

# Efeitos da Infiltração de $H_2O$ Num Canal de Recarga no Controlo da Intrusão Salina. Vulnerabilidade e Extracção de Aquíferos Costeiros

**ANTÓNIO PEDRO** *Said Aly* **PINA**

INGRH Cabo Verde

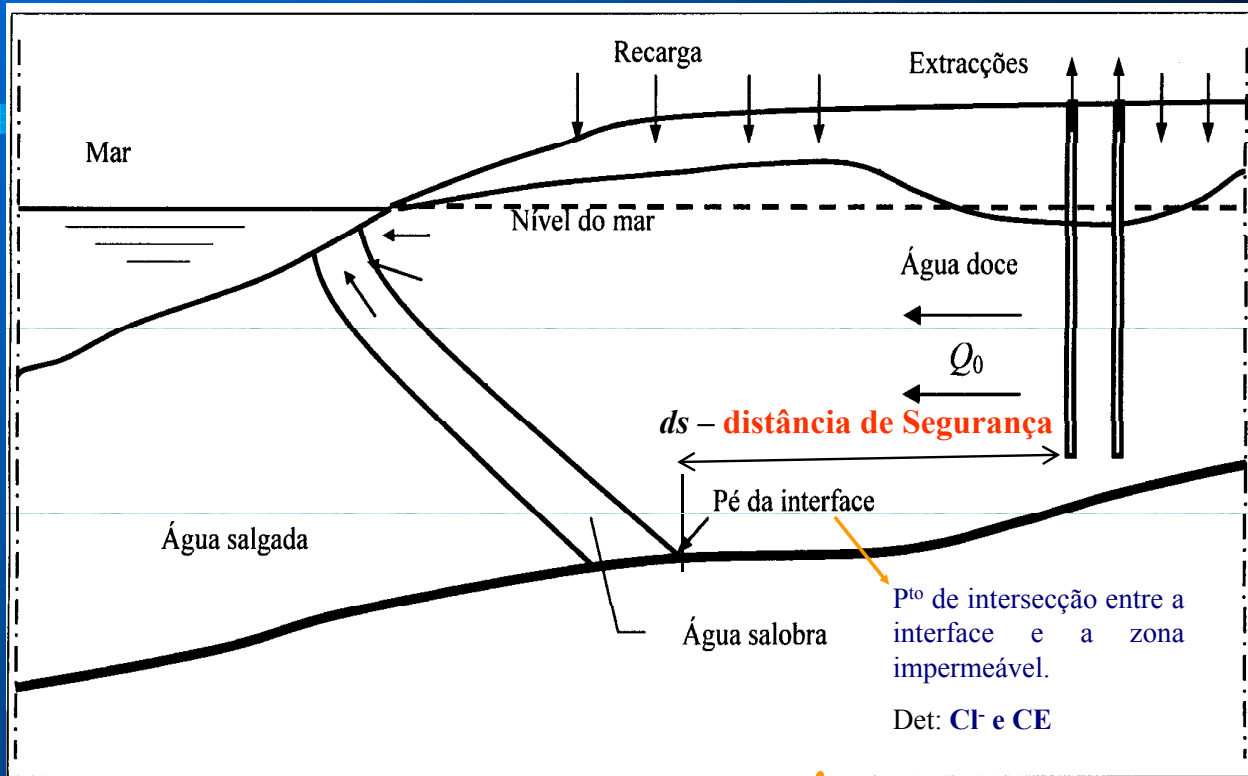
*A ciência e a engenharia dos recursos hídricos de zonas costeiras devem encontrar soluções racionais e optimizadas para a gestão da água disponível!*

➤ Serã possível implementar medidas que minimizem os efeitos nefastos nos aquíferos costeiros da extracção excessiva, das secas ou das eventuais alteraçõs climáticas?

➤ Não serã possível utilizar a água disponível na região para ajudar no controlo daqueles efeitos nefastos?

# Intrusão Salina

## Breve Descrição do Fenômeno

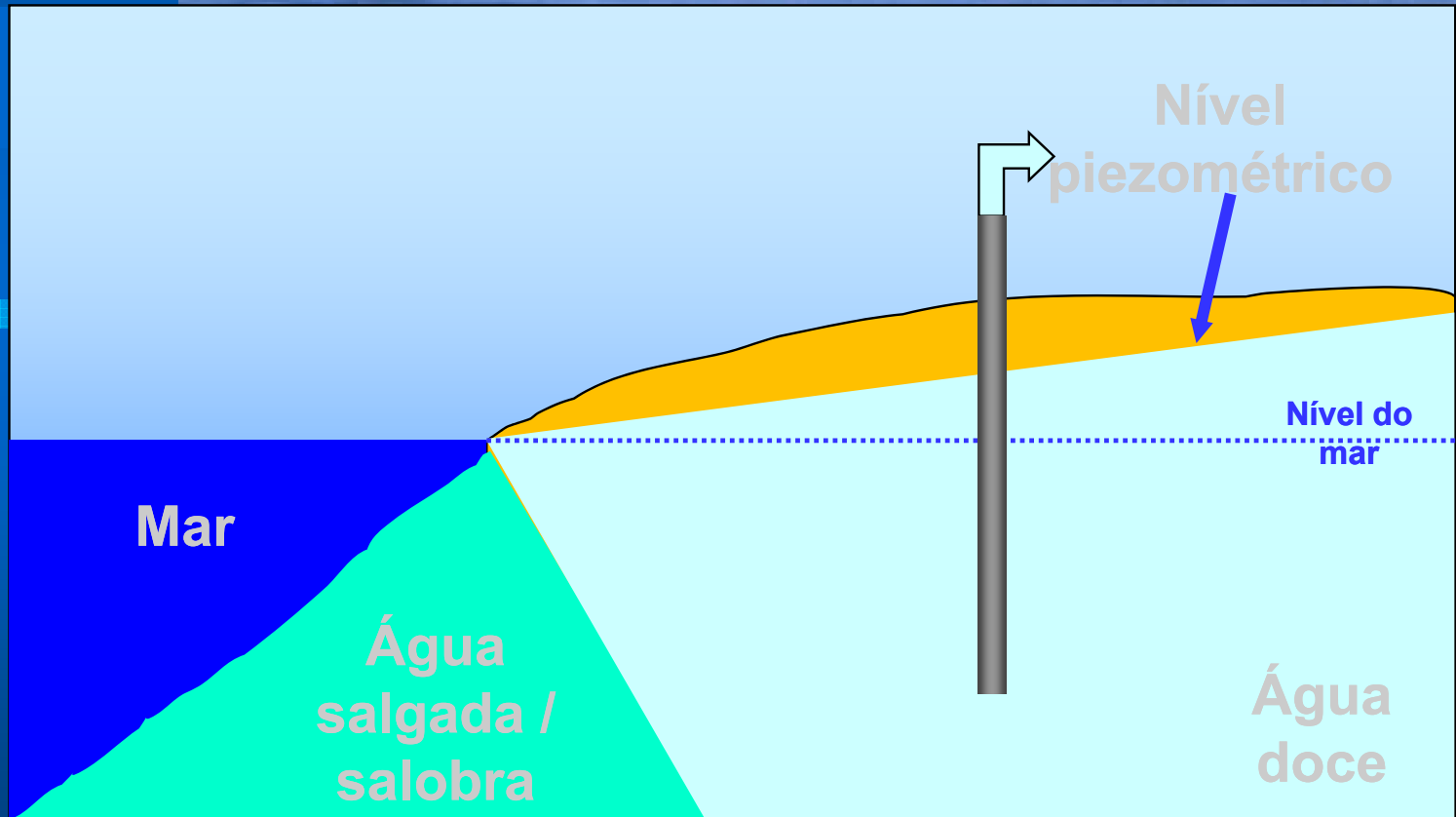


## Causas da intrusão Salina:

- Causas naturais – Redução de recarga natural, motivada por seca prolongada;
- Subida do nível do mar
- Exploração excessiva de reservas subterrâneas;

# Intrusão Salina

## Aquífero costeiro sem bombagem

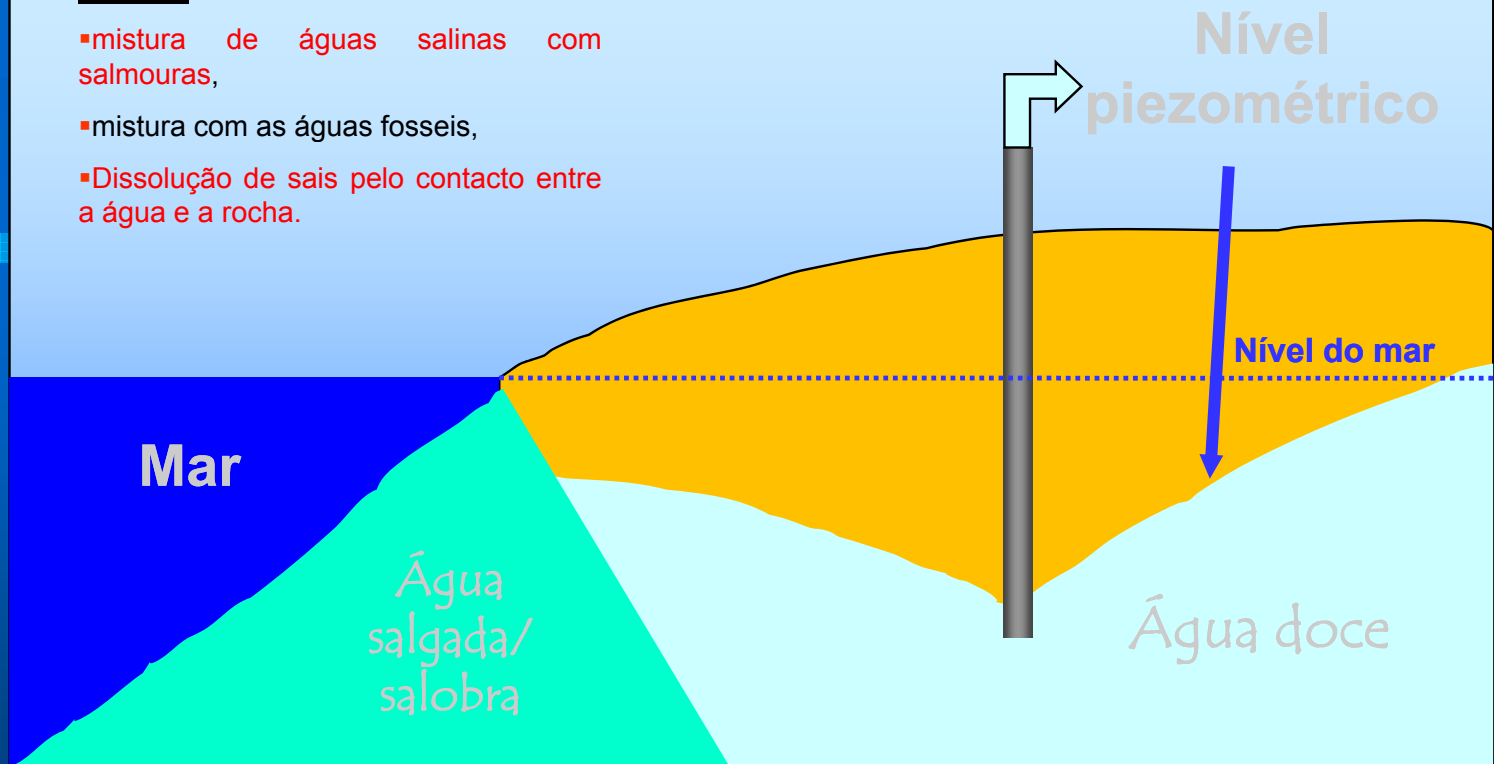


# Intrusão Salina

## Aquífero costeiro com extracção

### Origem:

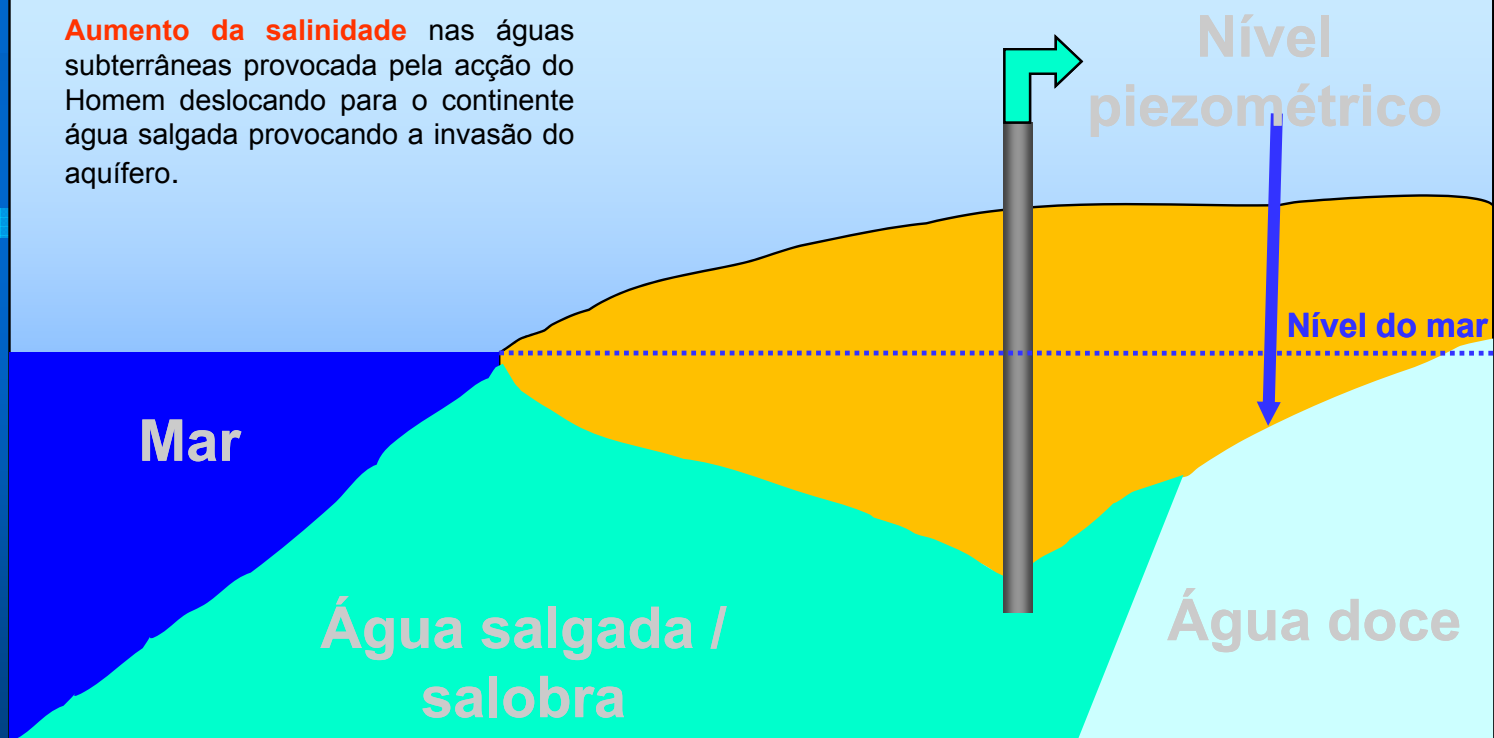
- mistura de águas salinas com salmouras,
- mistura com as águas fósseis,
- Dissolução de sais pelo contacto entre a água e a rocha.



