar da improcedência da ADI, o MPSP ajuizou diversas ações (várias ainda em curso) em face de proprietários de áreas contaminadas. Portanto, assumiu um posicionamento contrário à Lei Paulista e à Res. Conama 420/2009, defendendo que, ao não preverem a reparação integral das funções ecológicas do solo e das águas subterrâneas, essas normas contribuem com a geração de passivos ambientais para as presentes e futuras gerações (LUTTI, 2012).

Dentre as inúmeras ações ajuizadas destaca-se a decisão que negou provimento à Apelação Cível nº 1096930-98.2016.8.26.0100, com o reconhecimento da “Impossibilidade de exigir a adoção de solução técnica distinta daquela imposta pelo órgão ambiental no trato da área contaminada.” Em precedente semelhante (Apelação Cível nº 1032789-75.2013.8.26.0100), decidiu-se que “Não se mostra razoável exigir a adoção de solução técnica distinta daquela imposta pelo órgão ambiental, notadamente sem a declaração de inconstitucionalidade da Lei Estadual nº 13.577/09 e do Decreto nº 59.263/2013.” (TJSP, 2016, 2020).

A partir dessas decisões observa-se a tendência de o Judiciário do estado de São Paulo garantir a segurança jurídica dos procedimentos de remediação de áreas contaminadas, balizados exclusivamente pela legislação existente. Inúmeras ações, entretanto, permanecem em curso, havendo margem para o surgimento de novos entendimentos. O posicionamento atual garante a segurança jurídica dos procedimentos legais de remediação, o qual deve se balizar pelo equilíbrio entre a busca da reparação da área e as limitações existentes para alcançar esse objetivo.

O foco prioritário do GAC no Brasil está direcionado: *a)* à identificação da área contaminada; *b)* à avaliação do risco à saúde humana e ambiental; e *c)* à realização do processo de reabilitação. A lógica desse procedimento é estabelecer metas de limpeza do solo ou aquífero e realizar a sua reabilitação de forma a devolver à sociedade um ambiente que ofereça um nível tolerável de risco. Entende-se, assim, como área conta-

minada aquela que oferece um nível de risco acima do tolerado e não somente uma alteração físico-química ou biológica do meio comparativamente às qualidades naturais originais.

Diante dos custos ambientais e sociais das áreas contaminadas, os órgãos ambientais devem buscar a proteção preventiva do solo e aquíferos por meio das seguintes ações:

- estabelecimento de padrões de qualidade ambiental para o solo, o ar e a água, bem como para as emissões de poluentes;
- licenciamento e fiscalização de fontes potenciais de contaminação, com base em normas legais pré-estabelecidas;
- incentivos para o desenvolvimento e aplicação das melhores práticas tecnológicas que visem a reduzir ou a eliminar as emissões de poluentes.

O estado de São Paulo é considerado uma referência nacional no GAC, pois foi a primeira Unidade Federativa a implementá-lo. Esse procedimento foi introduzido em 1999, quando da edição do primeiro Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas, sendo que em 2002 foi publicado o primeiro relatório de áreas contaminadas. O GAC está previsto na Lei Estadual nº 13.577/2009 e no seu Decreto Regulamentador nº 59.263/2013. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) – órgão estadual competente para realizar o GAC – regulamentou o procedimento por meio da Decisão da Diretoria nº 38/2017. Essas bases legais inspiraram várias normativas pelo país.

A partir da identificação de áreas com probabilidade de contaminação, o GAC impõe uma sequência de procedimentos e estudos a fim de caracterizar e comprovar tal situação e atuar na remediação do problema, quando necessário. Seu início se dá por meio da realização de uma **avaliação preliminar**. O estudo visa a “encontrar evidências, indícios ou fatos que permitam suspeitar da existência de contaminação na área” por meio do levantamento de informações históricas e de visitas ao local (art. 6º, inc. II da Res. Conama nº 009). A partir dele é elaborado o plano de investigação confirmatória.

A **investigação confirmatória**, ao contrário da preliminar, exige a coleta de amostras de solo e de águas subterrâneas, além de outras técnicas invasivas ou não invasivas (como a geofísica). O objetivo da investigação é confirmar ou não a existência de contaminação. Importante pontuar que esse reconhecimento se faz comparando os resultados das análises químicas de solos e água com os Valores Orientadores e de referência de qualidade estabelecidos pelo órgão ambiental.

Confirmada a contaminação é realizada uma **investigação detalhada**, cujo objetivo é “entender a dinâmica da contaminação nos meios físicos afetados e a identificação dos cenários específicos de uso e ocupação do solo, dos receptores de risco existentes, dos caminhos de exposição e das vias de ingresso.” (art. 6º, inc. IX da Res.

Conama nº 420/2009). Nessa etapa é estabelecido o nível e os limites da degradação (mapeamento das extensões da pluma contaminante), além da quantificação da massa presente, bem como a dinâmica de transporte dessas substâncias. Essa atividade permite avaliar o grau de risco a que estão expostas as pessoas e o ambiente. Uma vez definida a área contaminada e os riscos existentes, inicia o processo de reabilitação da área, que deve incluir um **plano de intervenção**. Com a aprovação do órgão ambiental, inicia a execução da remediação do solo e do aquífero. Se a remediação cumprir seus objetivos, ocorre o início do **programa de monitoramento**, que visa a garantir que as metas acordadas foram realmente atingidas. Se o relatório do monitoramento constatar o cumprimento das metas, a área é declarada pelo órgão ambiental como **reabilitada para o uso declarado**.

4.4 GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COMO MEIO DE GARANTIR O DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO

A extração de águas subterrâneas tem contribuído para o desenvolvimento social e econômico, bem como garantido a segurança hídrica e alimentar em várias partes do Planeta ao longo dos séculos. O crescimento populacional e do consumo, a degradação das reservas superficiais, os avanços no campo do conhecimento da Hidrogeologia e das técnicas de perfuração de poços incentivaram e ampliaram o uso dessas águas a partir dos anos 1950 (UN/WWAP, 2003). A água subterrânea, portanto, foi, é e sempre será importante fonte hídrica para a humanidade. Apesar da sua importância para o uso de abastecimento, agricultura e indústria, a percepção sobre a dependência das populações e os benefícios decorrentes de sua exploração só foram destacados pela literatura a partir dos anos 2000 (FOSTER; HIRATA; ANDREO, 2013).

4.4.1 O uso histórico das águas subterrâneas

O uso das águas subterrâneas remonta aos povos da Antiguidade, que desenvolveram técnicas para a sua utilização e garantia de fonte de abastecimento de qualidade. As antigas civilizações dos assírios, gregos e romanos construíram sistemas de aquedutos para transportar as águas das nascentes até os povoados (DEMING, 2020). O registro de poço mais antigo se encontra na região de Atlit Yam, em Israel (ano 8000 a.C.) (GALILI; NIR, 1993). Desde o ano 5000 a.C., os chineses perfuravam poços profundos com varas de bambu (REBOUÇAS, 2006),

enquanto os persas desenvolveram sistemas de túneis horizontais subterrâneos, denominados *canates*, que se espalharam pelos países que faziam parte das antigas rotas de comércio, tais como: Afeganistão, Espanha, Marrocos, Península Arábica, Norte da África, China, Arábia Saudita e Egito (VILLAR, 2015). O primeiro

canate registrado se localizava no Noroeste do Irã, na cidade de Nínive, e foi construído aproximadamente no ano 800 a.C. (SALIH, 2006; REBOUÇAS, 2006). Com a colonização espanhola, o sistema de canates foi trazido para a América Hispânica, sendo utilizado até os dias de hoje, como demonstra o Box 23.

Box 23 – A captação de água subterrânea por meio de canates ou galerias filtrantes: exemplos na América Latina

Jacinta Palerm

A galeria filtrante é uma técnica milenar utilizada para obter águas subterrâneas. Sua procedência é o Velho Mundo, mas possui presença importante nas Américas, seja em relação às galerias construídas durante o Período Colonial ou as dos tempos presentes.

No México, as primeiras galerias conhecidas foram utilizadas para o abastecimento urbano. Provavelmente, as primeiras construções foram feitas nas cidades de Aguascalientes (1730), Guadalajara (1730), Parras de la Fuente (1825), São Luis Potosí (1828) e Querétaro (1852). Há, também, relatos de galerias filtrantes construídas no século XIX por fazendeiros que buscavam garantir água ao gado nos estados de San Luis Potosí e de Jalisco, bem como para a agricultura no vale de Tehuacán, localizado no estado de Puebla (PALERM, 2020). Ao que parece, as galerias dos estados de San Luis Potosí e Jalisco foram construídas com grande investimento de capital, e sob a orientação de especialistas. No caso do vale de Tehuacán, os povos campesinos locais se apropriaram da técnica de construção e até os dias presentes implementam galerias filtrantes. Existem centenas de galerias filtrantes nessa região, as quais são geridas pelos campesinos.

Há muita incerteza em relação às datas de construção das primeiras galerias filtrantes na América, aventando-se, inclusive, a possibilidade de uma origem pré-hispânica, especialmente no caso das galerias de Nazca, no Peru (BARNES; FLEMING, 1991). As evidências sugerem, contudo, que os primeiros canates sejam de origem colonial.

Estudos sobre a gestão das galerias filtrantes são limitados, entretanto, eles existem. Destacam-se, por exemplo, os estudos sobre as galerias do vale de Tehuacán (CAMPOS et al., 2000), assim como um estudo sobre Pica, no Chile (CERNA, 2003). A técnica de captar água subterrânea por gravidade tem diversos nomes regionais, por exemplo: no Peru e no Chile é chamada de *puquios*; no norte do México, de *tajos*. Existem, também, variantes da técnica, como, por exemplo, aquelas que utilizam as águas subterrâneas localizadas sob o leito dos rios.

Para mais informações, consultar: Barnes e Fleming (1991), Campos et al. (2000), Cerna (2003), e Palerm (2002, 2004 e 2020).

4.4.2 O papel das águas subterrâneas como meio para atingir os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)

As águas subterrâneas foram consideradas o meio mais rápido e barato de atingir as metas de acesso à água e de combate à fome, previstas nos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) (LLAMAS; MARTINEZ-CORTINA, 2002), que foram retomadas pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (GUPPY et al., 2018).

A Cúpula das Nações Unidas, realizada em 2012, na cidade do Rio de Janeiro, também conhecida como Rio+20, se comprometeu a formular um conjunto de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para orientar o desenvolvimento global (GLASER, 2012). Como resultado, as Nações Unidas, em 2015, adotaram a Resolução 70/1 – *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. A Agenda 2030 é composta por 17 objetivos e 169 metas a serem alcançadas até 2030. Os 17 ODS estão expostos na Figura 47.



Figura 47 – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Fonte: Nações Unidas Brasil (2015).

O objetivo da Agenda 2030 é servir de quadro de referência para a ação dos países e integrar as dimensões econômica, social e ambiental. O ODS 6 – *Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos* – está diretamente dedicado às águas, superficiais e subterrâneas, sendo que seus principais desafios se relacionam aos aspectos de quantidade e qualidade, acesso à água potável e saneamento, ações de enfrentamento aos riscos hídricos (secas e inundações) e águas transfronteiriças (UNSDSN, 2013). A meta 6.6 menciona expressamente as águas subterrâneas e aquíferos, estabelecendo o seguinte: “Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos.”

As águas subterrâneas são fundamentais para cumprir as metas previstas no ODS 6, principalmente no que diz respeito à garantia do acesso universal à água potável, saneamento e higiene. Sua importância, porém, transcende esse ODS. Apesar de a estrutura dos ODS ser organizada por meio de objetivos individuais e independentes, existe uma interligação muito presente entre eles (BHADURI *et al.*, 2016). A água é um elemento central para o desenvolvimento sustentável e fundamental para todos os outros ODS, principalmente para os ODS-1, ODS-2, ODS-3, ODS-5, ODS-11, ODS-13, ODS-14 e ODS-15.

Ademais, as águas subterrâneas contribuem para o combate à pobreza, para a segurança alimentar, hídrica

e sanitária de milhares de pessoas, principalmente nas áreas rurais, áridas e semiáridas. São, também, menos suscetíveis à variabilidade climática, permitindo fomentar estratégias de mitigação e adaptação à mudança do clima. E, em algumas regiões, essas águas têm potencial para gerar energia geotermal.

A utilização dos recursos hídricos subterrâneos, contudo, de forma a promover os ODS, exige uma estrutura de governança capaz de implementá-los e integrá-los por meio de instituições, políticas e práticas de gestão (BERNSTEIN, 2017), bem como um processo de gestão que promova o aproveitamento sustentável e a proteção do recurso. As águas subterrâneas têm ajudado diversos países a cumprirem as metas internacionais relacionadas à ampliação do acesso à água. No caso do Brasil, pode-se destacar o Programa Água Doce, cuja iniciativa promove o desenvolvimento socioeconômico e, por meio de aquíferos salobros, o acesso à água das populações mais vulneráveis do Semiárido. Essa experiência é explicada em detalhes no Box 24. O Programa surgiu diante da necessidade de corrigir os erros de gestão do Programa Água Boa (PAB) e de reaproveitar os poços salobros abandonados.

O PAB foi implementado pelo Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos Hídricos Urbanos (MMA/SRHU) no final dos anos 1990, com o objetivo de instalar dessalinizadores em áreas críticas do ponto de

vista hídrica, como poços salobros ou salinos. Havia, porém, problemas de execução, seja do ponto de vista operacional ou social. Por exemplo, ocorreram falhas na destinação dos concentrados salinos gerados, o que contribuiu para o aumento da desertificação e da erosão nas áreas próximas às captações. Não havia previsão para manutenção preventiva ou gestão dos sistemas de dessalinização, o que acarretou a perda da qualidade da água ou a desativação de parte dos equipamentos (AZEVEDO, 2015).

O PAB e PAD demonstram que, mesmo as águas subterrâneas salobras e os aquíferos com baixas vazões podem ser utilizadas no abastecimento, contribuindo para garantir a segurança hídrica das populações, especialmente em situações de crise hídrica e em regiões semiáridas. O processo de dessalinização dessas águas é mais simples do que o aplicado às águas marinhas e dispensa grandes infraestruturas. Além disso, elas auxiliam na segurança alimentar das populações.

Box 24 – Programa Água Doce

Wilson Rodrigues de Melo Júnior

Alexandre Saia

O Programa Água Doce (PAD) é uma ação do Governo Federal, coordenada pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), em parceria com instituições federais, estaduais, municipais e sociedade civil. Seu objetivo é estabelecer uma política pública permanente de acesso à água de qualidade para o consumo humano por meio do aproveitamento sustentável de águas subterrâneas, incorporando cuidados técnicos, ambientais e sociais na implantação e gestão de sistemas de dessalinização no Semiárido brasileiro, levando em consideração a característica da presença de sais nas águas subterrâneas dessa região.

A formulação do Programa buscou construir uma metodologia que proporcionasse maior sustentabilidade à implantação dos sistemas de dessalinização, tendo em vista que muitos sistemas já vinham sendo implantados no Semiárido brasileiro desde os anos 1990, carecendo dos devidos cuidados técnicos, sociais e ambientais. Por conta disto, em pouco tempo muitos deixaram de operar e os que restaram lançavam os seus efluentes no meio ambiente, sem destinação adequada.

Tendo em vista que cerca de 70% dos poços da Região Semiárida do Brasil apresentam águas salobras ou salinas, e que a água subterrânea, muitas vezes, é a única fonte disponível para as comunidades, coube ao Ministério do Meio Ambiente estruturar um método para que esta tecnologia tivesse mais sucesso em sua implantação, e as comunidades recebessem de forma permanente uma água segura para beber (Figura 48).

Um dos principais diferenciais do Programa Água Doce é a destinação ambientalmente adequada do efluente gerado no processo de dessalinização. Na maioria dos casos, o efluente é lançado num tanque de contenção para evaporação, evitando a degradação do solo. A depender, no entanto, das características físico-químicas desse concentrado, ele poderá ser destinado a outros usos, tais como dessedentação animal ou irrigação da agricultura biossalina.



Figura 48 – Esquema ilustrativo das infraestruturas do PAD

Fonte: Imagens do acervo do MDR

As comunidades que possuem poços com vazões superiores a 5.000 l/h e solos com profundidade superior a 1,00 m podem receber um sistema de produção integrado. O sistema foi desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e aproveita o efluente resultante do processo de dessalinização para a produção de tilápias e irrigação de cultivares adaptados à salinidade da água, cujos produtos podem alimentar os rebanhos locais (Figura 49).



Figura 49 – Esquema ilustrativo do sistema desenvolvido pela Embrapa

Fonte: Imagens do acervo do MDR

Outro diferencial é a gestão compartilhada dos sistemas de dessalinização, com participação efetiva das comunidades e representantes dos municípios, estados e governo federal. Em cada comunidade são construídos os *acordos de gestão compartilhada*, instrumentos que definem as responsabilidades das partes na gestão (Figura 50).



Figura 50 – Gestão compartilhada dos sistemas de dessalinização

Fonte: Imagens do acervo do MDR

A partir de 2011, o Programa Água Doce entrou em sua fase de escala, passando a fazer parte do Programa Água Para Todos por meio do Decreto nº 7.535, de 26 de julho de 2011, com recursos do Programa de Segurança Alimentar e Nutricional. A partir de então foram implementados os Planos Estaduais do Programa Água Doce, sendo o programa institucionalizado por meio de decreto dos governadores, que também instituíram os núcleos de gestão e as coordenações estaduais.

O Programa Água Doce é executado por meio de parcerias com todos os estados do Nordeste (Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe) e Minas Gerais. Atualmente, estão em execução 10 convênios do Programa Água Doce, com investimento aproximado de R\$ 260 milhões de reais, destinados a fornecer água de qualidade a 1.200 comunidades rurais do Semiárido brasileiro.

Quanto à execução dos convênios firmados no âmbito do Programa Água Doce, foram diagnosticadas, até o momento, 3.677 comunidades em 291 municípios mais críticos da Região Semiárida brasileira. Também foram capacitados cerca de 2.400 operadores para atuar nos 895 sistemas de dessalinização em funcionamento. A implementação do Programa em cada estado está dividida em três fases:

- 1) realização de diagnósticos para definir, por meio de critérios técnicos, testes de vazão, análises físico-químicas da água dos poços e caracterização socioambiental das comunidades, para identificação das que serão atendidas;
- 2) implantação dos sistemas de dessalinização; e
- 3) manutenção e monitoramento dos sistemas.

Quanto à operação diária do sistema, a gestão compartilhada implementada pelo PAD sugere que um membro da comunidade assuma a operação do equipamento, sendo os custos de energia elétrica assumidos pelo município ou pela própria comunidade, conforme o acordo de gestão. Para tanto, em cada localidade é incentivada a criação de um fundo de reserva, gerido pela própria comunidade, para fazer frente aos custos de operação (energia elétrica e remuneração do operador) e pequenos reparos. O valor mensal pago por cada família é definido pela própria comunidade.

Considerando a vazão mínima de referência de, aproximadamente, 1.000 l/h para utilização de um poço profundo que abastece um sistema do PAD – o que representa grande parte dos poços localizados no Semiárido brasileiro – um sistema do PAD possui potencial para produzir até 4.000 litros de água dessalinizada por dia. Isso permite o fornecimento de 10 litros/dia de água potável por pessoa, e atender até 400 pessoas/dia residentes em comunidades rurais. Os sistemas de dessalinização implantados até o momento possuem capacidade instalada para produzir cerca de 3,2 milhões de litros de água potável por dia e beneficiar aproximadamente 320 mil pessoas.

Como perspectiva, há o desafio de avançar na utilização de energia solar para alimentar os sistemas de dessalinização implantados pelo Programa, a exemplo do projeto piloto de energia solar fotovoltaica implantado no município de João Câmara, no Rio Grande do Norte. Por último, há possibilidade de avançar na utilização da agricultura bioassalina, por meio de Unidades Demonstrativas do Programa Água Doce aliadas à difusão de cultivos apropriados ao Semiárido brasileiro que utilizem águas salinas ou salobras no processo de irrigação.

O êxito da metodologia do Programa Água Doce foi reconhecido com a sua premiação pela Associação Internacional de Dessalinização (IDA) durante o Congresso Mundial de Dessalinização, realizado em outubro de 2017, em São Paulo (SP). Além disso, destaca-se a participação do PAD em evento paralelo ao Conselho Econômico e Social da Organização das Nações Unidas (ONU), realizado em maio de 2017, em Nova Iorque, onde o Programa foi reconhecido como uma iniciativa que adota abordagem integrada para o desenvolvimento sustentável e combate à pobreza. Como resultado do Congresso Mundial de Dessalinização, realizado em outubro de 2017, foi estabelecida uma parceria entre o PAD, a IDA e a Associação Latino-Americana de Dessalinização (ALADYR).

4.4.3 A necessidade de conhecer o papel socioeconômico das águas subterrâneas

O Brasil carece de estudos que analisem a dimensão social das águas subterrâneas como, por exemplo, o seu papel no desenvolvimento socioeconômico, principalmente de grupos vulneráveis. A governança precisa incluir em seus debates a massa de pessoas que usa nascentes, poços escavados ou com pequenas vazões. Na maior parte das vezes, esses usos são irregulares, embora possam ser legalizados e classificados como isentos ou insignificantes. A gestão hídrica precisa criar espaços para esses *usuários sociais* previstos no art. 12, § 1º da Lei nº 9.433/1997, pois são um contingente completamente desconhecido, cuja subsistência depende das águas subterrâneas. Infelizmente, a criação de organizações de usuários de poços não é incentivada pelo Poder Público, ao contrário do que acontece em outros países. Os *usuários sociais* da água são os mais ameaçados pela degradação do aquífero diante de sua capacidade limitada para conseguir outras fontes de água, reverter a situação de degradação do aquífero, enfrentar os prejuízos causados pela

diminuição ou perda da água, e de se fazer ouvir pela gestão (VILLAR, 2016).

