



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# GROUNDWATER IN THE NEW EU WATER MANAGEMENT PLANS

## Examples from Portugal

João-Paulo LOBO-FERREIRA  
Former Groundwater Division Head at  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-014-3462-8>



**STI FORUM** |

Science, Technology & Innovation for  
the Sustainable Development Goals

**Engineering solutions for water adaptation**

May 4, 2023 / 8:30 - 9:45 AM EST / 2:30 - 3:45 PM CEST



# CEWP: LOOKING TO THE FUTURE

## Scientific based solutions for Water Resources Management



GOVERNO DE  
PORTUGAL



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



River Basin Management Programme



João-Paulo LOBO-FERREIRA  
Groundwater Division Head  
Laboratório Nacional de  
Engenharia Civil, Portugal  
14 March, 2012, CEWP Side Event



# River Basins in Europe



## REGIÕES E BACIAS HIDROGRÁFICAS

A Lei da Água (Lei n.º 58/2005), que estabelece as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas, determina a Região Hidrográfica como unidade principal de planeamento. São definidas as seguintes 10 Regiões Hidrográficas:

- RH1 - Minho e Lima
- RH2 - Cávado, Ave e Leça
- RH3 - Douro
- RH4 - Vouga, Mondego, Lis e Ribeiras do Oeste
- RH5 - Tejo
- RH6 - Sado e Mira
- RH7 - Guadiana
- RH8 - Ribeiras do Algarve
- RH9 - Açores
- RH10 -Madeira

- Bacia Rib. Deste
- RH1 - Minho e Lima
- RH2 - Cávado, Ave e Leça
- RH3 - Douro
- RH4 - Vouga, Mondego, Lis e RC
- RH5 - Tejo
- RH6 - Sado e Mira
- RH7 - Guadiana
- RH8 - Ribeiras do Algarve



A Lei da Água estabelece ainda o Instituto da Água (INAG) como autoridade nacional da água e garante da política nacional das águas e atribui às Administrações das Regiões Hidrográficas (ARH) a gestão das águas ao nível da Região Hidrográfica, incluindo o respectivo planeamento, licenciamento e fiscalização. Instituições regionais asseguram a gestão das Regiões Hidrográficas dos arquipélagos dos Açores e da Madeira.

# River basins and aquifer systems in Mainland Portugal



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

O1 - Sistema Quaternário de Aveiro  
O6 - Aluviões do Mondego

O2 - Sistema Cretáceo de Aveiro  
O5 - Tentúgal  
O7 - Figueira da Foz - Gesteira  
O10 - Leirosa - Monte Real  
O12 - Vieira de Leiria - Marinha Grande  
O14 - Pousos - Caranguejeira  
O15 - Ourém  
O19 - Alpedriz  
O23 - Paço  
O25 - Torres Vedras  
O29 - Louriçal  
O30 - Viso - Queridas  
O31 - Condeixa - Alfarelos  
O33 - Caldas da Rainha - Nazaré

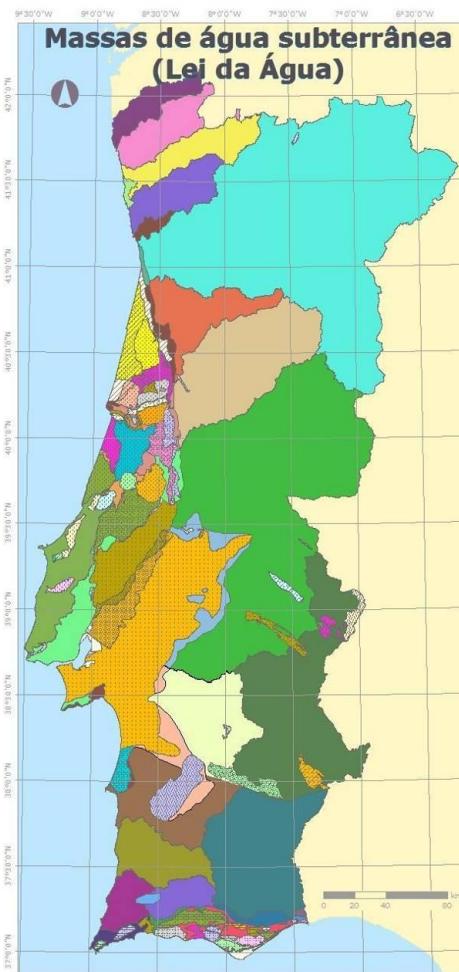
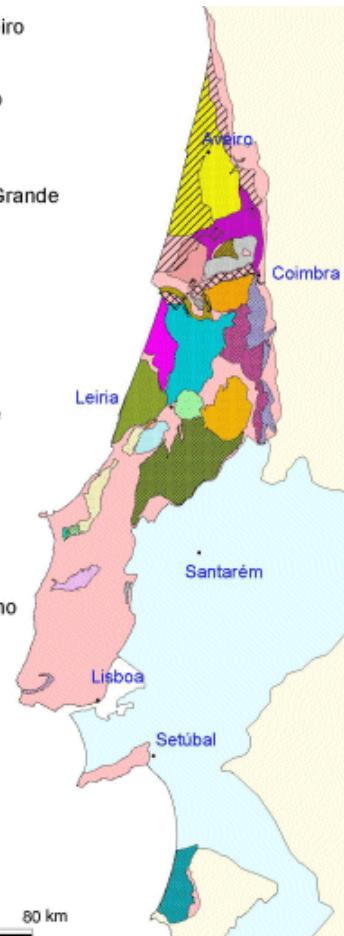
O3 - Cársico da Bairrada  
O4 - Ançã - Cantanhede  
O8 - Verride  
O9 - Penela - Tomar  
O11 - Sicó - Alvaizáere  
O18 - Maceira  
O20 - Maciço Calcário Estremeno  
O24 - Cesareda  
O26 - Ota - Alenquer  
O28 - Pisões - Atrozela  
O32 - Sines



0 20 40 60 80 km



Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos



INFORMAÇÃO DE BASE  
1. Carta Geológica de Portugal - Escala 1:200000 [Carta Geológica]  
(IGM, Lisboa, 1989) URL: <http://www.igm.pt>  
2. Carta Geológica de Portugal - Escala 1:500000 [Modelo Cartográfico do Terreno]  
(IGM, Lisboa, 1992) URL: <http://www.igm.pt>



Maio 2007

Figura adaptada de <http://snirh.pt/snirh/atlas/mapasweb/pt/aa29.png>  
(acessada em 2007-05-18)

(cf. <http://snirh.pt/snirh/atlas/mapasweb/pt/aa29.png>)  
Groundwater bodies in Mainland Portugal



Projecto Financiado:

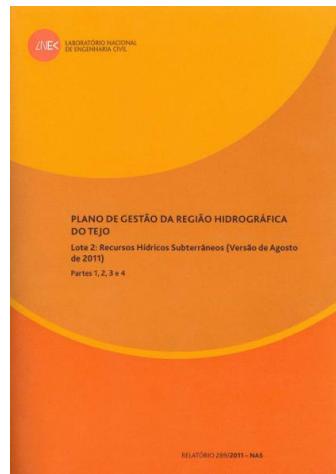
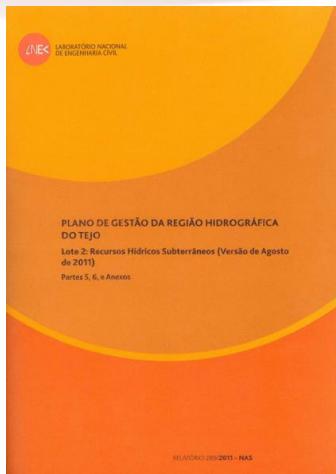


Plano de Gestão  
da Região Hidrográfica  
do Tejo



Plano das Bacias Hidrográficas  
das Ribeiras do Oeste

## 1. GROUNDWATER IN TAGUS AND OESTE RIVER BASINS MANAGEMENT PLANS



Lobo Ferreira, J.P.; Vaz Pinto, I.; Monteiro, J.P.; Oliveira, M.M.; Leitão, T.E.; Nunes, L.; Novo, M.E.; Salvador, N.; Nunes, J.F.; Leal, G.; Pombo, S.; Silva, M.F.; Igreja, A.; Henriques, M.J.; Silva, D.; Oliveira, L.; Martins, T.; Martins, J.; Braceiro, A.; Henriques, R.S.; Martins, R. (2011): **Plano de gestão da Região Hidrográfica do Tejo - Lote 2: Recursos Hídricos Subterrâneos (Versão de Agosto de 2011)**. Consórcio Hidroprojecto/LNEC/ICCE. Rel. 289/2011 – NAS. Estudo realizado para a Administração da Região Hidrográfica do Tejo, I.P., 1056 pp.



Administração da  
Região Hidrográfica  
do Tejo I.P.