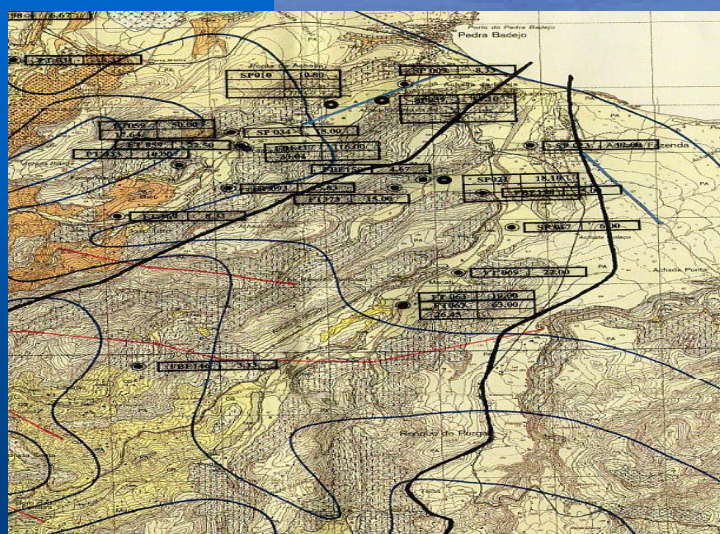
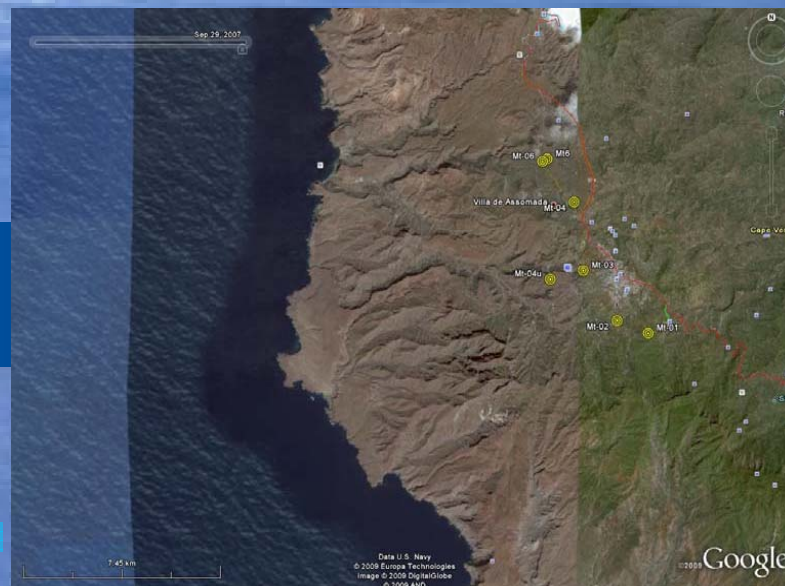
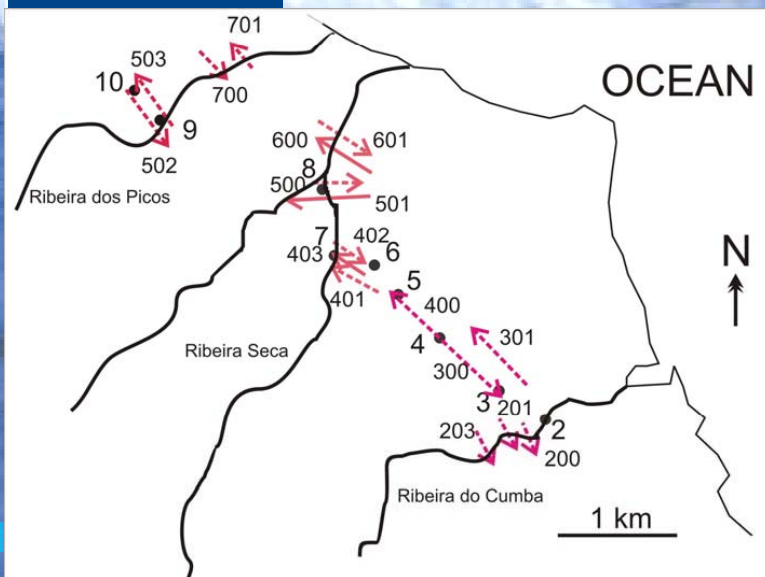
# Intrusão Marinha

## Aquífero costeiro - Intrusão marinha

**Aumento da salinidade** nas águas subterrâneas provocada pela ação do Homem deslocando para o continente água salgada provocando a invasão do aquífero.



# Localização dos Pontos de H<sub>2</sub>O na zona Leste da ilha de Santiago



PARAMETROS MENSIS	PARAMETROS TRIMESTRAL	PARAMETROS SEMESTRAIS
<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Temperatura</li> <li>❖ Condutividade</li> <li>❖ Salinidade</li> <li>❖ TDS</li> <li>❖ pH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Nitratos</li> <li>❖ Nitritos</li> <li>❖ Cloretos <sup>(1)</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Cálcio</li> <li>❖ Magnésio</li> <li>❖ Sódio</li> <li>❖ Potássio</li> <li>❖ Bicarbonatos</li> <li>❖ Silica</li> <li>❖ Sulfatos</li> <li>❖ Fosfatos</li> </ul>

# Distância de Segurança

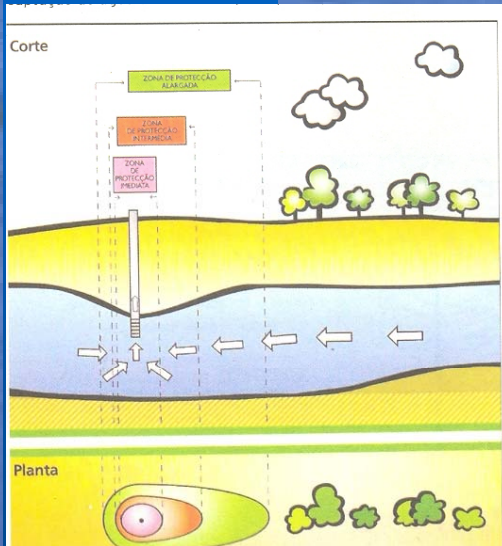


TIPO DE BARRAGEM	B. DE GRAVIDADE EM ALVENARIA
HMÁX:	26 M
ÁREA DE CAPTAÇÃO A MONTANTE	28 KM <sup>2</sup>
FUNÇÃO	IRRIGAÇÃO
ÁREA BENEFICIADA	63-65 HA. MAIS OS 100
DESENVOLVIMENTO DO COROAMENTO	153 M
CAPACIDADE DA ALBUFEIRA	1.200.000 M <sup>3</sup> /ANO MAX = 1.700.000 M <sup>3</sup> /ANO
CAUDAL DE PONTA DE CHEIA	320 M <sup>3</sup> /ANO T=30 ANO 557 M <sup>3</sup> /ANO T= 200 ANOS
ÁREA DE ALBUFEIRA	17 HA
COMPRIMENTO DA ALBUFEIRA	1235 M
<b>PROFUNDIDADE TOTAL DA FUNDAÇÃO DA B.</b>	PREVISTO =8-9 REAL = 16 METROS

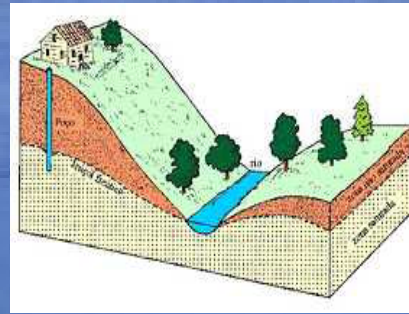


# Perímetro de Protecção

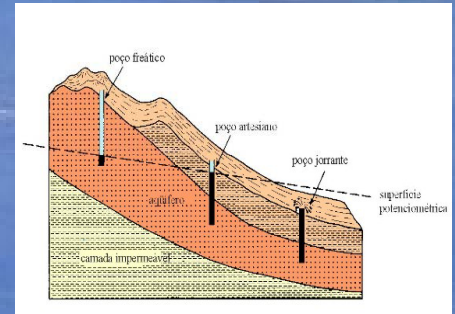
- o **Elaboração do modelo conceptual do sistema,**
- o **Modelação numérica do escoamento subterrâneo pelo método das diferenças finitas,**
- o **Delineação das zonas de protecção através do método do rastreio de partículas.**



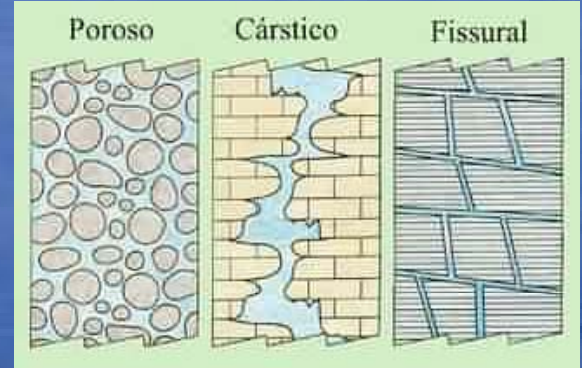
- a. Zonas de protecção imediata
- b. zona de protecção intermédia
- c. zona de protecção alargada



Aquífero Livre



Aquífero Confinado



$$\text{Método de Raio Fixo } R = \sqrt{\frac{Q \times t}{3,14 \times n \times H}}$$

tempo necessário para um poluente atingir a captação (dia)  
 porosidade eficaz do aquífero (%), (tabela)

# Perímetro de Protecção

## > Metodologia.

### 1. Distância de protecção a montante da captação.

$$r_{\text{máx}} = (0.00002x^5 - 0.0009x^4 + 0.015x^3 + 0,37x^2 + x)/F$$

Sendo:  $x=(2Ft/A)^{1/2}$  ,  $F=2\pi Kbi/Q$  e  $A=n/Ki$

Em que: **K** = condutividade hidráulica (m/dia), **Q** = caudal de extracção (m<sup>3</sup>/dia)  
**b** = espessura do aquífero (m), **i** = gradiente hidráulico, **n** = porosidade eficaz,  
**t** = tempo de propagação.

### 2. Distância de protecção a jusante da captação.

$$r_{\text{min}} = (-0.042x^3 + 0.37x^2 - 1,045x)/F$$

**Limitações:**  $X < -3,5$  deve aplicar-se uma dist. mínima de protecção=25m como medida de segurança.

### 3. Distância de protecção na perpendicular à direcção do fluxo.

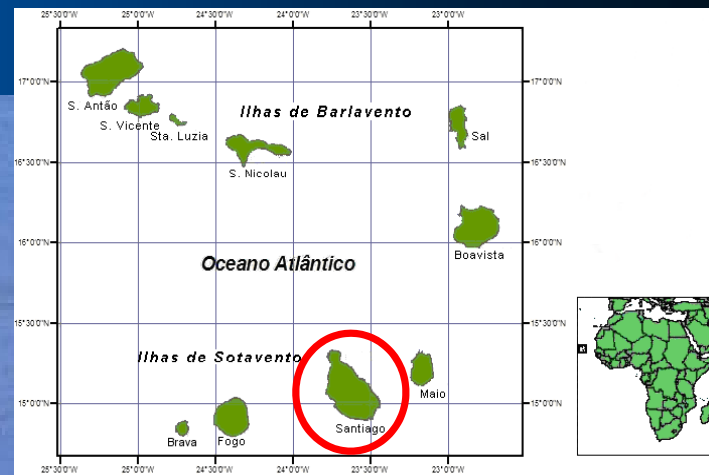
$$r_p = 4(Q/nb)^{1/2}$$

**Limitações:** .....  $r_{\text{máx}} > 4$  vezes ao  $r_{\text{min}}$  o erro de cálculo pode ser  $>15\%$

# Localização da Zona de Estudo

A ilha de Santiago fica situada na parte Sul do arquipélago de Cabo Verde, entre os paralelos  $15^{\circ} 20'$  e  $14^{\circ} 50'$  de latitude Norte e os meridianos  $23^{\circ} 50'$  e  $23^{\circ} 20'$  de longitude Oeste.

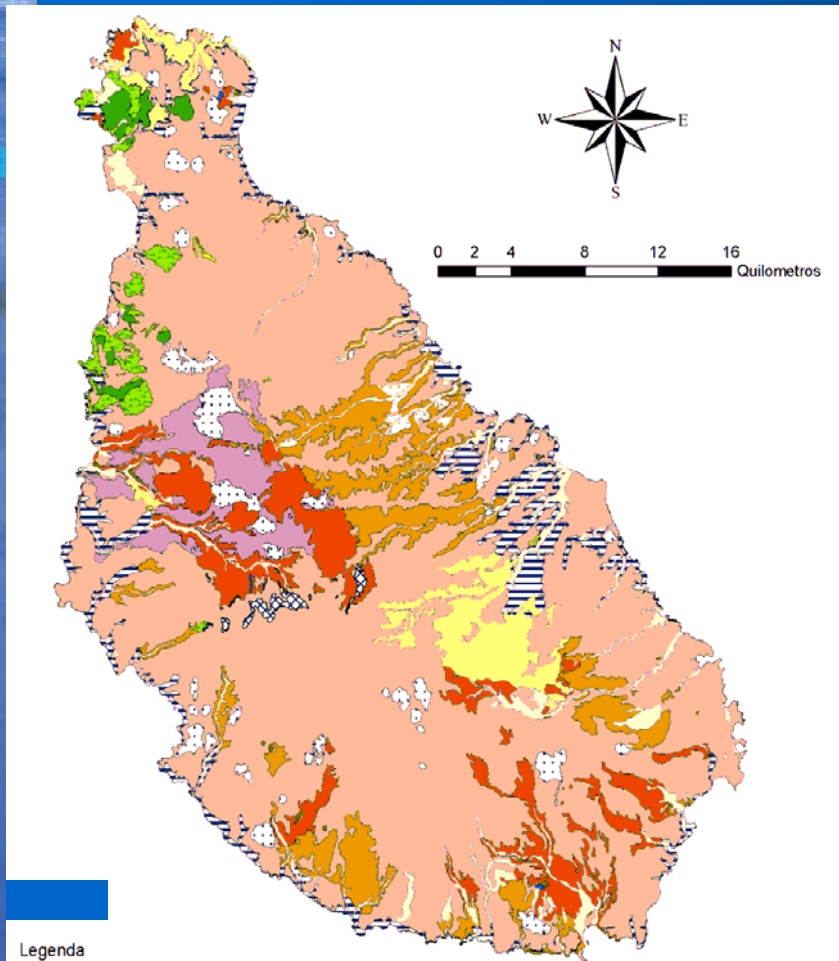
Tem forma adelgada na direcção NW-SE, com um comprimento máximo de 54,9km entre a ponta Moreia, a Norte, e a ponta Mulher Branca, a Sul, e uma largura máxima de 29km entre a ponta Janela, a Oeste, e a ponta Praia Baixo, a Leste.



