

## Gestão da qualidade das águas subterrâneas em cidades



**Dr. Ricardo Hirata**  
CEPAS|USP Vice-Diretor  
Instituto de Geociências  
Universidade de São Paulo

## Classificação de problemas de qualidade da água subterrânea e seu abastecimento

Tipo de problema	Causa subjacente	Contaminante de interesse
Contaminação do aquífero	Proteção inadequada de aquíferos vulneráveis contra fontes potenciais de contaminação	Patógenos, NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> , Cl, SO <sub>4</sub> , As, metais pesados, COD, Hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, pesticidas
Contaminação da cabeça do poço	Construção/desenho inadequado do poço	Principalmente patogênicos
Intrusão salina	águas subterrâneas salgadas induzida, resultado de extração	Principalmente NaCl, e outros contaminantes antrópicos
Contaminação que ocorre naturalmente	Relacionado com a evolução química do água subterrânea e a solução de minerais	Principalmente Fe e F, a vezes MgSO <sub>4</sub> , As, Mn, Se, Cr e outras espécies inorgânicas

CEPAS|USP



**19 e 20  
Maio**

# Gerenciamento de Águas Subterrâneas Urbanas:

Novas Estratégias para o Aumento da Segurança Hídrica em Tempos de Escassez



Instrutor:  
Ricardo Hirata

## Gestão da qualidade das águas subterrâneas em cidades

Patrocínio:



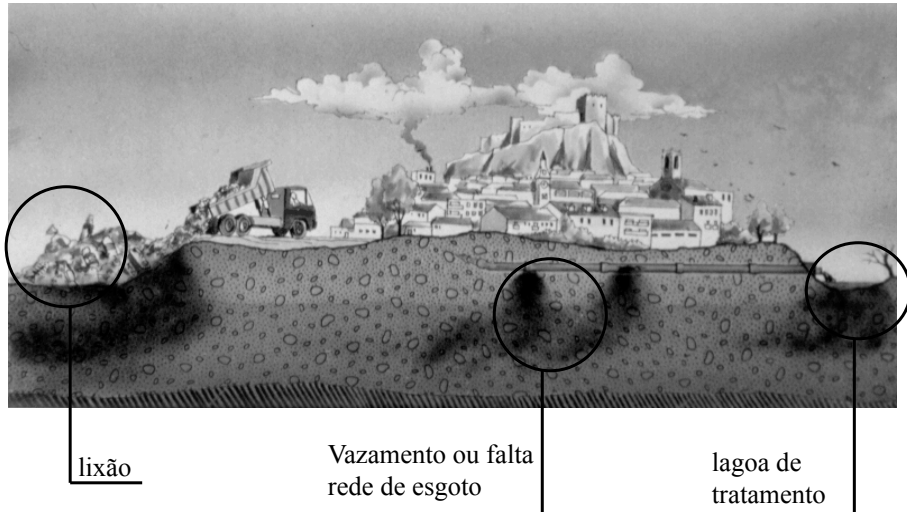
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO AO SEU LADO

Apoio:



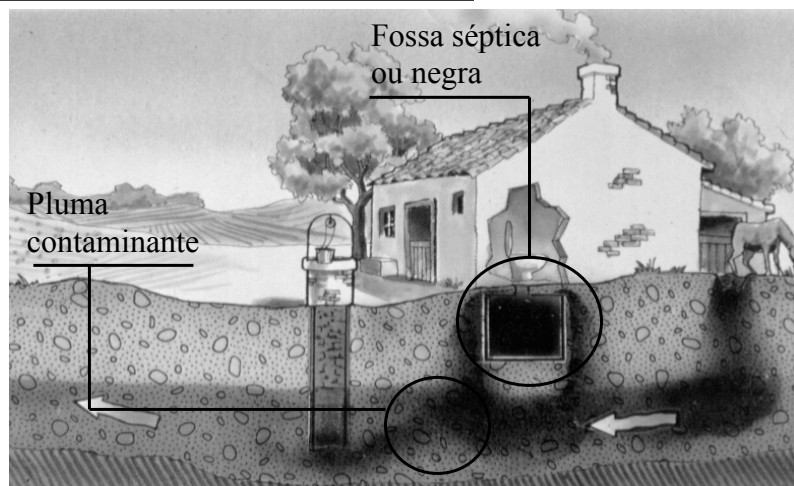
GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO  
SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – SEAMA  
AGÊNCIA ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS - AGERH

## Fontes potenciais de contaminação urbana

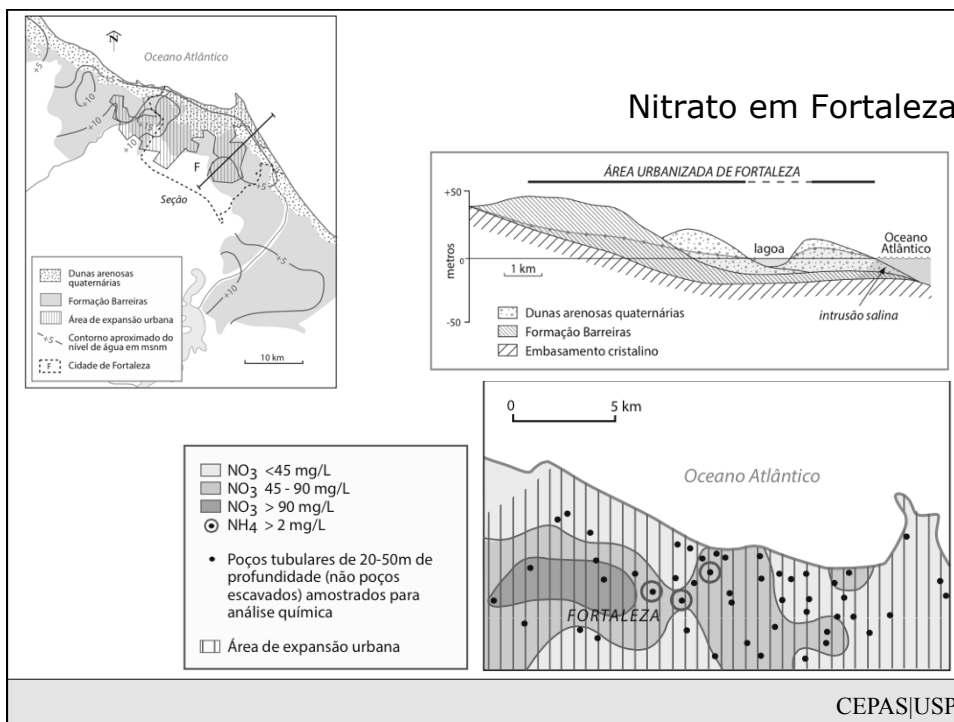
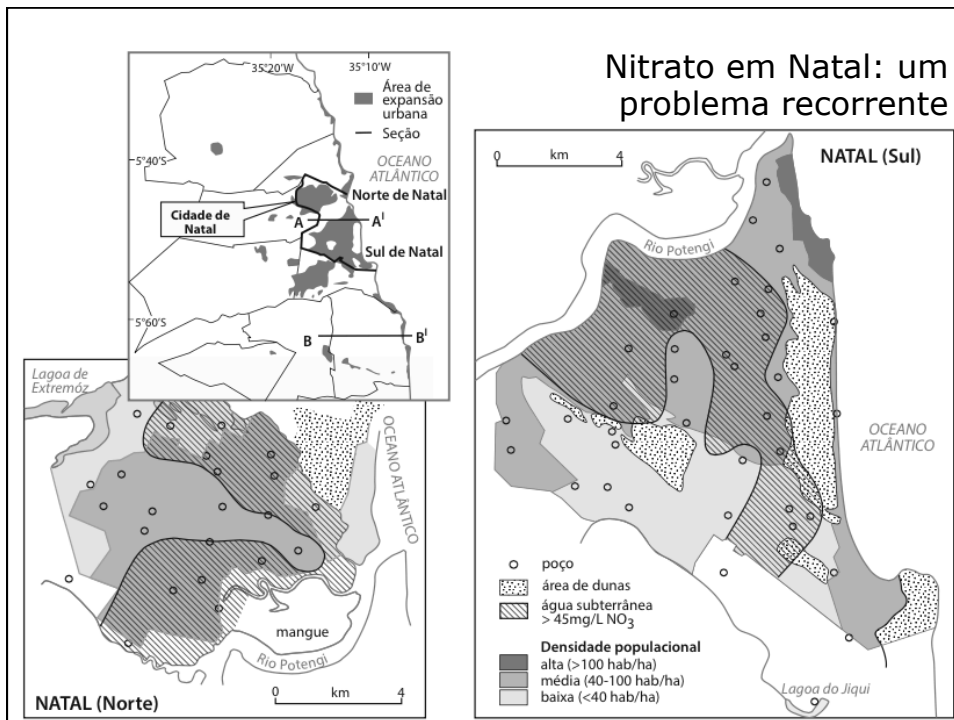


CEPAS|USP

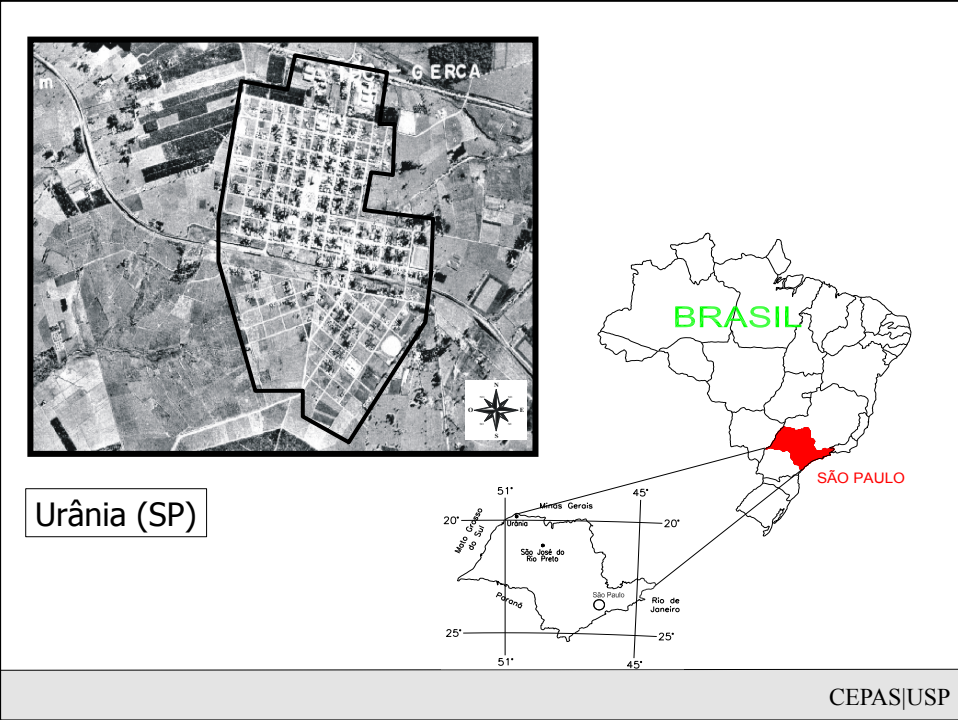
## Contaminação por sistema de saneamento *in situ*