As águas subterrâneas podem e devem ser usadas como forma de garantir o abastecimento, contudo, sua exploração deve se pautar na maximização dos benefícios sociais gerados e pela sustentabilidade, seja buscando extrações compatíveis com a recarga, elaborando planos de extração de longo prazo, ou adotando mecanismos que contribuam para promover a recarga. A exploração sem controle pode gerar danos, culminando, inclusive, no esgotamento do aquífero. De forma geral, a maioria dos aquíferos brasileiros possui condição de exploração adequada, porém, já há registros de situações preocupantes, como o caso de Ribeirão Preto (SP), Recife (PETELET-GIRAUD *et al.*, 2017), São José do Rio Preto (HIRATA; FOSTER; OLIVEIRA, 2015) e o Aquífero Urucuia. A literatura internacional traz vários casos de alerta sobre os prejuízos econômicos causados pela exploração insustentável do recurso. A prosperidade regional pode ser comprometida ou inviabilizada se as fontes hídricas que a sustentam se esgotarem, a exemplo do caso do Aquífero Ogallala, nos Estados Unidos.

O aquífero Ogallala é a principal unidade hidrogeológica do Sistema Aquífero High Plains, que se estende por oito estados norte-americanos: Dakota do Sul, Nebraska, Wyoming, Colorado, Kansas, Oklahoma, Novo México e Texas. Esse aquífero é a principal fonte de abastecimento de água pública e agrícola. Por quase um século, as águas subterrâneas sustentaram o desenvolvimento econômico por meio de cultivos agrícolas irrigados. Contudo, a insustentabilidade dos padrões de uso traz o risco de esgotamento, inviabilizando o abastecimento e a produção agrícola. As principais medidas propostas para manter os estoques hídricos e reduzir os prejuízos são: redução da exploração, adoção de novas tecnologias de irrigação, e substituição do tipo de agricultura. Deines *et al.* (2020) afirmam que se os limites de exploração não forem modificados, 24% da área irrigada pode ser forçada a adotar culturas de baixa demanda hídrica ou pastagens, cujo retorno econômico é inferior. Além disso, 13% das áreas não seriam mais capazes de sustentar a produtividade agrícola. A realidade hídrica do aquífero e a contenção desse processo de degradação exige um processo de adaptação, definição de escalas de atuação e estudos sobre possibilidades de substituição do uso da terra para planejar a estratégia de desenvolvimento local (DEINES *et al.*, 2020).

A perda de um aquífero significa menor qualidade de vida e de sustento de toda uma comunidade, contudo, os efeitos causados pela degradação do recurso não atingem a todos os usuários da mesma forma. Os grandes usuários são mais resilientes na medida que podem perfurar poços mais profundos ou buscar outras fontes hídricas, enquanto os *usuários sociais* são os primeiros a perder a sua fonte hídrica. Ademais, sua capacidade financeira de buscar alternativas é limitada, podendo, inclusive, inviabilizar a sua permanência no local. Os

efeitos da superexploração dos aquíferos podem gerar prejuízos socioeconômicos que extrapolam os usuários hídricos, a exemplo do caso da cidade de Jacarta, Indonésia (Box 25).

Por isso, a governança das águas subterrâneas deve incluir ações no sentido de reconhecer que: *a)* não é possível pensar a gestão das águas subterrâneas sem levar em conta a gestão das águas superficiais e do solo; *b)* o perfil dos usuários de água subterrânea é muito variado, pois incorpora desde grandes usu-

ários econômicos até os usos de subsistência; c) os usuários sociais precisam ser incorporados no processo de gestão, pois são os primeiros prejudicados pela degradação; d) a gestão das águas subterrâneas, principalmente nas áreas críticas, exige um planejamento que busque alternativas econômicas de menor

consumo hídrico; e) não há soluções rápidas para os problemas associados à degradação ou esgotamento dos aquíferos, sendo que o processo de recuperação pode levar décadas e demandar altos custos; e f) a prevenção da degradação do aquífero é sempre a melhor alternativa.

Box 25 – A superexploração do Aquífero Jacarta e os seus impactos à cidade

Dua Kudushana Singgih Yejezkial Klaas

Jacarta, a maior cidade do Sudeste asiático, é uma megaciudad em crescimento econômico, com cerca de 11 milhões de habitantes registrados. A capital da Indonésia é uma área administrativa ligada a outras zonas de apoio, que formam a área metropolitana de Jabodetabek, cuja população total supera os 30 milhões. Com um crescimento populacional modesto de 1,35% ao ano, a cidade depende profundamente da abstração de água subterrânea do sistema aquífero confinado superior da Bacia Hidrogeológica de Jacarta (JGB). Com uma espessura total de cerca de 300 m, esse sistema consiste em um conjunto de aquíferos multicamadas homogêneos e anisotrópicos do Plioceno marinho e areia quaternária e depósitos aluviais separados por argila marinha como camadas confinantes. A água é captada diretamente pelos habitantes e pelas indústrias, sendo autoadministrada, majoritariamente, sem a permissão do governo, diante da ausência de fiscalização e de regulamentação clara para a sua apropriação.

O contínuo bombeamento da água subterrânea para fins domésticos e industriais resultou no rápido declínio dos níveis hidráulicos, no abalo da resistência do solo e sua compactação como forma de suportar as cargas que se sobrepõem. O impacto direto do rápido esgotamento das águas subterrâneas, causado pela superexploração das partes mais profundas do sistema aquífero, foi a queda da linha piezométrica regional para níveis abaixo da linha do mar (SCHMIDT; SOEFNER; SOEKARDI, 1990) e a subsidência de vastas porções de terra, com taxas médias de afundamento entre 1-15 cm por ano (ABIDIN et al., 2011). Essa situação transformou Jacarta na cidade que mais afunda no mundo. Estruturas como edifícios afundaram no solo, provocando o abandono de assentamentos e o deslocamento de comunidades, com os seus subsequentes impactos sociais, como perda de meios de subsistência e desarticulação social. Essas consequências diretas da subsidência dos terrenos são particularmente visíveis na parte norte da cidade, que é adjacente ao litoral. Nessa área, à medida que a água doce recua a montante devido à rápida queda do nível do lençol freático, a intrusão salina avança, tendo invadido mais de 14 km nas áreas interiores (YUWANDARI et al., 2020), gerando um sério problema para o ecossistema dependente da água subterrânea e de sua qualidade.

Os problemas de subsuperfície induzidos pela extração excessiva e descontrolada de água subterrânea são exacerbados pelas enchentes anuais do regime de monções que, na estação das chuvas, inundam a cidade, prejudicando os negócios, a educação, a saúde e o setor governamental. Os modelos sugerem que a cidade afundaria totalmente em 2050, o que levou o atual governo nacional a iniciar o programa de evacuação, determinando a transferência da capital nacional, incluindo seus escritórios, para o outro lado do mar, na cidade de Penajam, na Ilha de Kalimantan, localizada a cerca de 1.200 km da atual capital. Só isso custaria à nação US\$ 32,7 bilhões, o que é quase 20% do orçamento anual do estado.

Além disso, egos provinciais e setoriais envolvidos na fragmentação política e em regulamentações conflitantes sobre a responsabilidade na gestão de recursos hídricos subterrâneos – não apenas em Jacarta, mas, também, na Indonésia, em geral – têm sido o principal impedimento para alcançar a gestão sustentável da água nesse país tropical, onde as condições climáticas extremas costumam ocorrer, deixando-o vulnerável às consequências das mudanças climáticas.

O enfrentamento dessa situação demanda um esforço conjunto promovido pelos diferentes atores sociais no sentido de considerar a complexa interação entre águas superficiais e subterrâneas no processo de recarga na área (KLAAS et al., 2018). Não existe, contudo, um programa de recarga de água subterrânea bem definido que promova um esforço construtivo para, natural ou artificialmente, injetar água no aquífero.

4.5 INTEGRANDO A SOCIEDADE NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: A IMPORTÂNCIA DA PARTICIPAÇÃO SOCIAL

A participação social é um elemento central da governança das águas e da gestão integrada dos recursos hídricos. Além de ser uma forma de aumentar a eficiência da governança, ela pode ser classificada como um direito fundamental, previsto no ordenamento constitucional brasileiro (PRETTY, 1995; MELO; SCHIER, 2017). Essa participação pode ser definida como um processo relacionado ao envolvimento direto ou indireto (representação) das partes interessadas no processo de tomada de decisões sobre políticas, planos ou programas relacionados às múltiplas dimensões das águas (QUICK; BRYSON, 2016). As partes interessadas ou atores sociais são todas aquelas pessoas, grupos ou organizações que podem influenciar ou serem afetados pelas decisões

políticas que envolvem a proteção ou o uso das águas (QUICK; BRYSON, 2016).

O poder de participação dos atores sociais está diretamente relacionado à sua capacidade de interagir com as agências governamentais, líderes políticos e organizações que criam ou implementam as políticas públicas, e do seu engajamento nessas políticas (QUICK; BRYSON, 2016). O universo de atores sociais relacionado à água é amplo. No caso das águas subterrâneas destacam-se os seguintes: empresas de perfuração de poços; usuários de poços profundos; comunidades ou indivíduos que dependem integralmente do poço ou nascente para a sua subsistência; universidades e institutos de pesquisa; Ministério Público; associações profissionais técnicas, principalmente as relacionadas à Engenharia e Geologia; e as organizações não governamentais relacionadas aos recursos hídricos, com destaque a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), descrita no Box 26.

Box 26 – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS)

João Carlos Simanke Souza

A Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS) foi fundada em 19 de setembro de 1978 em uma histórica assembleia realizada no auditório da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). A comunidade hidrogeológica ansiava por dar protagonismo às águas subterrâneas junto aos órgãos de governo e à sociedade brasileira. São Paulo era o local onde a atividade de perfuração de poços era mais forte e intensa e muitas empresas reivindicavam melhor ordenamento jurídico do setor, combatendo a irregularidade dos poços.

A chamada dos perfuradores também teve eco junto à universidade, ao governo e aos consumidores, o que permitiu constituir uma Comissão Organizadora que conduziu o processo de criação da ABAS. A própria Comissão convocou uma assembleia em 21 de agosto de 1978, por meio da publicação do edital nos jornais Folha de São Paulo, O Estado de São Paulo, Gazeta Mercantil, O Globo, Diário do Comércio e Indústria, e Jornal do Brasil.

A Comissão Organizadora era liderada pelo engenheiro Renato João Baptista Della Togna, presidente da CETESB que, por aclamação, foi eleito o primeiro presidente da Associação, juntamente com a Diretoria e o Conselho Deliberativo, e o vice-presidente, engenheiro Euclides Cavallari, do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). A ABAS, assim, nasceu da feliz conjunção de esforços do empresariado de perfuradores de poços tubulares, de figuras proeminentes do governo e de técnicos e pesquisadores das universidades. Essa pluralidade de setores foi uma de suas fortalezas na época da sua criação, cuja característica a Associação ainda preserva nos dias atuais.

Nos anos seguintes, sob o comando de várias lideranças da ABAS, buscou-se uma lei específica de águas subterrâneas, o que tramitou, sem sucesso, por 10 anos no Congresso Nacional, até surgir a Lei nº 9.433/1997 (Lei das Águas), que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Na Constituição de 1988 e na Lei das Águas, reconheceu-se que a proteção das águas deveria ser feita como parte integrante do meio ambiente. Assim, foram introduzidos os conceitos de usos múltiplos e sustentáveis dos recursos hídricos, a gestão descentralizada, a participação de todos os atores, inclusive dos usuários, da sociedade civil e do governo no processo de gestão e governança das águas. A ABAS teve participação na construção desse marco do setor do recurso hídrico. Mais recentemente, ela teve papel de relevo na criação do Novo

Marco Legal do Saneamento Básico e na Portaria GM-MS 888/2021 de Padrão de Potabilidade da Água para Consumo Humano, garantindo o acesso do usuário às águas subterrâneas, com responsabilidade e cuidado ambiental. Hoje, a ABAS está representada por seus núcleos em todos os estados brasileiros, conta com associados de vários setores, possui protagonismo internacional e, inclusive, é reconhecida como o capítulo brasileiro da Associação Internacional de Hidrogeólogos (IAH).

A ABAS é responsável pela organização e promoção do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, do Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo e do Encontro Nacional dos Perfuradores, além de simpósios regionais, cursos e palestras. Ela também edita a principal publicação técnica do setor, a *Revista Água Subterrânea*. Assim, é impossível pensar na história das águas subterrâneas no Brasil sem a ABAS, pois ela esteve presente nos principais momentos da Hidrologia Moderna do país, cujo protagonismo trouxe maior visibilidade ao recurso hídrico subterrâneo, bem como tornou o seu uso mais responsável, equânime e socioambientalmente sustentável.

A literatura sobre governança das águas destaca o papel central da participação social no sucesso ou insucesso das políticas hídricas. A seguir, são apresentados os benefícios e desafios na materialização de processos participativos nas políticas públicas hídricas (Quadro 13).

Benefícios potenciais da participação social	Problemas na execução
Permite um processo de tomada de decisão transparente, melhor fundamentado e com soluções criativas.	Governo centralizador ou relutante que apenas recebe as propostas, mas não dá respostas nem faz o acompanhamento, gerando desapontamentos e menor aceitação das decisões.
Maior aceitação das decisões, aumento da confiança no governo e redução dos problemas de implementação.	Respostas limitadas e com pouca representatividade.
Processo de aprendizagem social.	Tempo e custos.
Prática governamental mais aberta e integrada.	Baixa qualidade da resposta social.
Fortalecimento da democracia.	Processo de tomada de decisão inconsistente.
Uma gestão de águas mais abrangente e que leve em conta as questões econômicas, sociais e ambientais.	Concessão de privilégios a determinados grupos, sem uma fundamentação bem articulada.

Quadro 13 – Benefícios e dificuldades da Participação Social

Fonte: Mostert (2003, p. 181).

A superexplotação dos aquíferos exige a cooperação dos atores não governamentais, com destaque aos usuários, empresas perfuradoras, conselhos de classe e universidades (BARTHEL; FOSTER; VILLHOLTH, 2017). No caso específico das águas subterrâneas pode-se destacar os seguintes benefícios da participação social:

- fomenta a compreensão e incentiva a adoção de boas práticas no manejo da gestão das águas subterrâneas (por exemplo, técnicas adequadas para construir o poço e definir a sua localização, adoção de PPPs, etc.) (GARDUNO; STEENBERGEN; FOSTER, 2010);
- contribui para a implementação das ações de gestão, pois decisões que não incluem os proprie-

tários dos poços dificilmente serão implementadas, especialmente com as limitações do Poder Público em promover a fiscalização (GARDUNO; STEENBERGEN; FOSTER, 2010);

- cria a oportunidade para que os usuários negoçiem entre si e com o governo metas de gestão que levem em conta os impactos socioambientais da proteção do aquífero (EMERSON; NABATCHI; BALOGH, 2012);
- permite a construção de acordos cooperativos para a execução de atividades relacionadas à gestão, tais como monitoramento, inspeção e fiscalização (GARDUNO; STEENBERGEN; FOSTER, 2010);
- facilita a coordenação das decisões relacionadas às águas e ao ordenamento territorial, contri-

buindo, inclusive, para reduzir as contradições entre as políticas (GARDUNO; STEENBERGEN; FOSTER, 2010);

- contribui para que indivíduos, grupos e comunidades locais tenham voz no desenho da gestão hídrica, de forma a proteger a sua captação de água subterrânea que, em muitos casos, é a mais vulnerável por tratar de nascentes e poços escavados (QUEVAUVILLER; BATELAAN; HUNT, 2016).

O formato e o nível da participação dependem da estrutura institucional, jurídica e política dos governos e dos órgãos de gestão (RUIZ-VILLAVERDE; GARCÍA-RUBIO, 2016). Diversos autores se debruçaram

sobre a forma como esses níveis de participação pública se estruturam. Dentre os mais conhecidos está o exemplo da escala de participação cidadã de Arnstein Ladder (ARNSTEIN, 1969). Além desse sistema, a escala Pretty (1995) classifica a participação de acordo com o envolvimento em atividades de gestão e no controle do resultado final, que vai de manipulativo à automobilização. Michener (1998) define a participação em duas categorias: *a*) a abordagem centrada no planejador; e *b*) a abordagem centrada nas pessoas. Ruiz-Villaverde e García-Rubio (2016), baseados em Mostert (2003), ilustram os níveis de participação (Figura 51).

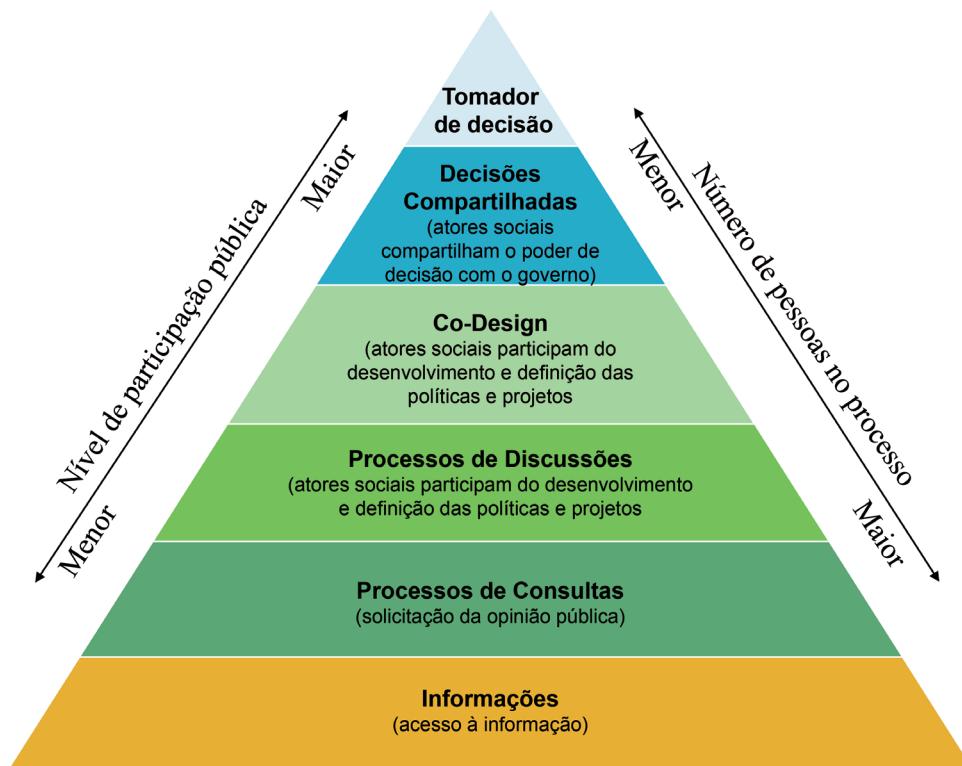


Figura 51 – Diferentes níveis de participação pública

Fonte: Ruiz-Villaverde e García-Rubio (2016, p. 5), adaptado e traduzido por Pilar Carolina Villar.

Por meio da participação pública, as partes interessadas podem interagir com agências governamentais, líderes políticos, organizações sem fins lucrativos e organizações empresariais, que criam ou implementam políticas e programas públicos. A legislação brasileira incorpora diversos níveis de participação no exercício da governança hídrica. Como exemplo, pode-se citar os processos de consulta na elaboração do Plano Na-

cional de Recursos Hídricos 2022-2040, as discussões realizadas no âmbito dos CBHs ou, ainda, os Acordos de Gestão Compartilhada do Programa Água Doce.

As Políticas Públicas enfrentam dificuldades em promover a participação da sociedade e dos usuários de águas subterrâneas, pois não conseguem motivá-los a participar do processo de obtenção de informação, do desenvolvimento das políticas e estratégias para a gestão

ou da implementação dessas políticas (PIYAPONG *et al.*, 2019). Em grande parte, isso se deve aos seguintes aspectos: *a)* à falta de informação e de conhecimento social sobre o tema; *b)* ao caráter extremamente técnico que se dá ao debate de águas subterrâneas; e *c)* à irregularidade do uso.

O acesso à informação é a primeira condição de qualquer processo participatório (RUIZ-VILLAVERDE; GARCÍA-RUBIO, 2016). Se a sociedade não conhece os aquíferos ou possui apenas uma compreensão básica sobre os recursos hídricos subterrâneos, é improvável que se estabeleça um senso de urgência para incluí-los nas políticas públicas, ou de responsabilidade para cumprir as normas, tampouco surge o desejo de se engajar no desenvolvimento de políticas públicas ou contribuir para a sua implementação (JANMAIMAO-OL *et al.*, 2019). Esse cenário favorece a exploração irregular, que “se dá de forma alheia à disponibilidade hídrica local, desrespeita o direito de uso de terceiros e impede que se arbitrem os seus impactos sobre o abastecimento público, os usuários outorgados e os donos de poços de uso isento.” (VILLAR, 2016, p. 92).

A execução de programas de Educação Ambiental e de capacitação para as águas subterrâneas é fundamental para mudar essa realidade. Infelizmente, faltam iniciativas que foquem na realidade dos aquíferos e que busquem abordagens diferenciadas, segundo o público-alvo: gestores, usuários, empresas de perfuração ou sociedade. O Box 27 traz uma ação nesse sentido, incluindo o Aquífero Guarani nas escolas de Ensino Médio de Santa Catarina.

O debate sobre as águas subterrâneas é marcado por um discurso técnico, cuja complexidade, em muitos casos, afasta a participação social ou a relega a uma postura passiva e submissa desse saber técnico. O conhecimento técnico-científico é fundamental para orientar a gestão, porém, a tomada de decisão é um processo político (FORSYTH, 2011). Se os atores sociais não entenderem a razão desses dados científicos ou as consequências de não orientarem suas ações por esse conhecimento, dificilmente vão adotar comportamentos que, no curto prazo, possam parecer prejudiciais aos seus interesses, como, por exemplo, reduzir o volume captado, principalmente quando há falhas na fiscalização, como é o caso brasileiro. Além disso, poucos gestores têm o conhecimento técnico necessário para propor ações específicas às águas subterrâneas.