Localização geográfica do arquipélago de Cabo Verde na costa ocidental de África.

- Com uma área de 991 km<sup>2</sup> é a maior ilha, correspondendo a cerca de 25% da área total do arquipélago. Pertence ao grupo das ilhas de Sotavento e ao das ilhas altas ou montanhosas.
- Santiago tem uma população de 236 627 habitantes (INE, 2000), aproximadamente 54,4% da população total do arquipélago, e é nesta ilha que se localiza a capital do país, a cidade da Praia.
- Santiago é a ilha onde as potencialidades agrícolas são mais importantes. Nela se produzem sobretudo culturas de sequeiro (milho e feijão), que nos anos bons (quando chove) produz em quantidades suficientes para o consumo próprio e para satisfazer as necessidades das outras ilhas.

# Geologia da Ilha de Santiago



- as **rochas eruptivas afaníticas** constituem a quase totalidade da parte emersa da ilha e as **faneríticas** pequenas áreas;
- os **produtos de origem explosiva têm importância reduzida**, formando os derrames a maior parte da ilha;
- os **filões** encontram-se um pouco por todo o lado;
- as **formações sedimentares** aparecem essencialmente na parte terminal das ribeiras (8% da ilha).

	Depósitos de vertente, enxurrada, areias dunares e praias marinhas
	Piroclastos basálticos (tufos, lapilli, bombas e escórias)
	Mantos basálticos
	Piroclastos subaéreos
	Conglomerados (Ft), conglomerados e calcarenitos (Fm), fossilíferos
	Domos, Chaminés e Mantos
	Mantos submarinos inferiores e superiores)
	Mantos subaéreos (piroclastos e chaminés - indiferenciados)
	Piroclastos e depósitos de nuvem ardente
	Tufos e Brechas
	Depósitos conglomerático-brechóides (Ft), conglomerados e calcarenitos (Fm)
	Mantos e piroclastos
	Gabros e sienitos feldspatódicos, carbonatitos
	Complexo filoneano de base (basanitos, ancaratritos e limburgitos)
	Piroclastos de fonitos e rochas afins

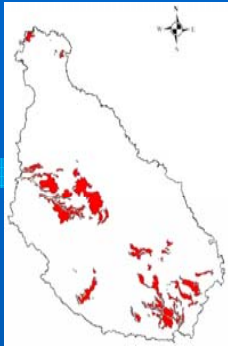
Legenda

Carta Geológica da Ilha de Santiago, Cabo Verde, digitalizada a partir de Serralheiro (1977).

Anterior

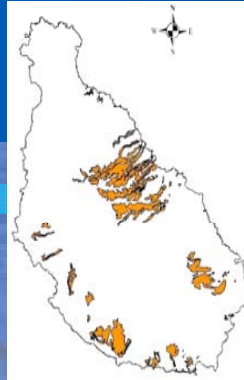
Seguinte

## Formação do Complexo eruptivo interno antigo - CA



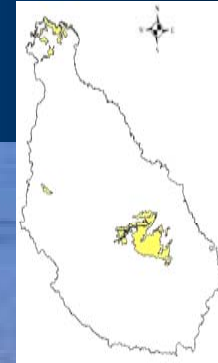
- **Filões básicos** e **fono-traquitos**, e algumas intrusões de rochas granulares silicatadas.
- São os primeiros derrames do vulcão.

## Formação dos Flamengos - λρ



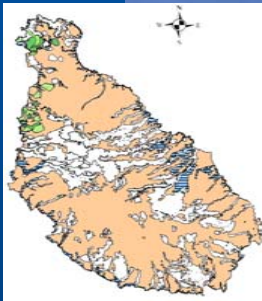
- Constituída basicamente por mantos, brechas e piroclastos, básicos, de grande uniformidade e **extensão**, de natureza submarina.

## Formação dos Órgãos - CB



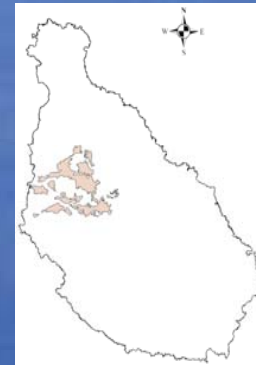
- Constituída basicamente por **blocos muito espessos**, angulosos, sub-angulosos e arredondados de natureza basáltica.

## Complexo eruptivo do Pico da Antónia - PA



- **Maços**, profundamente modelados pela erosão ocupam cerca de 70% da área estudada.
- É a partir destes maços que nascem a maioria das ribeiras **direccionadas para o mar**, sendo estas formadas nos seus leiros por formações recentes e antigas.

## Formação da Assomada - A



- Constituída **exclusivamente** por formações **sub-aéreas**, que se traduz pela emissão de escoadas de lavas de fácies basáltica.

Anterior

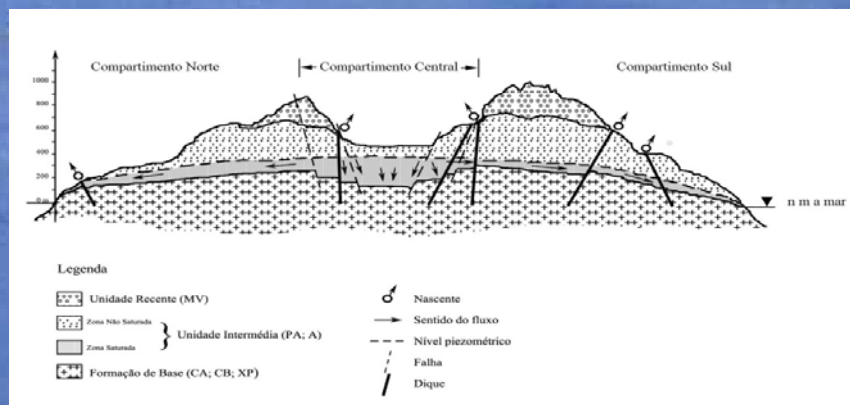
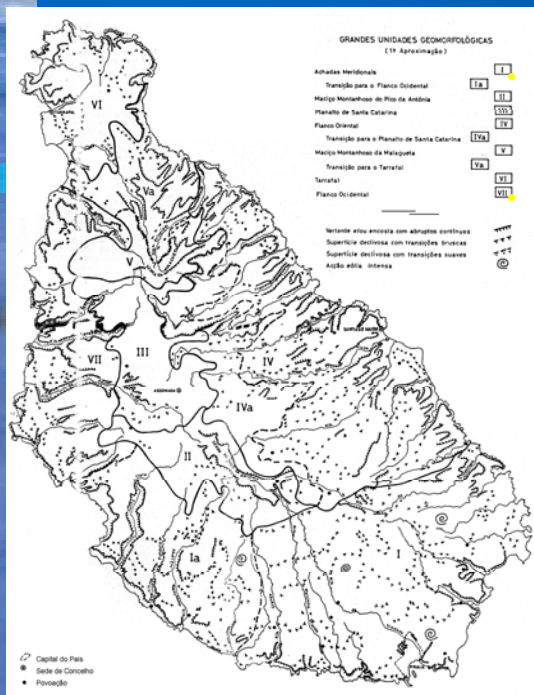
Seguinte

# Geomorfologia

- **Morfologias complexas**, caracterizadas sobretudo pelas grandes altitudes, grandes pendentes de terreno, **orografia acentuada** e extensas achadas.

Nos **processos de recarga**, têm especial relevância os parâmetros morfológicos que condicionam a infiltração, nomeadamente, a extensão territorial (Falkland & Custodio, 1991).

Os **processos de descarga** são, por seu lado, marcados pela altitude do terreno, nomeadamente pelos **grandes declives associados a escarpas de origem tectónica**, (Rodrigues, 1993; Meneses, 1993).



## Modelo Hidrogeológico conceptual

um **grande reservatório central de água subterrânea** constituído essencialmente pelas formações da **unidade intermédia**.

- **Recebe infiltração directa** da precipitação da água da chuva ou da condensação dos nevoeiros e é drenado por inúmeras nascentes e/ou ribeiras que sulcam a ilha em direcção ao mar.

# Geomorfologia

## Espelho de Captação da Água



Anterior

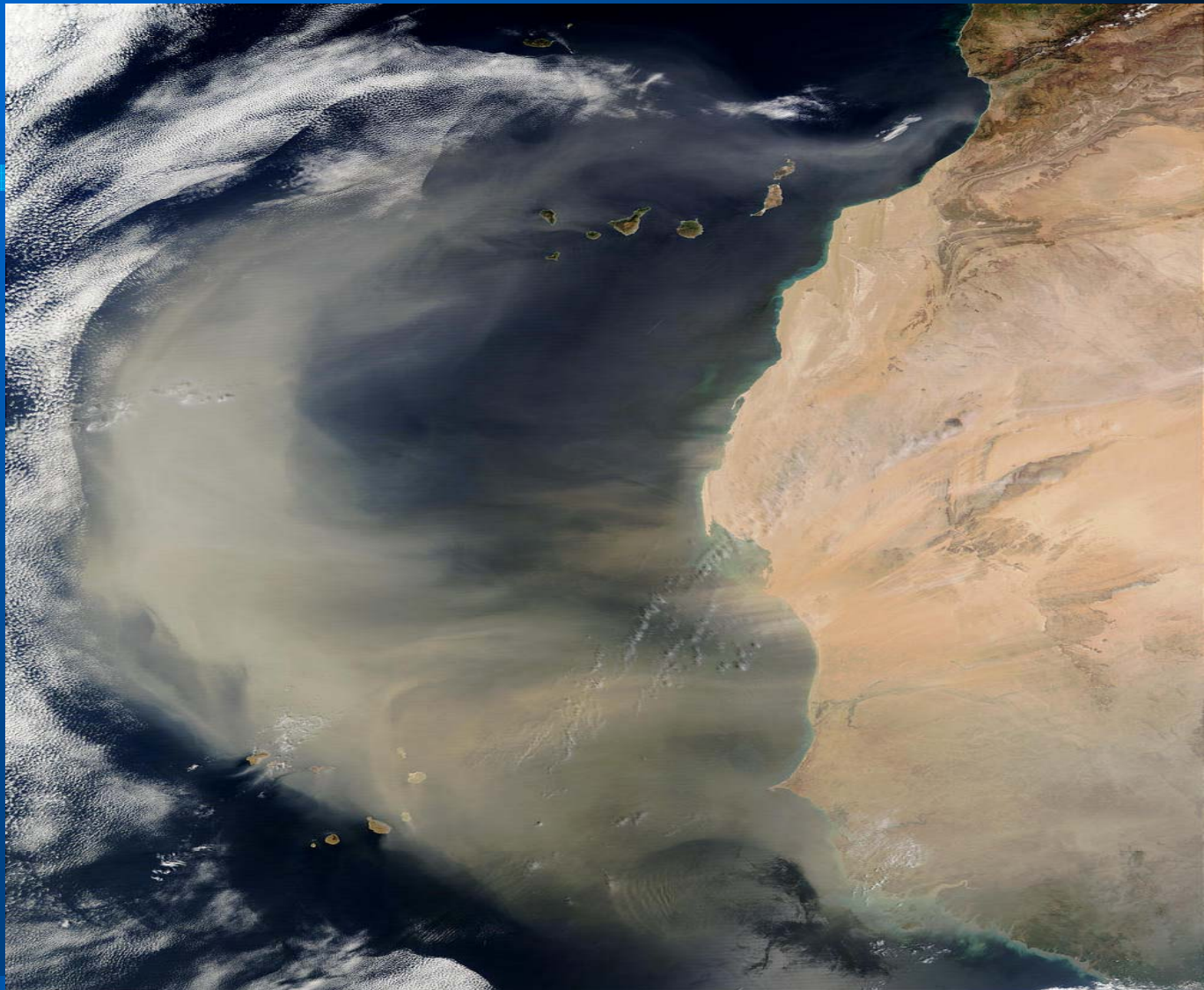
Seguinte

# Perfil de Vulnerabilidade

- ❑ **Caracterizada por uma escassez dos recursos hídricos de superfície, resultante das baixas precipitações pluviométricas, que apresentam irregularidades inter anuais, responsáveis por secas periódicas de efeitos muitas vezes catastróficos. Por outro lado, a região também está sujeita a taxas de evapotranspiração potencial muito elevadas.**
- ❑ **A pouca cobertura vegetal e a pequena espessura do solo constituem um ecossistema frágil cujas características físico-ambientais reduzem substancialmente o seu potencial produtivo. A pequena disponibilidade de água superficial aliada à baixa e irregular pluviosidade explica a grande dependência dos habitantes da região em relação à água subterrânea, mesmo sendo essa, na maior parte, uma alternativa fraca pela reduzida vocação hidrogeológica das rochas vulcânicas.**
- ❑ **Tratando-se de uma ilha, os aquíferos (de água doce) mantêm um equilíbrio delicado com a água do mar, expresso pelo avanço e recuo da interface água doce-água salgada. A exploração racional dos aquíferos existentes implica o conhecimento da evolução desta interface quer do ponto de vista espacial quer temporal. A importância deste conhecimento cresce, quando se verifica que é ao longo da costa que se concentram as maiores densidades demográficas, aumentando significativamente a procura de água.**