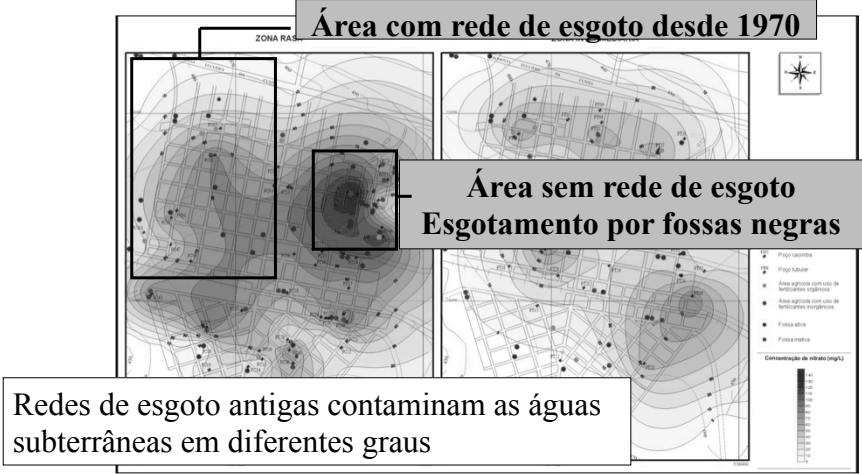
CEPAS|USP

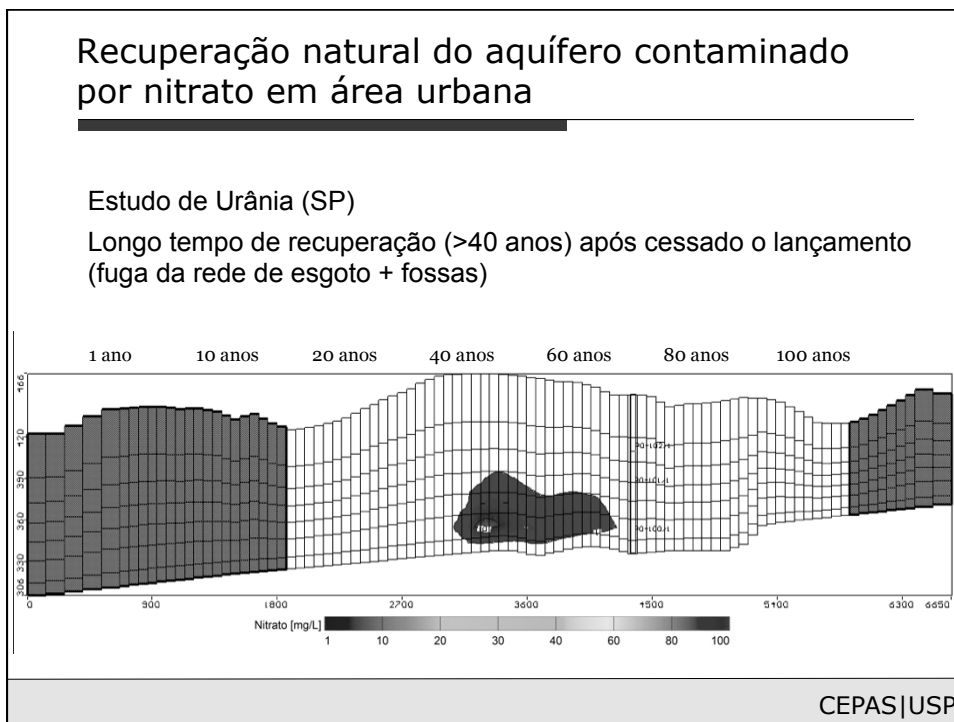
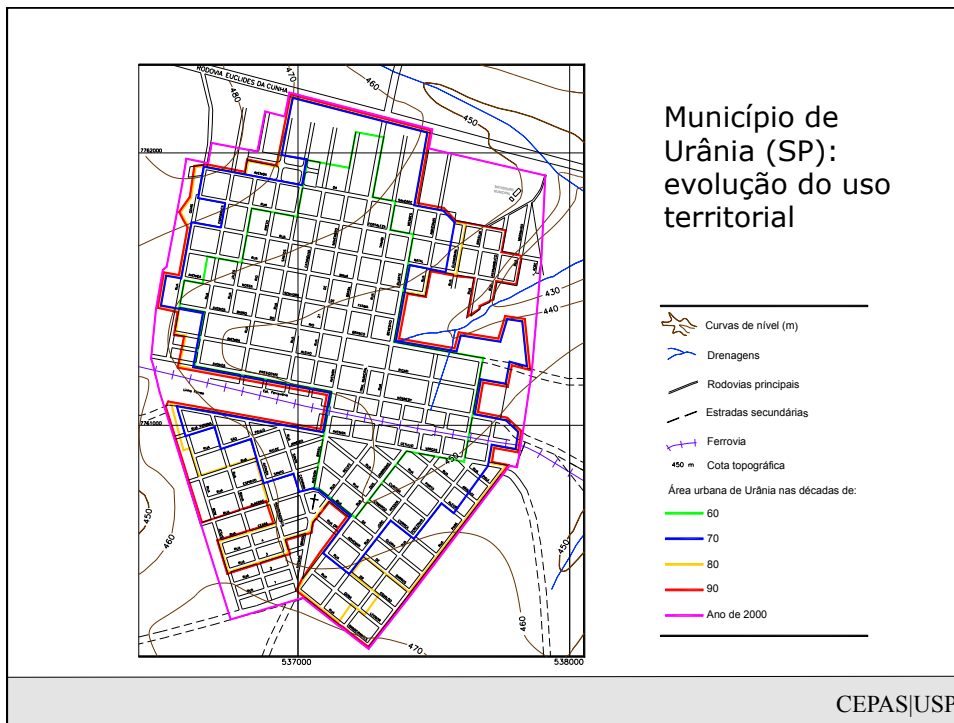






Nitrato nas águas subterrâneas em Urânia (SP)

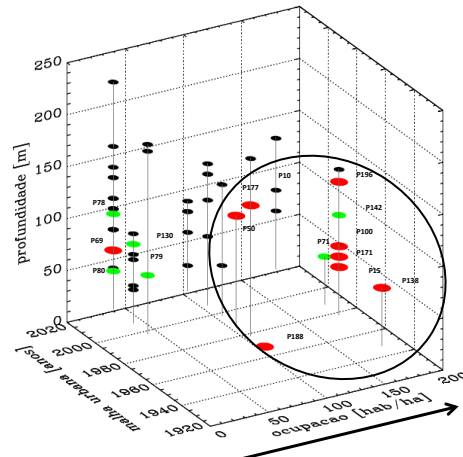




## Estabelecimento de relação entre ocupação urbana e a contaminação de nitrato em aquíferos

- Nítida relação entre ocupação do solo e o nitrato nas águas subterrâneas
- Presidente Prudente (SP)

LEGENDA	
Maiores 45 mg/L NO <sub>3</sub>	●
Entre 23-45 mg/L NO <sub>3</sub>	●
Menores 23 mg/L NO <sub>3</sub>	●
P49 Número do poço	



(Procel et al 2010)

CEPAS|USP

## Contaminação de água subterrânea por vazamento de estações de serviço



Servmar Inst. Assessoria Ambiental Ltda.