Por fim, a falta de adesão às políticas públicas, materializada pela prevalência de usuários irregulares também prejudica a gestão, pois: *a)* oculta a importância das águas subterrâneas na gestão hídrica; *b)* esvazia o debate

sobre o recurso; *c)* impede que os interesses e conflitos existentes pelo uso das águas subterrâneas sejam discutidos de forma transparente entre todos os que podem ser afetados; *d)* dificulta ou impede o estabelecimento de parcerias nas ações necessárias para proteger o aquífero; e *e)* prejudica a organização dos usuários e a construção de uma responsabilidade coletiva sobre o uso do recurso.

Ao contrário de países como México, Peru e Chile, a legislação brasileira não estabeleceu a figura jurídica das organizações de usuários de poços. Essas organizações são grupos de usuários de água subterrânea que podem, conforme a legislação de cada país, funcionar como entidades gestoras (concedem direitos de uso de águas) ou como associações ou organizações não governamentais que buscam defender seus interesses em relação ao uso ou, ainda, angariar fundos para realizar obras que beneficiem ao grupo (por exemplo, sistemas de recarga ou perfuração de novos poços). A mera previsão legal, porém, não garante o sucesso desse tipo de arranjo cooperativo, como demonstra o caso das Comunidades de Águas Subterrâneas do Chile, exposto na galeria de casos. Ao contrário do que ocorre com as águas superficiais, os usuários de águas subterrâneas não se sentem motivados a se organizar. Os casos chileno e mexicano demonstram que as organizações de usuários têm importante papel no enfrentamento de situações de degradação de aquíferos.

No Brasil, as entidades gestoras são os órgãos estaduais de recursos hídricos ou as agências de bacia, contudo, nada impede que os usuários constituam organizações de direito privado com o objetivo de promover ações complementares à gestão das águas subterrâneas. Existem, inclusive, algumas experiências de organizações de usuários de irrigação³ que podem contribuir para promover o uso sustentável do recurso, desde que a sua atuação seja pautada pela exploração sustentável das águas e com foco em objetivos de longo prazo.

A participação social nas águas subterrâneas do Brasil é um tema pouco explorado. Abordagens das Ciências Sociais poderiam contribuir para fomentar o debate sobre o desenvolvimento e aplicação de metodologias e ferramentas que tivessem como objetivo fomentar a divulgação do conhecimento, o engajamento social ou a mediação e negociação no processo de gestão dos aquíferos.

3. Essas iniciativas têm como foco a irrigação com base nas águas superficiais. São exemplos: a Associação dos Usuários do Perímetro Irrigado de Tourão (AUPIT) (BA) e a Associação dos Usuários do Perímetro de Irrigação do Arroio Duro (RS). Faltam, contudo, estudos científicos sobre tais iniciativas.

Box 27 – A experiência do Projeto Educação Ambiental para Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani, na Zona de Recarga Direta, no Estado de Santa Catarina/Brasil

Marcio Cardoso

Daniel José da Silva

Este projeto foi realizado no período de maio de 2005 a fevereiro de 2007, tendo como equipe executora o Instituto Autopoiésis Brasilis – Organização da Sociedade Civil de Interesse Público – e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC). Sua realização contou com a parceria da Fundação de Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (FATMA), a Prefeitura Municipal de Urubici, o Grupo de Apoio Local em Urubici (GAL) e a Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina (ALESC). A coordenação geral foi realizada por Marcio Cardoso (Instituto Autopoiésis) e Daniel José da Silva (UFSC). O Projeto elaborou um modelo de Educação Ambiental formal, não formal e difusa para inclusão do tema da proteção ambiental e do desenvolvimento sustentável do Sistema Aquífero Guarani (SAG) em currículos escolares e em políticas públicas municipais na região de sua abrangência em Santa Catarina (Figura 52).

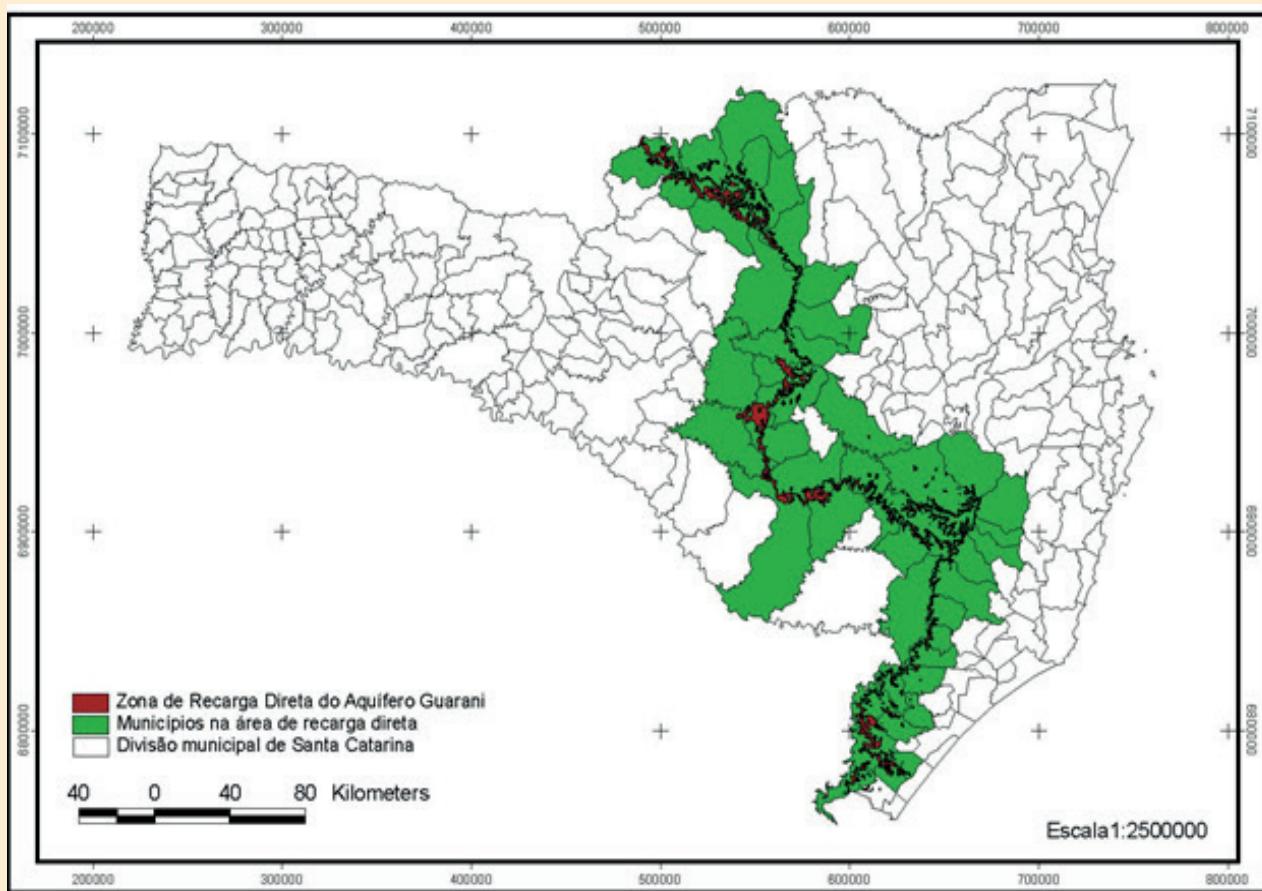


Figura 52 – Área de recarga do Sistema Aquífero Guarani em Santa Catarina

Fonte: elaborado pelos autores.

Os objetivos específicos do projeto visam a promover: 1) a **Educação Ambiental Formal** por meio da inclusão dos conteúdos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável do SAG no Projeto Político Pedagógico do Município de Urubici; 2) a **Educação Ambiental Não Formal** mediante a construção social de projeto de lei municipal para proteção ambiental e desenvolvimento sustentável do SAG, envolvendo

vereadores, gestores públicos, sociais e privados do Município de Urubici; 3) a **Educação Ambiental Difusa** nos 47 municípios situados sobre a Zona de Recarga Direta do SAG, no estado de Santa Catarina, por meio da difusão de materiais pedagógicos e de seminários.

As atividades foram estruturadas em cinco etapas: 1) *Pesquisa e produção de informações* – relatório do perfil e de vulnerabilidade dos 47 municípios, mapas temáticos, histórico do SAG, site do SAG; 2) *Materiais pedagógicos e de comunicação* – folder, cartaz de apresentação, cartilha do SAG, manual metodológico, folder e cartaz do seminário; 3) *Formação de educadores e inclusão do tema SAG nas escolas* – oficina de formação de educadores do Município de Urubici, envolvimento das escolas e ONG's da Região; 4) *Oficina de Formação Gestores Públicos e Sociais e Legisladores* – estratégias para inserção do tema SAG nas escolas e políticas municipais; 5) *Seminário de difusão e intercâmbio de experiências do SAG em SC* – Seminário para 350 participantes, difusão dos materiais pedagógicos, disseminação e intercâmbio de informações entre SC, Brasil, Uruguai, Argentina, Paraguai.

As principais recomendações para os próximos projetos em SC envolveram a elaboração de vários instrumentos e a promoção de eventos, tais como: 1) material pedagógico para a Educação formal nas escolas; 2) material pedagógico para a Educação não formal de jovens e adultos; 3) material pedagógico para inclusão do tema Proteção e Desenvolvimento Sustentável do SAG nas Políticas Públicas municipais e estadual; 4) material informativo para orientação de proprietários rurais, agricultores, pecuaristas, industriais, mineradores e outros empreendedores, no ajuste de conduta do uso sustentável do SAG; 5) material informativo para a inclusão do SAG nos planos diretores municipais, de unidades de conservação e de bacias hidrográficas; 6) material de comunicação social para escolas e comunidades, tais como: cartilha pedagógica do SAG, folder, cartaz, vídeos, programas de rádio e TV; 7) promoção de Seminários Estaduais Anuais e Seminários Nacionais e Internacionais para intercâmbio de experiências sobre melhores práticas, materiais pedagógicos produzidos e construção de redes sociais e parcerias; 8) ampliação do Projeto de Educação para a Proteção do SAG aos demais municípios catarinenses e estados brasileiros, integrantes do SAG⁴.

4.6 COOPERAÇÃO ENTRE OS DIVERSOS ENTES ADMINISTRATIVOS E O ENFOQUE NA GESTÃO LOCAL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O Brasil é um país federativo que “institui a divisão de responsabilidades e autonomia entre os governos federal, estadual e municipal.” (GRANJA; WARNER, 2006, p. 1101). A existência de competências comuns e concorrentes aponta para um federalismo de cooperação e integração que se reflete na política de águas e na organização do Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SNRH), formado por sistemas nacional, estaduais, regionais e locais. A Lei nº 9.433/1997 adota, ainda, a gestão participativa e descentralizada por meio da bacia hidrográfica e operacionalizada pelos CBHs. Dessa forma, o modelo de gerenciamento de águas no Brasil é orientado pelo federalismo e pelo princípio da subsidiariedade, que determina que as decisões, legislativas ou administrativas, sejam toma-

das no nível político mais baixo possível, isto é, por aqueles que estão o mais próximo possível das decisões que são definidas, efetuadas e executadas (GRANJA; WARNER, 2006).

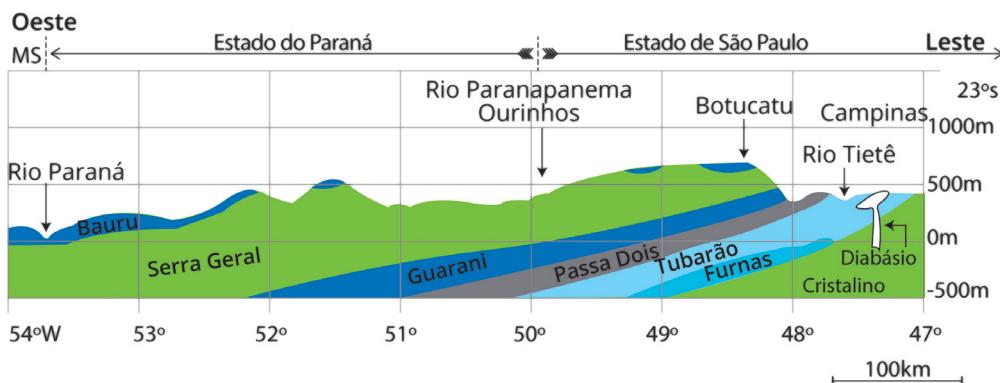
A bacia hidrográfica como território de gestão das águas não se confunde com a divisão clássica dos entes administrativos: União, estados, Distrito Federal e municípios. A bacia transcende os limites administrativos clássicos, pois a sua territorialidade se conforma com base em aspectos físico-naturais. Ainda que se estabeleçam limites jurídicos, subdividindo-as em porções menores, como forma de facilitar a gestão, não se pode ignorar que o sistema hídrico é uno. Logo, criou-se uma territorialidade de decisão que exige a construção de arranjos cooperativos e integrativos entre todos esses entes administrativos e, em alguns casos, até com outros países, conforme a escala da bacia ou do aquífero, ou em virtude da correlação entre esses corpos hídricos (GRANJA; WARNER, 2006).

Os aquíferos foram inseridos nessa gestão por bacias, ainda que a sua territorialidade não convirja com elas. Apesar disso, a bacia ainda é o melhor território

4. Para mais informações sobre essa experiência, consultar o documento *Aquífero Guarani: Gigante Desconhecido*, disponível on-line em: <https://vimeo.com/83763069>.

para geri-los, pois os principais serviços ecossistêmicos dos aquíferos e os impactos do uso de suas águas ou do solo ocorrem, prioritariamente, na territorialidade da bacia hidrográfica. Como se percebe na Figura 53, em uma mesma bacia há diversos aquíferos sobrepostos, que possuem territorialidades completamente distintas,

embora possam interagir entre si e com a bacia. Diante do cenário de aplicação da Lei nº 9.433/1997, pensar na criação de uma territorialidade específica para cada aquífero seria um desafio de gestão impensável para um país que sequer conseguiu implantar, de forma plena, a gestão das bacias hidrográficas.



Elaborado por Geraldo H. Oda com base em IGG (1974), IPT (1981), DNPM/CPRM (1983)

Figura 53 – Seção geológica esquemática do estado de São Paulo e seus sistemas aquíferos

Fonte: São Paulo (2014, p. 29).

O Capítulo 3 demonstrou que o CNRH estabeleceu as principais diretrizes que norteiam a atuação das unidades federativas, dos municípios e dos CBHs na gestão conjunta de bacias e aquíferos, contudo, faltam estudos que analisem a forma *como e se* isso foi feito (VILLAR; HIRATA, 2022). Além disso, seria importante que o CNRH e os Conselhos Estaduais determinassem áreas prioritárias para o controle das extrações dos aquíferos, cujos efeitos pudesse ir além da bacia na qual ocorre a gestão. Essa definição contribuiria para estimular a cooperação entre os diversos entes administrativos e os diversos CBHs envolvidos. Tais ações de cooperação podem incluir: *a)* a idealização de estudos e monitoramento conjunto; *b)* a adoção de metodologias conjuntas para determinar a disponibilidade hídrica e controlar as extrações; *c)* a criação de salas de situação para aquíferos; ou *d)* a idealização de acordos interbacias ou internacionais. Nesse sentido, a experiência do Sistema Aquífero Guarani é bastante exemplificativa quanto à importância de articular e coordenar as ações nas diversas escalas de gestão.

4.6.1 Aquíferos transfronteiriços e interestaduais: o caso do Sistema Aquífero Guarani (SAG)

A Res. CNRH 202/2018, no art. 2º, assim define os aquíferos transfronteiriços e interestaduais:

III - aquífero interestadual: aquífero distribuído nos territórios de, pelo menos, dois estados, ou entre um estado e o Distrito Federal;

IV - aquífero transfronteiriço: aquífero compartilhado pelo Brasil com, pelo menos, um país vizinho fronteiriço; [...].

Vários aquíferos brasileiros são interestaduais. Infelizmente, ainda não se produziu um mapa exclusivo para demonstrar esses aquíferos, o que ajudaria os estados e os CBHs a conformarem ações conjuntas. O Brasil possui 11 aquíferos transfronteiriços (Figura 54): Amazonas, Aquidauana, Boa Vista, Bauru-Caiuá, Roraima, Pantanal, Permo-Carbonífero, Costeiro, Litorâneo, Serra Geral e Guarani.

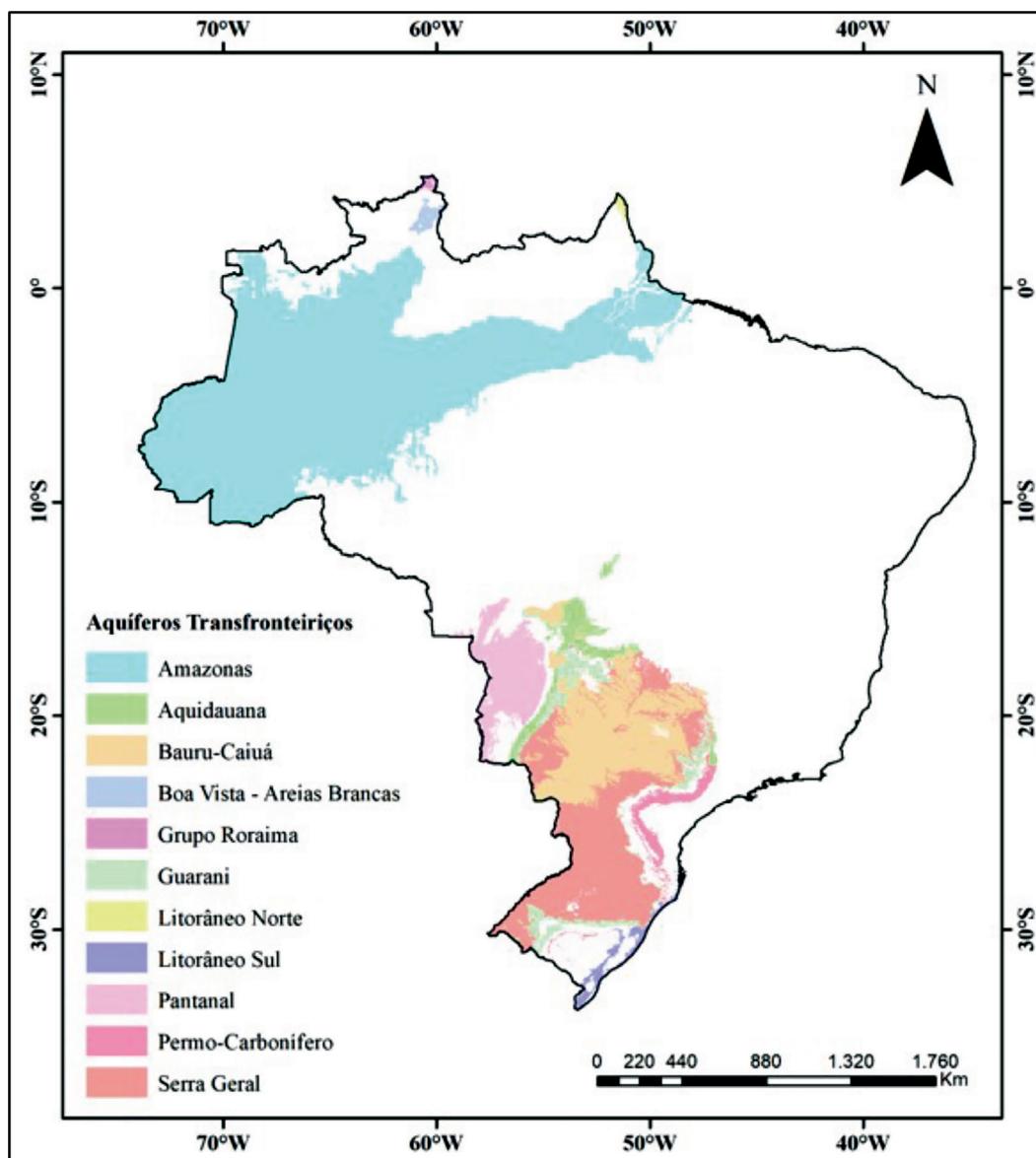


Figura 54 – Aquíferos transfronteiriços no território brasileiro

Fonte: ANA (2017, p. 1), adaptado e cedido por Felipe Nincaio.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG), sem dúvida, é o mais conhecido e o único que possui um Acordo Internacional (Box 28). Conforme demonstra a Figura 54, esse aquífero transfronteiriço é sobreposto por outros dois aquíferos também transfronteiriços: o Serra Geral e o Bauru-Caiuá, por isso a referida Figura demonstra apenas as suas áreas de afloramento.

Sua área ocupa 1.087.879 km², compreendendo o território da Argentina (225.500 km²), Brasil (735.918 km²), Paraguai (71.700 km²) e Uruguai (45.000 km²).

(OAS, 2009, p. 62) (Figura 55). O Brasil detém a maior porção do aquífero (61,65%) que, no território brasileiro, é classificado como um aquífero interestadual pois se estende por oito estados: Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo, respondendo por 80% do uso brasileiro (OAS, 2009). Trata-se de um aquífero sedimentar e confinado em 90% do território, sendo que as zonas de afloramento correspondem apenas a 124.650 km² (LEBAC/UNESP, 2008).