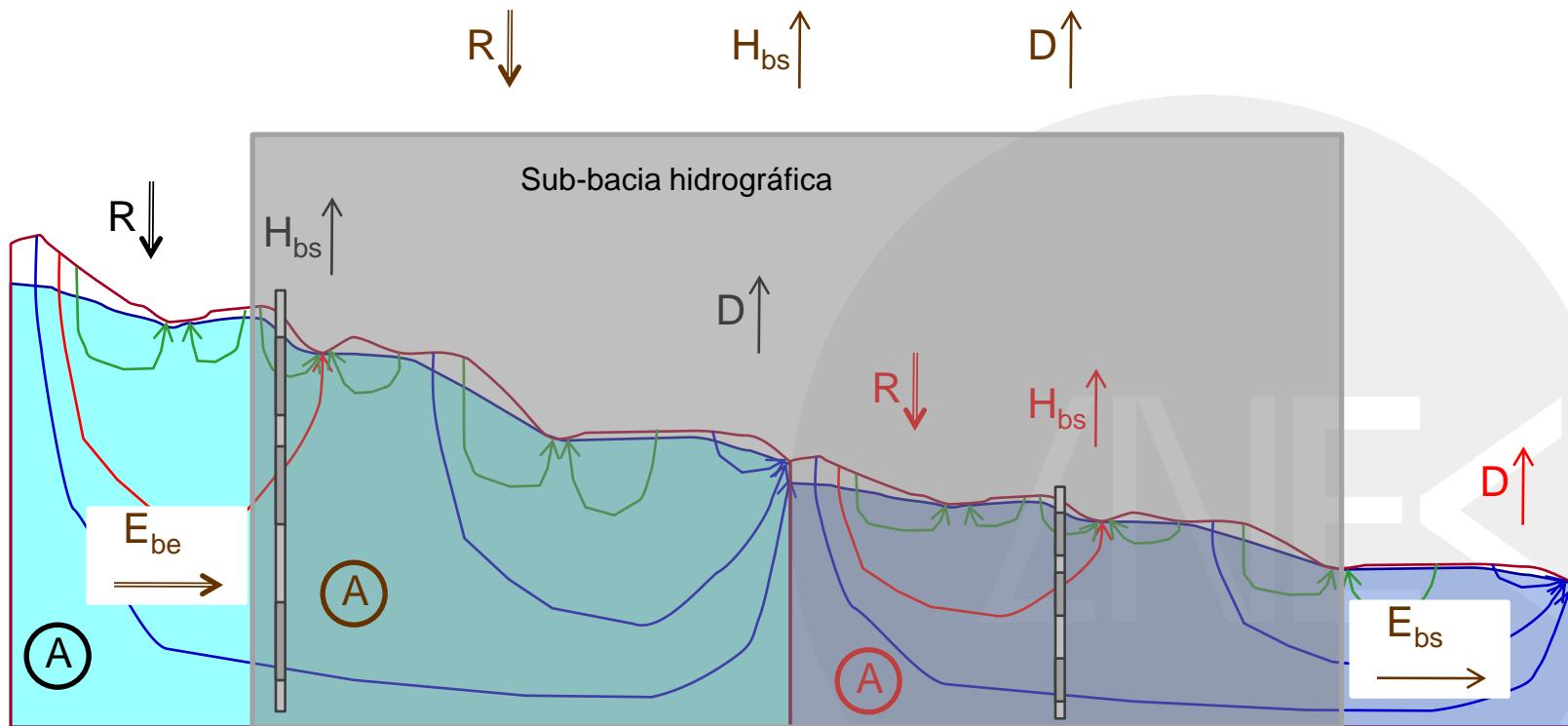
HIDROPROJECTO  
ENGENHARIA E GESTÃO, S.A.  
A Subsidiary of  
INGÉROP



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



Lobo Ferreira, J.P.; Vaz Pinto, I.; Monteiro, J.P.; Oliveira, M.M.; Leitão, T.E.; Nunes, L.; Novo, M.E.; Salvador, N.; Pombo, S.; Silva, M.F.; Igreja, A.; Nunes, J.F.; Leal, G.; Henriques, M.J.; Silva, D.; Oliveira, L.; Martins, T.; Martins, R.; Monte, M.; Martins, J.; Braceiro, A.; Henriques, R.S.; Quaresma, M. (2011): **Plano das bacias hidrográficas das Ribeiras do Oeste - Lote 2: Recursos Hídricos Subterrâneos (Versão de Agosto de 2011)**. Consórcio Hidroprojecto/LNEC/ICCE. Rel. 290/2011 – NAS. Estudo realizado para a Administração da Região Hidrográfica do Tejo, I.P., 597pp.