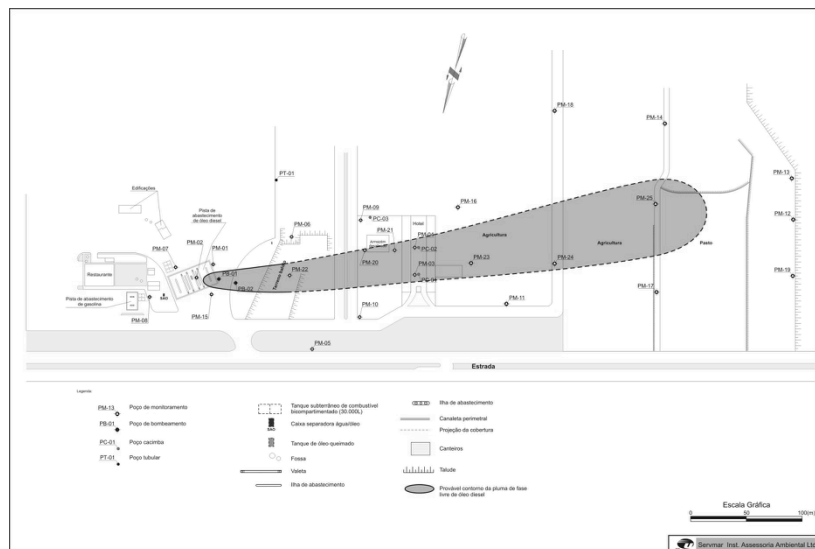
12 CEPAS|USP



Presença de fase livre em poços de monitoramento

CEPAS|USP

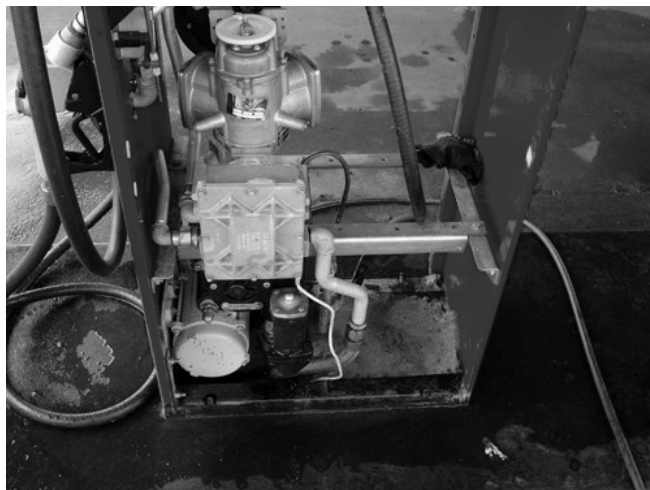
### Pluma de fase livre de diesel



CEPAS|USP

## Vazamento da conexão da bomba de diesel

---



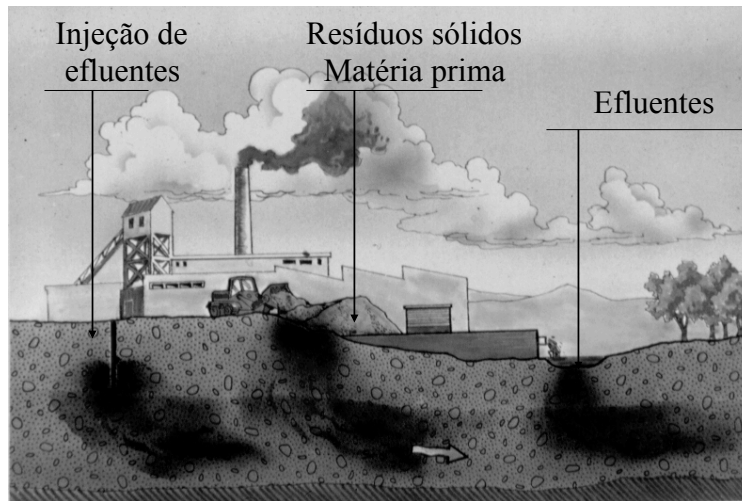
CEPAS|USP



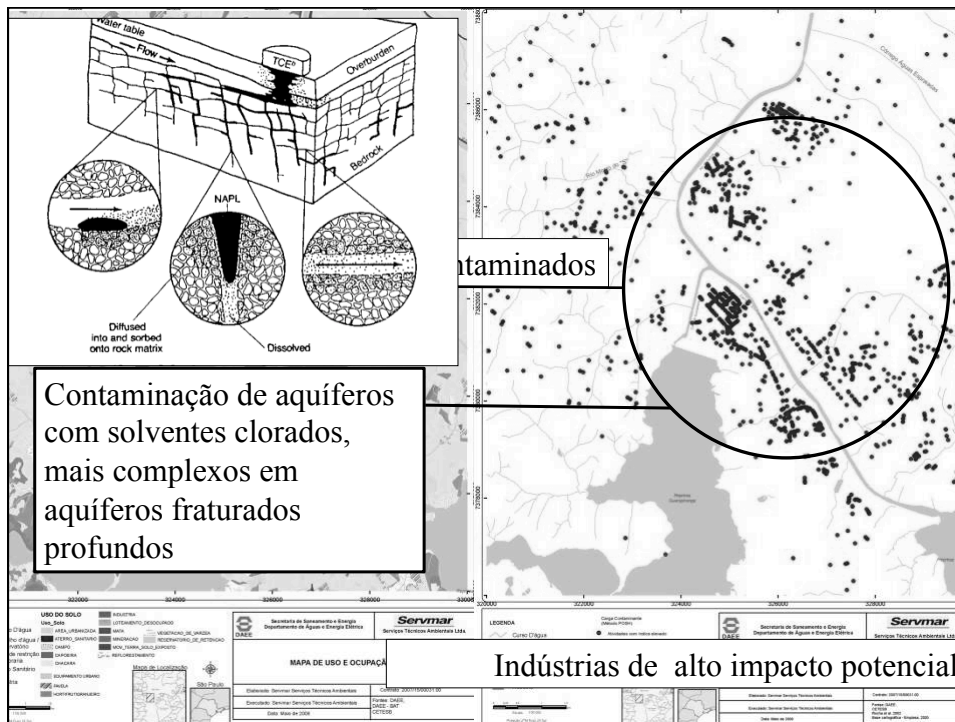
Local provável  
do vazamento da  
estação de  
serviço

CEPAS|USP

## Fontes potenciais de contaminação industrial



CEPAS|USP





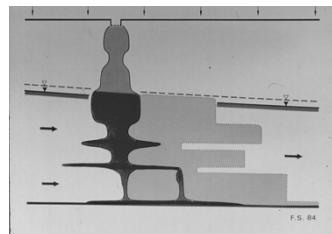
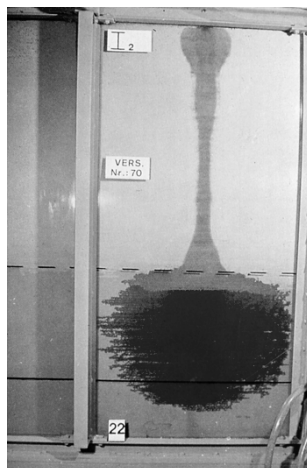
## Vazamento da indústria USA Chemical, Porto Feliz Processamento de solventes sintéticos



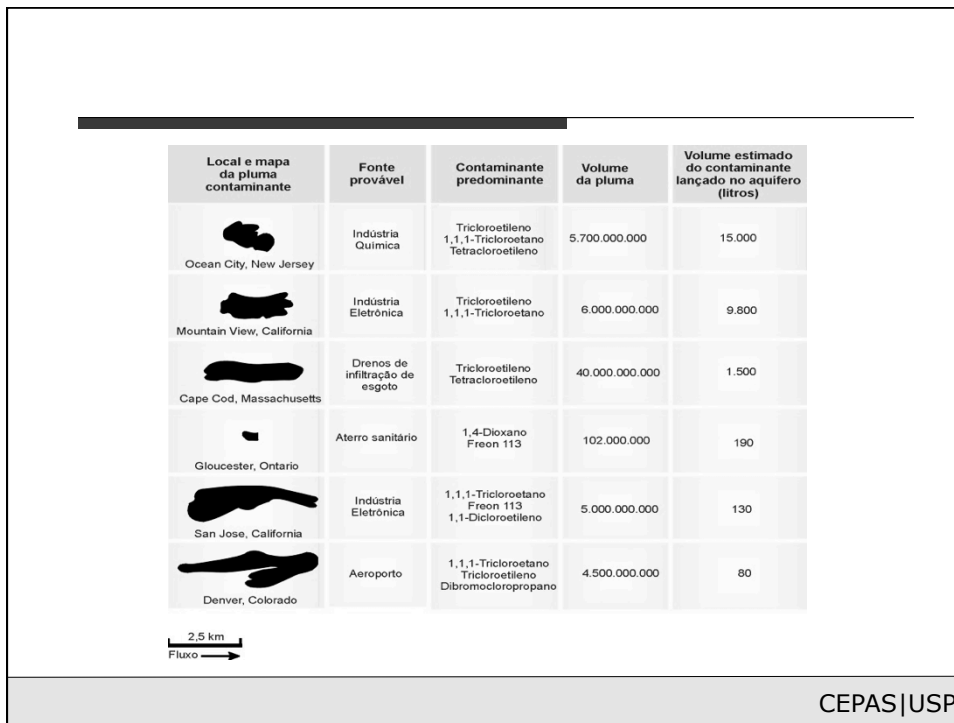
- Vazamento de  $\sim 400\text{m}^3$  de solventes clorados, contaminando diversos poços da região

19 CEPAS|USP

## Compostos mais densos que a água (DNAPL)



CEPAS|USP



## Reutilização de áreas abandonadas contaminadas

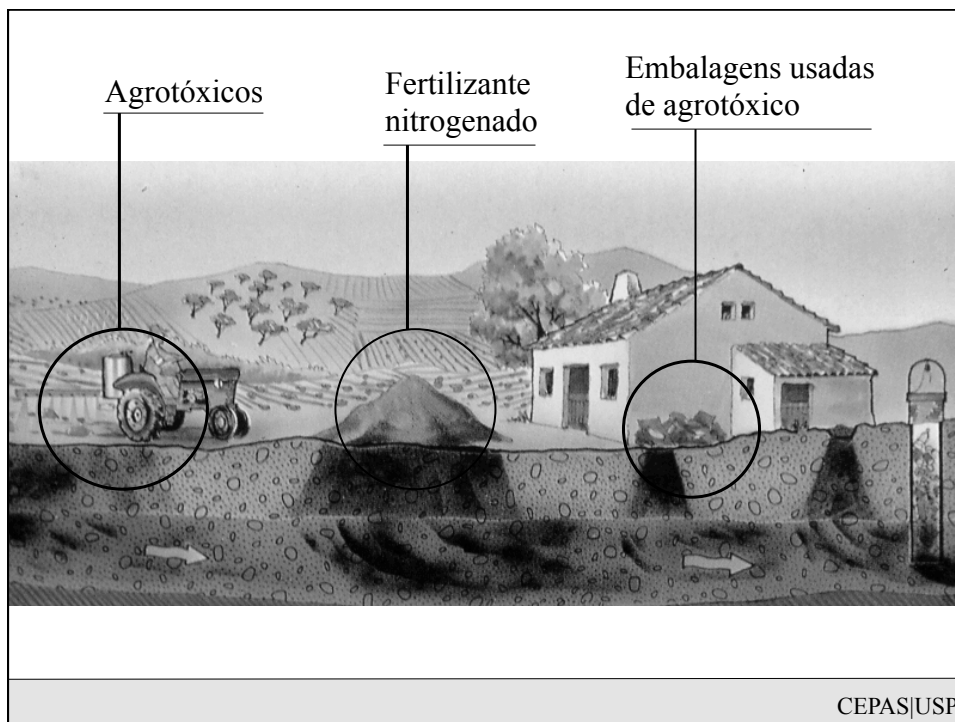







- Existem 4238 áreas industriais abandonadas e cadastradas na RMSP.