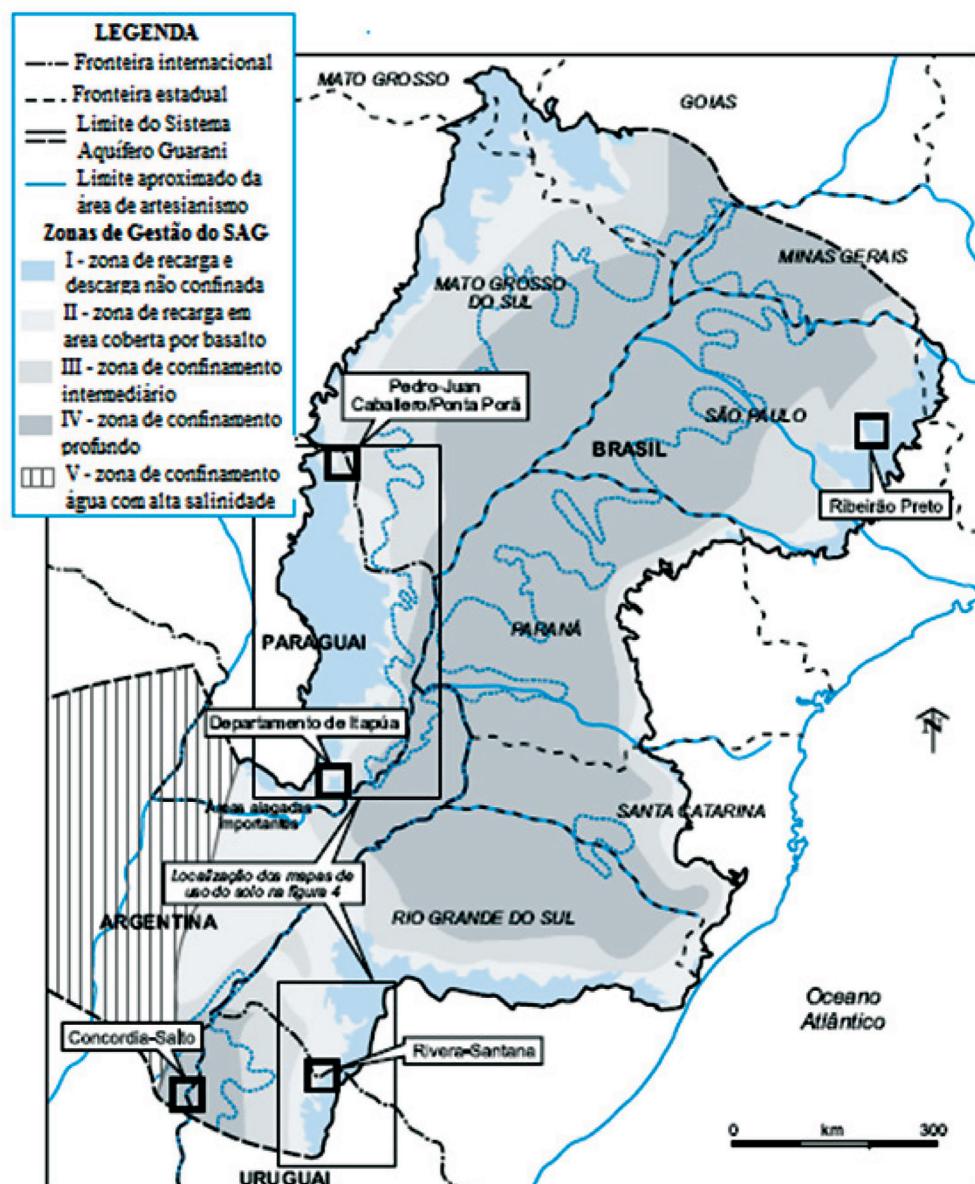


Figura 55 – O Sistema Aquífero Guarani e suas Zonas de Gestão

Fonte: Foster et al. (2009, p. 11).

Ao contrário das descrições comumente difundidas em meios não técnicos, o SAG não é uma estrutura uniforme, como uma esponja ou um lago/rio subterrâneo. Pelo contrário, o aquífero é bastante heterogêneo, seja em relação à formação rochosa que o compõe, ou às características de suas águas. Possui áreas de afloramento e regiões cobertas por basaltos de diversas espessuras, que podem superar mais de 1.500 m de profundidade (OAS, 2009; BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). Essa característica influencia o tempo de residência das águas, que pode ser de meses ou mais

de centenas de milhares de anos, o que indica taxas de recarga extremamente reduzidas, além de condicionar as características geoquímicas da água, com porções de excelente qualidade e outras com salinidade elevada ou anomalias naturais relacionadas às altas concentrações de flúor e de salinidade (OAS, 2009, p. 66; BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2011). Nesse sentido, a Figura 55 ilustra essa heterogeneidade, propondo cinco Zonas de Gestão que demonstram a necessidade de abordagens de planejamento distintas (FOSTER et al., 2009):

- I. **zona de recarga e descarga não confinada:** o aquífero aflora na superfície, por isso, as águas são reabastecidas continuamente, contribuindo com os recursos hídricos superficiais. Em contrapartida, é vulnerável à contaminação;
- II. **zona de recarga em área coberta por basaltos:** a recarga ocorre por meio das fraturas do basalto, sendo consideravelmente inferior à da zona de afloramento. A conexão com os recursos superficiais precisa ser mais bem estudada;
- III. **zona de confinamento intermediário:** a área é coberta pelos basaltos da formação Serra Geral, portanto, não há recarga significativa. As águas têm tempo de residência superior a 10.000 anos e sua extração equivaleria à mineração do aquífero. Risco de contaminação antrópica muito baixo. Possibilidade de problemas de qualidade de água decorrentes do tempo de residência e falta de renovação. Em algumas áreas, o teor de sais dissolvidos, incluindo o flúor e o arsênico, pode comprometer a sua potabilidade;
- IV. **zona de confinamento profundo:** similar à Zona III, contudo, a camada de basalto que confina o aquífero supera os 400 m. O custo da extração inviabiliza a exploração, salvo para o uso hidrogeotermal;
- V. **zona de confinamento com alta salinidade:** além do confinamento, nessa região as águas possuem alta salinidade, podendo ser utilizadas para fins hidrogeotermais ou após tratamentos, se for economicamente viável.

Apesar dessa divisão sugerir certa homogeneidade, ainda existem heterogeneidades que só poderão ser avaliadas no âmbito local. Por exemplo, no município de Ribeirão Preto (SP), é possível encontrar as Zonas I, II e III com distâncias que variam de alguns quilômetros. Além disso, considerando o tempo de residência das águas, a maioria dos impactos acaba tendo efeitos locais. A superexploração do SAG em Ribeirão Preto pode comprometer o aquífero nas cidades vizinhas, mas não influencia a exploração de outro país ou estado brasileiro.

A região de Ribeirão Preto, além de ser uma área piloto do Projeto Sistema Aquífero Guarani, foi objeto de um Termo de Cooperação Técnica entre o estado de São Paulo e o da Baviera (Alemanha), denominado “Sistema Piloto de Informação para o Gerenciamento

Ambiental dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo”. As recomendações desse estudo contribuíram para a criação da Área de Restrição e Controle do Uso das Águas Subterrâneas no município Ribeirão Preto (SP) (VILLAR; RIBEIRO, 2011).

Embora as formações geológicas se estendam para além dos limites nacionais, o fluxo hídrico tem características locais, portanto, “os efeitos transfronteiriços atuais e potenciais do SAG se restringem a uma faixa estreita de não mais do que algumas dezenas de quilômetros, dependendo das condições hidrodinâmicas locais e específicas.” (OAS, 2009, p 18). Os problemas transfronteiriços no SAG podem ocorrer se extensas áreas com intensa exploração estiverem situadas próximas à fronteira, o que poderia resultar em rebaixamentos expressivos no nível potenciométrico do aquífero, trazendo prejuízos a essas áreas e, consequentemente, aos países vizinhos.

A lógica de fluxos locais se mantém nas Unidades Federativas brasileiras. Por isso, do ponto de vista de cooperação interestadual, é importante delimitar as áreas com extensas e intensas explorações próximas aos limites interestaduais. Na lógica da gestão estadual, os estados devem definir tais áreas em que há compartilhamento de fluxos subterrâneos justamente para promover a cooperação entre bacias e propor ações conjuntas. O Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e os Planos Estaduais de Recursos Hídricos (PERH) têm um papel destacado na promoção dessa coordenação.

O Brasil é responsável pela maior parte da exploração do SAG, mas os problemas de superexploração ainda são localizados e de ocorrência restrita ao estado de São Paulo. Embora não existam problemas transfronteiriços significativos (VILLAR; RIBEIRO, 2011; VILLAR, 2015; HIRATA; FOSTER, 2020; HIRATA; KIRCHHEIM; MANGANELLI, 2020), esse aquífero conseguiu o notável feito de se fazer conhecer pela sociedade e incentivar ações destinadas às águas subterrâneas. Em grande parte, isso se justifica pela realização do Projeto Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani (também conhecido como Projeto Sistema Aquífero Guarani – PSAG), entre os anos de 2003 a 2009. Esse projeto internacional contou com a participação de todos os países do aquífero e com o apoio de várias organizações, com destaque ao Banco Mundial, à Organização dos Estados Americanos (OEA) e ao Fundo Global para

o Meio Ambiente (GEF). Sua execução só foi possível graças a um histórico anterior de cooperação incentivado pelas universidades dos países que perceberam a possibilidade de haver uma conexão hidrogeológica entre formações geológicas compartilhadas pelos países (VILLAR, 2015). A partir daí foi possível mobilizar organismos internacionais e estados (VILLAR, 2015; SÍNDICO; HIRATA; MANGANELLI, 2018),

culminando, inclusive, na criação de um Centro Regional para a Gestão de Águas Subterrâneas da América Latina e do Caribe (CeReGAS), descrito no Box 29. O SAG será alvo de um novo projeto internacional de porte médio⁵, denominado “Programa Estratégico de Ação do Aquífero Guarani: Viabilizando Ações Regionais”, organizado pelos estados, o GEF e o Banco de Desenvolvimento da América Latina (CAF).⁶

Box 28 – O Acordo sobre o Aquífero Guarani

Pilar Carolina Villar

O acordo sobre o Aquífero Guarani foi firmado pelos países envolvidos em 2 de agosto de 2010, na cidade de San Juan (Argentina), sendo muito celebrado pela comunidade de águas, pois: a) configura um acordo específico para um aquífero transfronteiriço, algo raro no contexto mundial; b) menciona, em seu preâmbulo, a Resolução da Assembleia Geral das Nações Unidas nº 63/124 (2008), reforçando a importância desse documento; c) inclui os princípios de Direito Internacional de Águas Doces, evidenciando a sua aplicabilidade aos aquíferos; d) é o primeiro acordo específico de um aquífero na América Latina, podendo incentivar a celebração de outros acordos; e) representa a continuidade do processo de cooperação estabelecido entre os países no âmbito do Projeto Sistema Aquífero Guarani⁶; e f) é exemplo de diplomacia preventiva, pois não havia conflitos pelo uso das águas subterrâneas (VILLAR; RIBEIRO, 2011).

O longo processo de ratificação arrefeceu o otimismo inicial. Em outubro de 2020, o Paraguai depositou o último instrumento de ratificação, o que permite a entrada em vigor do acordo. Seu objeto são “os recursos hídricos transfronteiriços do Sistema Aquífero Guarani” (art. 1º), e representa uma ferramenta de cooperação flexível que obriga os estados a gerirem as águas subterrâneas, de acordo com as normas de Direito Internacional (VILLAR, 2016).

A entrada em vigor do Acordo possibilita que os Estados aprofundem o processo de cooperação. Para isso, porém, são necessárias as seguintes ações: a) criação de uma comissão para o Aquífero Guarani; b) implementação de programas de cooperação para as águas subterrâneas; c) identificação de áreas críticas, especialmente nas áreas de fronteiras, que são as que efetivamente possuem um fluxo compartilhado entre os estados; e d) definição do procedimento arbitral para solução de controvérsias por meio da edição de um Protocolo Adicional (art. 19). Dentre essas ações, a mais urgente, sem dúvida, é a criação da Comissão, responsável por coordenar a cooperação no cumprimento dos princípios e objetivos do Acordo. Sem a regulamentação de seu estatuto, definindo a sua estrutura e poderes, o Acordo terá efetividade limitada no contexto regional (VILLAR, 2020).

5. Para mais informações consultar: <https://www.thegef.org/project/implementation-guarani-aquifer-strategic-action-program-enabling-regional-actions>.

6. Ver: <http://www.oas.org/DSD/WaterResources/projects/Guarani/SAP-Guarani.pdf>.

Box 29 – Centro Regional para a Gestão de Águas Subterrâneas na América Latina e Caribe (CeReGAS): exemplo prático da importância da cooperação internacional

Alberto Manganelli

Como consequência do impulso dado pelo Projeto Sistema Aquífero Guarani (2003-2009) e diante da necessidade de contar com um escritório de articulação regional para promover a cooperação entre os países da região em relação à gestão dos recursos hídricos subterrâneos, particularmente os transfronteiriços, apresentou-se, em 2011, perante a mesa do Programa Hidrológico Intergovernamental da Unesco (IHP-LAC), a proposta de criação do Centro Regional de Gestão de Águas Subterrâneas da América Latina e do Caribe (CeReGAS). Após um longo processo de aprovação, em março de 2014 foi assinado o Acordo entre o Governo da República Oriental do Uruguai e a Unesco para a criação do CeReGAS como Centro de Categoria II. A finalidade do CeReGAS é gerar capacidades científicas e técnicas que contribuam para o desenvolvimento sustentável, a gestão e a governança das águas subterrâneas, bem como para a proteção ambiental dos aquíferos a partir de uma visão integrada. Seus objetivos estratégicos incluem:

- impulsivar a cooperação entre os países da região em relação à gestão dos recursos hídricos subterrâneos, particularmente no caso dos transfronteiriços;
- promover a criação e/ou fortalecimento de redes regionais e internacionais de pesquisa temática sobre o tema;
- desenvolver e/ou promover a criação de ferramentas de gestão e formar profissionais e pesquisadores para utilizá-las;
- disseminar o conhecimento gerado sobre o tema e promover ações de conscientização pública sobre o uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Em relação à estrutura, o seu órgão superior é representado pelo Conselho de Administração que, conforme o Acordo Uruguai e Unesco, está composto por um representante do governo uruguai, um da Unesco, além de mandatários dos seguintes países: Argentina, Bolívia, Brasil, México e Paraguai. O CeReGAS promove, participa e articula projetos nos níveis regional e nacional, como, por exemplo: o Projeto Sistema Aquífero Guarani II (Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai) e o Projeto Lagoa Mirim (Brasil e Uruguai). Além disso, ministra cursos próprios ou em associação com diferentes instituições regionais, sendo os mais notórios: *Gestão Integrada da Água Subterrânea na América Latina* e *Governança de Aquíferos Transfronteiriços*, ambos com alcance regional na América Latina e no Caribe. O CeReGAS também coordena o grupo de trabalho do Programa *International Shared Aquifer Resources Management* (ISARM) Américas, da Unesco, que se desenvolve como um esforço coletivo dos países do continente, com o objetivo de identificar e avaliar os sistemas aquíferos transfronteiriços nas Américas.

4.7 MONITORAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

O monitoramento das águas subterrâneas se dá pelo acompanhamento de parâmetros hidráulicos e/ou biofísicoquímicos no tempo e no espaço, com diversos objetivos que incluem desde a caracterização inicial de um aquífero, até como parte de uma estratégia de proteção ou de remediação das águas subterrâneas.

Assim, diferentes objetivos impõem distintos programas de monitoramento, que devem considerar: *i*) localização do ponto a ser acompanhado; *ii*) densidade dos pontos monitorados e perfil construtivo de poços ou das características hidrogeológicas do ponto de água; *iii*) frequência de medição; *iv*) parâmetros de análise; *v*)

dados a serem coletados e definição quanto à sua forma de organização e de validação, entre outros.

O monitoramento das águas subterrâneas usado para caracterizar os aspectos de quantidade (disponibilidade do recurso) ou de qualidade (poluição natural e antrópica) possui uma restrição intrínseca: a baixa capacidade dos poços de monitoramento ou dos poços de produção de água (usados para o monitoramento) caracterizarem os fenômenos que ocorrem no aquífero.

Esses fenômenos, tais como a poluição, geram plumas específicas que dificilmente alcançam mais de 1-2 km de distância da fonte causadora. Por outro lado, poços exclusivos para o monitoramento estático (em oposição aos poços de bombeamento) podem apenas

identificar a pluma que os atinge, isto é, se o limite de uma pluma se localizar a poucos metros do poço ela não será identificada. Por isso, os estudos de áreas contaminadas possuem grande densidade de poços (entre dezenas a centenas de poços por hectare). Outra característica das plumas contaminantes é que elas são entes tridimensionais, ou seja, é quase certo haver estratificação da qualidade da água do aquífero, ou seja, se o filtro do poço não estiver localizado frontalmente à pluma, esta não será detectada.

O monitoramento associado à caracterização de eventos de contaminação de fontes pontuais é bem desenvolvido no país. E, apesar de exigir grande quantidade de poços na determinação dos limites de plumas contaminantes, há vários procedimentos normatizados. As principais ações sugeridas pelos hidrogeólogos para o monitoramento da contaminação e remediação de fontes pontuais são a adoção de tecnologias de perfuração de poços, a instalação de poços multiníveis e o uso de equipamentos adequados para a coleta de amostras representativas de água.

Por sua vez, quando o monitoramento da qualidade das águas envolve fontes dispersas e multipontuais é necessária alta densidade de poços para reconhecer a extensão do dano ao aquífero, o que, na prática, torna o monitoramento pouco efetivo ou com custos muito elevados. Geralmente, as contaminações desse tipo geram plumas extensas e muito heterogêneas em termos de concentração, o que torna a interpretação dos dados ainda mais complexa.

Em muitos estudos regionais, a caracterização da contaminação de aquíferos se faz por poços tubulares de produção de água, ou seja, aqueles onde o posicionamento dos filtros leva em consideração somente a produção do aquífero. Os poços tubulares são estruturas verticais que conectam vários níveis de água em um mesmo aquífero, misturando em seu interior águas de idades e de qualidade química diferentes. Muitas vezes, essa mistura de águas acaba mascarando a contaminação mais superficial do aquífero, deixando plumas importantes não detectáveis.

O monitoramento de quantidade possui os mesmos problemas. Assim, seria importante acompanhar o nível potenciométrico no tempo, o que exigiria medições periódicas e sistemáticas para avaliar as variações de longo prazo, como, por exemplo, as alterações da recarga devido às mudanças climáticas, ou identificar problemas de superexplotação. Neste último caso, os poços de monitoramento deveriam ser instalados onde

se localizam os poços de extração de água. A interpretação dos dados, por sua vez, precisa isolar aqueles advindos da interferência hidráulica de uma captação próxima ou do rebaixamento regional, os quais devem ser quantificados. Para tanto, são necessárias medições mensais ou mesmo semestrais, comuns aos programas de monitoramento regional, bem como de acompanhamento piezométrico horário ou pelo menos diário, requerendo a instalação de transdutores de pressão e de vários poços em uma região.

Dessarte, a maior limitação do monitoramento está na caracterização regional, quando o objetivo é identificar a superexplotação ou a contaminação de caráter disperso advindo da atividade agrícola e urbana. Alguns estados implantaram redes de monitoramento regional de qualidade com o acompanhamento semestral de suas águas. A rede paulista acompanha a geoquímica de 316 pontos ativos de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas (CETESB, 2020). Considerando que cada poço possa monitorar o que ocorre em um raio de 200 m, a área que cada poço avalia é de 0,13 km². Assim, a rede está monitorando apenas 0,02% da área do estado (~41 km²). Esses números dão a dimensão da baixa representatividade das redes regionais de qualidade de água e da necessidade de se redimensionar as redes regionais desse tipo e com esse enfoque. Constatou-se que há relação entre as concentrações de nitrato nas águas subterrâneas e a ocupação do terreno a um km de raio do poço, indicando que a rede de poços ao invés de monitorar o estado de São Paulo analisa a situação próxima aos 316 poços localizados em diferentes contextos de urbanização (PILEGGI *et al.*, 2021). Esses números dão a dimensão da baixa assertividade das redes regionais de qualidade de água e da necessidade de se repensar redes regionais desse tipo e com esse enfoque.

Para superar as limitações no monitoramento regional é necessário ter clareza dos objetivos pretendidos. A rede paulista é eficiente no sentido de mostrar a forma como as cidades modificam a qualidade das águas no tempo, em séries históricas longas, mas limitada em verificar os impactos nas unidades aquíferas como um todo.

Já a RIMAS, do Serviço Geológico do Brasil, exposta no Box 30, é mais regional e ampla. Neste caso, o objetivo é acompanhar a evolução dos níveis das águas subterrâneas em áreas naturais afastadas da ocupação humana, junto às estações meteorológicas, tentando traçar a evolução dos níveis potenciométricos no tempo,

indicando, por exemplo, as variações esperadas pelas mudanças climáticas globais. Assim, mesmo contando com um número inferior de poços, a caracterização de *background* e sua evolução em longo período dos níveis potenciométricos determina a adequação de tal escala e técnica para o objetivo pretendido.

A superação da baixa representatividade dos poços de monitoramento nas redes regionais é um desafio, sobretudo quando os investimentos são baixos. Há alternativas que se valem de estratégias diferenciadas. Uma delas é complementar a Rede Regional de Qualidade com os resultados da Rede de Vigilância Sanitária em cidades abastecidas por água subterrânea. A legislação exige que os pontos da rede de água de uma cidade sejam periodicamente monitorados e as informações encaminhadas aos órgãos de Saúde. Se os parâmetros indicadores de contaminação regional (incluindo a condutividade elétrica, cloreto, amônio e nitrato) fossem sistematicamente analisados e os pontos de amostragem associados aos poços produtores identificados, ter-se-ia uma extensa rede de milhares de pontos, cujas variações de concentração dos elementos no tempo poderiam indicar a degradação do aquífero ou de parte dele.

Uma forma de avaliar os problemas de superexploração de aquíferos seria utilizar os dados constantes nos relatórios de construção de poços tubulares. As empresas de perfuração de poços deveriam ser obrigadas a realizar a entrega compulsória dessas informações, assim como a data da perfuração, a cota do terreno, o nível estático e dinâmico, e a vazão do poço, bem como a sua profundidade total.