# Perfil de Vulnerabilidade



Anterior

Seguinte

# Perfil de Vulnerabilidade

## Desafios a Sobrevivência, Pobreza e Insularidade



Anterior

Seguinte

16 10 05

# Perfil de Vulnerabilidade



Anterior

Seguinte

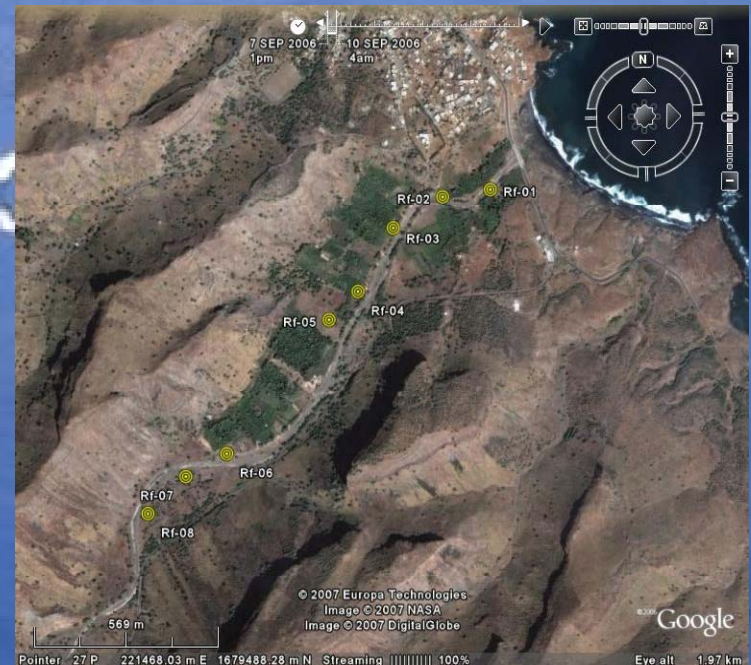
# Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos

- Os aquíferos constituem um recurso importante de água doce cuja qualidade tem vindo a deteriorar devido ao incremento das necessidades de água, **consequência directa do aumento demográfico, industrial e agrícola** que são verificadas. **A exploração intensiva e prolongada em captações muito próximas do mar, onde não existe uma fonte de compensação destas extracções por recarga natural ou artificial do aquífero, pode provocar o avanço da interface água doce – água salgada no sentido dos furos e a sua posterior contaminação.**



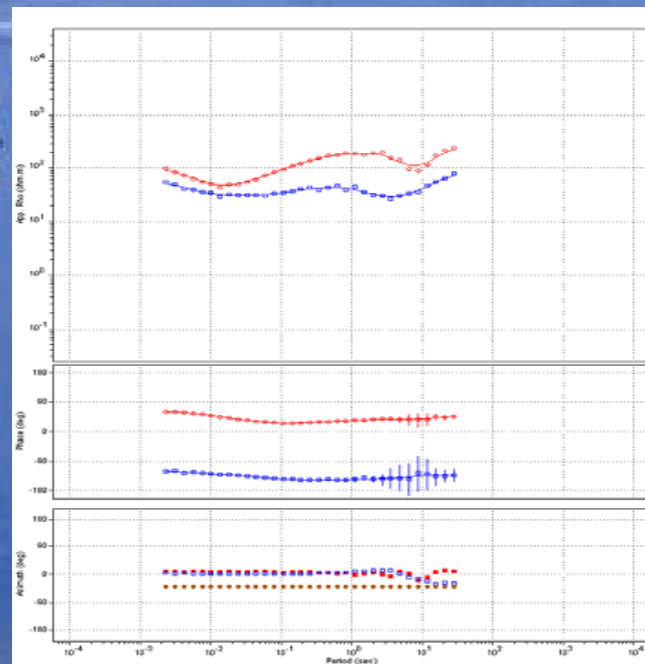
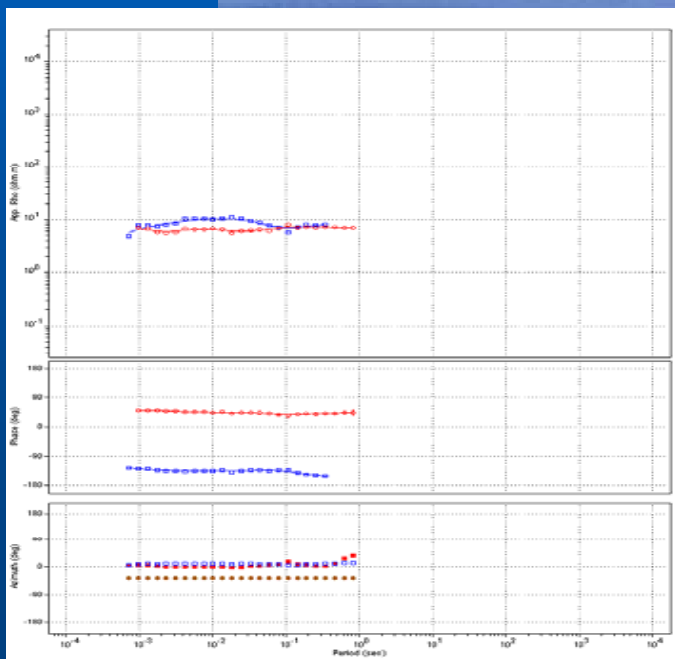
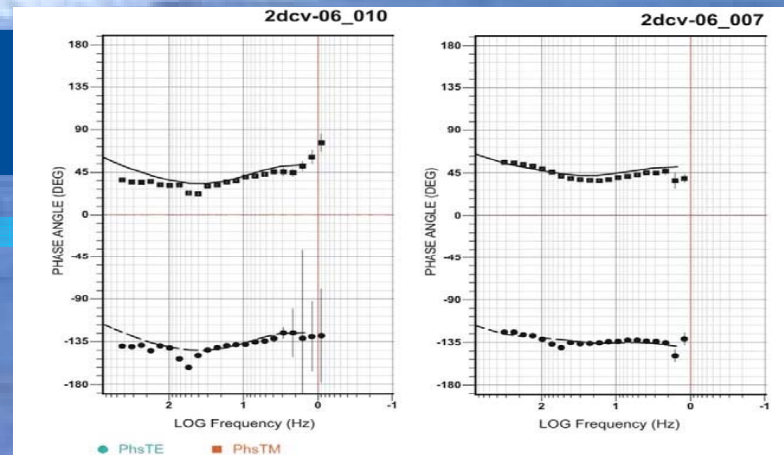
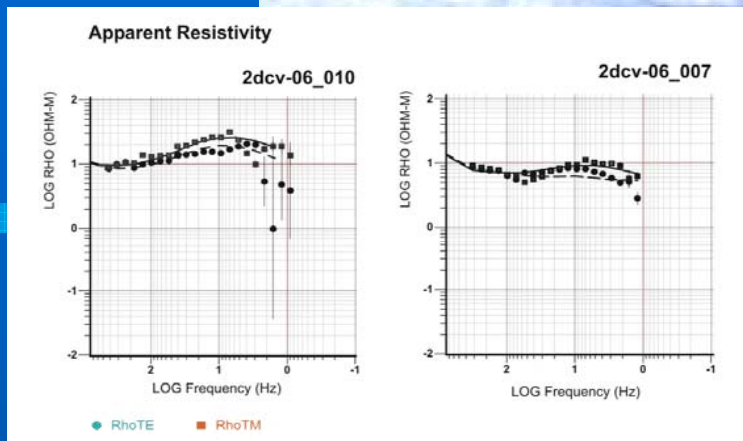
Anterior

Seguinte



Há uma grande pressão sobre as terras para a prática da agricultura de sequeiro.

# Curvas de Resistividade/Condutividade



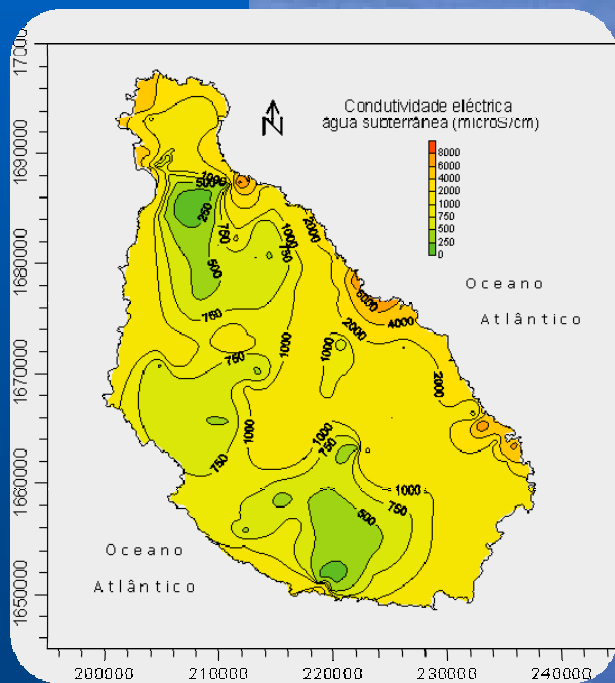
Anterior

Seguinte

# Curvas de Resistividade/Condutividade, II

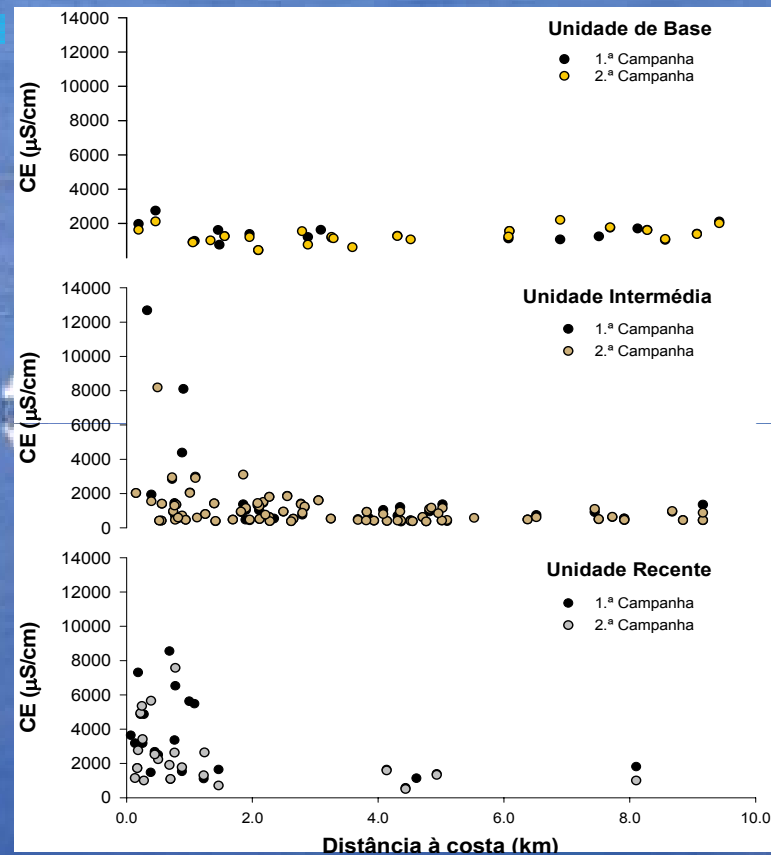
O aumento da CE pode **resultar não só** de **processos naturais de interacção água - rocha**, **mas também** de **processos de contaminação** (industrial, doméstica, agrícola, intrusão salina).

**Unidade de Base** - de 440 mS/cm e 2750 mS/cm,  
**Unidade Intermédia** - de 362 mS/cm e 53500 mS/cm  
**Unidade Recente** - de 503 mS/cm e 8550 mS/cm



Distribuição espacial da condutividade eléctrica da água subterrânea na ilha de Santiago.

Distribuição espacial da CE da água subterrânea na ilha de Santiago.



Evolução da CE VS distância à costa na ilha de Santiago.

Anterior

Seguinte

# Grandes Preocupações

## Erosão dos Solos

O balanço hídrico mostra que apenas **13%** das **chuvas** alimentam os aquíferos;  
**87%** perdem sobre forma de escoamento superficial e evaporação.



Escoamento superficial não aproveitado

Anterior

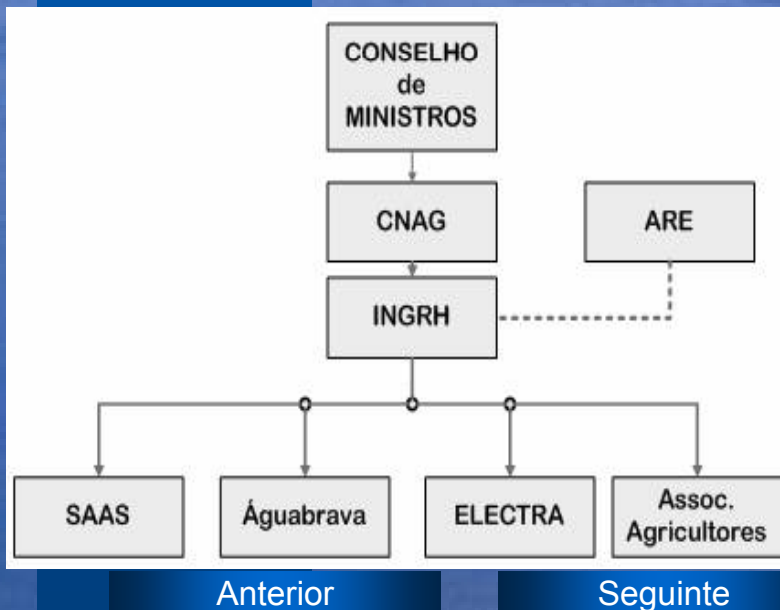
Seguinte



# Situação Vs Desafios

## A nível Institucional:

- ❑ Um quadro legal e institucional que se foi adequando aos novos desafios (Código de Água -1984, Plano Director, Visão para e PAGIRH);
- ❑ Uma priorização ao sector com a correspondente afectação de recursos financeiros (mais de um milhão de contos entre 2001 e 2006);
- ❑ Escolha do sector da água como um dos eixos prioritários da política de cooperação (bilateral e multilateral)



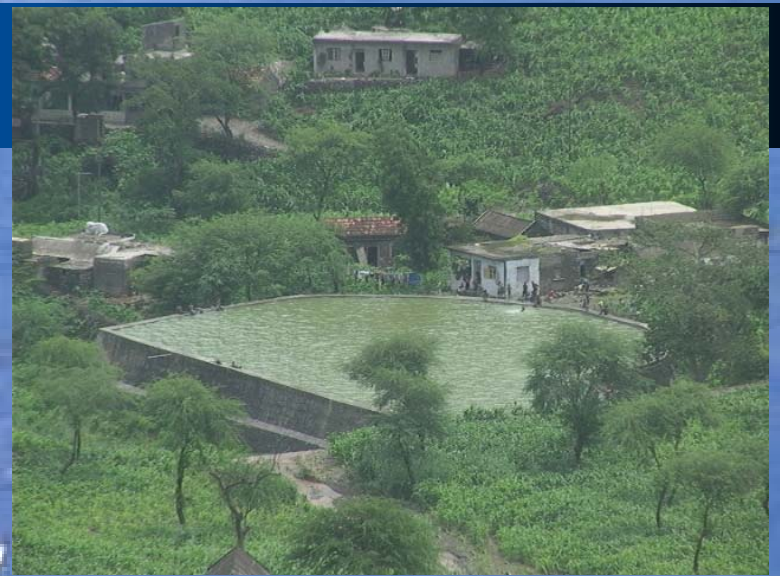
**A Política do Sector dos R.H. é orientada pelo:**

- Programa do Governo;
- Grande Opções do Plano;
- DECRP;
- PANAII.