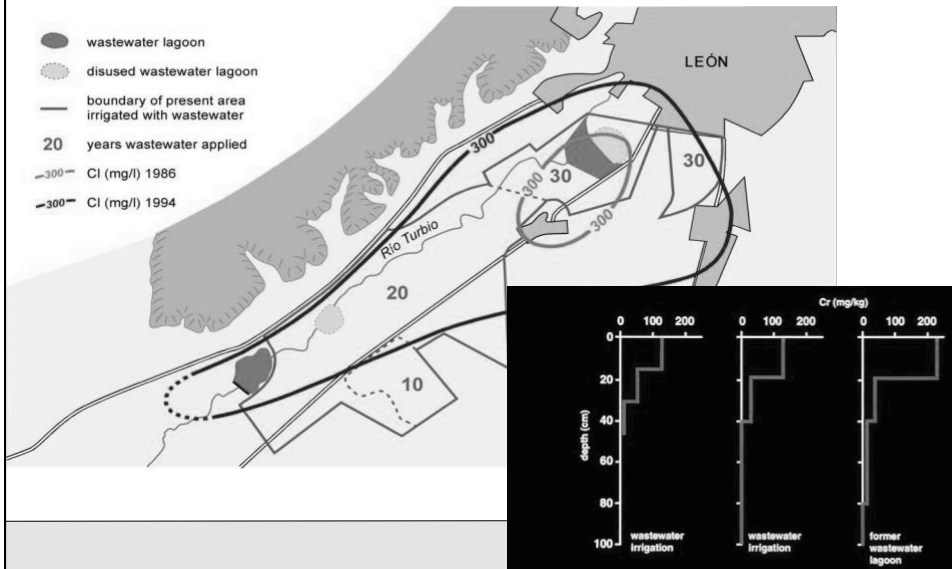
CEPAS|USP

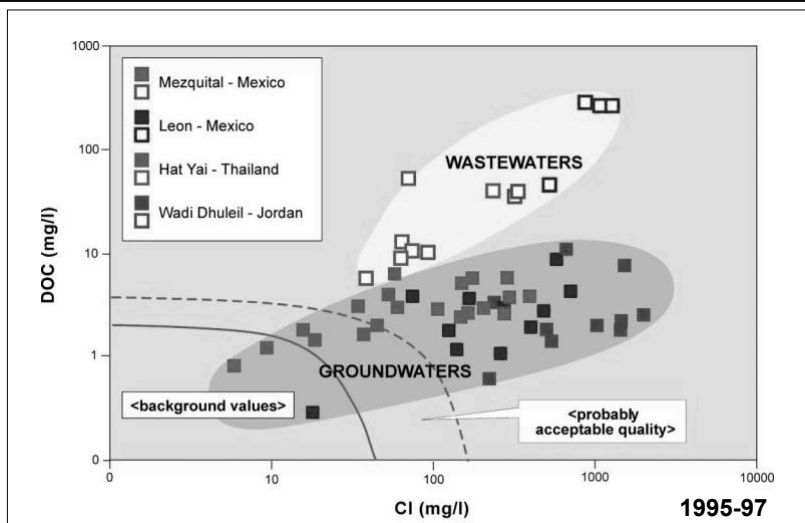
- ❑ Nos EUA, programa de monitoramento de águas subterrânea envolvendo 68.824 poços de produção.
- ❑ Nitrato elevado em 25-30% dos poços.
- ❑ Pesticidas detectados em 8-15% e maior que o MCL em 1% dos casos.
- ❑ Estratificação dos resultados
- ❑ Casos relatados estão aumentando

24  
CEPAS|USP

## WASTEWATER IRRIGATION IMPACTS ON GROUNDWATER rising salinity in the case of Leon (Guanajuato)-Mexico



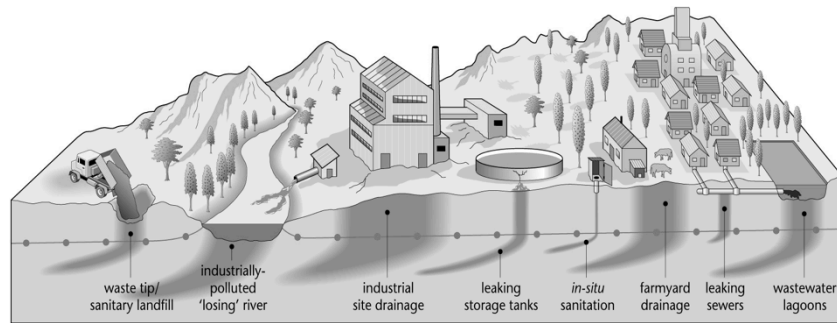
## QUALITY IMPACTS OF WASTEWATER RECHARGE groundwater DOC concentrations



1995-97

CEPAS|USP

Como classificar cargas contaminantes, quando elas são tão numerosas e complexas?



CEPAS|USP

Uma revisão da contaminação das águas subterrâneas permite algumas conclusões importantes:

- Há grande quantidade de atividades antrópicas, mas somente algumas são geralmente responsáveis pela maioria dos casos importantes de contaminação de aquífero

a) The Netherlands: 500 important sites of contaminated land (Duijvenboden, 1981)

Pollution Source	Types of Contaminant	Frequency of Occurrence (%)
Coal Gas Works	aromatic hydrocarbons (BTEX group) phenols, cyanide	28
Waste Tips and Sanitary Landfills	variable, often ammonium, chlorinated hydrocarbons, heavy metals, alkylbenzene, domestic/industrial pesticides, etc	21
Metal Industries	chlorinated hydrocarbons, heavy metals	12
Hydrocarbon Storage and Handling	aromatic hydrocarbons (BTEX group), lead	8
Chemical Plants	wide range of halogenated and aromatic hydrocarbons, phenols, alkylbenzene etc	7
Paint Factories	aromatic hydrocarbons (BTEX group), chlorinated hydrocarbons	5

CEPAS|USP

- 
- ❑ A quantidade de substâncias potencialmente contaminante não tem uma relação direta com sua ocorrência nas águas subterrâneas.
  - ❑ A presença das substâncias nos aquíferos é controlada pela sua mobilidade e persistência em solos e aquíferos.

CEPAS|USP

*USA National Priority List (1985), substâncias mais comuns detectadas em aquíferos*

---

Composto	m de caso	Composto	m de caso
Tricloroetileno	33	Cromo	15
Chumbo	30	1,1,1,triCl-etano	14
Tolueno	28	Zn & compuesto	14
Benze			13
Bifeniles poliaromáticos	22	Xileno	13
Cloroformio	20	Cl-metila	12
Tetracloroeto Carbono	16	Trans-1,2-diCl-etileno	11
Fenóis	15	Mercúrio	10
Arsênio	15	Cu & compostos	9
Cádmio	15	Cianeto	9



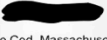


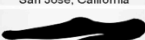
CEPAS|USP



## Contaminação das águas subterrâneas

- Relativamente uma pequena quantidade de substâncias muito tóxicas e persistentes é capaz de gerar uma pluma de contaminação muito grande, particularmente em aquíferos com alta velocidade de fluxo.

CEPAS|USP

Local e mapa da pluma contaminante	Fonte provável	Contaminante predominante	Volume da pluma	Volume estimado do contaminante lançado no aquífero (litros)
 Ocean City, New Jersey	Indústria Química	Tricloroetileno 1,1,1-Tricloroetano Tetracloroetileno	5.700.000.000	15.000
 Mountain View, California	Indústria Eletrônica	Tricloroetileno 1,1,1-Tricloroetano	6.000.000.000	9.800
 Cape Cod, Massachusetts	Drenos de infiltração de esgoto	Tricloroetileno Tetracloroetileno	40.000.000.000	1.500
 Gloucester, Ontario	Aterro sanitário	1,4-Dioxano Freon 113	102.000.000	190
 San Jose, California	Indústria Eletrônica	1,1,1-Tricloroetano Freon 113 1,1-Dicloroetileno	5.000.000.000	130
 Denver, Colorado	Aeroporto	1,1,1-Tricloroetano Tricloroetileno Dibromocloropropano	4.500.000.000	80

(Mckey & Cherry)

2,5 km  
Fluxo →

CEPAS|USP

## A primeira boa moral da estória .....

- ❑ Qualquer atividade antrópica pode ser classificada em termos de seu potencial de geração de carga contaminante, se analisarmos:
  - ❑ substâncias que manejam (vendo a toxicidade, concentração, persistência e mobilidade) e
  - ❑ Modo de disposição (carga hidráulica associada, profundidade de descarga e duração da descarga) .

CEPAS|USP

## Método POSH de avaliação de carga contaminante potencial

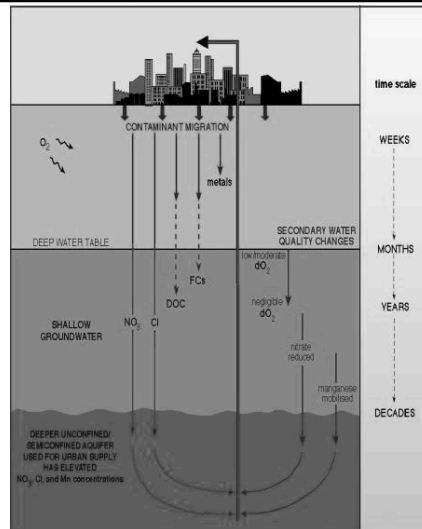
**PO** = *Pollutant Origin*

**SH** = *Surcharge Hydraulically*

POTENTIAL FOR SUBSURFACE CONTAMINANT LOAD GENERATION	POLLUTION SOURCE				
	solid waste disposal	industrial sites*	wastewater lagoons	miscellaneous urban	mining and oil exploration
<b>Elevated</b>	industrial type 3 waste, waste unknown origin	type 3 list, any activity handling >100 kg/d of hazardous chemicals	all industrial type 3, any effluent (except residential sewage) if area >5 ha		oilfield operations, metalliferous mining
<b>Moderate</b>	rainfall >500mm/a with residential/ industrial type 1/ agroindustrial wastes, all other cases	type 2 list	residential sewage if area >5 ha, other cases not above or below	gas filling stations, transportation routes with regular traffic of hazardous chemicals	some mining/ quarrying of inert materials
<b>Reduced</b>	rainfall <500mm/a with residential/ industrial type 1/ agroindustrial wastes	type 1 list	residential, mixed urban, agro- industrial and non-metalliferous mining wastewater if area <1 ha	cemeteries	
<p>* contaminated land from abandoned industries should have same ranking as industry itself</p> <p>List 3 Industries: engineering workshops, oil/gas refineries, chemical/pharmaceutical/plastic/pesticide manufacture, leather tanneries, electronic factories, metal processing</p> <p>List 2 Industries: rubber factories, paper and pulp mills, textile factories, fertilizer manufacture, electrical factories, detergent and soap manufacture</p> <p>List 1 Industries: woodworking, food and beverage manufacture, sugar and alcohol distilleries, non-metallic material processing</p>					