Nas áreas com indícios de extrações intensas (pela densidade de poços ou por relatos de conflitos), uma estratégia de monitoramento seria estabelecer a malha de pontos, dividi-la em quadrados de 500 m x 500 m ou 250 m x 250 m e em cada uma delas avaliar, sistematicamente, os decaimentos dos níveis potenciométricos ao longo do tempo (de cinco em cinco anos, por exemplo) (Método MetQ). Nos quadrados onde há queda sensível de níveis, o responsável pelo monitoramento poderia selecionar um poço ou mesmo instalar outro poço dedicado à instalação de transdutores de pressão, e fazer o acompanhamento periódico do nível potenciométrico em relação ao tempo. O principal objetivo é otimizar os dados que geralmente não são utilizados pelo órgão ambiental e permitir a extensão das redes convencionais de monitoramento.

Box 30 – Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (Rimas)

Daniele Tokunaga Genaro

Frederico Cláudio Peixinho

Maria Antonieta A. Mourão

João Alberto Oliveira Diniz

A Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (Rimas) surgiu da necessidade de ampliar o conhecimento dos principais aquíferos do Brasil e da exigência, presente em vários instrumentos legais dos órgãos gestores estaduais, de uma ferramenta de ação para subsidiar a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Seu propósito é registrar as variações naturais do nível d'água para estimativa da recarga, de parâmetros hidráulicos e cálculo do balanço hídrico, além de acompanhar a variação do nível d'água em condições influenciadas pela intensa exploração e ocupação dos terrenos (MOURÃO; PEIXINHO, 2012). A Rimas também auxilia na identificação de variações na qualidade das águas subterrâneas monitoradas, pois realiza análises químicas e físico-químicas completas na instalação do poço e durante a operação da rede, a partir da determinação *in loco* de parâmetros considerados indicadores (pH, condutividade elétrica e temperatura). Secundariamente, monitora os parâmetros climatológicos (pluviometria, umidade relativa e temperatura do ar) nos locais onde estão instalados os poços de observação.

O monitoramento é realizado em todo o território nacional, atendendo aos seguintes critérios de priorização:

- poços/piezômetros dedicados (exclusivos) à atividade de monitoramento;
- aquíferos sedimentares livres (área de recarga);
- importância socioeconômica da água;

- uso da água para abastecimento público;
- aspectos de vulnerabilidade natural e riscos; e
- representatividade espacial do aquífero.

A Rimas é uma rede automática de registros horários dos níveis d'água. Sua operação e manutenção é dividida entre as oito Superintendências e três Residências Regionais do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM), as quais são responsáveis por três a cinco roteiros de operação e manutenção, frequentemente reavaliadas de acordo com condições financeiras, quadro operacional (colaboradores) e inclusão de novos pontos de monitoramento. Ainda em função da particularidade de cada roteiro, as visitas alternam entre duas a quatro vezes por poço/roteiro.

Após as visitas em que são realizadas as extrações dos dados do nível d'água (dos *dataloggers*), as equipes retornam aos escritórios, realizam a consistência dos dados e a sua sintetização (mediana diária). Subsequentemente, os dados são disponibilizados na página da Rimas (<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/>), por meio da qual a evolução do nível d'água pode ser visualizada em gráficos analíticos e temporais, com a possibilidade de *download*, de acordo com o período de interesse.

A rede de monitoramento conta com mais de 400 poços localizados em 24 aquíferos, em sua porção livre, além de algumas unidades confinadas e semiconfinadas, coberturas sedimentares indiferenciadas e aquíferos cristalinos. Ademais, possui aproximadamente 100 plataformas de coleta automática de dados de chuva, temperatura e umidade relativa do ar, próprias do projeto, e está presente em 21 Unidades Federativas brasileiras.

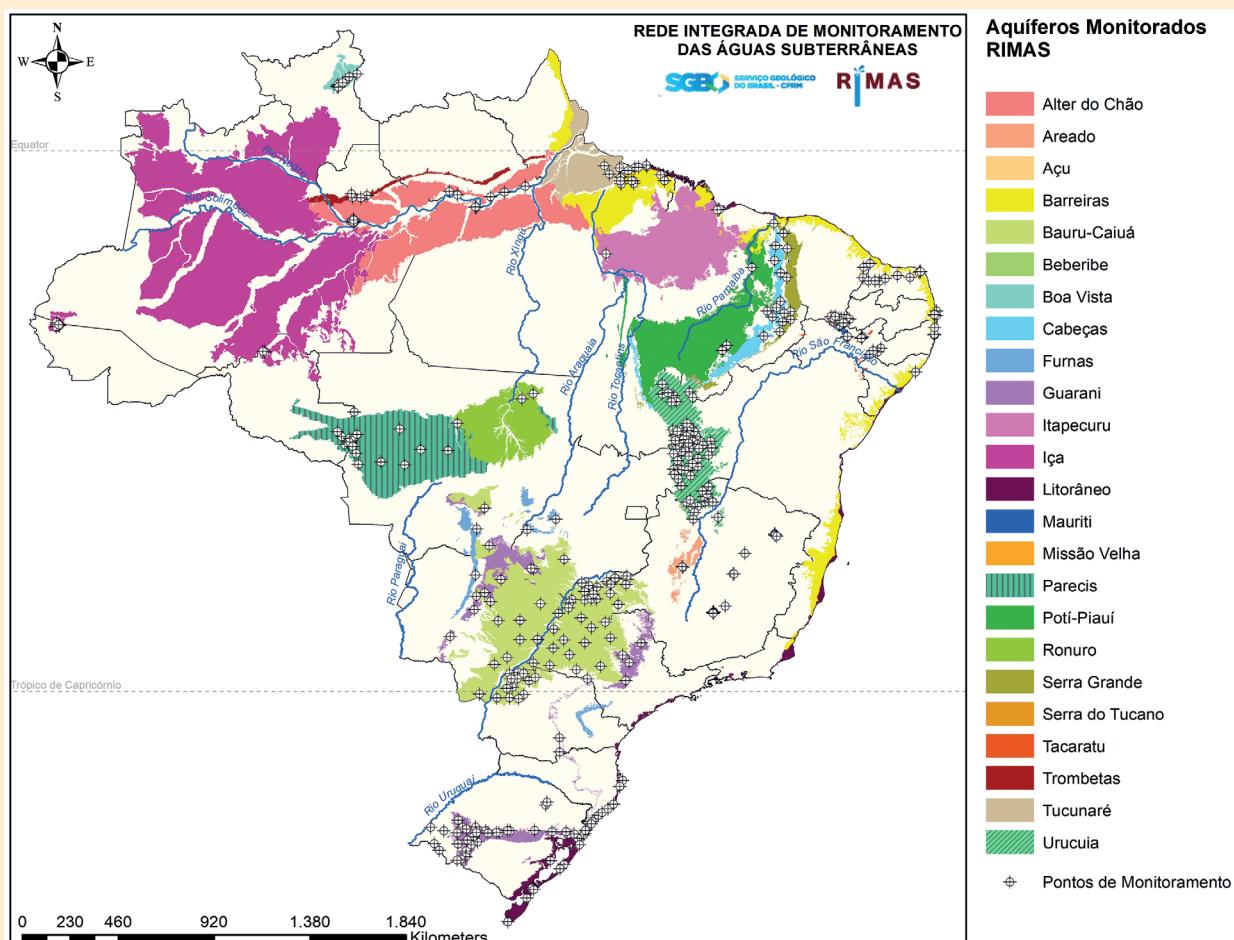


Figura 56 – Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (Rimas)

Fonte: SGB-CPRM (2021).

Parte da Rimas é operada de forma integrada com a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), na área do Aquífero Urucuia (oeste da Bahia) e em bacias dos rios Verde Grande e Carinhanha (divisa entre Bahia e Minas Gerais). Dentro os seus objetivos específicos, pode-se enfatizar os seguintes:

- promover uma avaliação confiável da condição quantitativa dos corpos de água subterrânea, incluindo a avaliação da disponibilidade do recurso hídrico;
- estabelecer avaliações de tendências de longo termo, tanto como resultado de mudanças nas condições naturais quanto derivadas de atividades antropogênicas;
- definir o estado qualitativo dos corpos d'água;
- identificar tendências significativas de crescimento na concentração de poluentes e no aumento do rebaixamento do nível d'água;
- avaliar a reversão das tendências nas condições qualitativas e/ou quantitativas após a implantação de medidas mitigadoras;
- estabelecer o grau de interação entre águas subterrâneas e águas superficiais.

A continuidade e expansão do monitoramento das águas subterrâneas é essencial à ampliação do conhecimento a respeito dos aquíferos e à avaliação da influência exercida por fatores diversos, tais como crescimento demográfico, exploração intensiva e alterações climáticas. Essas informações fornecem subsídios fundamentais para o planejamento, implantação e avaliação da eficácia dos procedimentos de gestão.

4.8 GALERIA DE CASOS

4.8.1 A gestão de áreas contaminadas complexas por múltiplas fontes: o caso da região do Distrito Industrial de Jurubatuba, São Paulo

Marcos B. Barbosa

Reginaldo A. Bertolo

O antigo Distrito Industrial de Jurubatuba, situado no Município de São Paulo, apresenta várias propriedades que contêm fontes de contaminação por compostos organoclorados. A distribuição geográfica dessas fontes caracteriza a região como uma extensa área contaminada complexa (ITRC, 2017). Esse termo refere-se a áreas onde a recuperação ambiental é incerta e se espera que o atingimento de metas ambientais ocorra em prazos consideráveis, ou seja, da ordem de várias décadas. As áreas complexas apresentam inúmeros desafios técnicos e não técnicos que contribuem para a existência de incertezas na sua recuperação ambiental.

Na região do Jurubatuba, os desafios técnicos do gerenciamento das áreas contaminadas são inúmeros: ocorrência de aquíferos fraturados; contaminação de níveis aquíferos profundos (de até 300 m); variação dos níveis de água subterrânea devido ao bombeamento

de poços tubulares irregulares; existência de contaminantes densos em fase líquida não aquosa; condições complexas de degradação desses contaminantes; existência de múltiplas fontes de contaminação e de plumas de contaminação extensas e combinadas; além da existência de receptores à contaminação.

Os desafios não técnicos no Jurubatuba também são numerosos e causam grandes incertezas quanto ao sucesso do seu gerenciamento ambiental. Dentre os principais desafios, destacam-se: *a)* múltiplos responsáveis legais em litígio; *b)* dificuldades em realizar a identificação de outros responsáveis; *c)* existência de áreas contaminadas órfãs; *d)* conflitos de entendimento entre autoridades públicas sobre o gerenciamento ambiental da área; *e)* judicialização dos conflitos entre órgãos públicos e poluidores; *f)* gerenciamento ambiental realizado de forma individual (sem haver ações coordenadas para o entendimento dos desafios técnicos na escala adequada); e *g)* falta de recursos financeiros e de uma política que facilite o acesso aos fundos de financiamento para recuperação de impactos ambientais.

Paralelo aos problemas de gestão ambiental, a existência dessas áreas contaminadas também ocasionou conflitos entre os usuários e proprietários de poços tubulares, constituídos pelas próprias indústrias, por

empreendimentos comerciais e por condomínios. A contaminação da água dos aquíferos por compostos organoclorados ocasionou a interdição de dezenas de poços tubulares privados no ano de 2005, e o estabelecimento, pelos órgãos gestores, de uma grande área de restrição de uso de água subterrânea (Figura 57). Essa Deliberação se encontra em processo de revisão geral coordenada pela Câmara Técnica de Águas Subterrâneas (CTAS) do CBH do Alto Tietê (CBH-AT), sendo que a principal proposta é a flexibilização da utilização da água subterrânea para fins não potáveis após tratamento, mesmo que ela apresente algum sinal de contaminação de origem industrial. Espera-se que tal medida contribua para aliviar os efeitos da elevada demanda por recursos hídricos na região.

A gestão de problemas ambientais dessa natureza, em locais de forte demanda por recursos hídricos, está entre os maiores desafios dos órgãos públicos gestores no Brasil e no mundo. O avanço das tecnologias digitais e da internet representa um passo rumo à praticidade na gestão desses problemas, pois o manuseio da informação pode ser feito de modo mais fácil, ágil e abrangente. A falta, porém, de um sistema de dados integrado e de pessoal capacitado é um desafio que persiste no gerenciamento ambiental dessas áreas complexas. Toda a abordagem eficiente para lidar com esses casos faz uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), já que as informações estão, invariavelmente, associadas a um local no espaço físico (LONGLEY *et al.*, 2005).

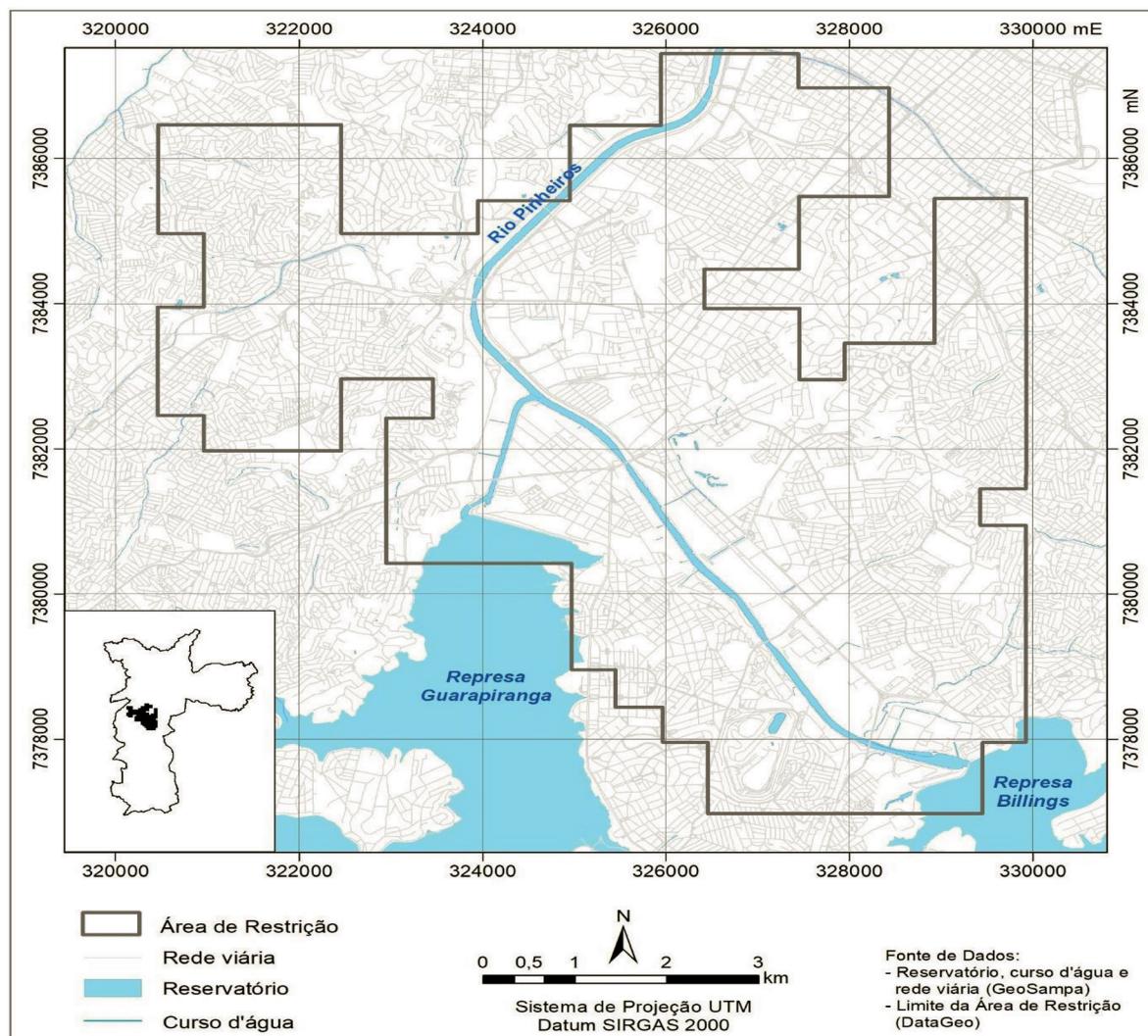


Figura 57 – Limites da Área de Restrição e Controle (ARC) de captação e uso de águas subterrâneas na Região de Jurubatuba

Fonte: CBH-AT (2021).

No caso da ARC de Jurubatuba, organizou-se um banco de dados espaciais para sistematizar toda a informação disponível e relevante a respeito das áreas contaminadas e poços tubulares (BARBOSA; BERTOLO; HIRATA, 2017). Essa integração permitiu gerenciar

uma grande quantidade de dados que, anteriormente, se encontravam desconexos, o que proporcionou novas interpretações a partir das informações já existentes, além de permitir um entendimento mais amplo sobre a contaminação da área (Figura 58).

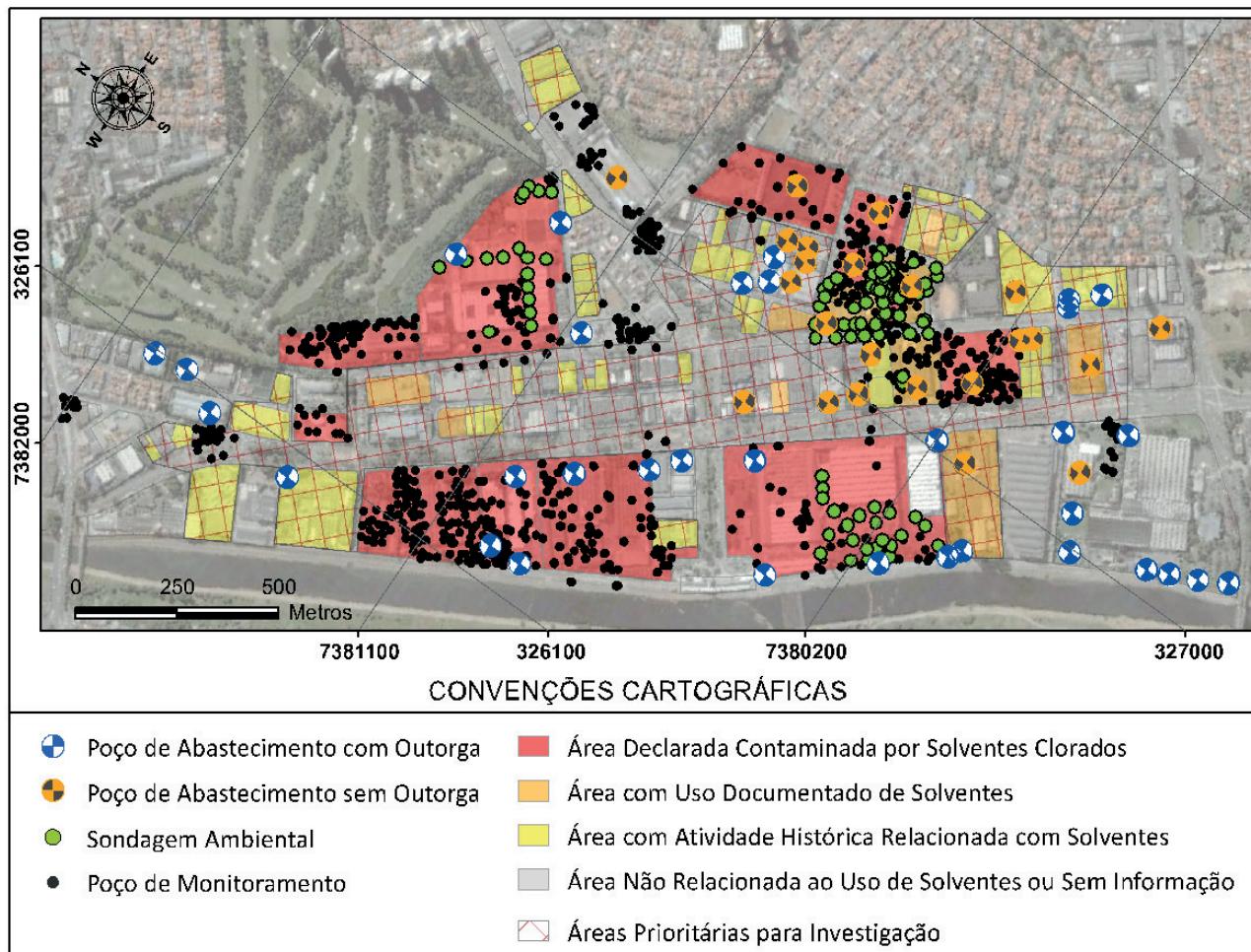


Figura 58 – Análise e processamento de dados com base no cruzamento das informações disponíveis no SIG do Projeto Jurubatuba, integrando dados de áreas contaminadas, sistema de gerenciamento ambiental da CETESB, cadastro de poços tubulares e coleta de dados em campo

Fonte: Barbosa, Bertolo e Hirata (2017, p. 329).

Os principais resultados obtidos nesse trabalho foram:

- 1) evidenciar aspectos críticos dos dados, tais como: distribuição espacial e temporal; formato e quantidade; e confiabilidade;
- 2) indicar áreas prioritárias a serem investigadas;
- 3) minimizar a inconsistência dos dados de mais de mil poços de monitoramento e de sondagens, bem como delimitar, de maneira con-

fiável, as principais unidades litológicas que ocorrem na área de estudo;

- 4) entender a dinâmica de fluxo da água subterrânea na escala do Projeto, indicando que o rio Pinheiros é de fato uma zona de descarga do aquífero raso, e sugerindo que a recarga do aquífero cristalino pode estar sob influência dos reservatórios Billings e Guarapiranga;
- 5) delimitar cinco locais onde as concentrações de compostos organoclorados estavam pre-

sentes, tanto no aquífero sedimentar quanto no aquífero fraturado (pelos poços tubulares profundos);

- 6) identificar os locais com concentrações elevadas de compostos organoclorados no aquífero fraturado (em poços tubulares), próximos de áreas que manipularam esses compostos no passado, sem a ocorrência de investigações até então.

A ausência de uma rede de monitoramento da qualidade da água com cobertura espacial e temporal dificulta o estabelecimento de uma estratégia de investigação compatível com a escala do problema na ARC Jurubatuba. Nesse caso, uma estratégia semirregional ou semilocal e integrada poderia resultar em menor número de poços, locados em pontos estratégicos, compondo uma rede de monitoramento mais representativa dos diferentes aquíferos, com maior eficiência e menor custo.