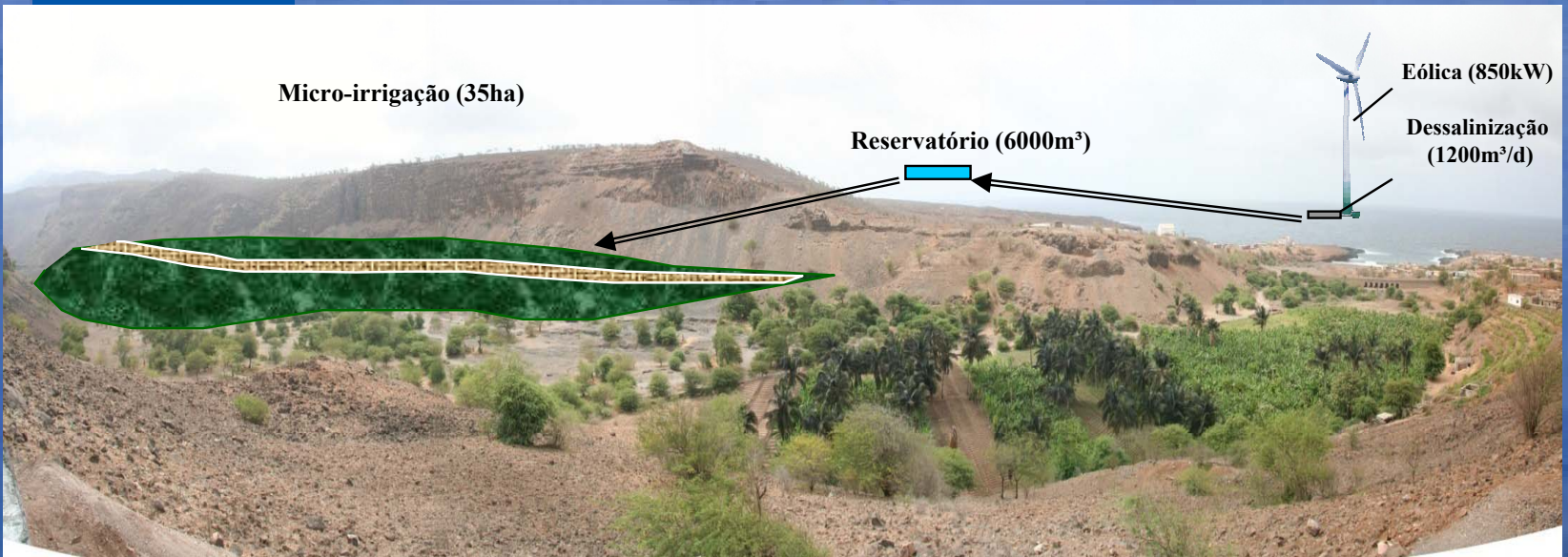
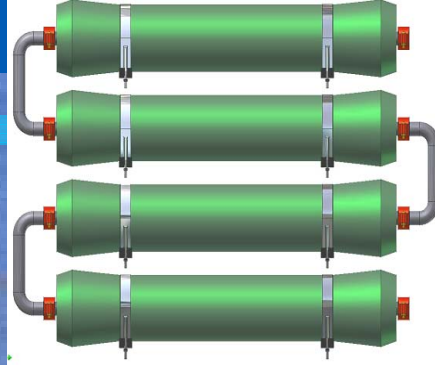
**Muito brevemente pelo (PAGIRH)**



# Situação Vs Desafios



# Situação Vs Desafios



Anterior

Seguinte

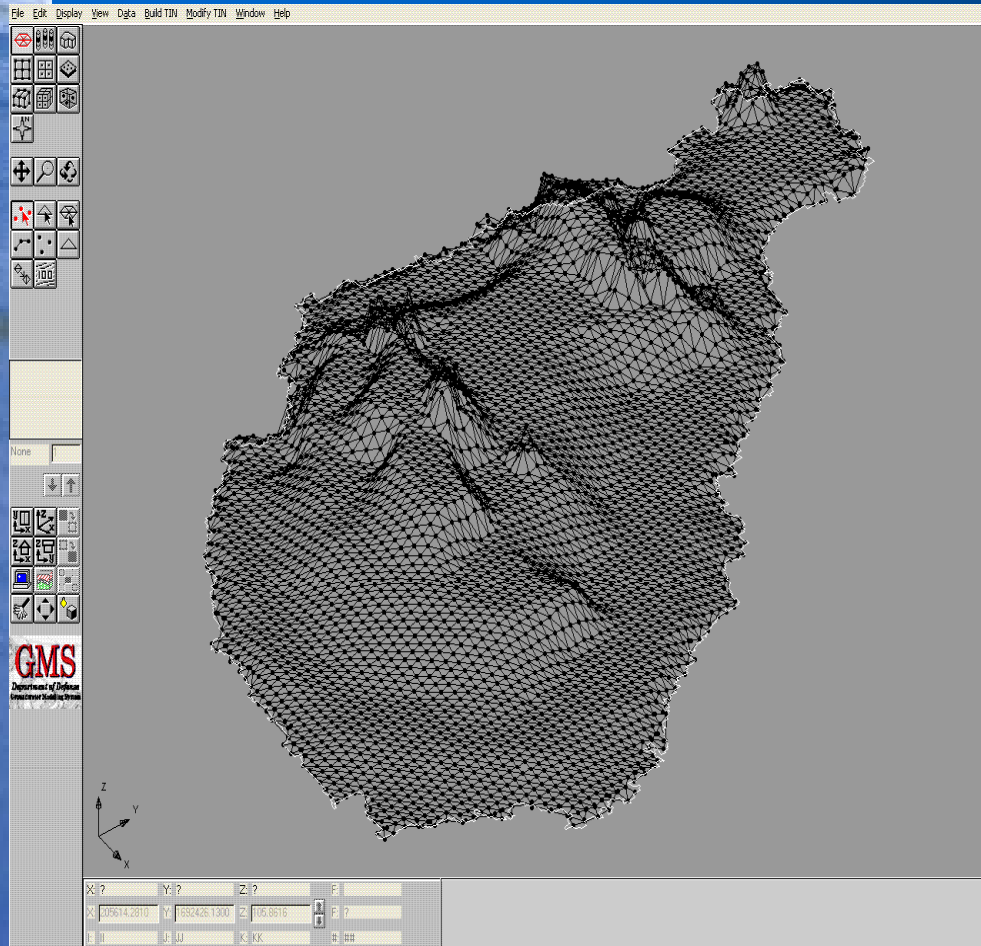
# Identificação das Acções Vs Estratégias

## Principais Problemas:

- ❑ **Escassez Hídrica** → baixa capacidade de armazenamento.
- ❑ **Sazonalidade** → Limitação do acesso a água potável e ao saneamento.
- ❑ **Poluição das águas** → dependência extrema em R.H. Subterrâneos.
- ❑ **Salinidade** → segurança alimentar

O aumento de volume de água doce nos aquíferos **consegue-se** adoptando **regras que controlem a extracção**, planeando correctamente os locais de descarga dos sistemas de drenagens e tratamento de águas pluviais e residuais, **promovendo políticas para a utilização racional e sustentável da água**, incrementando a recarga com água de superfície e implementando medidas que façam diminuir o volume de água salgada/salobra no aquífero. **Conceito Water Demand Management.**

# Identificação Vs Aplicações



Ocupação do solo				Pontuação
<b>Áreas agrícolas</b>				
Perímetros de rega ( culturas anuais , ...)				90
Culturas Permanentes (vinhas, pomares, oliveiras, ...)				70
Áreas agrícolas heterogêneas				50
Pastagens e áreas agro-florestais				50
<b>Áreas artificiais</b>				
Descargas de resíduos industriais e aterros				100
Pedreiras, estaleiros, áreas mineiras a céu aberto				80
Áreas urbanas contínuas, aeroportos, portos, vias férreas, áreas com actividades industriais e comerciais, ...				75
Áreas urbanas descontínuas				70
<b>Áreas naturais</b>				
Ambientes aquáticos (sapais, salinas, etc.)				50
Florestas e zonas semi-naturais				0
Massas de água				0

1ª delimitação das zonas Vulneráveis

Cartas iso -  
piezométricas e  
determinação dos  
principais sentidos de  
fluxos.

Anterior

Seguinte

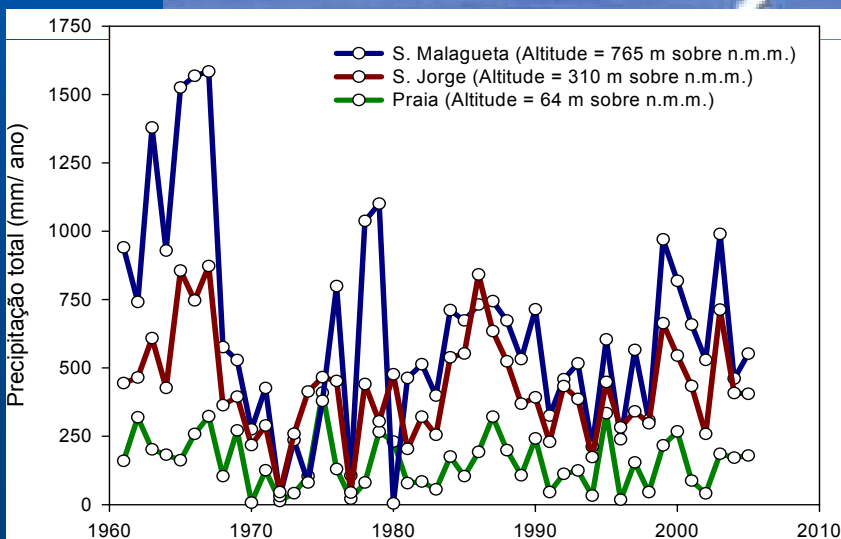
# Recarga de H<sub>2</sub>O Subterrânea

Diversos autores têm tentado determinar os valores de recarga subterrânea para o arquipélago de Cabo Verde, quer utilizando:

- **Métodos empíricos** (Burgeap, 1974; Fernandopullé, 1979; Bossher, 1981; Dittrich, 1982; Burgeap, 1983; PNUD, 1992), quer
- **Métodos que implicam a realização de balanços hidrológicos** (Fernandopullé, 1979; Burgeap, 1983; PNUD, 1992).
- **Os valores a que chegam são muitas vezes díspares e revelam a dificuldade de encontrar um método adequado à estimativa da recarga de água subterrânea na região.**

**A recarga de água subterrânea na ilha de Santiago está fortemente condicionada pelo:**

- **Clima, tipo de solos, geologia, geomorfologia e a hidrologia.**



**Evolução da precipitação na ilha de Santiago desde 1963 à actualidade (dados medidos na cidade da Praia, S. Jorge e Serra da Malagueta).**

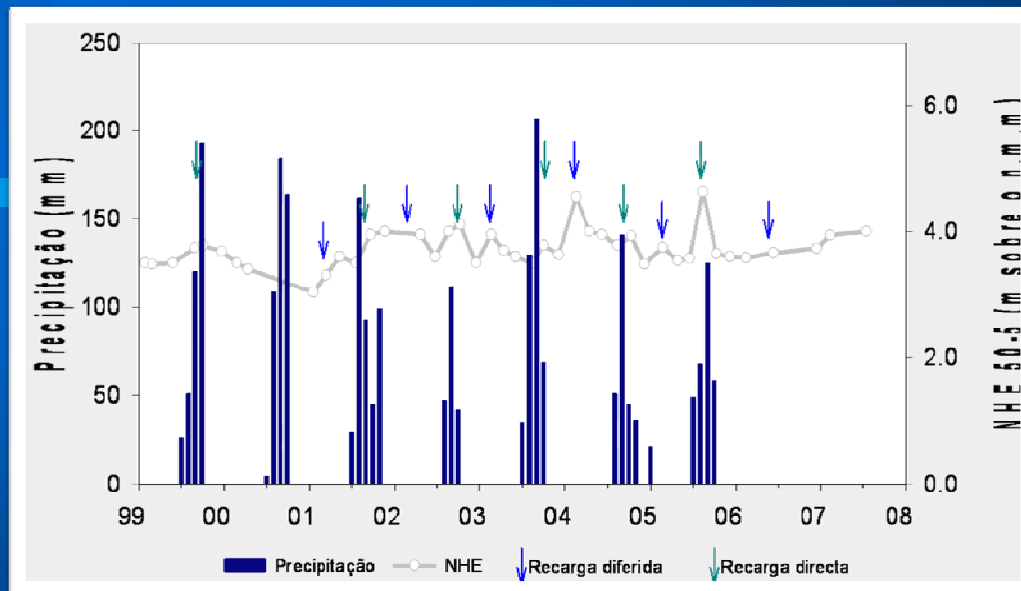
Anterior

Seguinte

# Recarga de H<sub>2</sub>O Subterrânea

As principais áreas de recarga subterrânea da ilha estão localizadas na parte central e +alta da ilha, onde:

- (1) ocorrem as principais precipitações e nevoeiros orográficos;
- (2) a evapotranspiração é menor;
- (3) predominam formações geológicas recentes (principalmente a formação do Monte das Vacas).
- (4) Nas zonas mais baixas da ilha e próximas da costa também ocorrer recarga subterrânea importante.



Identificação do impacto da recarga directa e diferida na evolução do nível piezométrico no poço 50-5.

- Nos **processos de recarga**, têm especial relevância os parâmetros morfológicos que condicionam a infiltração, nomeadamente, a extensão territorial (Falkland & Custodio, 1991).

# Recarga de H<sub>2</sub>O Subterrânea<sup>31</sup>

- A **recarga subterrânea** na ilha de Santiago **varia** significativamente com a altitude e com o método de cálculo.
- PARA EFEITOS DE RECARGA DE AQUÍFEROS EM CABO VERDE, **O MONITORAMENTO PLUVIOMETRICO E O BALANÇO DOS CLORETOS** SÃO OS MAIS APROPRIADOS.
- o método de Penman-Grindley não permite o cálculo na zona árida.