## URBAN GROUNDWATER CONTAMINATION common types of process and problem

- associated with urban wastewater (via in-situ sanitation, sewer leakage, wastewater reuse), industrial chemicals (spillage, ground disposal) and solid waste disposal
- impact varies widely with natural vulnerability of groundwater system



CEPAS|USP

### Vulnerabilidade à contaminação de aquíferos

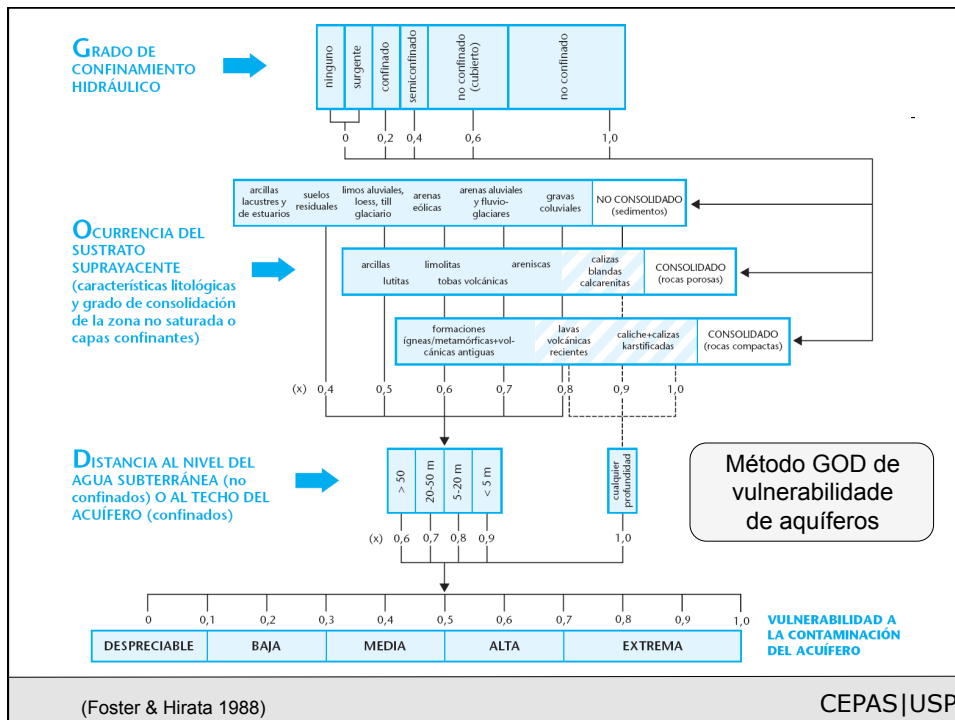
- A vulnerabilidade pode ser primariamente entendida como:
  - a) Acesso hidráulico da zona não saturada à penetração de contaminantes (advecção de contaminantes); e
  - b) Capacidade de atenuação da camada que recobre a zona saturada, resultado da retenção ou reação físico-química de contaminantes (dispersão, retardação e degradação)

CEPAS|USP

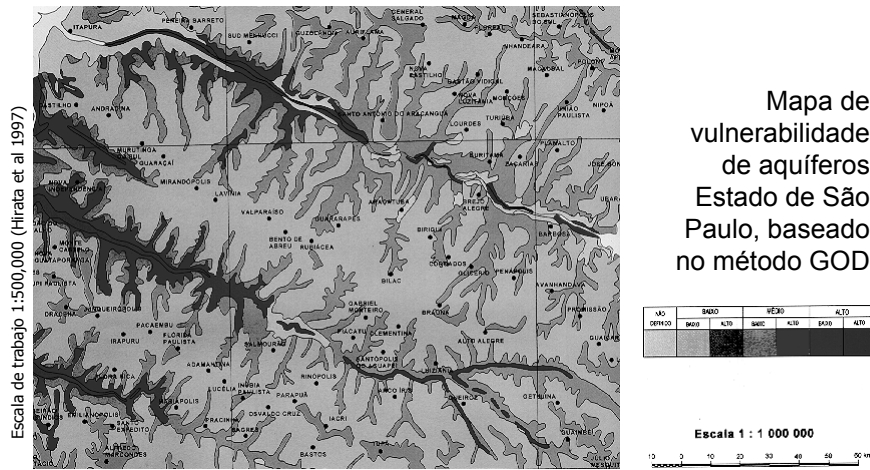
## Factores hidrogeológicos que controlan a vulnerabilidad de acuíferos

COMPONENTE DE LA VULNERABILIDAD	INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA	
	idealmente requerida	normalmente disponible
Inaccesibilidad Hidráulica	grado de confinamiento del acuífero	tipo de acuífero
	profundidad al agua subterránea o al techo del acuífero	profundidad al agua subterránea o al techo del acuífero confinado
	contenido de humedad de la zona no saturada	
	conductividad hidráulica vertical de los estratos de la zona no saturada o de las capas confinantes	
Capacidad de Atenuación	distribución del tamaño de granos y fisuras en la zona no saturada o en las capas confinantes	grado de consolidación/fisuración de estos estratos
	mineralogía de los estratos de la zona no saturada o capas confinantes	características litológicas de estos estratos

CEPAS|USP



Segunda boa moral da estória: é possível obter um mapa de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, com limitações claras



CEPAS|USP

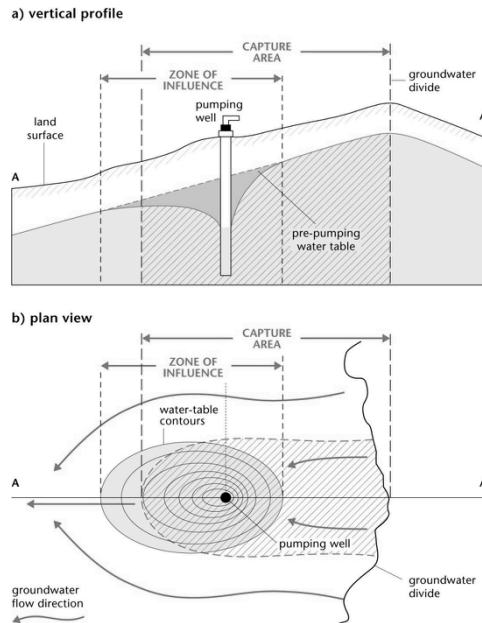


Mas e os poços de abastecimento público, eles não merecem um tratamento especial?

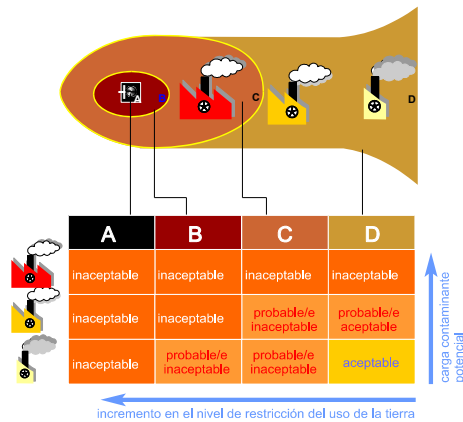
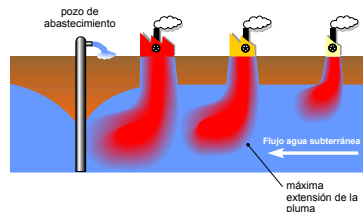
CEPAS|USP

A zona de captura de poços (ZOC) é a área em superfície onde há contribuição para o poço em bombeamento

A determinação da ZOC permite definir a origem da contaminação do poço.



CEPAS|USP



Conceito de perímetro de proteção de poço e o controle do uso da terra

- (D)** Área total de captura da fonte (área de recarga)
- (C)** Áreas intermediárias (divisão baseada em tempo: 1; 5 ou 10 anos).
- (B)** Área de proteção microbiológica (50 dias)
- (A)** Área de cabeça do poço ou nascente (10m)

CEPAS|USP

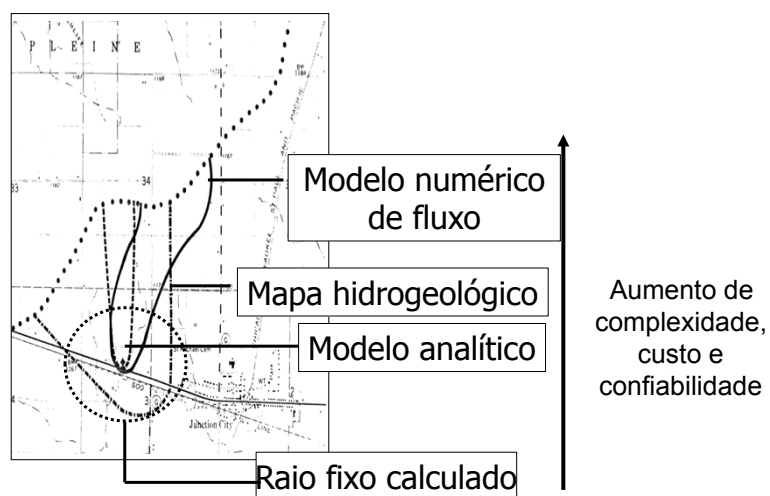


## Problemas mais comuns na delimitação de perímetro de proteção de poços

- Existe uma série de situações hidrogeológicas e de exploração do aquífero onde o conceito encontra complicações:
  - Complexidade (transiência) da exploração de poços
  - Complexidade hidrogeológica
  - Falta de informação (que se relaciona aos dois primeiros)