$$R + E_{be} - E_{bs} - D - H_{bs} = \Delta A_b$$

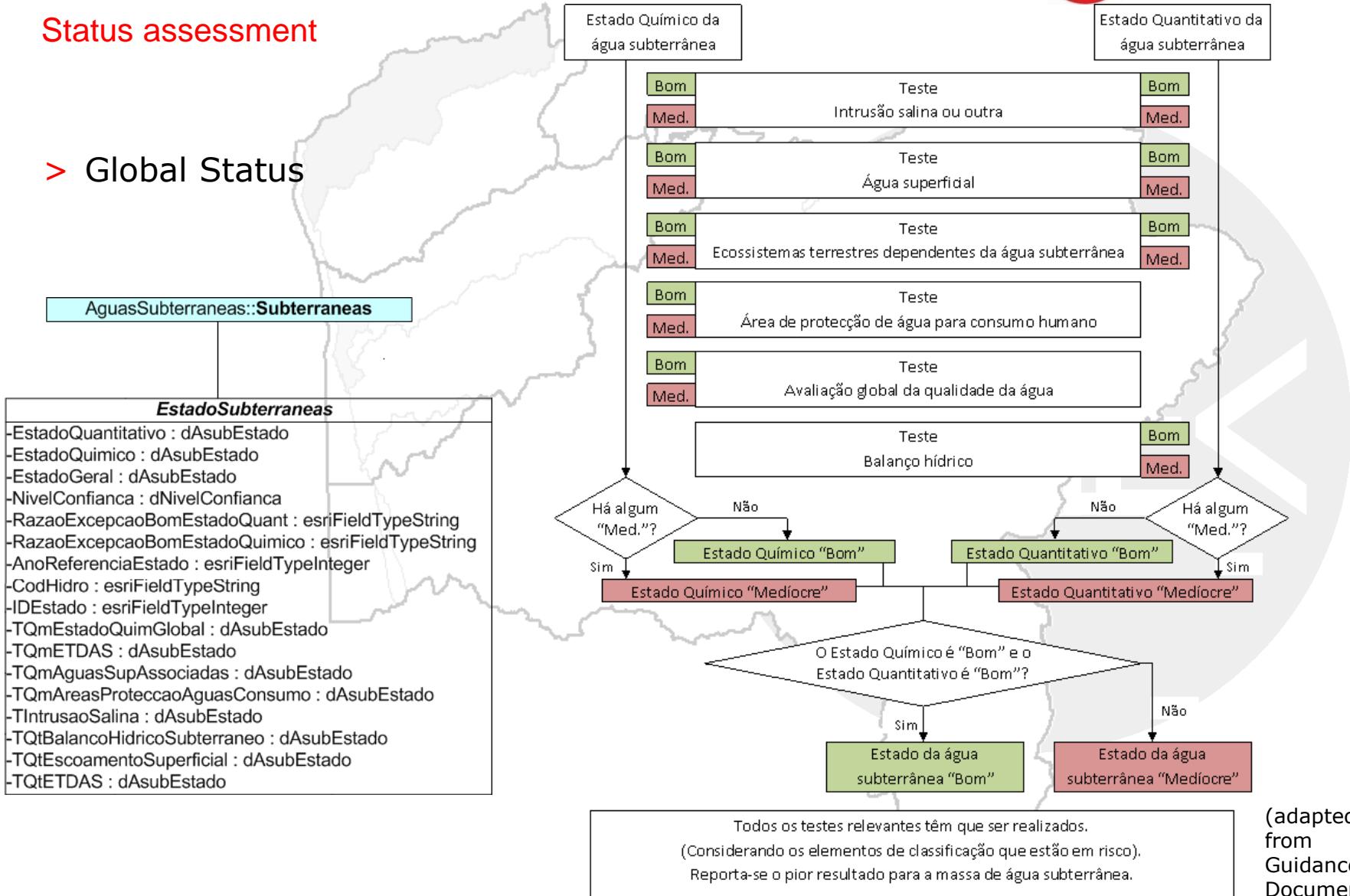
# Groundwater bodies



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

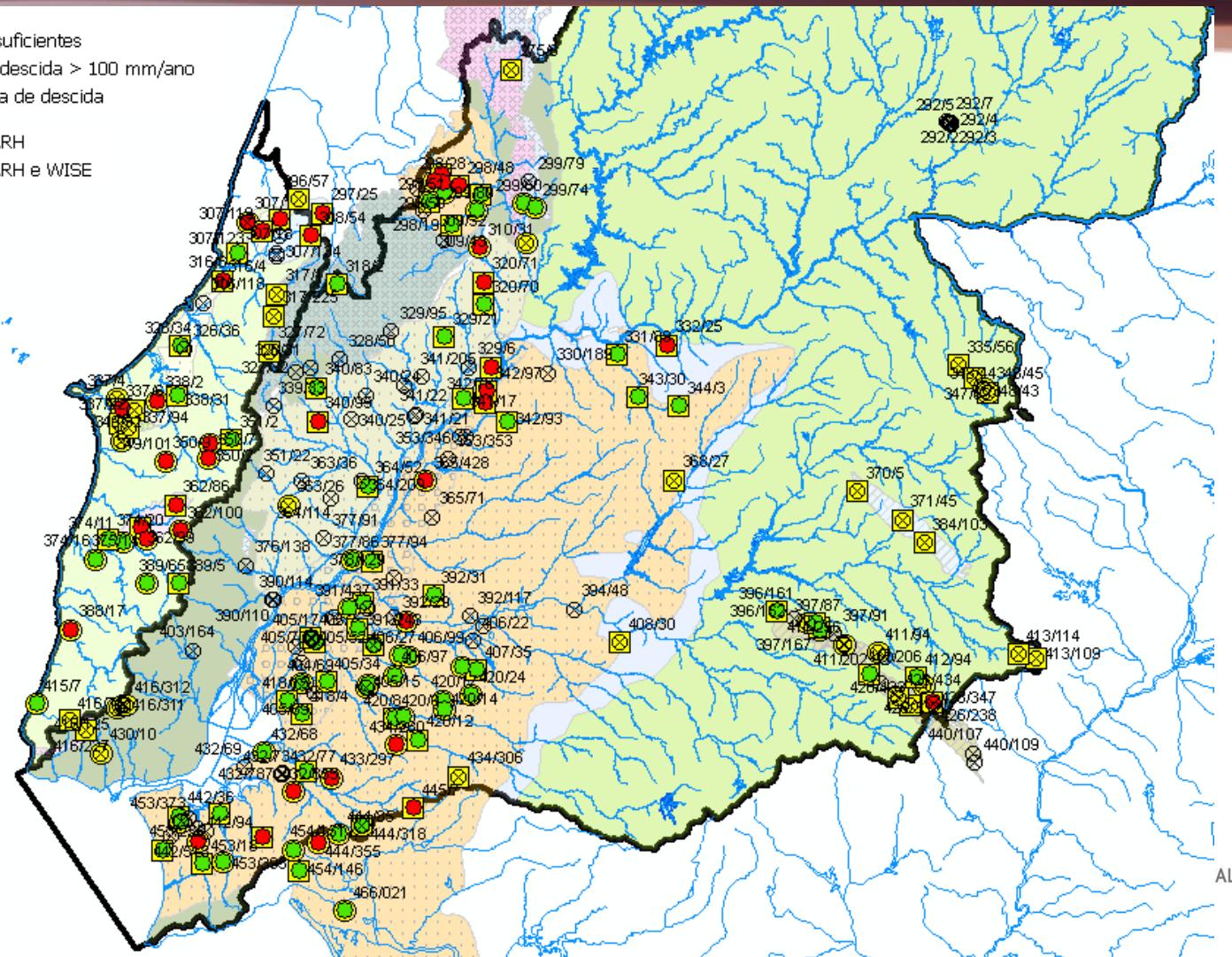
## Status assessment

### > Global Status



## 2. GROUNDWATER QUANTITATIVE ASSESSMENT

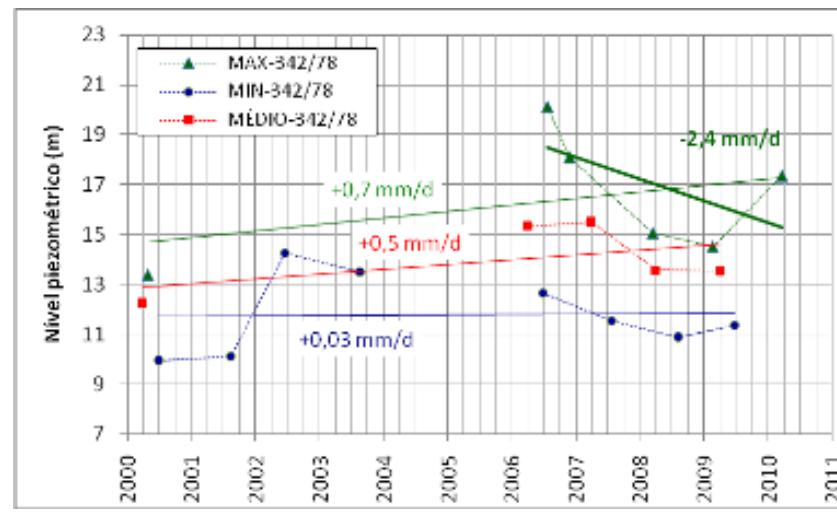
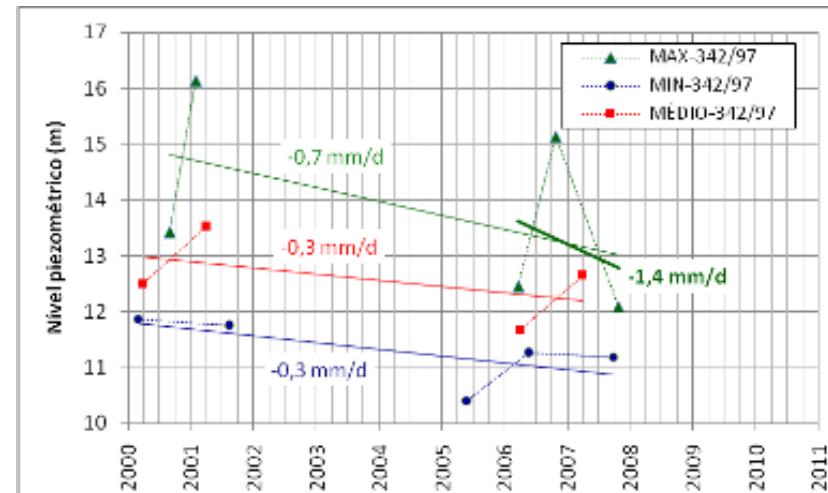
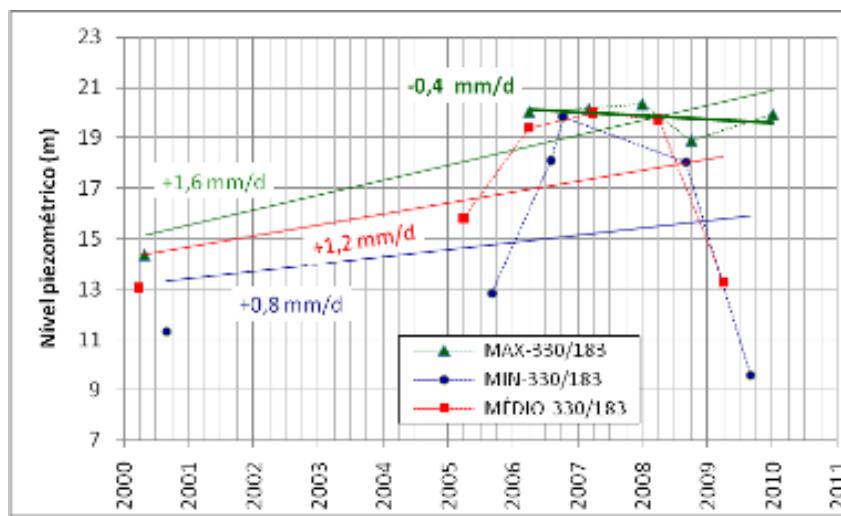
- ⊗ sem valores suficientes
- tendência de descida > 100 mm/ano
- sem tendência de descida
- Rede actual ARH
- Rede actual ARH e WISE