# Estrutura Vs Banco de Dados

**Estudo hidrogeoquímico detalhado** das águas subterrâneas da ilha com o objectivo de:

- **estudar** por um lado as relações existentes entre o quimismo da água subterrânea e as características hidrogeológicas e mineralogia das principais formações aquíferas e,
- por outro lado, **avaliar a qualidade da água para diferentes usos identificando potenciais focos de contaminação.**

A **metodologia seguida** incluiu:

- a **caracterização da distribuição espacial** das principais características físico-químicas;
- a **identificação dos principais processos geoquímicos de interacção água - rocha;**
- o **estudo de outros processos responsáveis pela variação do quimismo da água subterrânea**, com **especial ênfase nos processos de mistura**; e,
- a **identificação de indicadores de contaminação.**



# Banco de Dados

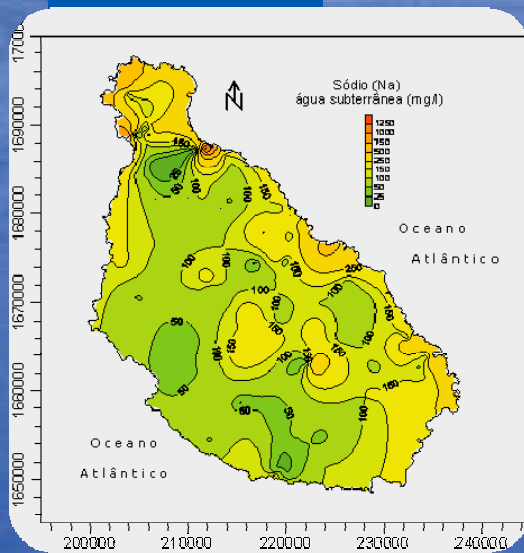
## pH

pH que variam:

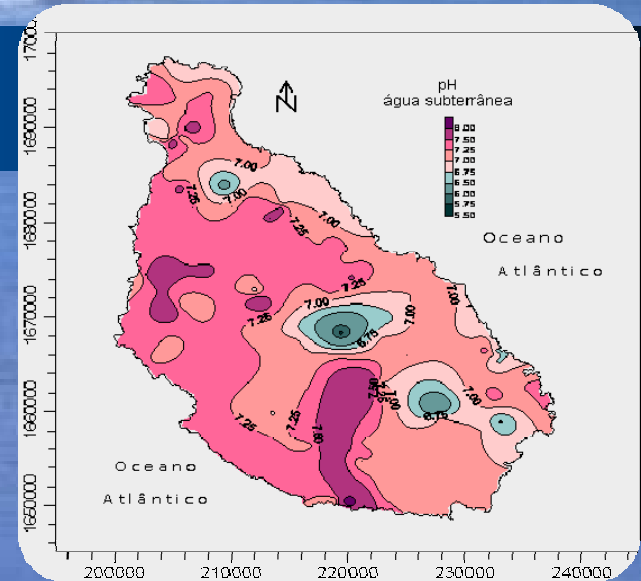
7,0 – 7,3 na metade oriental da ilha,

valores de pH >7,3 na metade mais ocidental da ilha

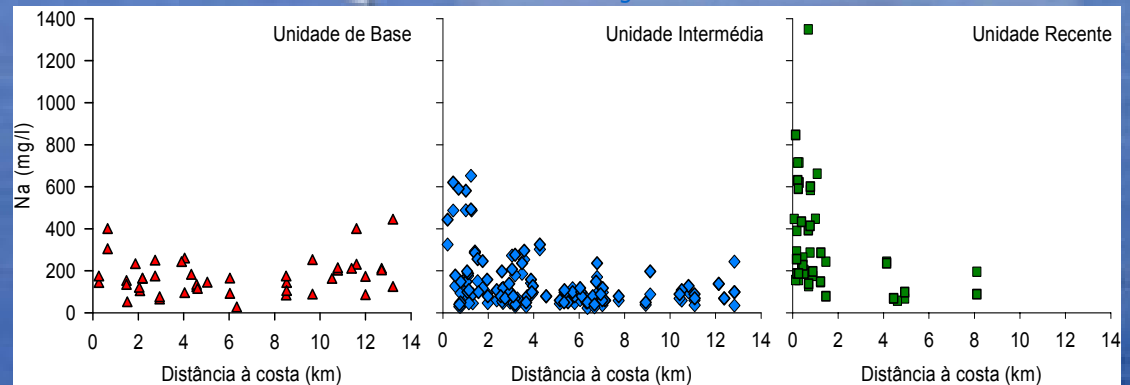
## Na<sup>+</sup>



Distribuição espacial das concentrações de sódio na água subterrânea da ilha de Santiago



Distribuição espacial do pH da água subterrânea na ilha de Santiago.



Comparação da evolução das concentrações do ião sódio com a distância à costa na ilha de Santiago.

Anterior

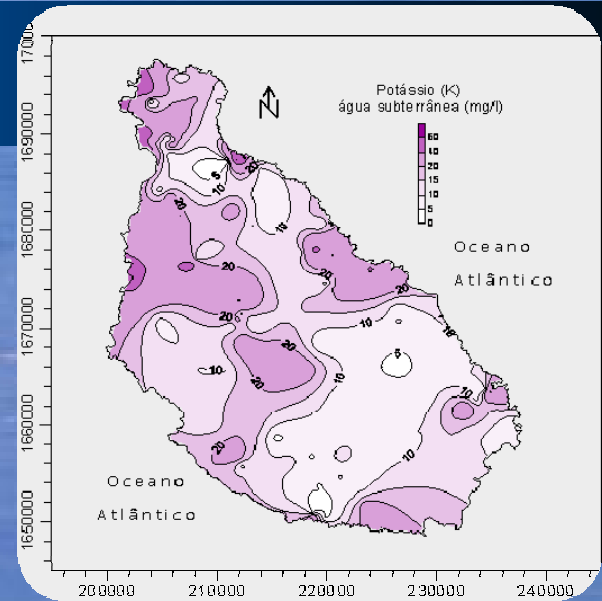
Seguinte

# Banco de Dados

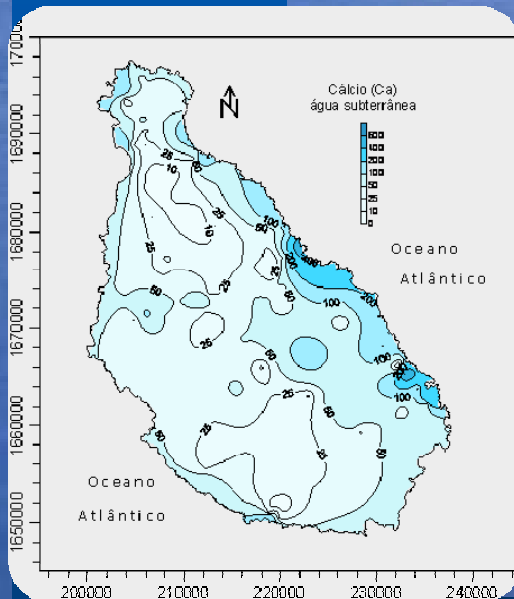
## K<sup>+</sup>

### Origem:

- processos de **interação água – rochas** vulcânicas alcalinas ricas em minerais como os feldspatos potássicos, ou com zonas de metassomatismo potássico (Unidade de Base) ou
- ainda **relacionado com alguns factores de origem antrópica**, como a **contaminação agrícola**, onde o **potássio** é utilizado na composição química dos fertilizantes.



Distribuição espacial das concentrações de potássio na água subterrânea da ilha de Santiago.



## Ca<sup>+2</sup>

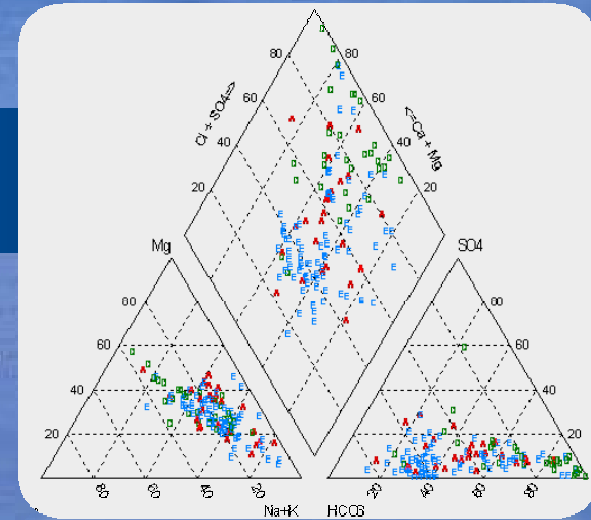
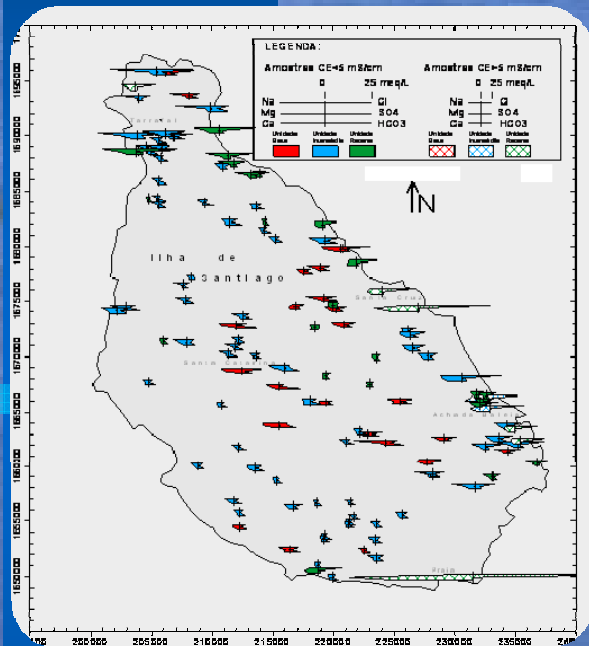
### Origem:

- a **dissolução de minerais carbonatados** como a calcite,
- **Furos profundos que captam água com maiores tempos de residência;**
- os processos de intrusão salina, por intercâmbio catiónico com o ião sódio.

Anterior

Seguinte

# Fácies hidroquímicas



Legenda: ■ Unidade Recente    ◆ Unidade Intermédia  
▲ Unidade de Base

**Distribuição das principais fácies hidroquímicas nas diferentes unidades hidrogeológicas.**

**Distribuição das principais fácies hidroquímicas nas diferentes unidades hidrogeológicas.**

águas subterrâneas apresentam **fácies hidroquímica dos tipo:**

- 1. cloretada-bicarbonatada sódica (Cl-HCO<sub>3</sub>-Na)**- Unid Base;
- 2. bicarbonatada-cloretada sódica (HCO<sub>3</sub>-Cl-Na)** – Unid Int;
- 3. cloretada sódica (Cl-Na)** - Unidade Recente

# Qualidade e Vulnerabilidade da $H_2O$ Subterrânea

A **qualidade** da água subterrânea na ilha é **bastante variável**, sendo **os principais riscos** resultantes da:

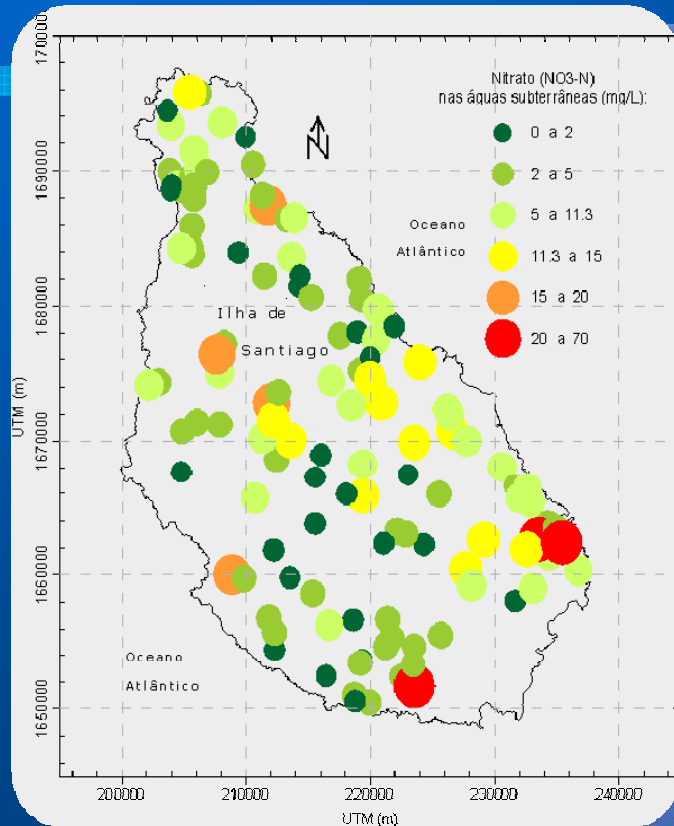
- 1. Contaminação Difusa** associada à agricultura;
- 2. drenagem de efluentes humanos;**
- 3. actividade de pastoreio livre de bovinos e caprinos ao longo das ribeiras e junto à costa; e,**
- 4. Intrusão Salina**, provocada pela sobre exploração dos recursos subterrâneos junto à costa.

O **grau de vulnerabilidade à contaminação** também **varia de unidade hidrogeológica para unidade**, sendo **maior na Unidade Recente** pois trata-se de uma unidade superficial e muito permeável.

A representação das **composições isotópicas** de  $d^{18}O$  e  $d^2H$  versus a **CE** mostra um **pequeno enriquecimento isotópico com o aumento de salinidade**, o que **implica que apesar de não ser a causa fundamental da salinização, a evaporação também pode estar a contribuir para um aumento de salinidade nos níveis aquíferos mais superficiais junto à costa.**

# Riscos de Contaminação da H<sub>2</sub>O Subterrânea

## Contaminação Agrícola

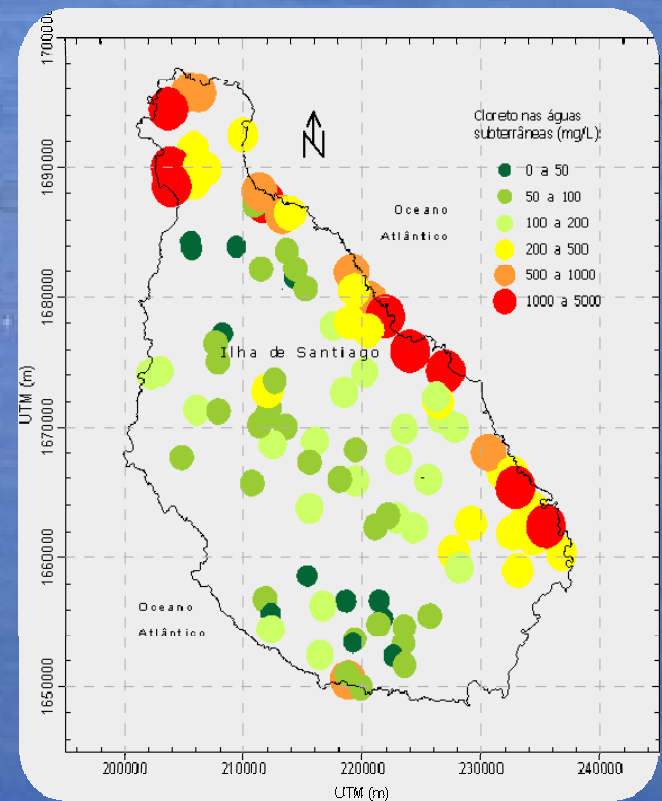


Distribuição do conteúdo de **NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** nas águas subterrâneas, com indicação dos **pontos acima do valor máximo admissível** para consumo humano.