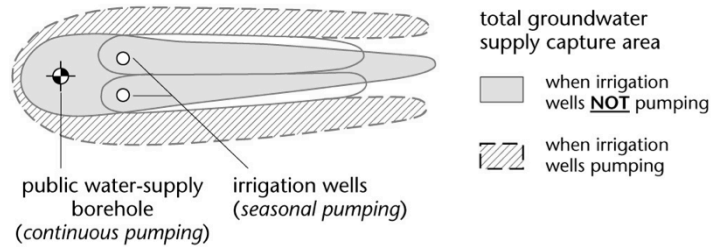
CEPAS|USP

## Diferentes métodos geram diferentes formatos de zonas de captura de poços (ZOC)



CEPAS|USP

(a) effect of intermittent abstraction



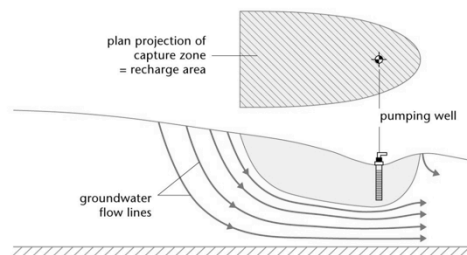
Vários tipos de interferências hidráulicas no formato e estabilidade das zonas de captura (ZOC):  
bombeamento forte por irrigação agrícola ou outras atividades sazonais

CEPAS|USP

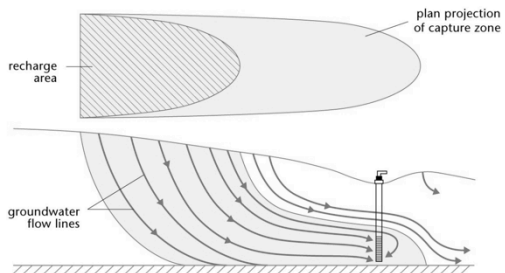
Problema de modelos 2D e 3D

Comparação entre a zona de captura com poços rasos e fluxos mais profundos em aquíferos no confinados

(a) shallow well in unconfined aquifer



(b) unconfined deep well



CEPAS|USP

## Planejamento urbano e as proteção das águas subterrâneas

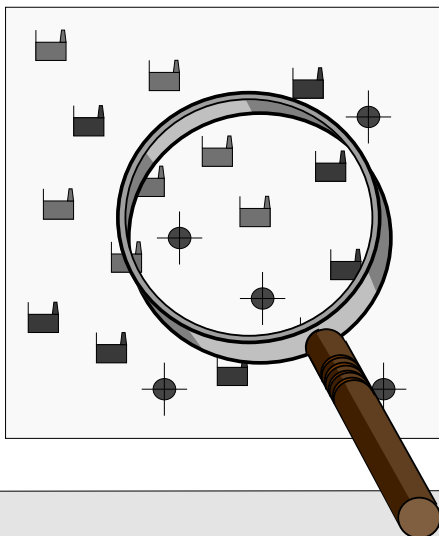
---



CEPAS|USP

### 1º Problema: quais são as atividades que devem estar provocando casos de contaminação de solos e aquíferos?

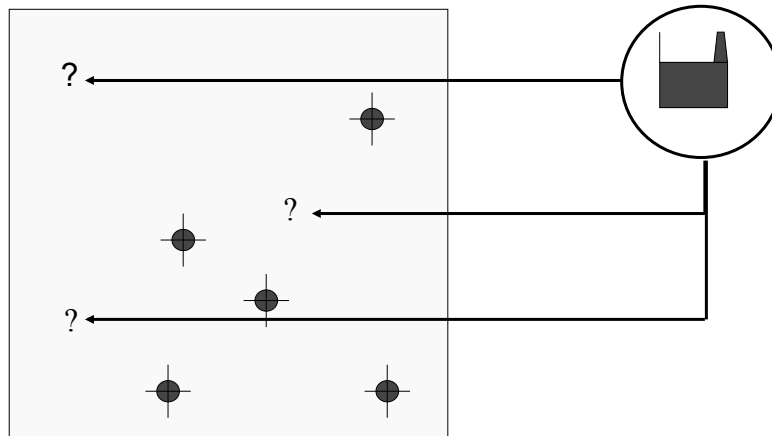
---



- Com restritos orçamentos, necessitará estabelecer prioridades em estudos de detalhe
- Por onde começar?

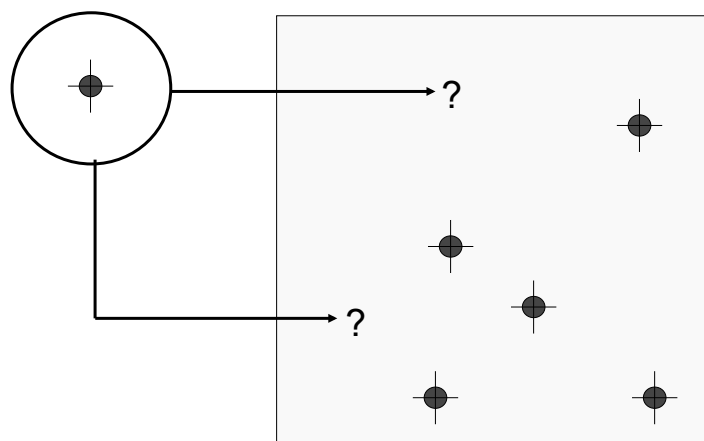
CEPAS|USP

2º Problema: onde localizar uma nova atividade potencialmente contaminante ao solo e aquífero?



CEPAS|USP

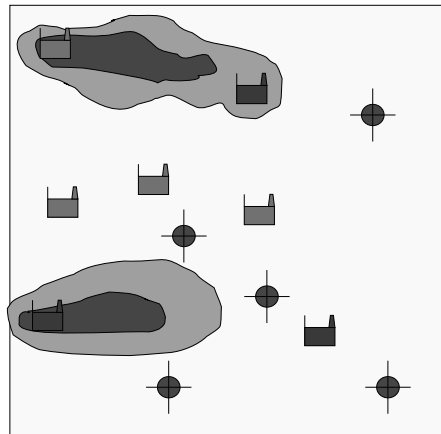
3º Problema: onde localizar uma nova captação para abastecimento de água potável na cidade?



CEPAS|USP

4º Problema: Que fazer com as áreas comprovadamente contaminadas?

---



CEPAS|USP

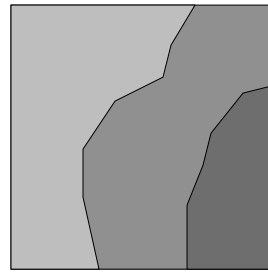
Terceira boa moral da estória:

---

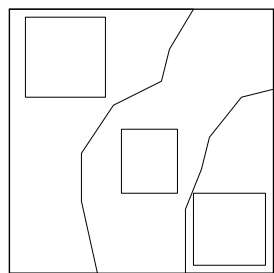
- O reconhecimento da vulnerabilidade e das zonas de captura de poços, juntamente com a classificação da carga contaminante potencial são ferramentas muito úteis nos programas de proteção de aquíferos e do disciplinamento do uso e ocupação da terra

CEPAS|USP

Proteção do aquífero  
 Prioridade baseada  
 no Perigo de  
 contaminação:  
 interação entre  
 vulnerabilidade de  
 aquífero e fontes  
 contaminantes



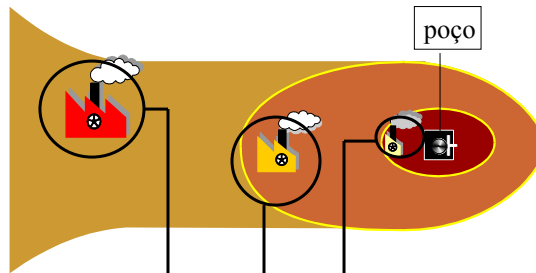
vulnerabilidade de aquífero



carga contaminante	vulnerabilidade de aquífero		
	baixa	media	alta
elevada	3	2	2
moderada	2	2	1
reduzida	2	1	1

Incremento de prioridade

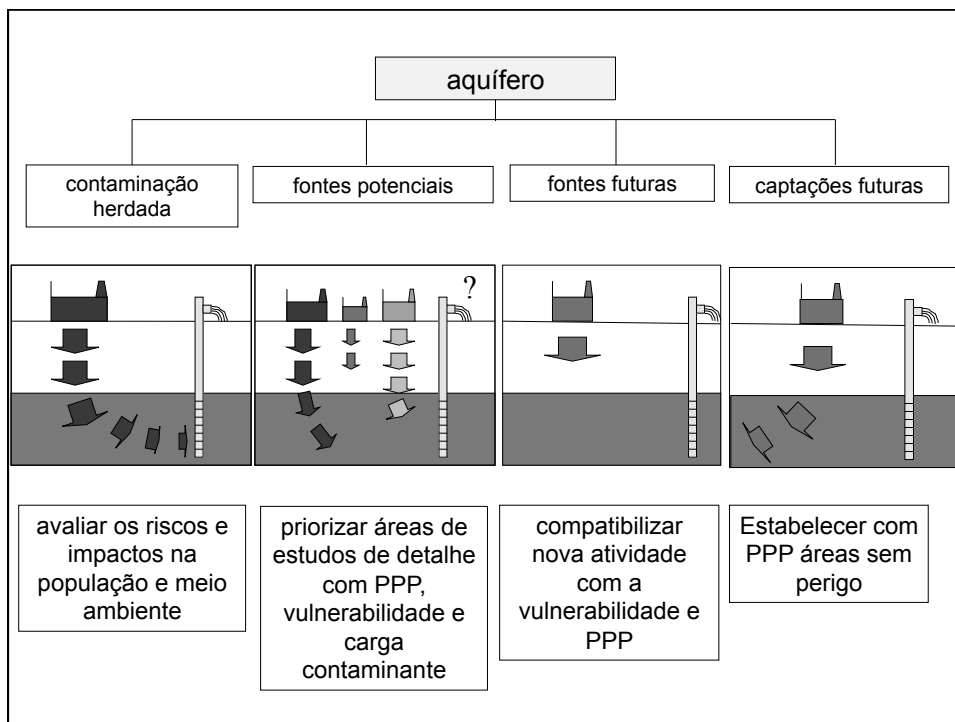
Estratégia  
 voltada ao poço  
 (captação)  
 Perigo de  
 contaminação  
 baseado em  
 área de  
 proteção de  
 poço e fonte e  
 atividades  
 contaminantes



Carga contaminante	Area de proteção de poço			
	D	C	B	A
elevada	3	3	1 não aceitável	0
moderada	3	2 aceitável	1	0
reduzida	2 não Aceitável	1	1	0