A abordagem de trabalho adotada na ARC Jurubatuba, embora estruturada para casos de contaminação por múltiplas fontes, pode ser aplicada no gerenciamento de áreas contaminadas para todo o estado de São Paulo, facilitando o processo de identificação de

novas áreas complexas e a adoção de estratégias mais eficientes de gestão ambiental.

A sistematização e a importação de dados são atividades complexas e trabalhosas, cuja responsabilidade cabe à entidade que produz ou contrata o serviço de coleta dos dados. A gestão da informação, após integração à base de dados, deve ser responsabilidade do administrador do Sistema (por exemplo, o próprio órgão ambiental). Os dados podem ser inseridos diretamente no SIG, validados por um gestor e avaliados por um técnico do órgão ambiental. Na estruturação do SIG é possível criar regras de validação com o objetivo de minimizar os erros associados a esse processo. A Figura 59 apresenta um modelo de gerenciamento da informação que pode ser desenvolvido e aplicado ao processo de gerenciamento de áreas contaminadas.

Uma das etapas mais trabalhosas, e que poderia ser incorporada ao SIG, seria a entrada de dados de perfurações e de análises químicas. No caso dos laboratórios, esses já têm um sistema de banco de dados em *Structured Query Language* (SQL), e a sua importação poderia ser feita diretamente, reduzindo bastante os volumes impressos e digitais enviados para análise pelo órgão ambiental.

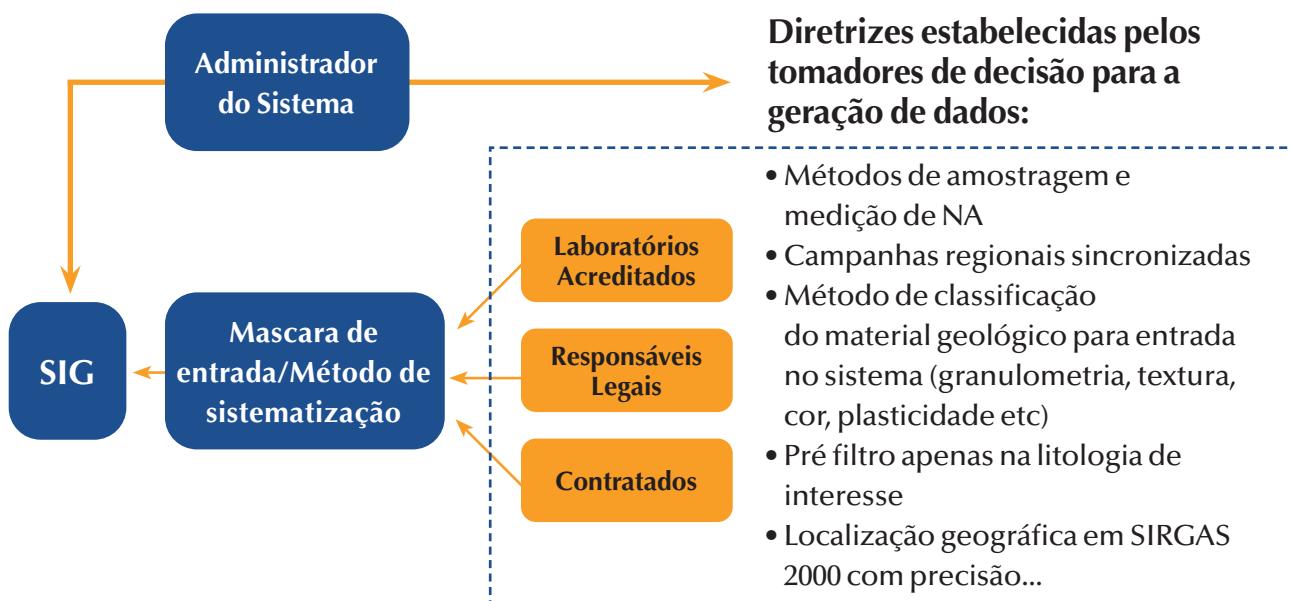


Figura 59 – Modelo de gerenciamento da informação aplicado ao gerenciamento de áreas críticas

Fonte: Barbosa, Bertolo e Hirata (2017, p. 335).

A adoção e implantação de um SIG representa importante passo no gerenciamento integrado do problema ambiental e do uso dos recursos hídricos subterrâneos na região, cuja recuperação ambiental será alcançada apenas em gerações futuras em virtude da complexidade dos desafios. O SIG também ajuda na tomada de decisões com vistas a uma abordagem mais efetiva dos desafios técnicos apontados, assim como na utilização racional de recursos disponíveis. Contribui, ainda, na resolução dos desafios não técnicos, trazendo maior clareza na comunicação entre as diferentes partes envolvidas em conflitos, responsáveis pela resolução dos problemas ambientais.

4.8.2 A gestão da água e a recuperação do Aquífero Santo Domingo, Comondú, Baixa California Sul, México

Zulema Guadalupe Lazos Ramírez

No Vale de Santo Domingo, na Baixa California Sul, México, a baixa precipitação média anual de 170 mm/m² reduz a possibilidade de aproveitamento da chuva e das águas superficiais. A principal fonte de abastecimento dos diferentes usos da água (principalmente agrícola) é o aquífero Santo Domingo (Figuras 60 e 61). Historicamente, a situação local impõe grandes desafios para o manejo e a gestão da água, de forma a garantir o desenvolvimento dessa bacia e o fortalecimento de sua economia, considerando o crescimento populacional (Tabela 1).

Município	Localidade	1990	2000	2010	2020
Comondú	Cidade de Constitución	34,692	35,589	40,935	43,805
	Cidade de Insurgentes	8,463	7,654	8,741	9,133

Tabela 1 – População das principais localidades do Vale de Santo Domingo

Fonte: INEGI (1990, 2000, 2010 e 2020).



Figura 60 – Localização do Aquífero Santo Domingo, Baixa California Sul, México

Fonte: Conagua (2020).

No dia 2 de julho de 1954 constituiu-se, por Decreto Presidencial, o Distrito Nacional de Irrigação da Baixa California Sul, conformado por uma área delimitada na qual se localiza a zona de irrigação abastecida pela água extraída do Aquífero Santo Domingo. A ação contribuiu para o desenvolvimento agrícola, resultando no crescimento econômico e populacional da comunidade. Com o passar do tempo, porém, surgiram problemas devido à má gestão e à falta de controle do uso das águas subterrâneas. A captação de água excede a recarga do aquífero, cujos níveis hídricos resultaram numa queda de três a 15 metros por ano.

Considerando que o Aquífero Santo Domingo é do tipo costeiro, ocorreu a migração da cunha salina, o que aumentou significativamente a salinidade da água subterrânea. Alguns poços atingiram níveis de mineralização de 3.000 ppm, tornando a qualidade da água inadequada ao consumo humano e uso agrícola. A consequência dessa extração exacerbada, portanto, foi o desequilíbrio do ecossistema, que se refletiu no aumento da salinidade, afetando a quantidade e a qualidade da água do aquífero para o seu uso nas atividades agrícolas, que são a base da economia do Vale de Santo Domingo.

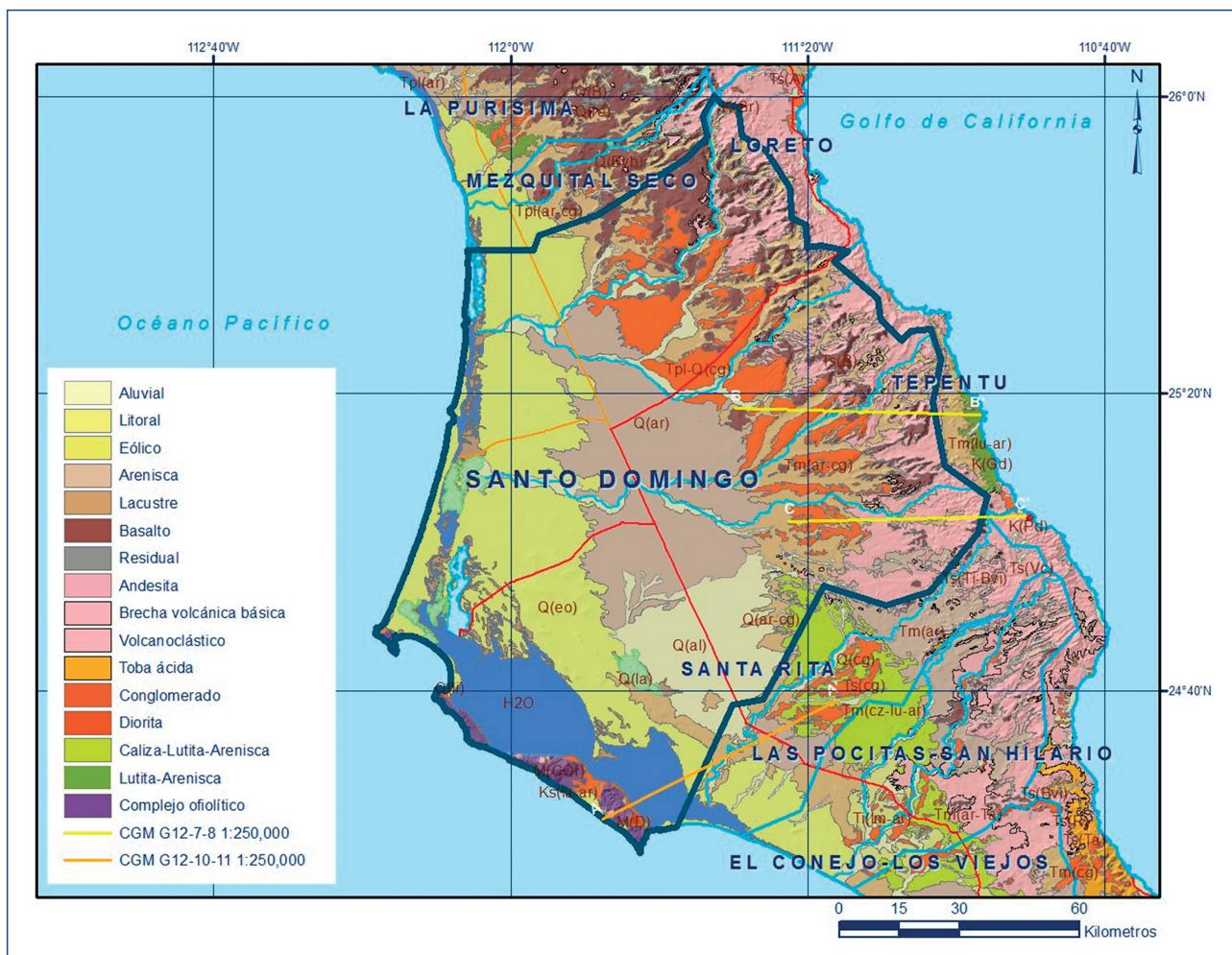


Figura 61 – Geologia do Aquífero Santo Domingo

Fonte: Conagua (2020).

Devido a essa situação, em 14 de agosto de 1992 foi publicado no Diário Oficial da Federação, o “Regulamento para o uso, exploração e aproveitamento das águas do subsolo na zona conhecida como Vale de Santo Domingo, município de Comondú, no Estado da Baixa California Sul, e que estabelece a respectiva reserva de água potável”⁷. A partir daquele ano, a Autoridade de Água no México incluiu a participação dos Organismos e Associações de Usuários do Aquífero, a fim de que esses pudessem propor soluções relacionadas à problemática da água, bem como se comprometessem a promover o manejo eficiente das águas e a proteção do aquífero.

Santo Domingo foi o primeiro aquífero a ser regulamentado no país, permitindo a redução dos volumes extraídos, entretanto, só alcançou o volume necessário para a estabilização do ecossistema no ano de 2004, quando as extrações estabilizaram. A redução do nível potenciométrico do aquífero, contudo, seguiu aprofundando na parte central. A partir dessa constatação, no ano de 2010, em decorrência dos impactos observados no aquífero, da dependência hídrica e da responsabilidade da comunidade no manejo da água, foi executado, com a participação da sociedade, o Projeto de Recuperação do Aquífero Valle Santo Domingo, com o objetivo de reduzir os níveis de rebatimento por meio de ações de monitoramento e medição da quantidade e qualidade da água (CONAGUA, 2010).

Com a participação de diferentes instituições dos três níveis de governo (federal, estadual e municipal) e, principalmente, dos usuários das águas nacionais,

pertençentes, majoritariamente, ao setor agrícola, a Comissão Nacional de Águas (CONAGUA) organizou mesas de trabalho com o objetivo de definir um programa que integrasse tanto os atores responsáveis pelo processo de tomada de decisões, como os que realizam ações em benefício do aquífero, de forma a dar visibilidade à situação hídrica e, a partir daí, estabelecer soluções.

A organização das mesas de trabalho permitiu o desenvolvimento de uma matriz de planejamento operativa, bem como a construção, de forma participativa, de uma estrutura de execução do projeto, com atores comprometidos a dar continuidade à execução, acompanhamento e fiscalização dos acordos celebrados para a recuperação do aquífero. O resultado dessas ações foi formalizado em um documento (CONAGUA, 2010).

Os dados mais representativos dos efeitos positivos da participação cidadã se revelam na manutenção dos volumes de extração de água anual do aquífero, dos quais cerca de 94% remetem ao uso agrícola, que consome o equivalente a 165,12 milhões de m³ de água. A Figura 62 demonstra a estabilização das extrações anuais dos volumes de água para a agricultura. Ainda não se alcançou a recuperação do aquífero, porém, já se caminha para isso, graças ao apoio de diferentes ações que devem ser implementadas, tais como: elaboração de estudos e projetos, promoção da capacitação dos produtores para o conhecimento das normas e da cultura da água, ampliação das macro e micromedições das extrações de água, gestão dos recursos hídricos, etc.

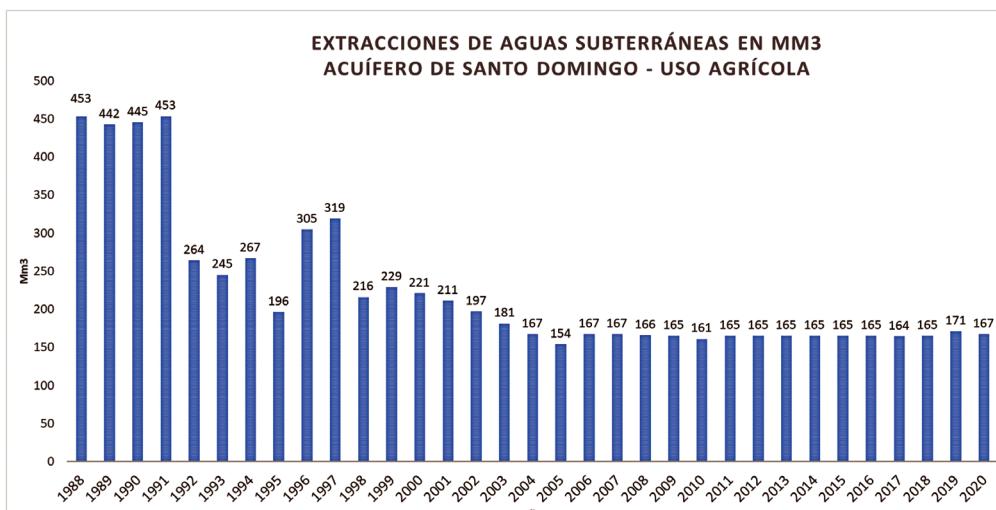


Figura 62 – Extrações de água subterrânea em Mm³ no Aquífero Santo Domingo (uso agrícola)

Fonte: Conagua (2020).

7. Disponível em: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4682007&fecha=14/08/1992.

No “*Projeto Emblemático de Recuperação do Aquífero do Vale de Santo Domingo, Cidade Constitución, Baixa California Sul*”, a população do Valle de Santo Domingo é exemplo de compromisso e participação na promoção do desenvolvimento econômico, ambiental e social, na medida em que a comunidade participa, se engaja, decide, verifica o cumprimento dos objetivos propostos e se compromete com os programas que visam à eficiência do uso da água, seja para fins agrícolas ou para atividades domésticas.

Em 17 de setembro de 2020, a Conagua editou, via Diário Oficial da Federação, o Acordo no qual atualiza a disponibilidade média anual de água subterrânea dos 653 aquíferos dos Estados Unidos Mexicanos. Nesse cenário, o Aquífero Santo Domingo apresenta um volume de extração de águas subterrâneas de 176.771 m³ anuais, enquanto a recarga do aquífero é de 146.4 Mm³ anuais. É necessário, portanto, seguir as ações de recuperação e integrar novas medidas para alcançar de maneira mais eficaz e rápida os objetivos propostos.

A recuperação do Aquífero de Santo Domingo é um processo complexo e, em virtude da participação da comunidade, ela sabe e entende que esse trabalho levará muitos anos para ser alcançado, principalmente em razão das condições geológicas do aquífero, de sua capacidade de recarga, das condições atmosféricas e das atividades antrópicas do Vale de Santo Domingo. Contudo, embora o processo de recuperação demande tempo e o desenvolvimento continuado de ações, o engajamento da comunidade contribui para o cuidado e o uso eficiente da água na região. O sucesso dessa experiência está diretamente relacionado à participação da comunidade, que está comprometida com as ações necessárias para alcançar a sustentabilidade do uso do recurso hídrico.

4.8.3 As Comunidades de Águas Subterrâneas (CAS) no Chile

Ovídio Alejandro Melo Jara

Jose Luis Arumi

O modelo chileno

O Chile conta com um modelo especial de gestão dos seus recursos hídricos, caracterizado por outorgar Direitos de Aproveitamento de Águas (DAA) aos indivíduos de forma gratuita, perpétua e sem instrumentos de vencimento ou revogação que protejam o interesse público. A única menção, contudo, que a Constituição Política faz em relação às águas continentais é garantir a propriedade privada sobre esses direitos.

O Estado, consequentemente, não se vê na obrigação de zelar pelo bem comum. Ao contrário, oferece ao mercado liberdade e flexibilidade para lidar com os conflitos gerados pela manutenção de um sistema, que pode ser desigual e ecologicamente irresponsável, cujo propósito é atingir a otimização econômica resultante dessaliberdade de transação e da segurança jurídica gerada pelo modelo.

Uma vez que estes DAAs são concedidos, as competências atribuídas ao Estado em relação à gestão dos recursos hídricos se reduzem consideravelmente, deixando ao mercado (a transferência) e aos indivíduos as principais funções relativas à gestão dos usos. Nesse sentido, as pessoas detentoras de DAA constituem as chamadas Organizações de Usuários de Águas (OUA), que são entidades regulamentadas pelo Código de Águas, dotadas de personalidade jurídica, cujo objetivo é captar as águas do fluxo matriz, dividi-las entre os titulares de direitos, construir, explorar, conservar e melhorar as obras de captação, aquedutos e outras que sejam necessárias ao seu aproveitamento. No caso dos cursos naturais de água, as OUA se configuram como uma Junta de Vigilância, enquanto nos canais artificiais se organizam comunidades de águas e associações de canais.

No caso das águas subterrâneas, por meio de um ato de autoridade pública, fundamentado e materializado via Resolução da Direção Geral de Águas (DGA), é declarado um determinado Setor Hidrológico de Aproveitamento Comum (SHAC) como área de restrição ou zona de proibição de extração, o que dá origem à formação de uma Comunidade de Águas Subterrâneas (CAS) para o SHAC em questão.

Este modelo parte do pressuposto de que existem OUA funcionais e empoderadas no cumprimento de sua função, e que essas constituem interlocutores válidos perante as instituições e os atores sociais relevantes, em cada um dos territórios sob sua jurisdição. A própria existência dessas organizações, no entanto, não é garantida, pois apenas 40% das bacias hidrográficas do país possuem alguma Junta de Vigilância para a gestão de suas águas. Além disso, menos de 10% dos SHAC declarados como áreas de restrição ou zonas proibidas, se organizaram como CAS (SCHNEIDER; RIBERA, 2021).

É nesse contexto que, durante as últimas décadas, o Estado, por intermédio da Comissão Nacional de Irrigação, tem desenvolvido programas de fortalecimento das OUAs em boa parte do território nacional, aumentando o número dessas organizações, reforçando a sua estrutura e dinâmicas organizacionais, melhorando a sua

participação e, portanto, contribuindo para a gestão das águas. Do mesmo modo, a DGA criou o Departamento de Organizações de Usuários, que tem contribuído consideravelmente nesse fortalecimento. Contudo, as lacunas existentes nesse modelo são o principal desafio em relação à governança de água no país.

A falta de interesse dos usuários em fazer parte de uma CAS

Segundo a Universidad de Concepción (2019), é comum observar que nos cursos de águas superficiais sempre existem interessados em constituir a respectiva OUA. No caso das águas subterrâneas, porém, tem-se uma considerável falta de interesse das partes em realizar essa ação, o que pode ser explicado pela ausência de incentivos. No caso das águas superficiais, sempre há usuários que necessitam da Organização, principalmente aqueles localizados à jusante dos cursos de água, que notam um impacto negativo produzido pelos posicionados à montante. Além disso, o simples fato de compartilhar um curso de água gera inúmeras necessidades de organização, tais como: limpeza, manutenção da infraestrutura, melhoria de obras comuns, distribuição de água e financiamento de ações, entre muitas outras.

Uma CAS surge da obrigação legal de proteger o bem comum e os ecossistemas relevantes para as gerações futuras, e não da necessidade dos indivíduos. Apesar disso, não é fácil encontrar os elementos catalisadores que motivem a criação dessas organizações – como ocorre com as águas superficiais – por isso, o interesse em criá-las praticamente não existe.