Anterior

Seguinte

## Intrusão salina



Distribuição do conteúdo de **Cl<sup>-</sup>** nas águas subterrâneas com **clara indicação de salinização** dos recursos de água doce **ao longo de toda a costa oriental da ilha**

# Métodos Utilizados

- **Revisão da bibliografia, para obtenção da máxima informação disponível referente aos antecedentes geológicos, hidrogeológicos e ambientais da zona.**
- **Georeferenciação (ARCVIEW), para o mapa Hidrogeológico do Sistema Aquífero.**
- **Interpretação de fotografias de satélite da zona, para a identificação de estruturas geológicas, que possibilitaram melhorar o conhecimento do sector oriental do sistema aquífero, com base na cartografia geológica existente.**
- **Realização de trabalhos de campo destinados a elaboração de um inventário completo de pontos de água da zona de estudo.**
- **Utilizados ensaios de bombagem existentes no INGRH.**
- **Utilização da ferramenta SIG ( ARCGIS 9.2) para a realização da cartografia a vulnerabilidade utilizando o método DRASTIC.**

# Objectivo Geral

- Traçar a carta da vulnerabilidade a contaminação das águas subterrâneas do sistema aquífero, utilizando o método D.R.A.S.T.I.C.

## ● Objectivo Específico

- Determinar o índice DRASTIC

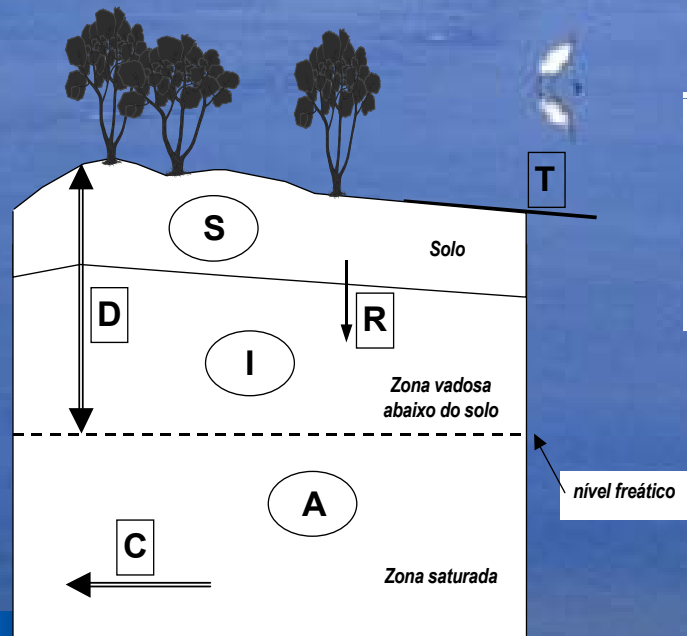
- O método DRASTIC foi **desenvolvido a partir dos seguintes pressupostos** (cf. Aller et al.,1987):
  - 1) o contaminante é introduzido à superfície do terreno,
  - 2) o contaminante é transportado verticalmente até ao aquífero pela água de infiltração,
  - 3) o contaminante tem a mobilidade da água,
  - 4) a área mínima avaliada pelo DRASTIC é de 0,4 km<sup>2</sup> (100 acres).
- O índice DRASTIC corresponde ao somatório ponderado de 7 valores correspondentes aos seguintes 7 parâmetros ou indicadores hidrogeológicos (cf. Aller et al.,1987):
  - **D** - Profundidade do Topo do Aquífero,
  - **R** - Recarga do Aquífero,
  - **A** - Material do Aquífero,
  - **S** - Tipo de Solo,
  - **T** - Topografia,
  - **I** - Influência da Zona Vadosa,
  - **C** - Condutividade Hidráulica do Aquífero.

O índice de vulnerabilidade DRASTIC **obtem-se através da seguinte expressão:**

$$DRASTIC = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i$$

onde ***i*** é o índice atribuído ao elemento em causa e ***p*** é o seu peso. O peso de cada parâmetro reflecte a sua importância relativa. O peso varia de 1 a 5 da seguinte forma:

PARÂMETRO	D	R	A	S	T	I	C
PESO	5	4	3	2	1	5	3



- D = Profundidade do Topo do Aquífero
- R = Recarga do Aquífero
- A = Material do Aquífero
- S = Tipo de Solo
- T = Topografia
- I = Influência da Zona Vadosa
- C = Condutividade Hidráulica do Aquífero



# VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

NÃO É UMA CARACTERÍSTICA QUE SE POSSA MEDIR *IN SITU* !!

**Depende (entre outros):**

- *Do grau de eficácia dos processos de atenuação natural que se desenvolvem nas camadas superiores do aquífero*
- *Da constituição litológica das formações onde poderá vir ocorrer um fenómeno de poluição*
- *É o grau da potencial **susceptibilidade da água** subterrânea a uma fonte de poluição tópica ou difusa.*

## TIPOS DE VULNERABILIDADE

### ESPECÍFICA

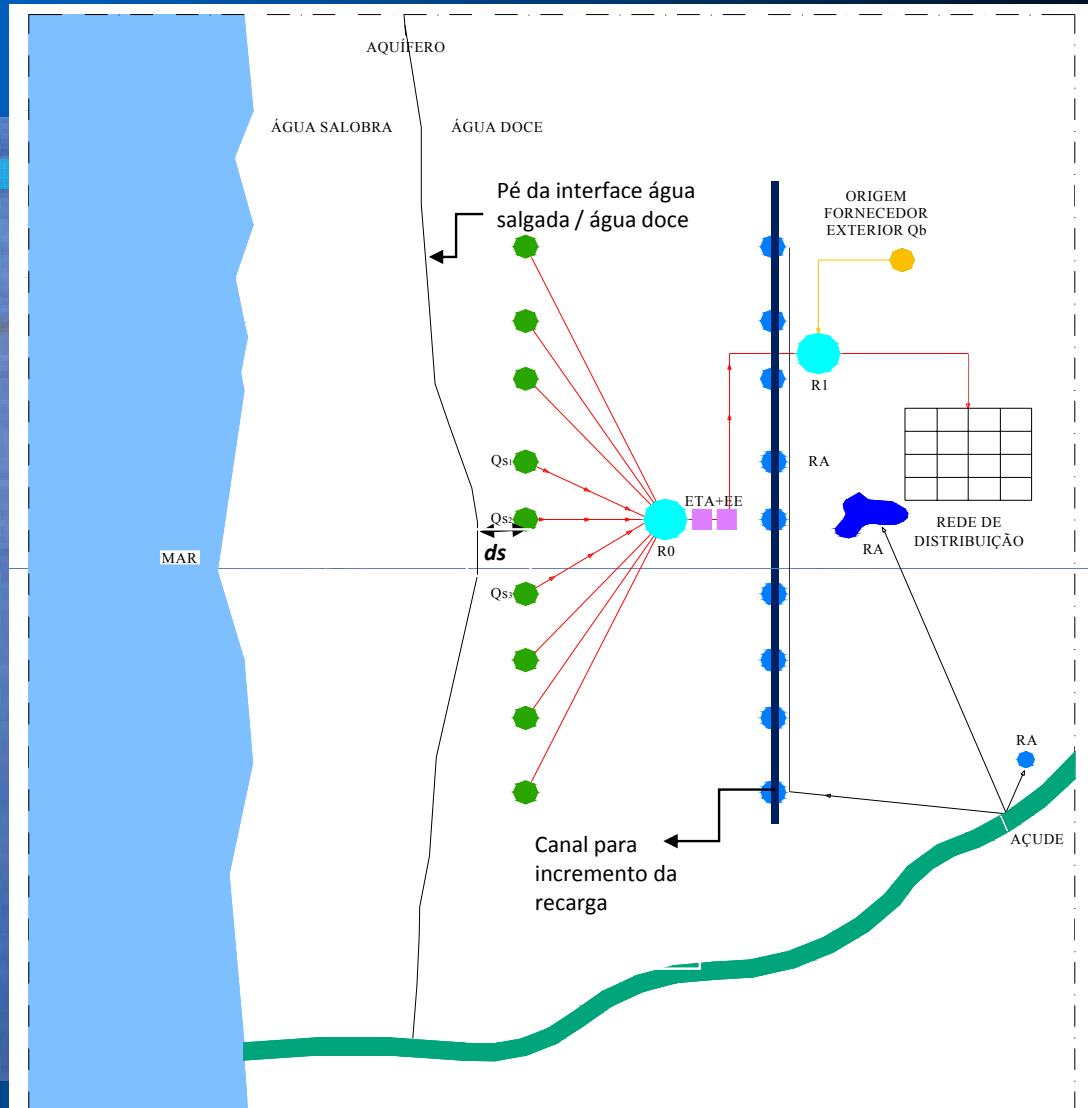
*Sempre que se considera também as propriedades de um poluente específico.*

### INTRÍNSECA

*Características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas do meio sendo por isso independente do tipo de poluente*

# Recarga de Aquíferos

Esquema de sistemas de captação, de abastecimento de água e de incremento da recarga



# Problemas e Metodologia de resolução <sup>43</sup>

- 1 – Para cada cenário de extração do aquífero e de recarga no canal, pretende calcular-se a posição do pé da interface;
- 2 – Para cada cenário de recarga no canal, pretende calcular-se o efeito na quantidade máxima que é possível extrair;
- O estudo realizado teve, também, como propósito cobrir um leque de eventuais locais de implantação e diversas distâncias de segurança.

$$x_{s,\min} \leq x_s \leq x_{s,\max}$$

$$x_s = 100, 150\dots, 1300 \text{ m}$$

$$ds_{\min} \leq ds \leq ds_{\max}$$

$$ds = 100, 200\dots, 800 \text{ m}$$

Anterior

Seguinte

## Eq.s que regem o fenómeno e Solução de Strack

As equações que caracterizam o escoamento num sistema aquífero costeiro podem ser definidas por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (K_{xx})_d \frac{\partial h_d}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (K_{yy})_d \frac{\partial h_d}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_{zz})_d \frac{\partial h_d}{\partial z} \right] + Q_d = S_d \frac{\partial h_d}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (K_{xx})_s \frac{\partial h_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (K_{yy})_s \frac{\partial h_s}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_{zz})_s \frac{\partial h_s}{\partial z} \right] + Q_s = S_s \frac{\partial h_s}{\partial t}$$

Considerando  $n$  captações com caudal  $Q_i$ , e escoamento de água doce  $q$ , o potencial é calculado por:

$$\phi = \frac{q}{K} x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} \ln \left[ \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (x_i, y_i) \text{ são as coordenadas da captação } i.$$

A interface é definida por:

$$\xi = \sqrt{\frac{2\phi}{s(s-1)}}$$

# Efeito da infiltração num canal

Quando existe um canal de **grande comprimento** com largura  $2a$  que dista da linha de costa  $L$  e onde é possível a altura de recarga diária  $w$ , então **o potencial** pode ser determinado através de:

$$\phi = \frac{q_r}{K} x \quad \Leftarrow \quad 0 \leq x \leq L \quad \wedge \quad \phi = \frac{q_r}{K} L \quad \Leftarrow \quad L \leq x$$

Considerando um canal com **comprimento limitado** a  $2l$  cujo ponto central está localizado a  $(L_x, L_y)$  o potencial determinado usando o **método das imagens** é:

$$\begin{aligned} \phi_{ditch} = & \frac{q_r}{4\pi K} \left[ 2(x + L_x) \left( \tan^{-1} \frac{y - L_y + l}{x + L_x} - \tan^{-1} \frac{y - L_y - l}{x + L_x} \right) \right. \\ & - 2(x - L_x) \left( \tan^{-1} \frac{y - L_y + l}{x - L_x} - \tan^{-1} \frac{y - L_y - l}{x - L_x} \right) \\ & + (y - L_y + l) LN \frac{(y - L_y + l)^2 + (x + L_x)^2}{(y - L_y + l)^2 + (x - L_x)^2} \\ & \left. - (y - L_y - l) LN \frac{(y - L_y - l)^2 + (x + L_x)^2}{(y - L_y - l)^2 + (x - L_x)^2} \right] \end{aligned}$$

# Formulação do Modelo

46

Para cada cenário da quantidade disponível para incremento da recarga

- **O objectivo:** maximização das extracções

$$\max Z = \sum_{s=1}^{N_s} Q_s$$

- No caso de zonas costeiras pouco inclinadas coincide com objectivo económico: maximização dos resultados