## Seminário Agricultura, Santarém – Águas Subterrâneas

### 1. Quantitative aspects – Water balance

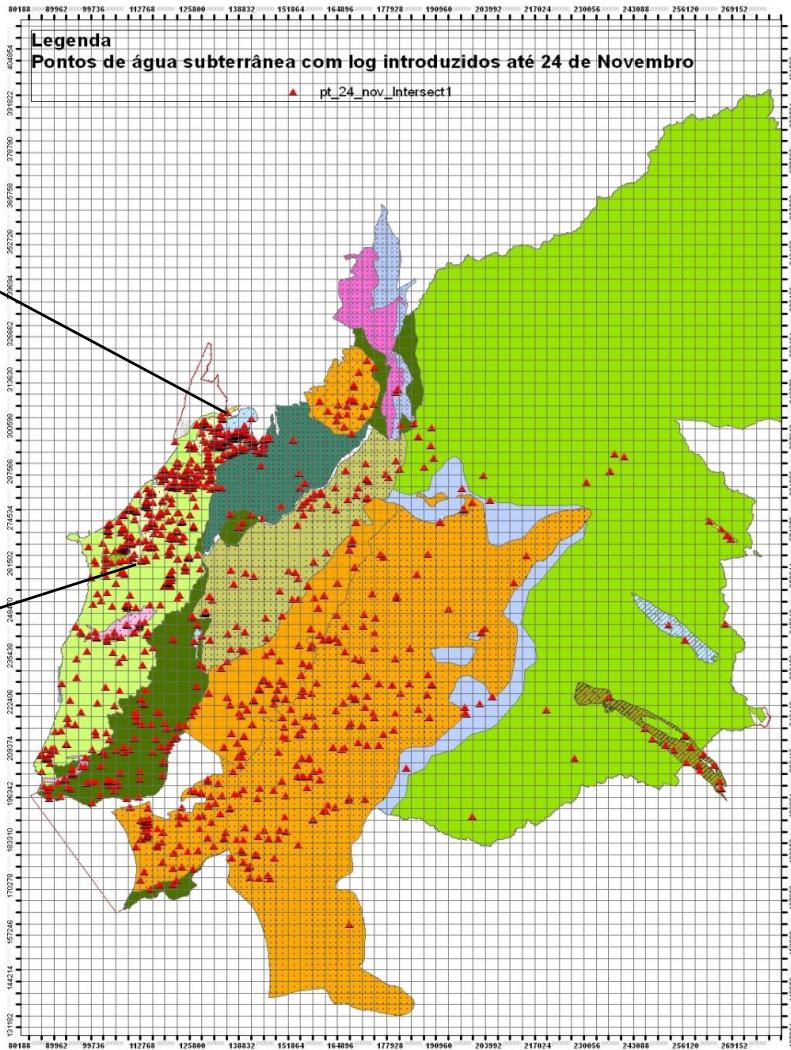
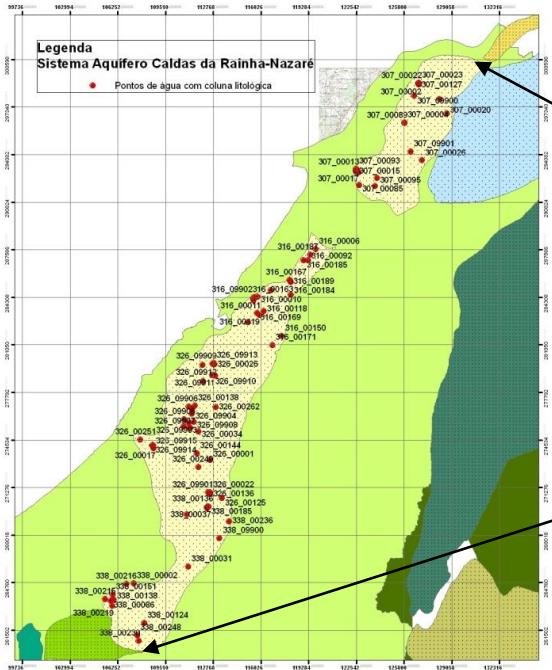
**ALUVIÕES DO TEJO:** Maximum, minimum and average annual piezometric levels, per hydrological year and respective evolution trends. In graphs that show two trend values per piezometer, the value in bold corresponds to the trend for the most recent hydrological years that show approximately consecutive monthly records; however, given the short series used, these trends are not considered significant



# SPATIAL DISTRIBUTIONS OF WELLS WITH LOGS INCLUDED IN PGRH Tagus and PBH Rib OESTE



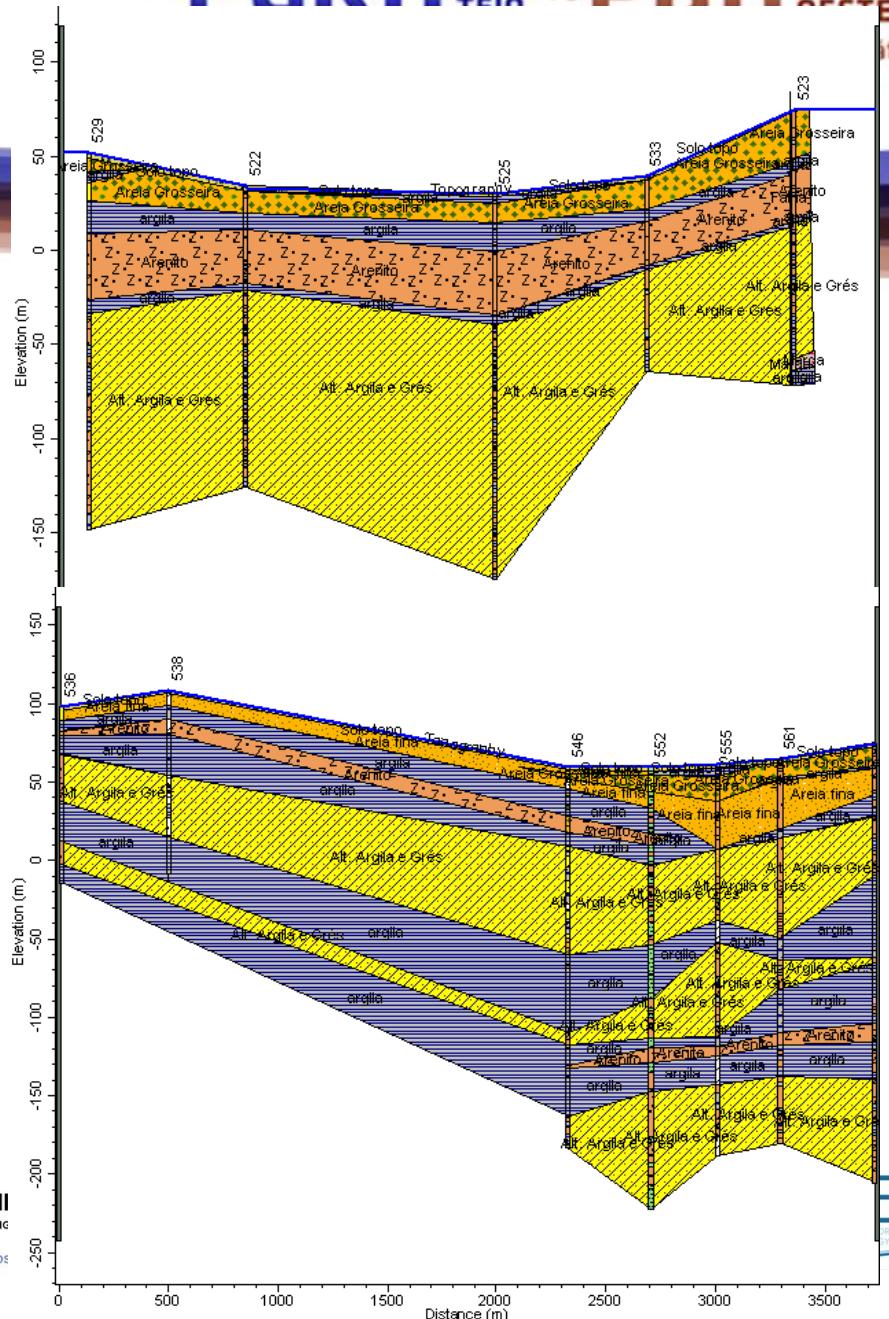
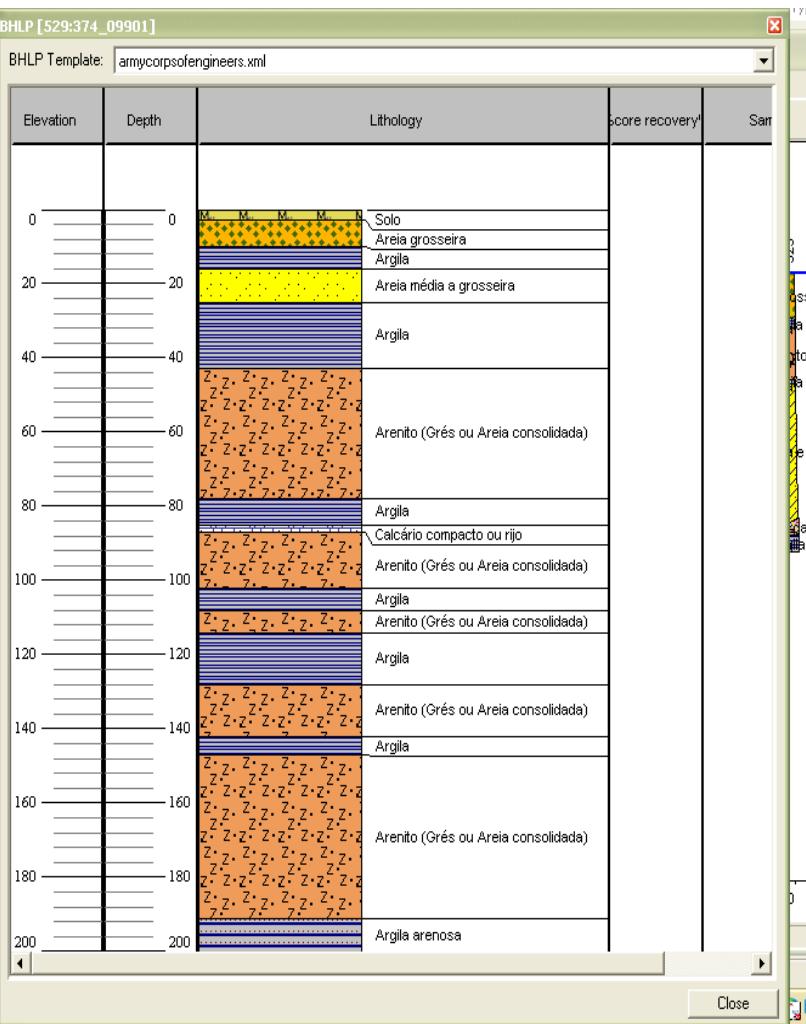
LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