Não surpreende, portanto, que dos mais de 170 SHAC declarados como Área de Restrição ou Zona de Proibição de Extração na escala nacional, apenas 14 tenham se organizado como CAS. Somente após o início dos trâmites judiciais para a constituição de uma CAS e quando a sua conformação se torna inevitável é que se constata o interesse de alguns usuários com maior nível de informação que pretendem, principalmente, ocupar os espaços de poder (direção) e aprovar os estatutos pertinentes. A legislação em vigor busca contornar esse desinteresse em se organizar, pois basta uma pessoa solicitar ao juiz competente a constituição de uma organização e ela se concretiza. Além disso, no caso da ausência de solicitantes, a DGA pode fazer essa solicitação.

Consequentemente, dado o interesse público que pressupõe a organização de uma CAS, parece lógico que o Estado continue provendo os instrumentos ne-

cessários para materializar a sua organização nos SHAC declarados como Área de Restrição ou Zona de Proibição de Extração, apesar do desinteresse dos usuários em relação a isso. Além disso, deve promover mudanças na legislação que gerem incentivos à organização das CAS, como, por exemplo, algum tipo de exigência para a realização de procedimentos de interesse, como o traslado dos pontos de captação por parte dos usuários.

Por fim, como no processo de tomada de decisões na OUA somente participam os membros titulares de DAA, surge o desafio de incluir outros atores sociais relevantes do território que representam distintos interesses, como o das gerações futuras, dos ecossistemas e da sociedade como um todo.

A gestão conjunta das águas superficiais e subterrâneas

Segundo Melo (2019), em 2005, o Código de Águas, de 1981, foi modificado para incluir a gestão de aquíferos na administração das OUA. Primeiramente, o art. 186 estabeleceu que a origem de uma OUA também pode ser o aquífero. Além disso, no art. 263 definiu que as Juntas de Vigilância (JV) são formadas por aqueles que aproveitam as águas superficiais ou subterrâneas de uma mesma bacia hidrográfica. Por sua vez, no art. 266, o Código estabelece que o objetivo das JV é administrar as águas a que seus membros têm direito, provenientes das fontes naturais. Já o art. 22 determinou que para constituir os DAA, a autoridade deverá considerar a “relação existente entre águas superficiais e subterrâneas”.

Essa nova legislação possibilitou o surgimento de um modelo de gestão no qual as JV não apenas administram as águas superficiais como, também, e de forma conjunta, as águas subterrâneas. A forma, contudo, de materializar essa integração não foi regulamentada em nenhum dos aspectos fundamentais da gestão efetuada pelas OUA. Por exemplo, a incorporação das águas subterrâneas à JV se realiza de forma individual ou por meio de CAS organizadas, mediante a regulamentação da participação societária ou das equivalências dos direitos subterrâneos em relação aos superficiais ou ainda quais são os aspectos essenciais para a tomada de decisões, e como se dá o financiamento dentro da organização.

Como consequência, somente após mais de 10 anos da promulgação do Regulamento é que surgiram as primeiras ações destinadas a materializar uma gestão conjunta das águas superficiais e subterrâneas, sendo todas experiências muito insipientes, o que permite um pequeno avanço, mas sem atingir um desenvolvimento mínimo organizacional.

4.8.4 O Aquífero Genebra (Suíça-França): uma história de sucesso na cooperação transfronteiriça a nível local

Gabriel de los Cobos

O Lago Leman e o Aquífero Genebra (Suíça-França) fornecem água potável a quase 700.000 habitantes da região Franco-Genovesa, sendo partilhado pelo Cantão de Genebra (Suíça) e pelo Departamento da Alta Sabóia

(França), e explorado de forma conjunta por meio de 10 poços na Suíça e quatro na França (situação no ano de 2017). O Aquífero Genebra se estende por 19 km de comprimento, entre o Lago Leman e o extremo ocidental do Cantão e parte do território francês da Alta Sabóia (Figura 63). A sua largura varia entre 1 e 3,5 km, e a espessura do cascalho saturado atinge 50 m (Figuras 64 e 65). O nível médio da água situa-se entre 15 e 80 metros de profundidade, dependendo das condições topográficas.



Figura 63 – Localização do Aquífero Genebra

Fonte: Service de géologie, sols et déchets (s.d.).

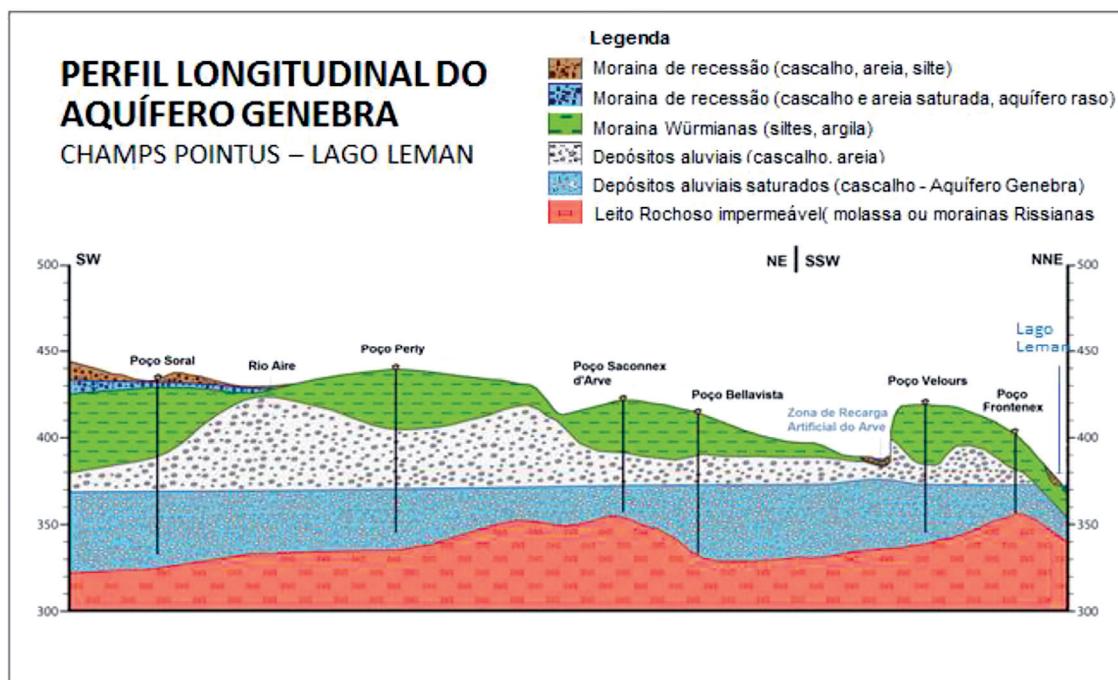


Figura 64 – Perfil longitudinal do Aquífero Genebra

Fonte: Service de géologie, sols et déchets (s.d.).

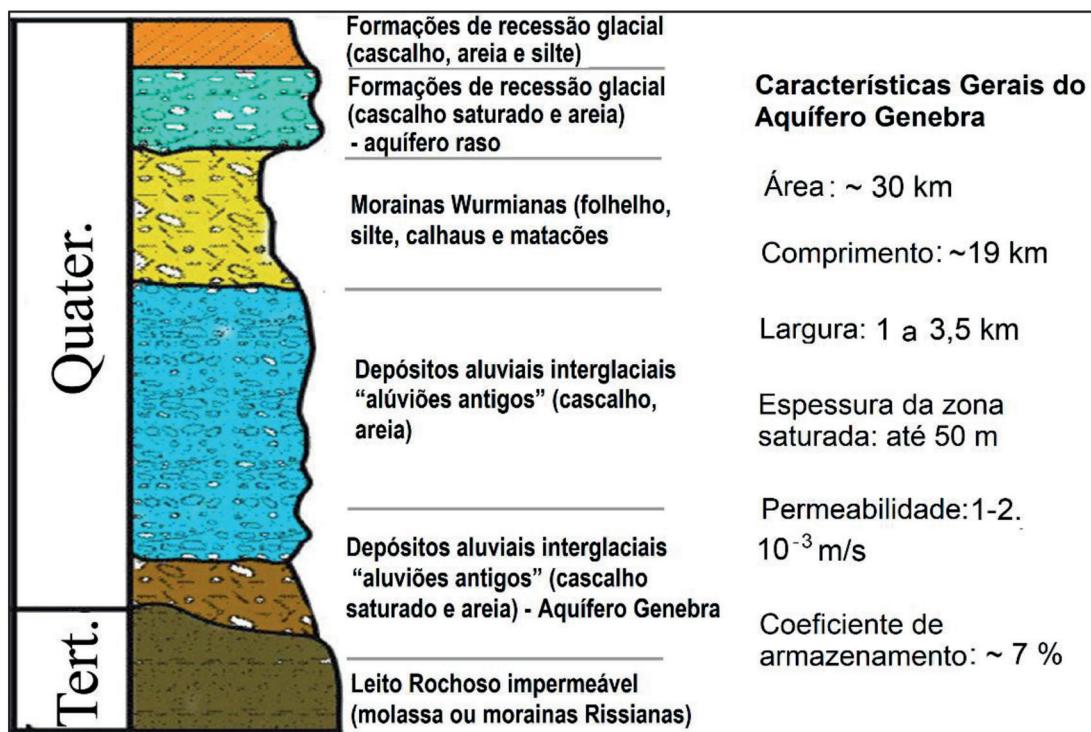


Figura 65 – Seção litoestratigráfica das unidades componentes do Aquífero Genebra

Fonte: Service de géologie, sols et déchets (s.d.).

Entre 1940 e 1960, a captação de águas subterrâneas do Aquífero Genebra foi muito próxima da vazão média explotável ($7,5 \text{ Mm}^3/\text{ano}$). Havia uma lenta tendência de rebaixamento do nível das águas subterrâneas, sem qualquer indicação de ameaça grave. Entre 1960 e 1980, porém, o aquífero foi superexplotado, com retiradas que chegaram, em 1971, a 14 Mm^3 por ano, quase o dobro das quantidades disponíveis. O nível médio da água do aquífero baixou de 6 para 7 m em 20 anos, com a utilização de cerca de um terço das reservas totais.

A gestão hidráulica revelou-se urgente, com duas opções: *a)* a redução da retirada, explorando outro recurso, o que exigiria a construção de nova estação de filtração e tratamento de água no lago; ou *b)* o reforço da capacidade natural do aquífero por meio da recarga artificial. A escolha não foi fácil: de um lado tinha-se uma técnica bem conhecida (estação de filtração no lago); do outro, a recarga artificial, cercada de incertezas na equação de balanço. A recarga artificial foi escolhida com base em dois critérios: *a)* critério de segurança de abastecimento (diversificação de recursos); e *b)* critério econômico (o elevado custo de construção e implementação de uma nova estação de filtração).

Em paralelo à elaboração dos estudos e testes na estação experimental, surgiu a vontade política de desenvolver o projeto de forma conjunta entre as fronteiras, apesar de aproximadamente 90% da superfície do aquífero localizar-se no território do Cantão de Genebra, e apenas os 10% restantes se encontrarem no território francês. Diversas reuniões e discussões foram realizadas no âmbito dos estudos técnicos e da preparação de um rascunho, a fim de obter:

- restrições de exploração enquanto o aquífero, que estava para ser esgotado, não fosse recarregado artificialmente;
- distribuição equitativa dos custos da obra que, uma vez concluída e operacional, beneficiaria os operadores localizados em ambos os lados da fronteira.

Desde as primeiras reuniões franco-suíças, em 1972, o esgotamento das águas subterrâneas no Aquífero Genebra era evidenciado, pois o nível da água diminuía regularmente. O problema afetava não só a região de Genebra, mas, também, o lado francês. Entre 1973 e 1974, as atividades centraram-se no inventário dos recursos de água potável na região, bem como nos aspectos hidrogeológicos, tais como perdas, recarga natural, bombeamento futuro (e aplicação de taxas

correspondentes). Todo o conjunto de questões que deveriam ser consideradas nesse momento foram abordadas a fim de lançar as bases de um possível Acordo franco-suíço.

No decurso do ano 1975, a parte francesa declarou a sua intenção de abandonar a exploração dos recursos hídricos subterrâneos e utilizar outros recursos hídricos localizados no território francês. Expressou, no entanto, o desejo de manter a possibilidade de uma participação subsequente na recarga e nos benefícios conexos. Em 1977, os benefícios da recarga artificial foram avaliados para todos os usuários. Finalmente, um Acordo entre o Cantão de Genebra (Suiça) e a Região da Alta Saboia (França) foi assinado em 19 de junho de 1978, válido por um período de 30 anos.

O acordo de 1978 entre o Estado de Genebra e a Região Haute-Savoie

O acordo celebrado entre o Conselho de Estado da República do Cantão de Genebra e o prefeito de Haute-Savoie foi motivado, principalmente, pela “necessidade de estabelecer uma exploração coordenada do Aquífero Genebra a fim de salvaguardar este recurso natural e de preservar a qualidade das suas águas”. Este acordo abrangia os seguintes aspectos:

- o programa anual de gestão do aquífero, ou seja, os fluxos reservados a cada usuário, de acordo com a disponibilidade e reservas do aquífero, e as necessidades de cada um, tendo em conta as disposições emitidas;
- uma lista de instalações para recarga artificial;
- os direitos da água de cada usuário;
- o preço da água (calculado com base nos custos de construção da estação).

Esperava-se que o custo da recarga (depreciação, juros, renovação e custos de operação do equipamento) fosse atribuído a todas as captações, independentemente da fonte de água (recarga natural ou artificial). A parte francesa obteve um bombeamento máximo de 5 milhões de m^3 , contudo, com uma concessão anual de 2 milhões de m^3 . Acima dessa quota, o preço do m^3 seria calculado de acordo com uma equação estabelecida em função de vários parâmetros, como custos de bombeamento e de operação.

Foi criada uma comissão franco-suíça encarregada da exploração das águas subterrâneas, que deveria rever regularmente a situação do recurso, de acordo com o

bombeamento e a recarga artificial. Essa comissão seria composta por representantes designados pelo Conselho de Estado na Suíça e pelo subprefeito distrital (*sous-préfet*) do lado francês. Para além dos aspectos relacionados ao programa anual de recarga artificial, orçamento, projetos de reparação e manutenção, a Comissão deveria avisar previamente sobre todos os assuntos que lhe fossem submetidos no âmbito da gestão e proteção do Aquífero Genebra.

A renovação do Convênio de 1978: a Convenção de 2008

Entre 2007 e 2008, a Comissão responsável pela exploração das águas subterrâneas do Aquífero Genebra criou um grupo de trabalho franco-suíço para desenvolver um documento de base para a gestão dos

recursos de águas subterrâneas durante os próximos 30 anos. Foi incluído apoio jurídico como forma de assegurar que as características técnicas aceitas pelas partes se enquadrasssem num contexto global reconhecido política e administrativamente.

Os primeiros passos consistiram em pôr em prática o quadro jurídico transfronteiriço em que o novo Acordo deveria se basear. De fato, o Acordo de 1978 não tinha qualquer base em instrumentos jurídicos de cooperação transfronteiriça pela simples razão de que esses não existiam na época. Muitos instrumentos surgiram desde 1980 e foram ratificados tanto pela Suíça como pela França. A Figura 66 comprehende os principais instrumentos jurídicos relacionados à promoção da cooperação internacional, que lastream a Convenção de 2008.

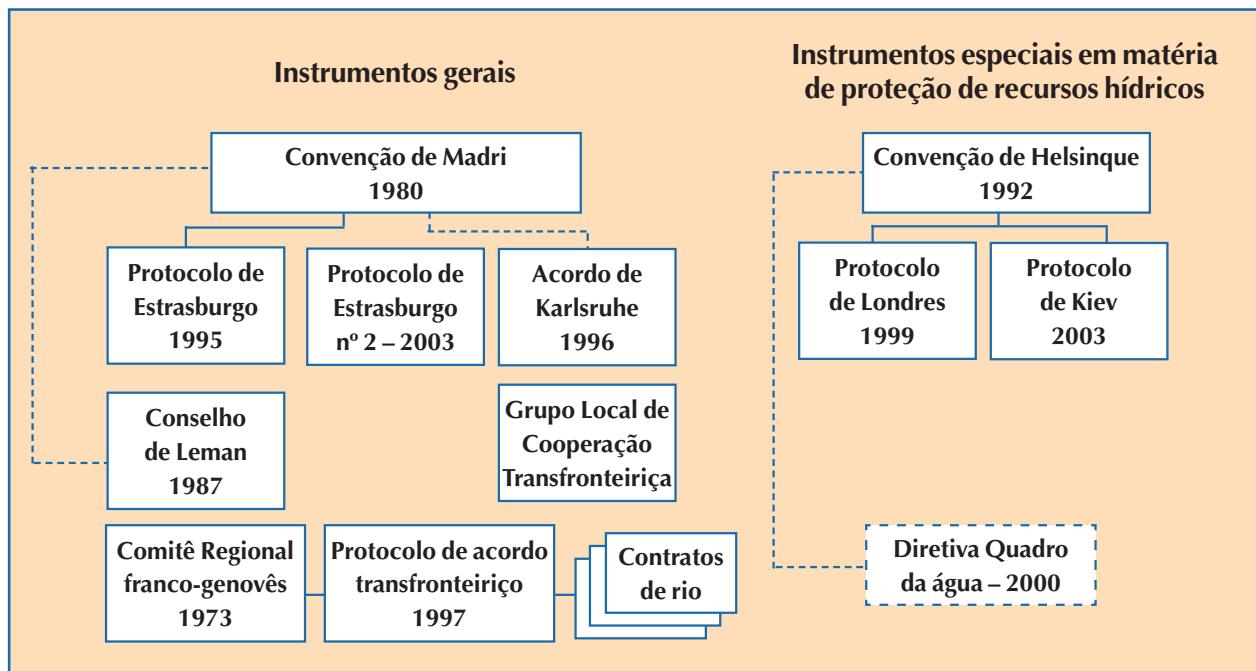


Figura 66 – Instrumentos jurídicos relacionados à promoção da cooperação internacional para o Aquífero Genebra

Fonte: elaborado por Gabriel de los Cobos.

Com base no Acordo de Karlsruhe, especificamente quanto à possibilidade prevista em seu art. 5º, que permite a delegação de uma missão a uma das autoridades locais, foi possível estabelecer um acordo entre o Cantão de Genebra e as três autoridades francesas envolvidas (*Annemasse Agglo, Community of Communities du Genevois e Commune de Viry*).

Tal como no Convênio de 1978, essa Convenção foi estabelecida com o objetivo comum de assegurar

a sustentabilidade do Aquífero Genebra e, assim, garantir, na medida do possível, a capacidade de captação de água necessária para assegurar o abastecimento de água potável às populações. Foram definidas as disposições administrativas, legais, técnicas e financeiras necessárias à boa execução dessa tarefa. Esse Acordo substituiu o Convênio de 1978 e entrou em vigor a partir de 1º de janeiro de 2008, com duração de 30 anos.

Avaliação de 40 anos de gestão partilhada

O Acordo para a gestão do Aquífero Genebra é um dos poucos exemplos existentes de um instrumento jurídico dedicado a um aquífero transfronteiriço a nível local, ou seja, entre comunidades pertencentes à França e ao Cantão suíço. É, portanto, o resultado do que pode ser considerado a validação legal de uma abordagem pragmática. De uma perspectiva política transfronteiriça, o sucesso da gestão do Aquífero Genebra constitui a base para o estabelecimento de uma comunidade aquífera transfronteiriça, formalizada pela assinatura de um Memorando de Entendimento para a Cooperação Transfronteiriça no Domínio da Água, em 12 de dezembro de 2012.