Incremento de prioridades



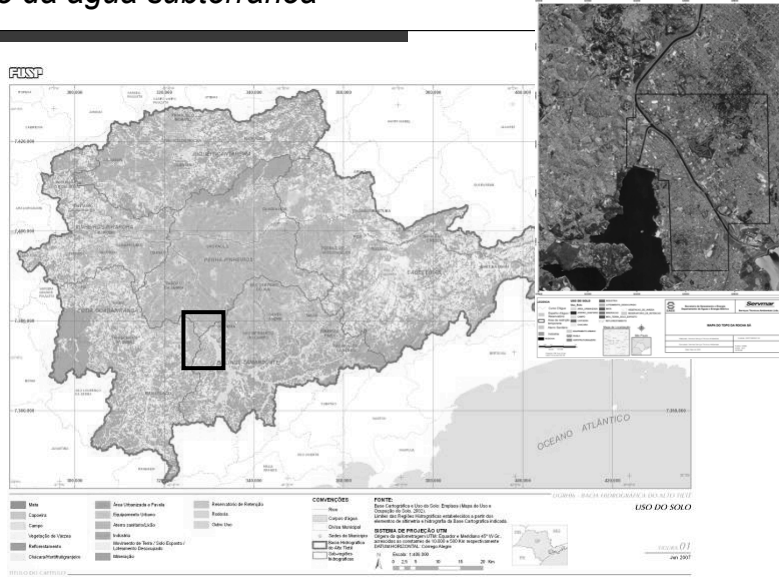


POTENTIALLY POLLUTING ACTIVITY REQUIRING CONTROL MEASURES	(A) BY AQUIFER VULNERABILITY		
	high	medium	low
<b>Septic Tank, Cesspits &amp; Latrines</b>			
individual properties	A	A	A
communal properties, public	A	A	A
gasoline filling station	PA	A	A
<b>Solid Waste Disposal Facilities</b>			
municipal domestic	PN	PA	A
construction/inert	A	A	A
industrial hazardous	N	N	PA
industrial (class I)	PN	PA	A
industrial (class II and III)	N	N	PA
cemetery	PA	A	A
incinerator	N	PN	PA

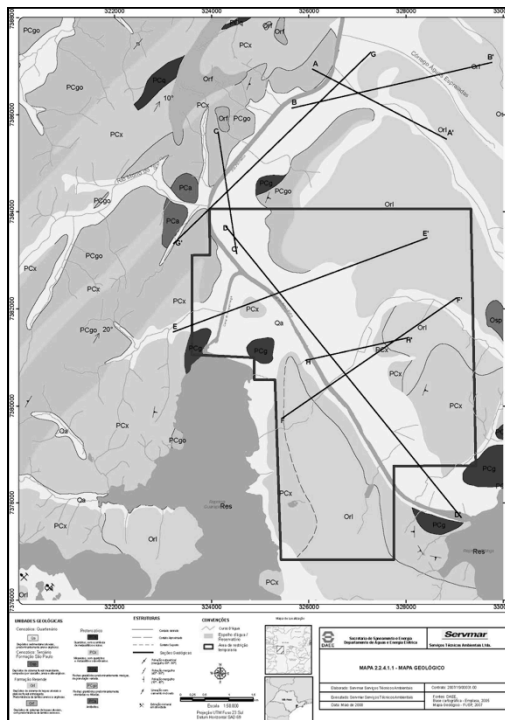
**A:** aceitáveis com padrões normais de desenho.  
**PA:** provavelmente aceitável sujeito a estudo e desenho específico  
**PN:** provavelmente não aceitável  
**N:** inaceitável em praticamente todos os casos

CEPAS|USP

## Jurubatuba: delimitação de áreas de restrição e controle do uso da água subterrânea



CEPAS|USP



## Mapa Geológico

### UNIDADES GEOLÓGICAS

#### Cenozóico: Quaternário

Qa

Depósitos sedimentares aluviais, predominantemente areno-argilosos.

#### Cenozóico: Terciário

##### Formação São Paulo

Osp

Depósitos de sistema fluvial meandriante, compostos por cascalho, areia e silte-argiloso.

##### Formação Resende

Ori

Depósitos de sistema de leques aluviais a planície fluvial entrelaçada. Predominância de lamitas arenos e argilosas.

Ori

Depósitos de sistemas de leques aluviais, com predominância de lamitas sesosos.

### ESTRUTURAS

Contato definido

Contato Aproximado

Contato Suposto

Seções Geológicas

Foliação subvertical (mergulho 90° - 90°)

#### Proterozóico

Qa

Quartzitos, com ocorrência de metacalcários e xistos.

PCx

Mixaristos, com quartzitos e metacalcários subordinados.

PCg

Rochas graníticas predominantemente maciça de granulação variada.

PCgo

Rochas graníticas predominantemente orientadas ou foliadas.

PCa

Amfibólitos.

Foliação mergulho (10° - 45°)

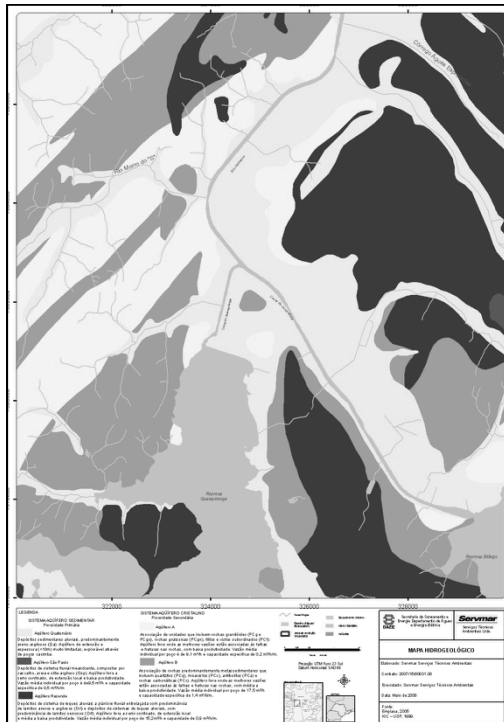
Lineação com mergulho indicado

Extração mineral em atividades

Foliação mergulho (45° - 90°)

CEPAS|USP





## Mapa Hidrogeológico

### LEGENDA

#### SISTEMA AQUIFERO SEDIMENTAR

##### Porosidade Primária

**Aquífero Quaternário**  
Depósitos sedimentares aluviais, predominantemente areno-argilosos (Qa). Aquífero de extensão e espessura (<10m) muito limitadas, explorável através de poços caçimba.

**Aquífero São Paulo**  
Depósitos de sistema fluvial meandrante, compostos por cascalho, areia e silte-argilosos (Qsp). Aquífero livre a semi-confinado, de extensão local e baixa produtividade. Vazão média individual por poço de 400,5 m<sup>3</sup>/h e capacidade específica de 0,5 m<sup>3</sup>/m.

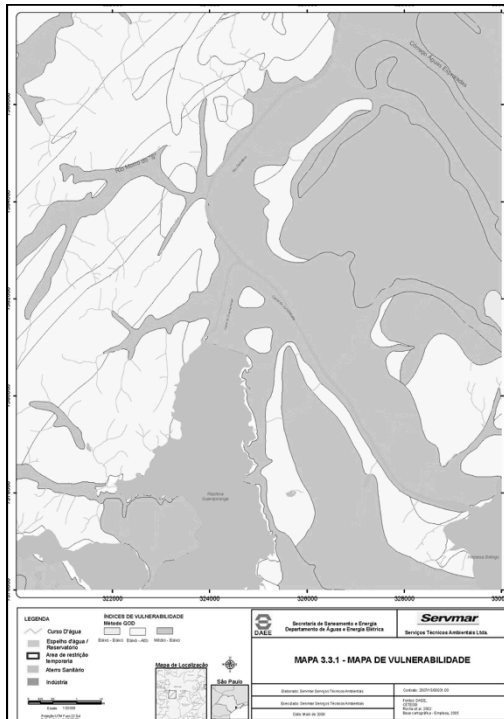
**Aquífero Resende**  
Depósitos de sistema de leques aluviais a planície fluvial entrelaçada com predominância de lamitos arenos e argilosos (Or) e depósitos de sistema de leques aluviais, com predominância de lamitos setores (Or). Aquífero livre a semi-confinado, de extensão local e média a baixa produtividade. Vazão média individual por poço de 15,2 m<sup>3</sup>/h e capacidade de 0,9 m<sup>3</sup>/m.

#### SISTEMA AQUIFERO CRISTALINO

##### Porosidade Secundária

**Aquífero A**  
Associação de unidades que incluem rochas granbóides (PCg e PCgo), rochas gnáissicas (PCgn), filitos e xistos subordinados (PCf). Aquífero livre onde as melhores vazões estão associadas às falhas e fraturas nas rochas, com baixa produtividade. Vazão média individual por poço de 9,1 m<sup>3</sup>/h e capacidade específica de 0,2 m<sup>3</sup>/m.

**Aquífero B**  
Associação de rochas predominantemente metasedimentares que incluem quartzitos (PCq), micaissitas (PCm), amfibólitos (PCa) e rochas carbonáticas (PCc). Aquífero livre onde as melhores vazões estão associadas às falhas e fraturas nas rochas, com média a baixa produtividade. Vazão média individual por poço de 17,5 m<sup>3</sup>/h e capacidade específica de 1,5 m<sup>3</sup>/m.