### **3. HYDROGEOLOGY ASSESSMENT IN 3D**

BHLB [529:374\_09901]

BHLP Template: armycorpsofengineers.xml

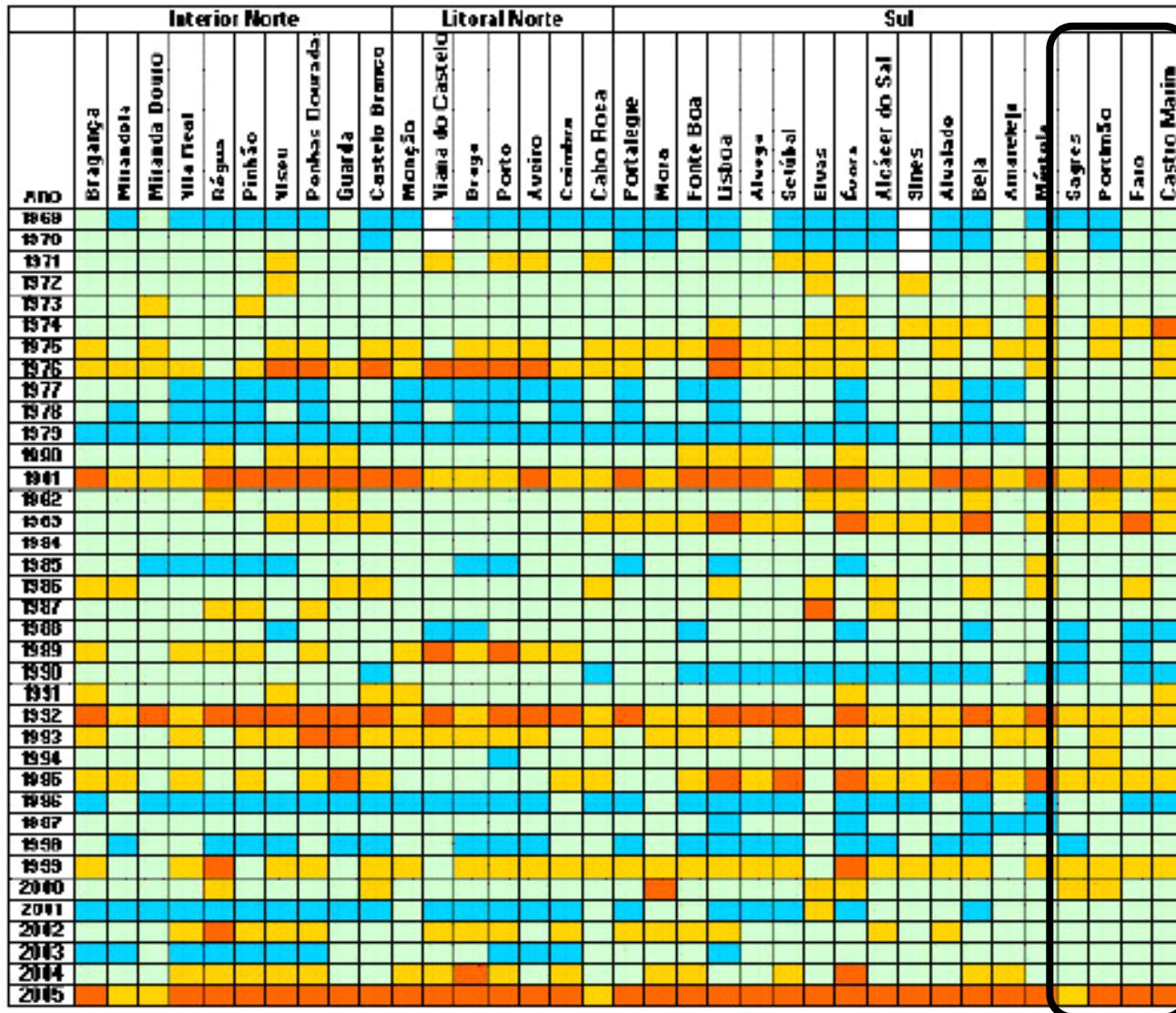




## 4. FULFILMENT OF LEGAL OBLIGATIONS

Tema	Designação abreviada	Legislação Nacional	Legislação Europeia	Estado*	O que falta**
Enquadramento	Lei da Água	<b>Lei 58/2005</b> – estabelece as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas - Lei da Água <b>Lei 54/2005</b> – estabelece o que são águas públicas e águas privadas	Directiva 2000/60 DQA	PC	IN; MNE
		<b>Decreto-Lei 77/2006 e Decreto-Lei 226-A/2007</b> – complementam a transposição da Directiva 2000/60 e da Lei 58/2005		PC	MIM; IN
da poluição	Directiva das águas subterrâneas	<b>Decreto-Lei 208/2008</b> – relativo à protecção das águas subterrâneas contra a contaminação e a deterioração	Directiva 2006/118 DAS	PC	MIM; IN; MNE
	Utilização de lamas em solos agrícolas	<b>Decreto-Lei 276/2009</b> – estabelece o regime de utilização de lamas de depuração em solos agrícolas	Directiva 86/278	PC	IE; PI; MNE
	Regime geral de gestão de resíduos	<b>Decreto-Lei 178/2006</b> – relativo às regras a que fica sujeita a gestão de resíduos	Directivas 91/156; 91/689; 2006/12	PC	IE; MNE
	Descarga de substâncias perigosas	<b>Decreto-Lei 56/99</b> – relativo aos valores limite e aos objectivos de qualidade para a descarga de certas substâncias perigosas	Directivas 86/280; 88/347; 90/415	PC	IE; PI
	Objectivos de qualidade substâncias perigosas	<b>Decreto-Lei 506/99</b> – fixa os objectivos de qualidade para determinadas substâncias perigosas incluídas nas famílias ou grupos de substâncias da lista II do Anexo XIX ao Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto	-	PC	IE; PI; MNE

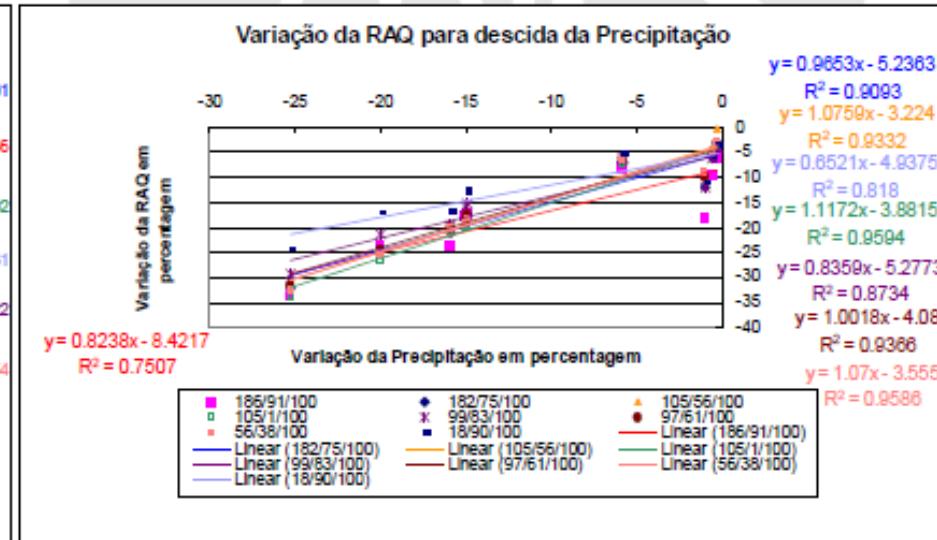
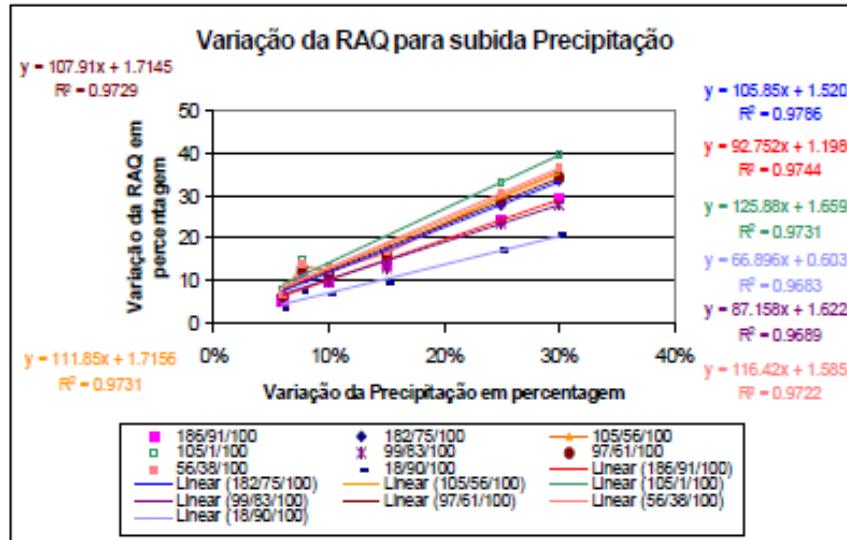
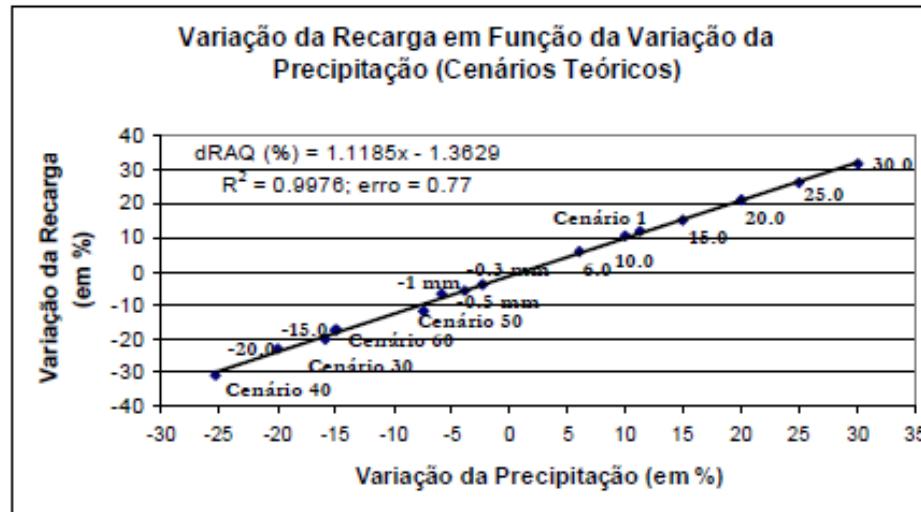
# Precipitation natural variation in Mediterranean countries: the example of Portugal