$N_s$  - O número de captações;  $Q_s$  - O caudal a extrair da captação  $s$

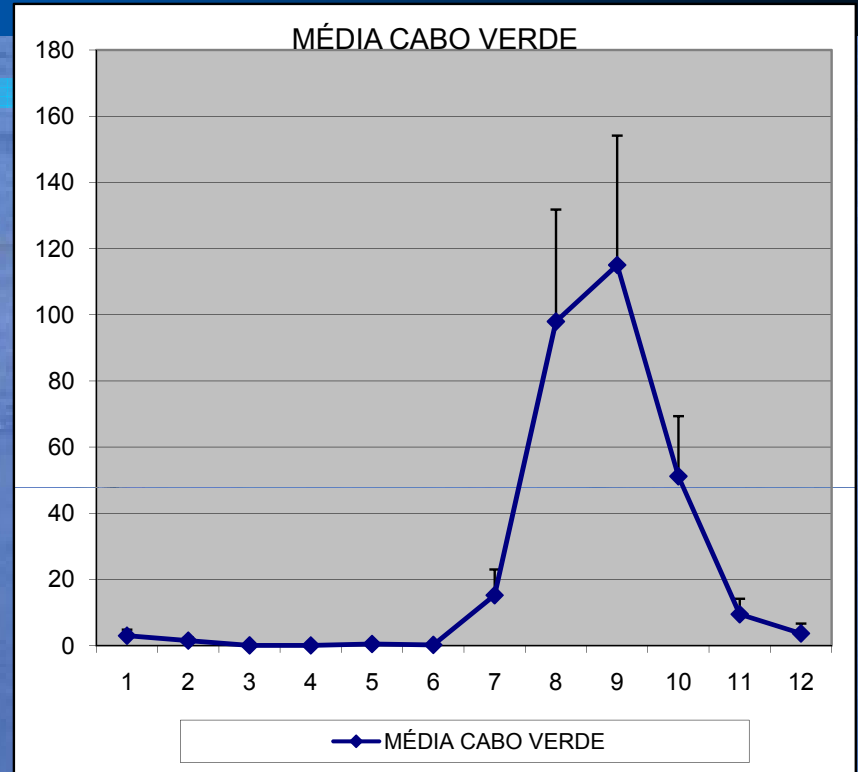
- Restrições
- **Controlo da intrusão salina** - limitando o avanço do pé da interface

$$(x_{pé})_i \leq (x_{pc} - d_s)_i \quad \forall i, \quad i=1,2,\dots,N_{pc}$$

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max}$$

# Aplicações e zonas Identificadas

ORDE	POSTOS	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
1	POSTO ACHADA ALEM	3,70	1,01	0,00	0,00	0,16	1,29	19,94	101,47	125,06	59,40	7,26	1,11
2	POSTO ACHADA LINDOIRA	1,61	1,23	0,00	0,00	0,27	0,00	32,64	123,10	126,47	56,18	7,65	0,83
3	POSTO ACHADA	4,43	0,11	0,42	0,14	0,14	0,00	24,27	115,61	155,96	71,05	7,55	2,41
4	POSTO ACHADA MONTE	2,41	1,55	0,00	0,00	0,13	0,00	4,67	90,60	114,55	51,63	16,87	1,72
5	POSTO BABOIA FIOS	5,19	0,54	0,19	0,04	0,04	0,06	24,50	138,09	156,24	73,84	11,29	10,12
6	POSTO CUAU BOM	3,84	1,46	0,00	0,00	0,49	0,00	9,93	65,33	87,97	34,75	7,71	2,87
7	POSTO CURRALINHO	4,88	2,20	0,08	0,16	0,48	0,00	21,27	148,50	152,22	75,01	9,44	8,87
8	POSTO ALTO FERRERINHA	3,59	0,50	0,00	0,00	1,11	0,00	11,61	100,84	114,72	51,33	10,07	1,81
9	POSTO ALTO CASARINA	2,76	1,20	0,00	0,00	1,20	0,00	23,21	140,02	185,92	76,60	9,81	7,42
10	POSTO ESCOLA AGRO-PECUARIA	3,53	2,16	0,19	0,05	0,11	0,06	21,15	129,39	166,55	58,65	10,73	9,60
11	POSTO FLAMENGOS	1,26	1,46	0,00	0,00	0,60	0,00	17,97	103,27	84,87	51,89	5,17	1,78
12	POSTO JOÃO BATE	3,02	0,33	0,00	0,00	0,13	0,00	13,75	121,33	141,63	50,11	6,05	6,68
13	POSTO PRAIA ACHOPADO	2,24	0,21	0,06	0,02	0,50	0,00	7,45	45,36	49,79	24,74	3,01	5,90
14	POSTO PINCO BARRERA	0,16	1,82	0,00	0,00	0,77	0,00	15,20	86,27	96,35	45,11	9,00	2,70
15	POSTO BARRAGEM	3,55	1,49	0,00	0,00	0,65	0,00	17,12	91,51	112,33	50,25	12,11	4,43
16	POSTO BARRIL DA BARUA	1,64	1,25	0,00	0,00	0,00	0,25	17,89	117,36	176,20	72,38	1,67	0,00
17	POSTO MILHO BRANCO	1,85	2,50	0,00	0,00	1,35	0,00	6,43	75,07	94,85	52,17	14,45	1,19
18	POSTO BARRIL DA BARUA	2,22	0,98	0,00	0,82	0,07	0,00	7,10	63,49	103,72	41,60	1,86	0,54
19	POSTO BARRIL DA BARUA	0,93	0,38	0,00	0,00	0,65	1,50	12,56	76,40	90,18	43,36	7,25	3,34
20	POSTO LONDA BOM PAU	4,47	2,38	0,00	0,00	0,00	1,46	13,75	87,22	105,96	40,65	14,48	6,59
21	POSTO MATO BRANCO	2,52	0,82	0,00	0,00	0,71	0,29	32,59	173,34	159,46	39,81	13,31	2,74
22	POSTO MONTANHA BANANA	4,71	1,00	0,30	0,00	0,00	0,00	14,87	94,36	63,70	34,09	9,65	2,75
23	POSTO MONTE VERDE	4,64	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00	15,71	99,06	112,40	46,59	12,54	2,90
24	POSTO SANTA CRUZ	4,27	2,09	0,00	0,02	1,32	0,05	10,54	86,72	80,94	44,36	18,75	4,44
25	POSTO SIAI	1,86	2,10	0,00	0,00	0,26	0,00	7,09	92,08	79,04	23,12	5,08	1,79
26	POSTO PORTAL BOSSA BOM DA LUZ	3,75	3,31	0,00	0,00	0,00	0,00	3,15	51,94	83,54	72,73	7,74	2,68
27	POSTO SANTAANA	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,74	101,64	149,52	21,72	1,47	1,21
28	POSTO SÃO DOMINGOS	3,41	3,96	0,00	0,08	0,61	0,07	14,22	99,81	104,97	47,93	10,98	3,61
29	POSTO SÃO FRANCISCO	2,97	1,73	0,00	0,00	0,32	0,08	9,18	64,55	72,45	43,92	4,42	6,35
30	POSTO SÃO JOAQUIM	9,21	2,77	0,47	0,22	1,15	0,26	25,82	128,29	164,02	60,50	13,24	10,47
31	POSTO RIBARRÃO MOURO	2,05	1,35	0,00	0,00	1,30	0,00	8,43	78,83	81,90	48,62	13,37	1,50
32	POSTO RUA VAZ	5,01	2,81	0,00	0,00	0,71	0,00	20,00	138,27	143,13	65,14	11,19	8,77
33	POSTO SERRADO	2,43	0,71	0,47	0,00	1,18	0,00	16,56	53,85	61,53	36,70	16,96	7,58
34	POSTO SÃO JOÃO BAPTISTA	1,90	0,89	0,04	0,00	0,13	0,00	6,78	56,78	70,63	23,89	1,91	0,53
35	POSTO SÃO MARTINHO PEQUENO	0,36	1,78	0,00	0,00	0,00	0,00	7,82	46,64	78,56	34,00	10,24	0,52
36	POSTO SERRA MOLADA	7,28	1,44	0,33	0,00	0,13	0,10	36,70	194,53	206,76	117,18	12,91	4,52
37	POSTO TRILHAL	2,40	1,98	0,24	0,04	0,06	0,00	16,30	103,17	136,99	64,74	5,80	3,42
38	POSTO TRINDADE	2,99	4,15	0,00	0,00	0,43	0,00	6,82	54,91	68,46	26,88	8,73	1,97
39	POSTO VALE DA MESA	1,28	0,65	0,06	0,00	1,46	0,00	13,60	94,19	118,87	50,11	10,10	1,07
40	POSTO VÁRzea SANTANA	4,55	2,04	0,00	0,63	1,64	0,04	17,66	123,07	145,83	60,43	12,46	7,44
41	POSTO VALE DO	1,71	0,59	0,12	0,00	1,52	0,29	11,78	80,76	68,54	35,75	20,13	0,95
42	POSTO ACHADA FALEAD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,14	121,09	169,14	65,43	12,43	0,00
43	POSTO SERRADO	0,00	1,91	0,00	0,00	0,00	0,00	9,51	53,14	84,13	56,01	0,44	0,63
	MEDIA GERAL	2,98	1,80	0,07	0,05	0,48	0,21	15,22	97,93	115,02	51,17	9,47	3,87
	DESV PAD	1,85	0,98	0,14	0,16	0,51	0,60	7,80	33,87	39,13	18,18	4,72	3,03
	CV	0,82	0,66	1,96	3,08	1,05	2,92	0,51	0,35	0,34	0,36	0,50	0,83



Anterior

Seguinte

# Modelo de Gestão

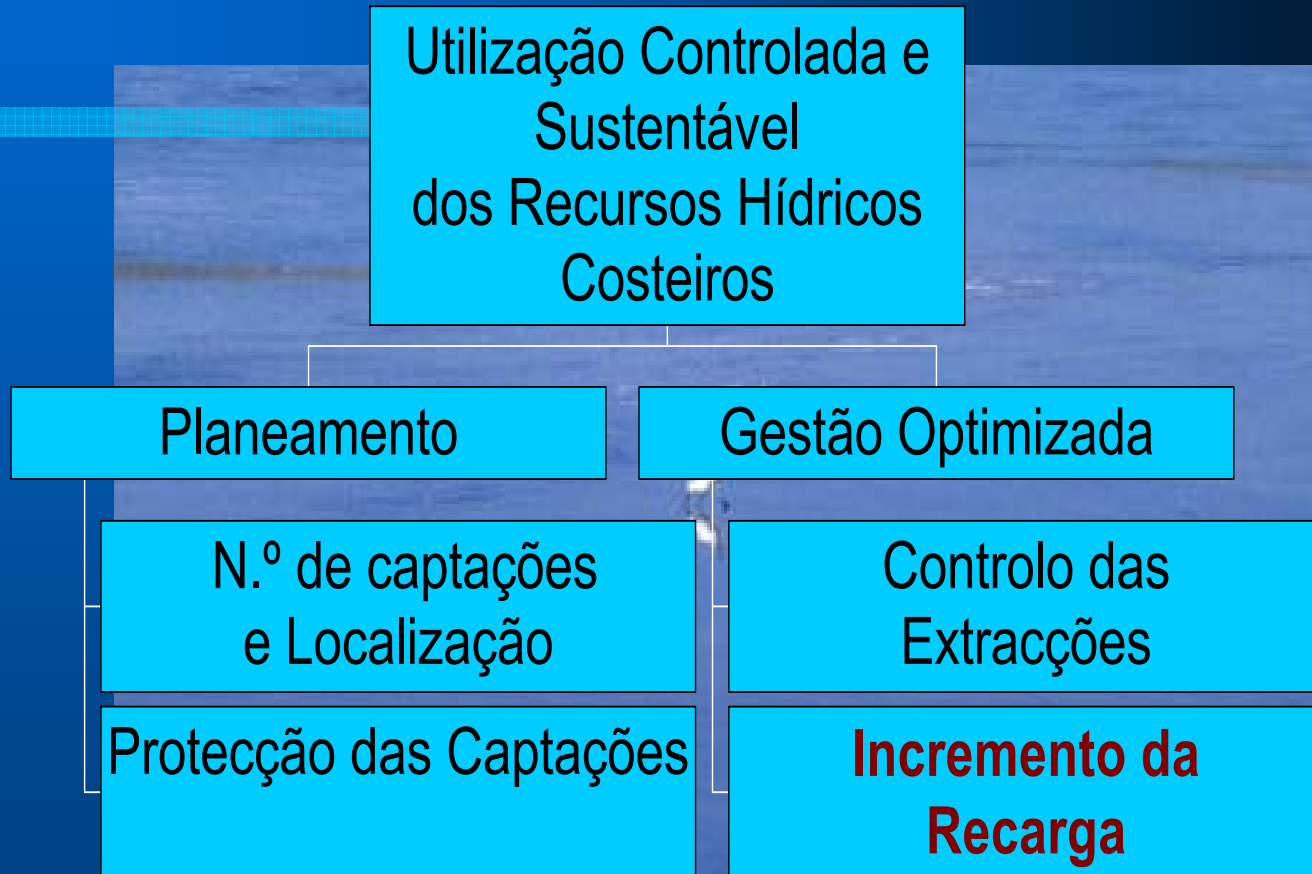
O modelo global de gestão da água disponível interliga diversas componentes:





# Modelo de Gestão

49



- ❖ Cabo Verde, apresenta uma grande **diversidade de aquíferos**, de condições hidrodinâmicas e de ambientes hidroquímicos. Assim a **vulnerabilidade** das formações hidrogeológica e o risco de poluição tb são **diversos**.
- ❖ **A qualidade da água dos sistemas aquíferos ainda é, regra geral, satisfatória.**
- ❖ A **protecção dos sistemas de aquíferos** e das captações é, por isso, uma tarefa imperativa e **urgente**. Esta protecção poderá recorrer a instrumentos de natureza institucional, económica e tecnológica. Entre outros.
- ❖ **Educação ambiental em geral, e em particular, a divulgação e o ensino do modo de ocorrência a propagação das águas subterrâneas,**
- ❖ Os perímetros de protecção constituem um instrumento legal cujo principal objectivo consiste em otimizar o compromisso entre a protecção necessária e suficiente dos R.H. subterrâneos e o respeito pela actividade socio-económica.
- ❖ **As boas técnicas de dimensionamento e de construção das captações que permitem a exploração dos aquíferos em boas condições técnico – económicas e que preservam a qualidade dos recursos.**
- ❖ Os cuidados com as captações devem estender-se à fase de exploração e o seu abandono deverá ser acompanhado de medidas que restabelecem tanto quanto possível as condições hidrogeológicas naturais.

- O incremento da recarga constitui um verdadeiro sistema de controlo da intrusão marinha;
- Os modelos de optimização - simulação são capazes de determinar políticas de gestão optimizadas, mantendo sob controlo a intrusão salina;
- Face a cada cenário de incremento da recarga (quantidade máxima de água disponível) os modelos de gestão determinam as extracções máximas *versus* local de implantação e distância de segurança.

# Recomendações

- **Elaboração de um mapa hidrogeológico da ilha de Santiago** para que sejam inseridos os elementos hidrogeológicos, estruturais, tectónicos, com vista a uma melhor compreensão do funcionamento hidráulico da ilha e de certos fenómenos ligados à (recarga) das águas pluviais.
- Devido à **degradação sistemática de piezómetros de observação**, torna-se necessário a redefinição e automatização da rede de monitorização.
- **Evitar a degradação dos postos udométricos e das estações meteorológicas**, assegurando o seu normal funcionamento.
- **Necessidade de exploração de outros recursos hídricos** **Dessalinização**
- Com a **redução da precipitação que a ilha vem sentindo nos últimos anos**, torna-se pertinente o **controlo de utilização da água para irrigação na agricultura**, com a introdução de metodologias mais adequadas - **gota-a-gota**.
- Delimitação de **Zonas Vulneráveis** aos  $\text{NO}_3^-$  nas águas subterrâneas (DIRECTIVA),
- Abordagem integrada na **Gestão de Riscos** e previsão de catástrofes estabelecendo **mecanismos de alerta** dos eventuais riscos para **grupos mais vulneráveis**.

*Um dia,  
mais cedo do que se estima,  
Saberemos antecipar os efeitos das  
acções excessivas sobre os  
sistema hídricos naturais e  
geriremos racional e  
optimizadamente a água colocada  
à nossa disposição.*

**MUITO OBRIGADO!**