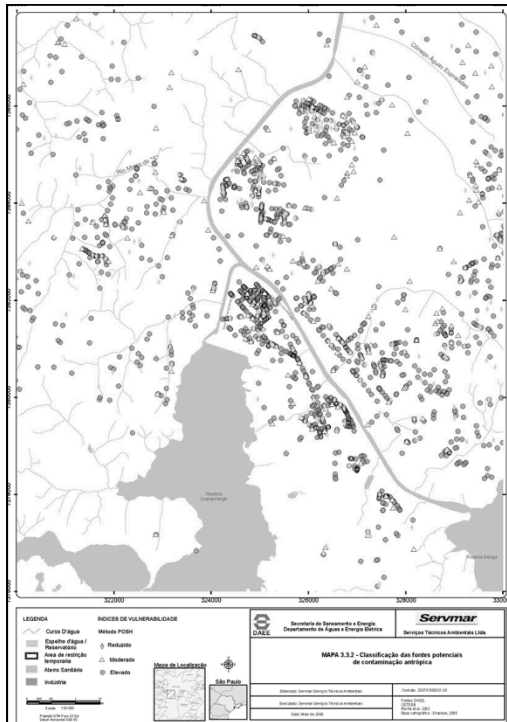


## Vulnerabilidade natural de aquífero

### ÍNDICES DE VULNERABILIDADE Método GOD

Baixo - Baixo  
 Baixo - Alto  
 Médio - Baixo





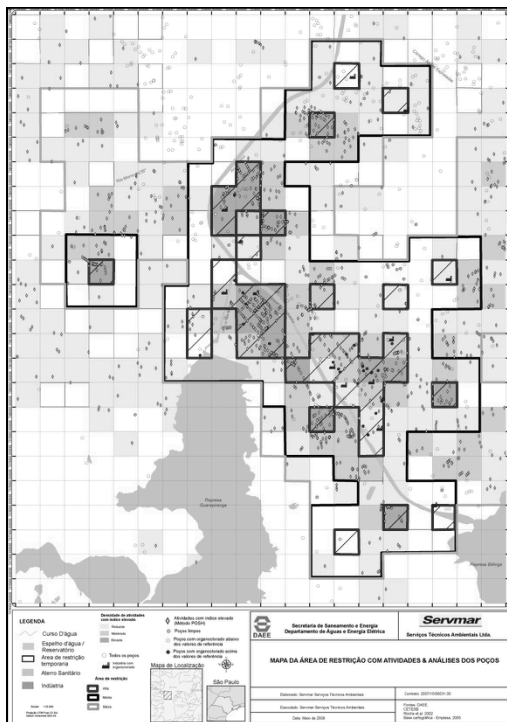
### Carga potencial de contaminação antrópica

#### LEGENDA

- Curso D'água
- Espelho d'água / Reservatório
- Área de restrição temporária
- Aterro Sanitário
- Indústria

#### Método POSH

- Reduzido
- Moderado
- Elevado



### Áreas de restrição do uso de água subterrânea

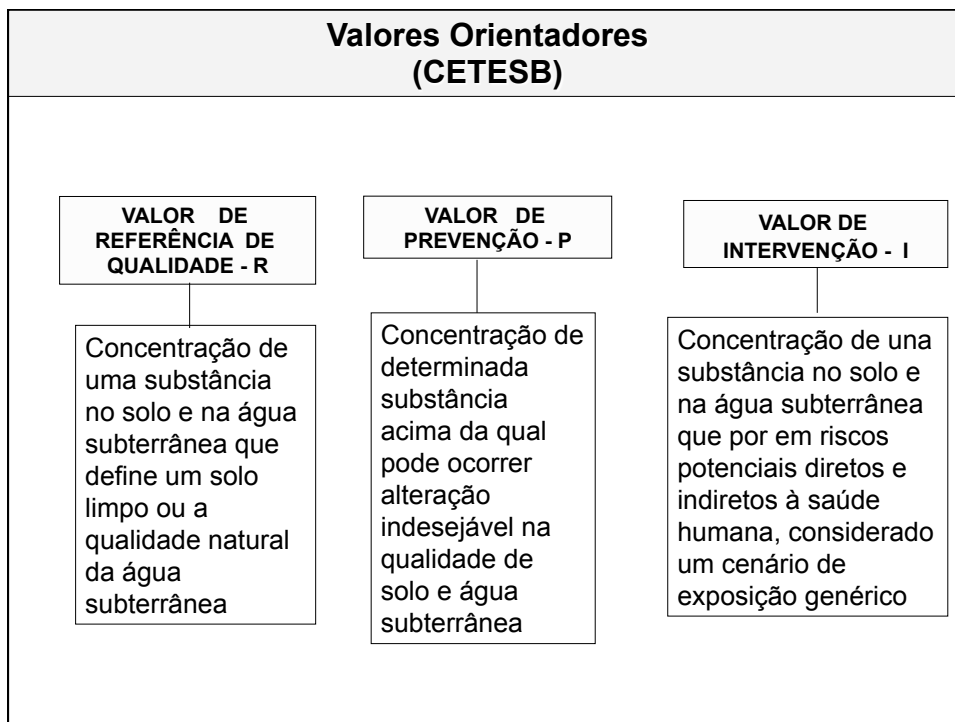
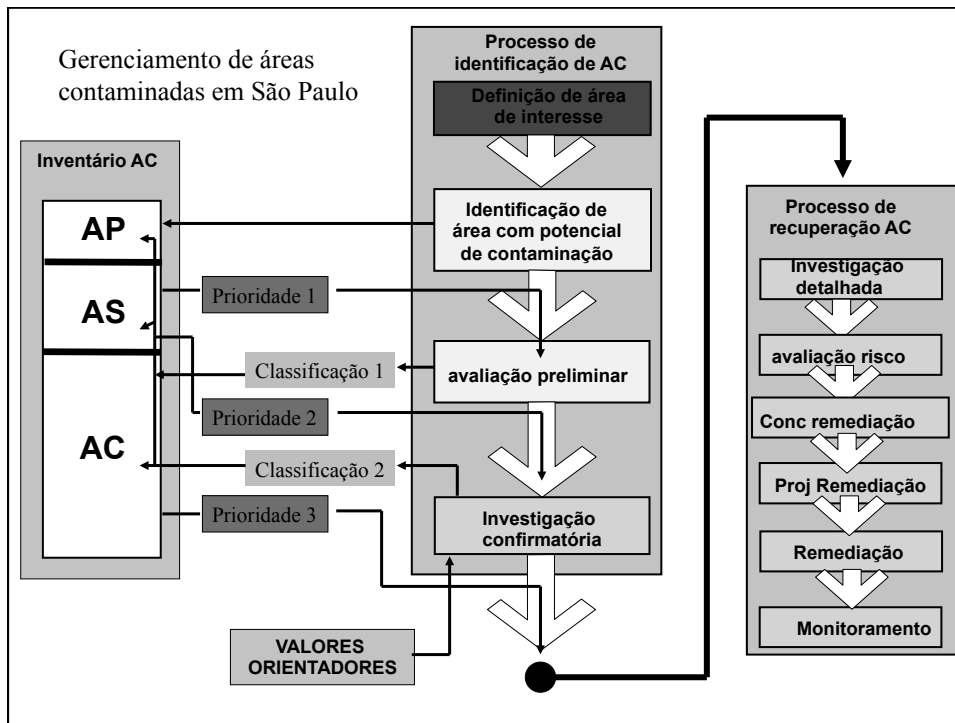
#### Densidade de atividades com índice elevado

- reduzida
- moderada
- elevada

- Todos os poços
- Indústria com organoclorado
- Atividades com índice elevado (Método POSH)
- Poços limpos
- Poços com organoclorado abaixo dos Valores Orientadores de Intervenção
- Poços com organoclorado acima dos Valores Orientadores de Intervenção

#### Área de restrição

- Alta
- Média
- Baixa



**VALORES ORIENTADORES PARA SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA PROPOSTOS  
PARA O ESTADO DE SÃO PAULO**

Substância	CAS Nº	Referência (a)	Prevenção	Solo (mg/kg)			Água Subt (µg/L)
				Intervenção			Intervenção
				Agrícola APMax	Residencial	Industrial	
<b>Etanos clorados</b>							
1,1-Dicloroetano	75-34-2	<LD	-	6	12	24	875
1,2-Dicloroetano	107-06-2	<LD	0,075	0,15	0,25	0,50	10
1,1,1-Tricloroetano	71-55-6	<LD	-	9	10	30	280
<b>Etenos clorados</b>							
Cloreto de vinila (Monocloroeteno)	75-01-4	<LD	0,01	0,02	0,003	0,008	5
1,1-Dicloroeteno (Dicloroetileno)	75-35-4	<LD	-	4	3	8	30
1,2-Dicloroeteno - cis	156-60-5	<LD	-	1,5	3	4	50 (s)
1,2-Dicloroeteno - trans	156-60-5	<LD	-	4	8	12	
1,1,2-Tricloroeteno (TCE)	79-01-6	<LD	0,0078	8	8	20	70
1,1,2,2 - Tetracloroeteno (PCE)	127-18-4	<LD	0,054	4	8	16	40
<b>Metanos clorados</b>							
Diclorometano (Cloreto de Metileno)	75-09-2	<LD	0,018	4,5	9	15	20
Clorofórmio (Triclorometano)	67-66-3	<LD	1,5	3	4	7	200
Tetraclorometano (tetracloro de carbono)	56-23-5	<LD	-	0,4	0,6	1,3	2
<b>Fenóis clorados</b>							
2 Clorofenol (o)	95-57-9	<LD	0,034	0,7	1,4	2,0	52,5
2,4-Diclorofenol	120-83-2	<LD	0,031	1,5	4	6	10,5
3,4-Diclorofenol	95-77-2	<LD	0,051	0,8	3	6	10,5
2,4,5-Triclorofenol	95-95-4	<LD	0,11	2	8	15	10,5
2,4,6-Triclorofenol	88-06-2	<LD	1,9	3	10	20	200
2,3,4,5-Tetraclorofenol	49-01-51-3	<LD	0,092	7	25	50	10,5
2,3,4,6-Tetraclorofenol	58-90-2	<LD	0,011	1,0	4	8	10,5
Pentaclorofenol (PCP)	87-86-5	<LD	0,16	0,35	1,3	3,0	9

## Referencia bibliográfica

- Foster, S; Hirata, R; Gomes, D; D'Elia, M; Paris, M. 2002. Groundwater quality protection. The World Bank. Washington. (também disponível em português, espanhol e chinês)
- Carvalho, AM & Hirata, R. 2012. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do estado de São Paulo. Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, 12(1):53-70
- Série de publicações do GWMate – Banco Mundial. [www.worldbank.org/gwmate](http://www.worldbank.org/gwmate)
- Gerenciamento de áreas contaminadas CETESB <http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/manual-de-gerenciamento/>



Dr. Ricardo Hirata  
CEPAS - Universidade de São Paulo  
*[rhirata@usp.br](mailto:rhirata@usp.br)*

CEPAS|USP