# LNEC studies on the variation of groundwater recharge for multiple precipitation scenarios

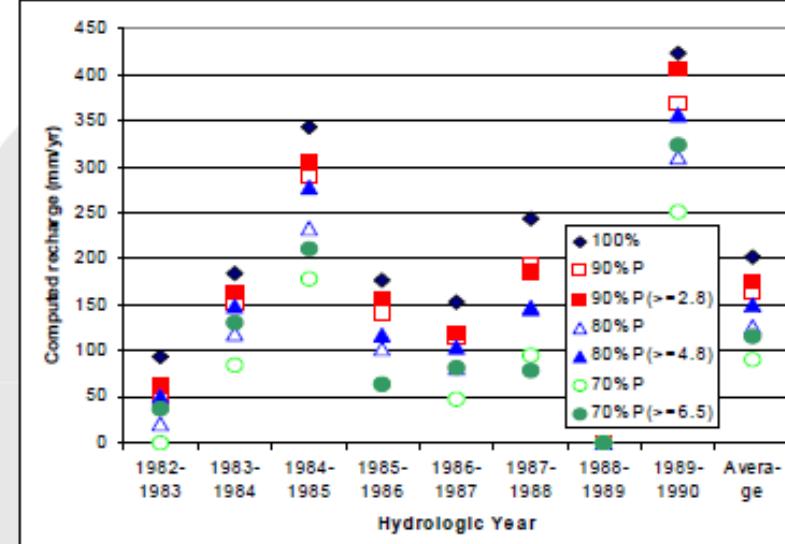
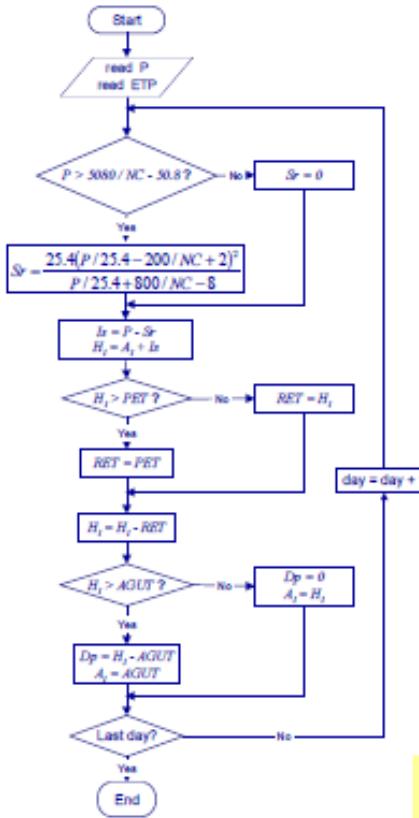


LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



# LNEC studies on GW recharge and Climate change

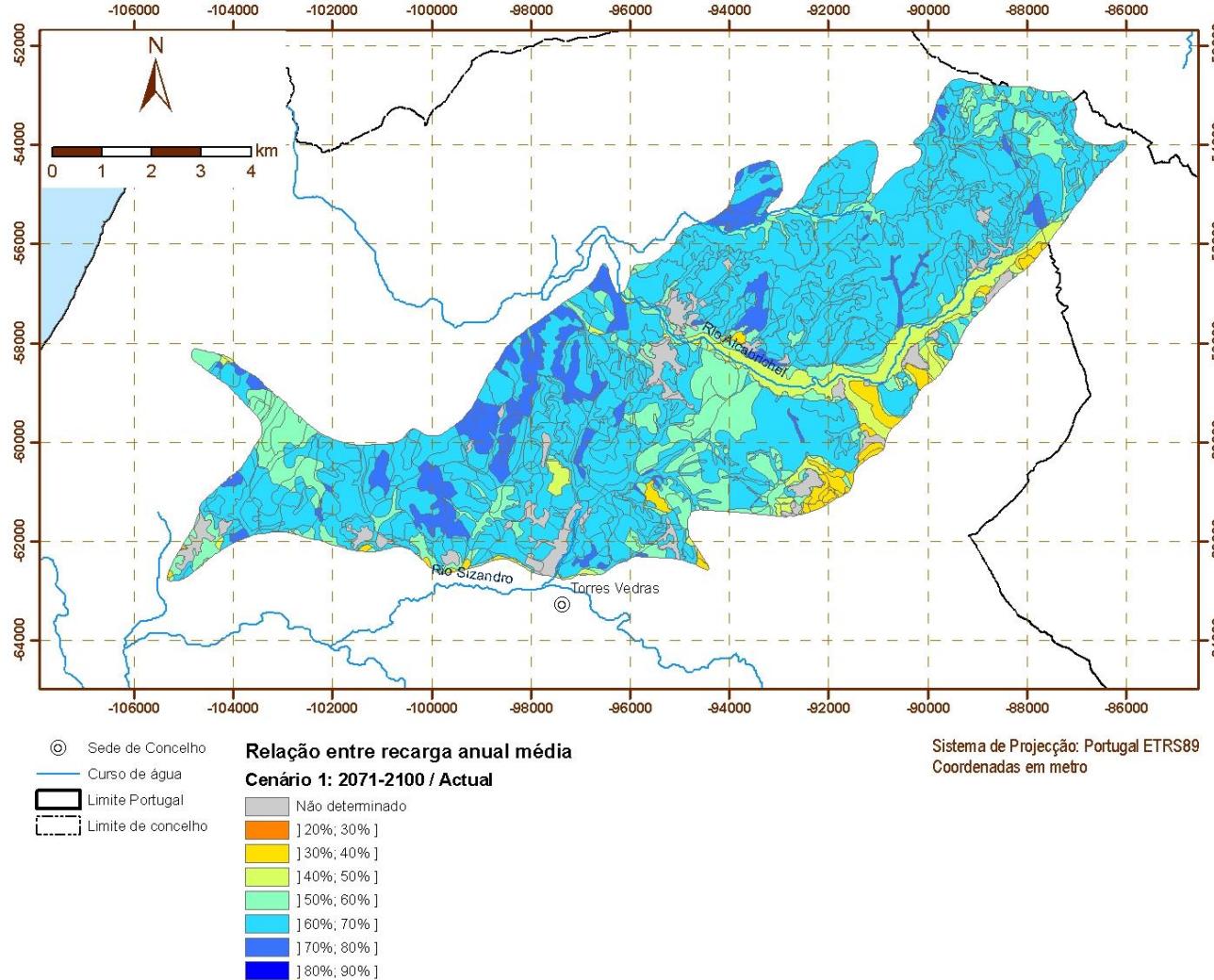
Sequential daily water balance model –  
the **BALSEQ** model (Lobo Ferreira, 1981)



- Starting point: source precipitation series - SPS

- 90 % of SPS
  - (1) applying the percentage factor to the SPS – only diminishes the daily amount of precipitation
- 80 % of SPS
  - (2) considering a cut-off value for daily precipitation so that the sum of daily precipitation values larger than that cut-off value would result in the required percentage of SPS – assumes that climatic changes always produce more intensive precipitation episodes
- 70 % of SPS