REFERÊNCIAS

- ABIDIN, H. Z.; FUKUDA, Y.; ANDREAS, H.; POHAN, Y. E.; GUMILAR, I.; DEGUCHI, T. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, v. 59, n. 3, 2011, pp. 1753-1771. doi:10.1007/s11069-011-9866-9.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J. **Drastic**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. United States Environmental Protection Agency, 1987 (EPA/600/2-85/018).
- ALMEIDA, L. **Estudo da aplicabilidade de técnicas de recarga artificial de aquíferos para a sustentabilidade das águas termais da região de Caldas Novas, GO**. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB). Brasília, 2011. 153p.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **A água no cenário da cooperação técnica internacional**. ABC/ANA, 2017. Disponível em: <http://www.abc.gov.br/imprensa/mostrarconteudo/726>.
- ARNSTEIN, S. R. A ladder of citizen participation. *Journal of the American Institute of Planners*, v. 35, n. 4, 1969, pp. 216-224.
- AZEVÉDO, A. C. Verso e reverso das Políticas Públicas de água para o semiárido brasileiro. *Revista Política e Planejamento Regional*. Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, jul./dez. 2015, pp. 373-392. ISSN 2358-4556.
- AZEVEDO, J. H. **Avaliação dos mecanismos de recarga natural e estabilidade hidroquímica em aquíferos rasos, sul do estado do Tocantins**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências. Universidade de Brasília (UnB). Brasília, 2012. 83p.
- BARBOSA, M.; BERTOLO, R.; HIRATA, R. A method for environmental data management applied to megasites in the state of São Paulo, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 9, n. 3, 2017, pp. 322-338.
- BARNES, M.; FLEMING, D. Filtration-gallery irrigation in the Spanish New World. *Latin American Antiquity*, v. 2, n. 1, mar./1991, pp. 48-68.
- BARTHEL, R.; FOSTER, S.; VILLHOLTH, K. G. Interdisciplinary and participatory approaches: the key to effective groundwater management. *Hydrogeology Journal*, v. 25, n. 7, 2017, pp. 1923-1926. doi:10.1007/s10040-017-1616-y.
- BERNSTEIN, S. The United Nations and the Governance of Sustainable Development Goals. In: KARNIE, N.; BIERMANN, F. **Governing Through Goals**: Sustainable Development Goals as Governance Innovation. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2017, pp. 213-240.
- BHADURI, A. et al. Achieving sustainable development goals from a water perspective. *Frontiers in Environmental Science*, v. 4, n. 64, 2016.
- BORGHETTI, N.; BORGHETTI, J. R.; ROSA, E. F. F. **A integração das águas: revelando o verdadeiro Aquífero Guarani**. Curitiba: Edição da Autora, 2011.
- CADAMURO, A. L. M. **Proposta, avaliação e aplicabilidade de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados para condomínios residenciais do Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2002. 130p.
- CADAMURO, A. L. M.; CAMPOS, J. E. G. Recarga artificial de aquíferos fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 1, 2005, pp. 89-98.
- CAMPOS, F.; HENAO, L. E.; ENGE, K.; WHITEFORD, S. El valle de Tehuacán. In: PALERM, J.; SALDAÑA, T. M. (Eds.) **Antología sobre pequeño riego**. Organizaciones autogestivas. Colegio de Postgraduados/Plaza y Valdés, v. II, 2000, pp. 253-344.
- CARVALHO, A. M.; HIRATA, R. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do estado de São Paulo. *Geologia USP*, v. 12, n. 1, 2012, pp. 53-70 (Série Científica).
- CBH-AT. Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. **Consulta Pública da Deliberação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê CBH-AT, de 10/05/2021**. Rerratifica a área de restrição e controle para a captação e uso das águas subterrâneas no município de São Paulo, na região de Jurubatuba e dá outras providências.
- CERNA, C. F. Galerías filtrantes en el Oasis de Pica: tecnología y conflicto social, siglos XVII-XVII. In: PALERM, V.; PALERM, J.; BLANCO, R. G. (Eds.). Memorias Simposio El agua: un problema histórico y actual. 51 Congreso Internacional de Americanistas. *Anais...* Santiago de Chile, 14 al 18 de julio 2003. Colegio de Postgraduados, México. ISBN 968-839-392-4.
- CNRH. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 153, de 17 de dezembro de 2013**. Estabelece critérios e diretrizes para implantação de recarga artificial de aquíferos no território brasileiro. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/aguas-subterraneas/1715-resolucao-153-recarga/file>.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. **Dirección Local en Baja California Sur, 2020**. Piezometría, Hidrometría de las Extracciones en el Acuífero Santo Domingo. Disponible em: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCaliforniaSur/DR_0306.pdf.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. **Recuperación del Acuífero del Valle de Santo Domingo, B.C.S**. Projeto Emblemá-

- tico, 2010. Disponível em: https://remexcu.org/documents/conagua/bcc/pg/cotas/2011_PG_Comoduo.pdf.
- CONAMA.** Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Res. Conama nº 420, de 28 de dezembro de 2009.** Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acos.pdf>.
- CONAMA.** Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 396, de 3 de abril de 2008.** Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=545.
- CONICELLI, B. P.; HIRATA, R.; GALVÃO, P.; ARANDA, N.; TERRADA, R.; GUZMAN-GUTIERREZ, O. Groundwater governance: the illegality of exploitation and ways to minimize the problem. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (Online), v. 93, 2021, pp. 9-16.
- CONTI, K. I. *Norms in Multilevel Groundwater Governance & Sustainable Development.* (PhD thesis) – Faculty of Social and Behavioural Sciences. Amsterdam Institute for Social Science Research (AISSR), 2017.
- DEINES, J. M.; SCHIPANSKI, M. E.; GOLDEN, B.; ZIPPER, S. C.; NOZARI, S.; ROTTLER, C.; SHARDA, V. Transitions from irrigated to dryland agriculture in the Ogallala Aquifer: land use suitability and regional economic impacts. *Agricultural Water Management*, v. 233, 30 april 2020, 106061. doi:10.1016/j.agwat.2020.106061.
- DEMING, D. The aqueducts and water supply of Ancient Rome. *Groundwater*, Jan./Feb. 2020, v. 58, n. 1, pp. 152-161.
- DILLON, P.; STUYFZAND, P.; GRISCHKEK, T.; LLURIA, M.; PYNE, R. D. G.; JAIN, R. C.; BEAR, J.; SCHWARZ, J.; WANG, W.; FERNANDEZ, E.; STEFAN, C.; PETTENATI, M.; VANDERGUN, J.; SPRENGER, C.; MASSMANN, G.; SCALON, B. R.; XANKE, J.; JOKELA, P.; ZHENG, Y.; ROSSETTO, R.; SHAMRUKH, M.; PAVELIC, P.; MURRAY, E.; ROSS, A.; BONILLA VALVERDE, J. P.; PALMA NAVA, A.; ANSEMS, N.; HÁ, K.; Martin, R., Spiano, M. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27:1-30, 2019.
- EMERSON, K.; NABATCHI, T.; BALOGH, S. An integrated framework for collaborative governance. *Journal of Public Administration Research and Theory*, v. 22, n. 1, 2012, pp. 1-29.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology.* 4th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, 2001. 598p.
- FORSYTH, T. Expertise needs transparency not blind trust: a deliberative approach to integrating science and social participation. *Critical Policy Studies*, v. 5, n. 3, 2011, pp. 317-322. doi:10.1080/19460171.2011.606305.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; ANDREO, B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*, 2013, pp. 737-750.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection.** A guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Washington: The World Bank, 2002. 103p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. **The Guarani Aquifer Initiative – Towards realistic groundwater management in a transboundary context.** Briefing Note 15. The World Bank, GW-MATE, 2009. Disponível em: <https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/case-studies/americas-and-caribbean/transboundary.-groundwater-management-issues-for-guarani-aquifer-368-english.pdf>.
- FOSTER, S.; KOUNDOURI, P.; TUINHOFF, A.; KEMPER, K.; NANINI, M.; GARDUÑO, H. **Groundwater dependent ecosystems – the challenge of balance assessment and adequate conservation.** Briefing Note 15. Washington DC: GW-MATE/World Bank, 2006.
- FOSTER, S.; STEENBERGEN, F. Conjunctive groundwater use: a “lost opportunity” for water management in the developing world? *Hydrogeology Journal*, v. 19, 2011, pp. 959-962.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas.** Una metodología basada en datos existentes. Lima, Peru: CEPIS, Technical Report (OPS-OMS-HPE), 1988.
- GALILI, E.; NIR, Y. The submerged Pre-Pottery Neolithic water well of Atlit-Yam, northern Israel and its palaeoenvironmental implications. *Holocene*, v. 3, n. 3, 1993, pp. 265-270.
- Service de géologie, sols et déchets (GESDEC). Disponível online: <https://www.kvu.ch/fr/adresses/geneve?id=509>
- GLASER, G. Base sustainable development goals on science. *Nature*, v. 491, n. 35, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/491035a>.
- GRANJA, S. I. B.; WARNER, J. A hidropolítica e o federalismo: possibilidades de construção da subsidiariedade na gestão das águas no Brasil? *Revista de Administração Pública*, v. 40, n. 6, dez./2006, pp. 1097-1121.
- GUPPY, L.; UYTENDAELE, P.; VILLHOLTH, K. G.; SMAKH-TIN, V. **Groundwater and Sustainable Development Goals:** analysis of interlinkages. Hamilton, Canadá: United Nations University Institute for Water, Environment and Health, 2018 (UNU-INWEH Report Series, Issue 04).
- HIRATA, R.; FOSTER, S. Guarani Aquifer System: from regional reserves to local use. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 53, 2020, p. qjegh2020-091.
- HIRATA, R.; FOSTER, S.; OLIVEIRA, F. **Águas subterrâneas urbanas no Brasil:** avaliação para uma gestão sustentável. São Paulo: Fapesp e IGc-USP, 2015, 111p.
- HIRATA, R.; KIRCHHEIM, R.; MANGANELLI, A. Diplomatic Advances and Setbacks of the Guarani Aquifer System in South America. *Environmental Science & Policy*, v. 114, 2020, pp. 384-393.
- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.** São Paulo: Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, 2019.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. **Censos Generales de Población y Vivienda** (1990, 2000, 2010 e 2020).

- ITRC. Interstate Technology Regulatory Council. **Remediation Management of Complex Sites**. Washington, DC: ITRC. Disponível em: <https://rmcs-1.itrcweb.org/>.
- JANMAIMAOOL, P.; BUNSRRI, T.; CHONTANAWAT, J.; SIRIPHAN, N.; PASSANAN, A. Enhancing citizens' sense of personal responsibility and risk perception for promoting public participation in sustainable groundwater resource management in Rayong Groundwater Basin, Thailand. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 9, n. 10, 2019.
- KLAAS, D. K. S. Y.; IMTEAZ, M. A.; ARULRAJAH, A.; SUDIAYEM, I.; KLAAS, E. M. E.; KLAAS, E. C. M. Evaluation of the effects of surface slope in discretization of groundwater models. **Earth and Environmental Science**, v. 151, 2018, 012012 (IOP Conference Series). doi: 10.1088/1755-1315/151/1/012012.
- LEBAC/UNESP. Laboratório de Estudos de Bacias/Universidade Estadual Paulista. **Informe Final de Hidrogeologia** – Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. Consórcio Guarani. Rio Claro, SP: Departamento de Geologia Aplicada (DGA) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE). Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008.
- LEITE, J. R. M.; AYALA, P. A. **Dano ambiental**: do individual ao coletivo extrapartrimonial. Teoria e prática. 3. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2010.
- LLAMAS, M. R.; MARTINEZ-CORTINA, L. Groundwater irrigation and poverty alleviation. **Proc. IWRA Regional Symposium**: Water for Human Survival, 27-30 November. New Delhi: Central Board for Irrigation and Power, v. 2, 2002, pp. 134-143.
- LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems and Science**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- LUTTI, J. E. I. Resolução Conama 420/2009 (LGL/2009/2401) e Lei Estadual 13.577/2009: inconstitucionalidade da "remediação para uso declarado". **Revista de Direito Ambiental**. São Paulo, ano 17, v. 65, jan.-mar. 2012, pp. 13-25.
- MELO, J. A. M. H.; SCHIER, A. C. R. O direito à participação popular como expressão do Estado Social e Democrático de Direito. **A&C Revista de Direito Administrativo & Constitucional**. Belo Horizonte, ano 17, n. 69, jul./set. 2017, pp. 127-147. doi: 10.21056/aec.v17i69.825.
- MELO, O. Experiencias de integración de la gestión de las aguas superficiales y subterráneas. **Revista Agryd**, n. 30, año 12, dez./2019, pp. 22-24.
- MICHENER, V. J. The participatory approach: contradiction and co-option in Burkina Faso. **World Development**, v. 26, n. 12, 1998, pp. 2105-2118. doi:10.1016/s0305-750x(98)00112-0.
- MONTEMNEGRO, S. G.; MONTEMNEGRO, A. A.; CAVALCANTI, G. L.; MOURA, A. E. S. Recarga artificial de aquíferos com águas pluviais em meio urbano como alternativa para a recuperação dos níveis potenciométricos: estudo de caso na planície do Recife (PE). 5º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva. **Anais...** Teresina, 2005. 10p.
- MOSTERT, E. The challenge of public participation. **Water Policy**, v. 5, n. 2, 2003, pp. 179-197. doi:10.2166/wp.2003.0011.
- MOURÃO, M.A.A.; PEIXINHO, F. C. A Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil: desafios e estágio atual de implantação. **Águas Subterrâneas**, 2012. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27659>.
- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Como as Nações Unidas apoiam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.
- NUNES, M. D. X. **Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no Distrito Federal**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2016. 75p.
- OAS. Organization of American States. **Guarani Aquifer**: strategic action program. Acuífero Guarani: programa estratégico de acción. Bilingual edition. Brazil: OAS, 2009. Disponível em: http://iwlearn.net/iw-projects/Fsp_112799467571/reports/strategic-action-program/view.
- PALERMO, J. **Cuadro localización galerías filtrantes (qanats) en México**. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324165405_Cuadro_localizacion_galerias_filtrantes_qanats_en_Mexico.
- PALERMO, J. Las galerías filtrantes o qanats en México: introducción y tipología de técnicas. **Agricultura, sociedad y desarrollo**, v. 1, n. 2, Jul./Dic. 2004, pp. 133-145. Disponível em: <http://www.colpos.mx/asyd/volumen1/numero2/asd-02-010.pdf>.
- PALERMO, J. Las galerías filtrantes o qanats. In: PALERMO, J. (Ed.). **Antología sobre pequeño riego**. Sistemas de riego no convencionales. Colegio de Postgraduados, v. III, 2002, pp. 257-290.
- PETELET-GIRAUD, E.; CARY, L.; CARY, P.; GIGLIO-JACQUEMOT, A.; BERTRAND, G.; HIRATA, R.; ALVES, L.; MARTINS, V.; MELO, A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CHATTTON, E.; FRANZEN, M.; AUROUET, A. Multi-layered water resources, management and uses under the impacts of Global Changes in a Southern Coastal Metropolis: when will it be already too late? **Environmental Science & Policy**. Crossed analysis in Recife, NE, Brazil, v. 13, 2017.
- PILEGGI, F.; HIRATA, R. C. A.; CONICELLI, B.; ARANDA, N. Support method for interpretation of regional groundwater monitoring in urban areas. **Brazilian Journal of Geology**, v. 51, 2021, pp. 1-10.
- PINHO, H. G. **Prevenção e reparação de danos ambientais**: as medidas de reposição natural, compensatórias e preventivas e a indenização pecuniária. Rio de Janeiro: GZ, 2010, pp. 319-320.
- PIYAPONG, J.; THIDARAT, B.; JARUWAN, C.; SIRIPHAN, N.; PASSANAN, A. Enhancing citizens' sense of personal responsibility and risk perception for promoting public participation in sustainable groundwater resource management in Rayong Groundwater Basin, Thailand. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 9, 2019.
- PRETTY, J. N. Participatory learning for sustainable agriculture. **World Development**, v. 23, n. 8, 1995, pp. 1247-1263.
- QUEUAUVILLER, P.; BATELAAN, O.; HUNT, R. J. Groundwater Regulation and Integrated Water Planning. In: JAKEMAN, A. J.; BARRETEAU, O.; HUNT, R. J.; RINAUDO, J. D.; ROSS, A. (Eds.). **Integrated Groundwater Management**. Springer, Cham, 2016, pp. 197-227.

- QUICK, K. S.; BRYSON, J. Theories of public participation in governance. In: TORBING, J.; ANSELL, C. **Handbook of Theories of Governance**. Massachusetts: Edward Elgar, 2016, pp. 1-12.
- REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Orgs). **Águas doces no Brasil**: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 2006, pp. 111-144.
- RUIZ-VILLAVERDE, A.; GARCÍA-RUBIO, M. A. Public Participation in European Water Management: from Theory to Practice. **Water Resources Management**, v. 31, n. 8, 2016, pp. 2479-2495. doi:10.1007/s11269-016-1355-1.
- SALIH, A. Qanats a unique groundwater management tool in arid regions: the case of Bam Region in Iran. **International Symposium on Groundwater Sustainability**, 2006, pp. 79-87.
- SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. **As águas subterrâneas do estado de São Paulo**. Governo do estado de São Paulo, 2014.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R.; COOK, P. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, 2002, pp. 18-39.
- SCHMIDT, G.; SOEFNER, B.; SOEKARDI, P. Possibilities for groundwater development for the city of Jakarta, Indonesia. **Proceedings of the Duisberg Symposium**: Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas. IAHS Publication n. 198, 1990, pp. 233-242.
- SCHNEIDER, V. P. D.; RIBERA, J. L. A. **El modelo chileno de regulación de las aguas subterráneas: críticas desde el derecho ambiental y las ciencias ambientales**. España: Tirant Lo Blanch, jul./2021.
- SILVA, A. C. C. F. A. **Dano por derramamento de óleo no mar: responsabilidade e reparação**. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2019.
- SILVA, A. C. C. F. A. Remediação de áreas contaminadas no estado de São Paulo sob os aspectos jurídicos, ecológicos e econômicos. Artigo defendido no 17º Congresso Brasileiro de Direito Ambiental. **Anais...** São Paulo, 2012, pp. 201-208.
- SILVA, P. S. **Avaliação de viabilidade de aplicação de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados**, Petrolina, PE. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília – UnB. Brasília, 2016. 113p.
- SINDICO, F.; HIRATA, R; MANGANELLI, A. The Guarani Aquifer System: from a beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 20, 2018, pp. 49-59.
- SOUZA, C. **Coordenação de políticas públicas**. Brasília: Enap, 2018.
- TJSP. Tribunal de Justiça de São Paulo. **Processo nº 1032789-75.2013.8.26.0100**. 1ª Câmara Reservada ao Meio Ambiente. Relator Rui Alberto Leme Cavalheiro, julgado em 03/03/2016.
- TJSP. Tribunal de Justiça de São Paulo. **Processo nº 1096930-98.2016.8.26.0100**. 1ª Câmara Reservada ao Meio Ambiente. Relator Nogueira Diefenthaler, julgado em 16/07/2020. Data de Registro: 24/07/2020.
- TOPPER, R.; BARKMANN, P. E.; BIRD, D. R.; SARES, M. A. Artificial groundwater recharge and management. In: SEWRPC. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission. **State-of-the-art of water supply practices**. Technical Report nº 43, Chapter VI – Artificial Groundwater Recharge and Management (preliminary Draft). 2006, pp. 67-104. Disponível em: http://www.sewrpc.org/SEWRPCFiles/Publications/TechRep/tr-043_water_supply_practices.pdf.
- TUINHOF, A.; DUMARS, C.; FOSTER, S.; KEMPER, K; GAR-DUÑO, H.; NANNI, M. Groundwater Resource Management an introduction to its scope and practice. **Sustainable Groundwater Management Concepts and Tools**. Briefing Note 1. The World Bank, 2006. Disponível em: <http://web.worldbank.org/archive/website00667/WEB/PDF/BN1.PDF>.
- UN/WWAP. United Nations/World Water Assessment Programme. **Water for people, water for life**. Paris: Unesco, 2003. Disponível em: <http://www.unesco.org/publishing>.
- UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. El desafío de organizar las comunidades de aguas subterráneas. **Revista Red Agrícola**, nº107, out./2019, pp. 46-49.
- UNSDSN. United Nation Sustainable Development Solutions Network. **An Action Agenda for Sustainable Development**. Report for the UN Secretary General. New York: UNSDSN, 2013.
- VILLAR, P. C. **Aquíferos transfrontereiros**: governança das águas e o Aquífero Guarani. Curitiba: Juruá, v. 1, 2015. 288p.
- VILLAR, P. C. International cooperation on transboundary aquifers in South America and the Guarani Aquifer case. **Revista Brasileira de Política Internacional** (Online), v. 59, 2016, pp. 1-20.
- VILLAR, P. C. The Agreement on the Guarani Aquifer enters into force: what changes now? **International Water Law Project Blog**. 2020. Disponível em: <https://www.internationalwater-law.org/blog/2020/11/16/the-agreement-on-the-guarani-aquifer-enters-into-force-what-changes-now/>.
- VILLAR, P. C.; HIRATA, R. Groundwater Governance and the Construction of Legal Indicators for Brazilian States. **Ambiente e Sociedade**, v. 25, 2022.
- VILLAR, P. C.; RIBEIRO, W. C. The Agreement on the Guarani Aquifer: a new paradigm for transboundary groundwater management? **Water International**, v. 36, n. 5, 2011, pp. 646-660.
- VRIES, J. J.; SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. **Hydrogeology Journal**, v. 10, 2002, pp. 5-17.
- YUWANDARI, M.; ISKANDARSYAH, T. Y. W. M.; BARKAH, M. N.; SETIAWAN, T.; NABABAN, J. R. S. Zonasi intrusi air laut pada sistem akuifer tertekan atas Cekungan Air Tanah Jakarta [Zoning of seawater intrusion in upper confined aquifer system of Jakarta Groundwater Basin]. **Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi**, v. 11, n. 2, 2020, pp. 97-113. doi: 10.34126/jlb.v11i2.310.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após mais de duas décadas da sua instituição, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) ainda não se tornou plenamente operativa do ponto de vista institucional ou da aplicação dos instrumentos de gestão em várias bacias do território brasileiro. Esse cenário impacta a gestão das águas. As águas subterrâneas assumiram papel coadjuvante na gestão, apesar de sua importância na manutenção das águas superficiais e ecossistemas, e do seu caráter estratégico no abastecimento público e privado, incluindo a segurança hídrica de grupos sociais vulneráveis.

Gradualmente, os órgãos do Singreh buscam incentivar a inclusão dos aquíferos e fornecer diretrizes à gestão das águas. Faltam, porém, dados e acompanhamento quanto à forma como os estados – titulares do domínio do recurso – têm promovido essa gestão. A aplicação dos instrumentos de gestão de águas no âmbito estadual enfrenta graves dificuldades para incluir as águas subterrâneas. Em muitos casos, a abordagem dos aquíferos nos planos de bacia se dá de forma superficial, sem a definição das áreas prioritárias à gestão. Os poços outorgados são a exceção, pois a absoluta maioria dos usuários é irregular e não vê nenhum benefício na sua legalização. Em contrapartida, há tolerância do Poder Público em relação a essa situação diante das dificuldades enfrentadas pelos

órgãos gestores em promover a fiscalização. Em muitos casos, as outorgas têm sido concedidas sem as avaliações hidrogeológicas necessárias para determinar a vazão explotável dos aquíferos, de forma a protegê-los da superexplotação. O enquadramento dos corpos de águas subterrâneas não saiu do papel, inclusive falta regulamentação estadual para a sua aplicabilidade. A cobrança, por sua vez, quando existente, é pouco efetiva diante do cenário de apropriação irregular da água.

No aspecto geral, o País possui um quadro jurídico-institucional capaz de promover a gestão integrada dos recursos hídricos, contudo, é necessário melhorar o ambiente de governança das águas de forma a aprimorar: *i*) a coordenação entre os diferentes entes administrativos e das gestões setorizadas (meio ambiente, saneamento, desenvolvimento econômico, ordenamento territorial, etc.); *ii*) o envolvimento e o apoio dos atores sociais, principalmente dos proprietários de poços e empresas perfuradoras; *iii*) a capacitação dos técnicos que atuam na gestão; *iv*) a promoção do conhecimento técnico e social sobre o tema; e *v*) a efetiva inclusão dessas águas nos instrumentos de gestão. A partir dessa governança será possível fomentar um planejamento estratégico das águas subterrâneas que leve em conta a relação sociedade e aquífero, e aquífero, rio e ecossistemas.