## 5. DIAGNOSIS: IMPLICATIONS OF CLIMATE CHANGE FOR GROUNDWATER RECHARGE



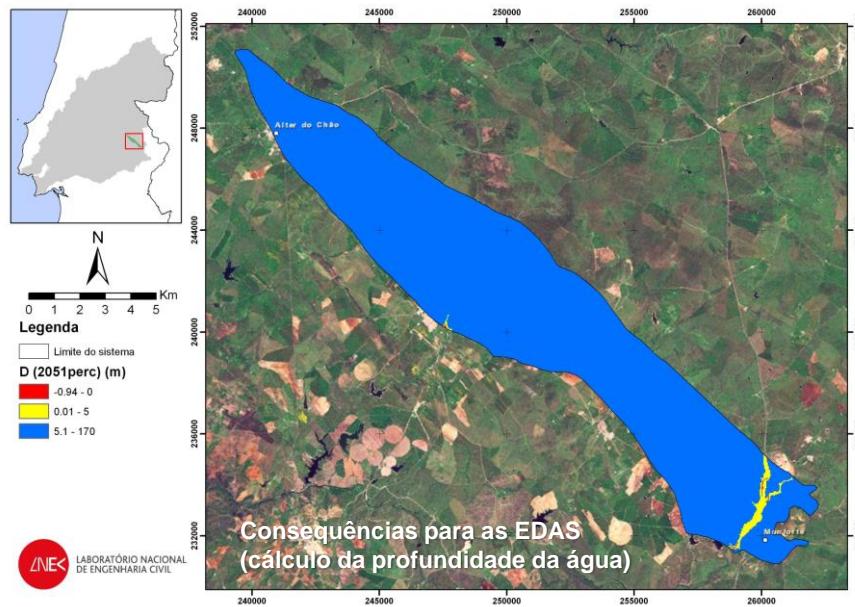
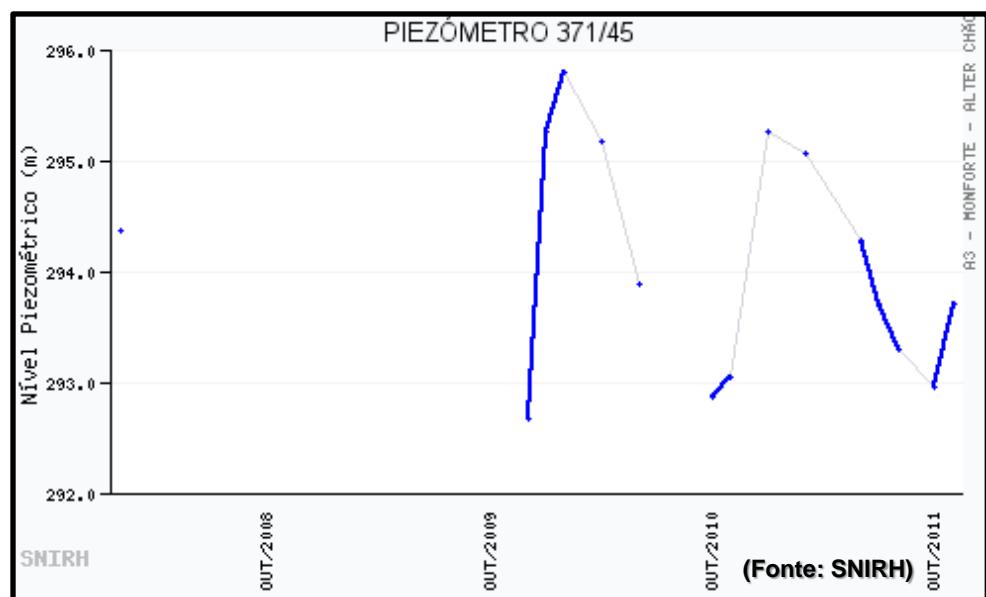
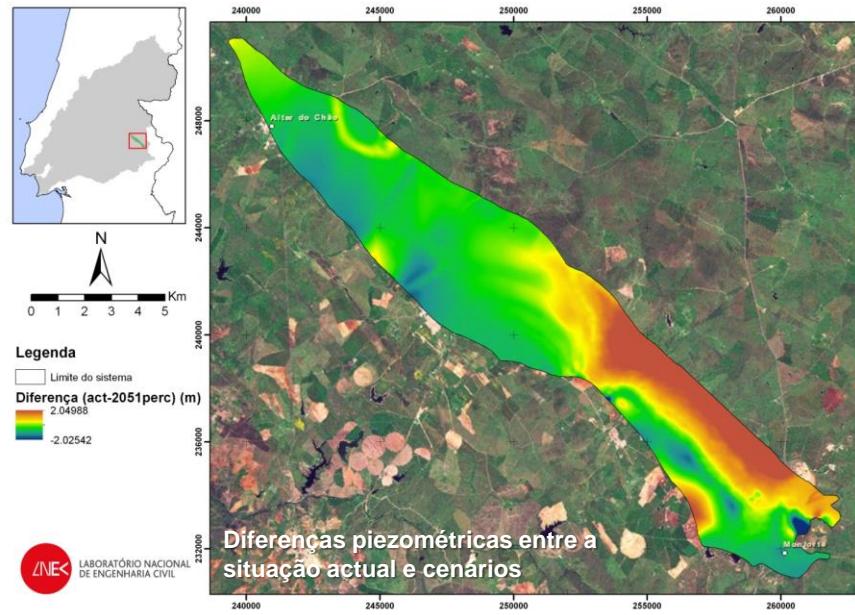
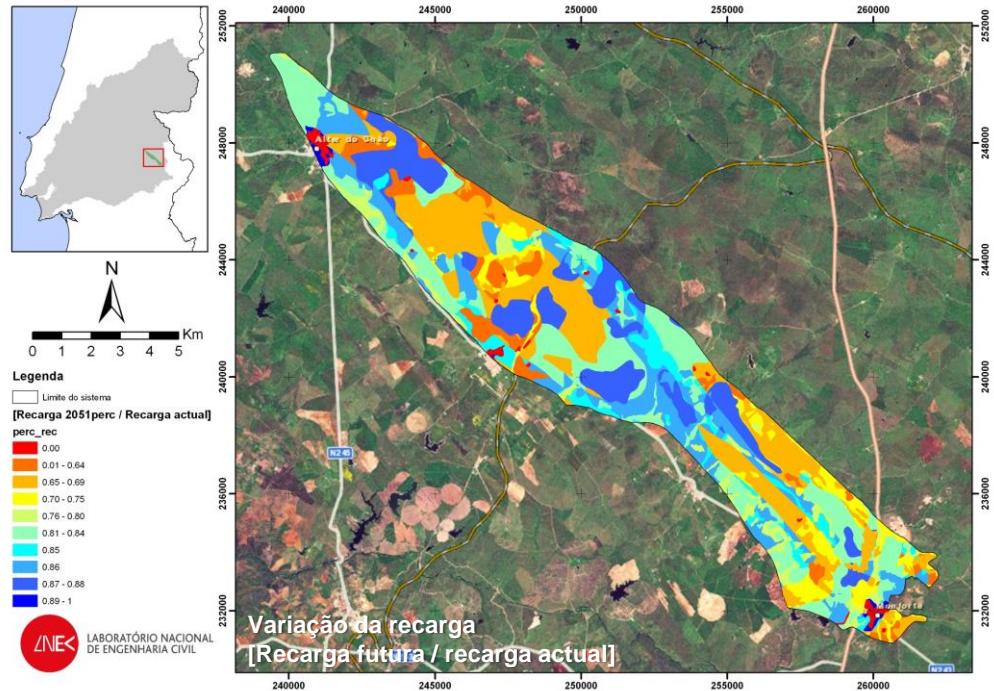
**Torres Vedras  
groundwater  
body**

# Alterações climáticas

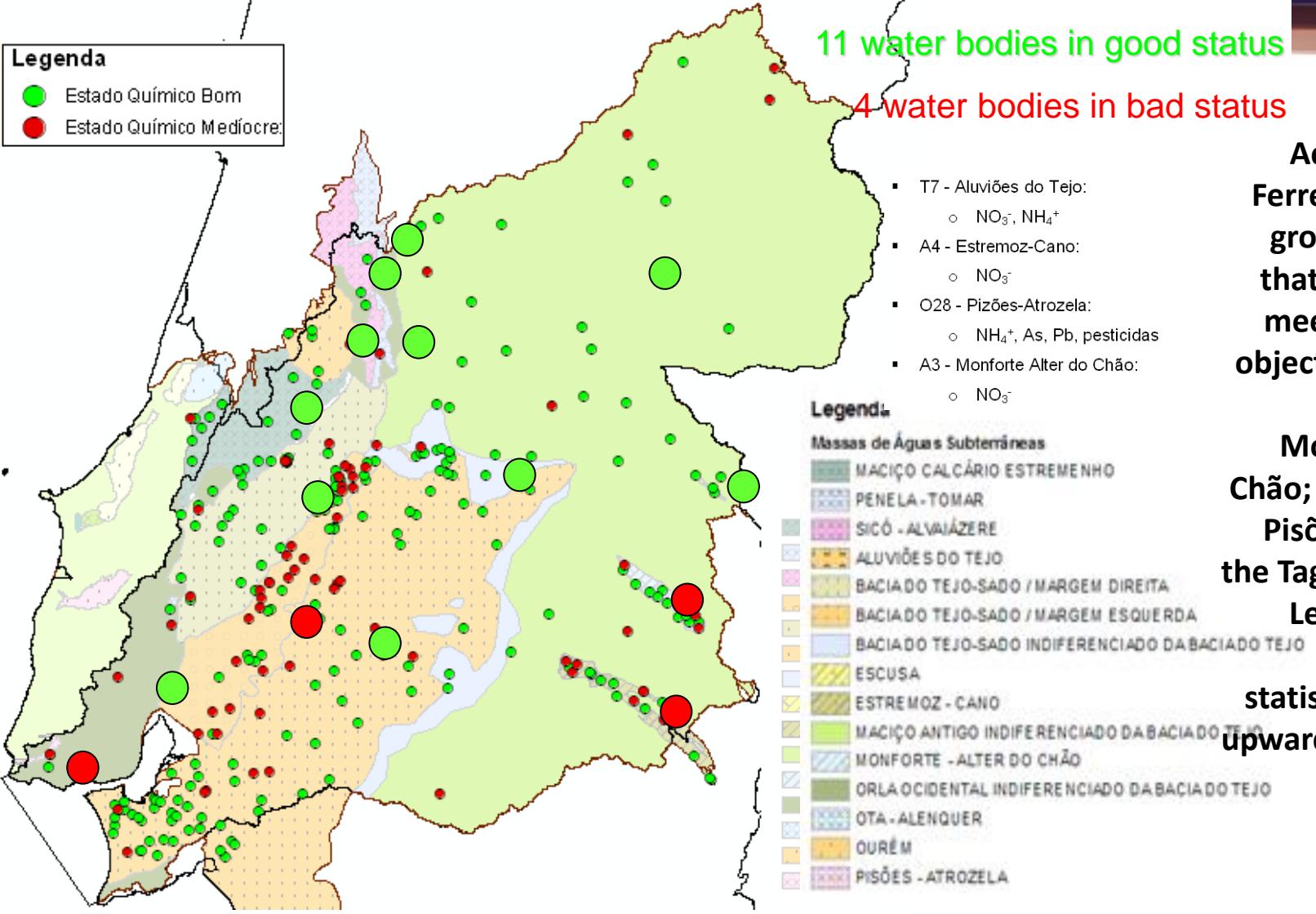
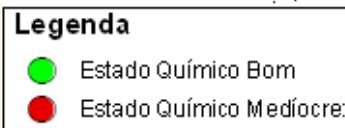
## Monforte – Alter do Chão (cenário 2050)



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

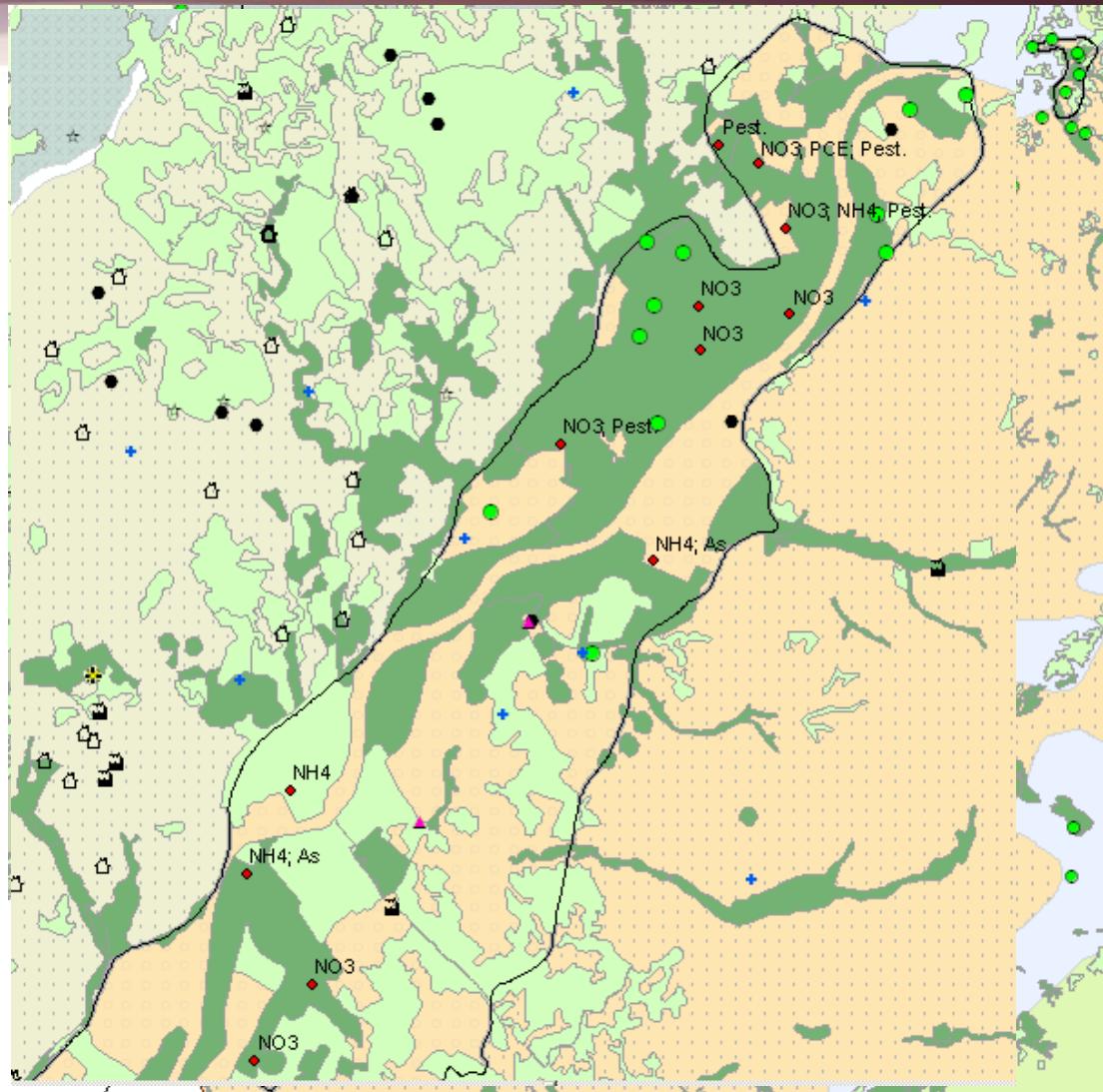


## 7. GROUNDWATER QUALITATIVE ASSESSMENT (WELLS - chemical status)



According to Lobo-Ferreira *et al.* (2011a) groundwater bodies that currently do not meet desired quality objectives in the Tagus RBMP area are: Monforte - Alter do Chão; Estremoz - Cano; Pisões - Atrozela and the Tagus alluvium. The Left Bank of Tagus-Sado also has a statistically significant upward trend of nitrate and ammonium nitrogen.

## 8. FOCUS ON AGRICULTURAL PRESSURES



### Legenda

- Estado Químico Bom
- Estado Químico Mediocre
- tejo-areas-agricolas-anuais
- tejo-areas-agricolas-permanentes
- ALUVIÕES DO TEJO
- BACIA DO TEJO-SADO / MARGEM DIREITA
- BACIA DO TEJO-SADO / MARGEM ESQUERDA

# MANAGEMENT OF AGRICULTURE LAND USE BASED ON GROUNDWATER SUSTAINABILITY SCENARIOS

## A Case-Study in Portugal



Framework

Objectives

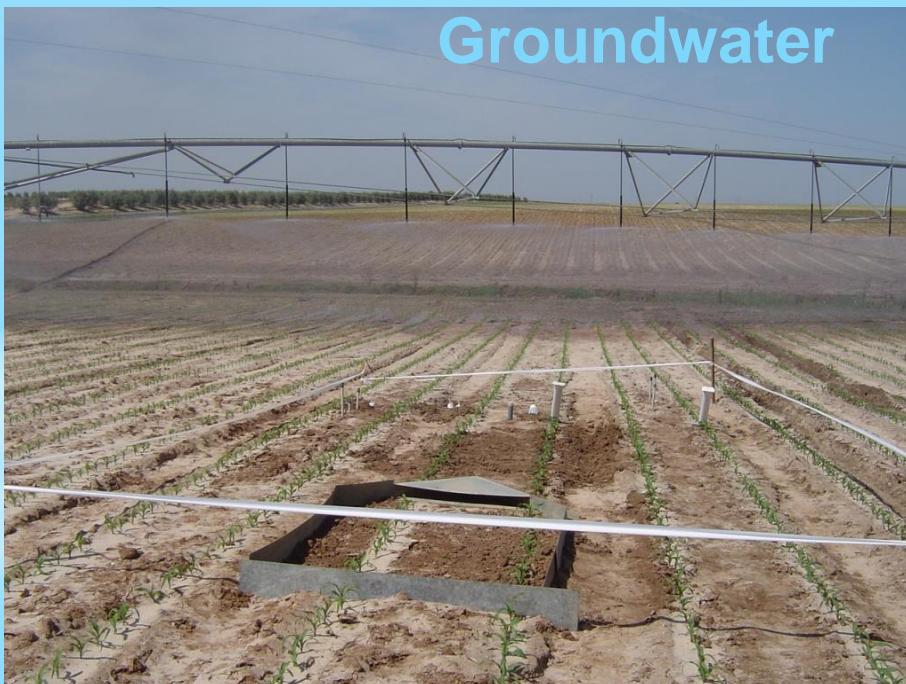
Tasks

Development

Results

### Vadose zone monitoring and modelling

Groundwater



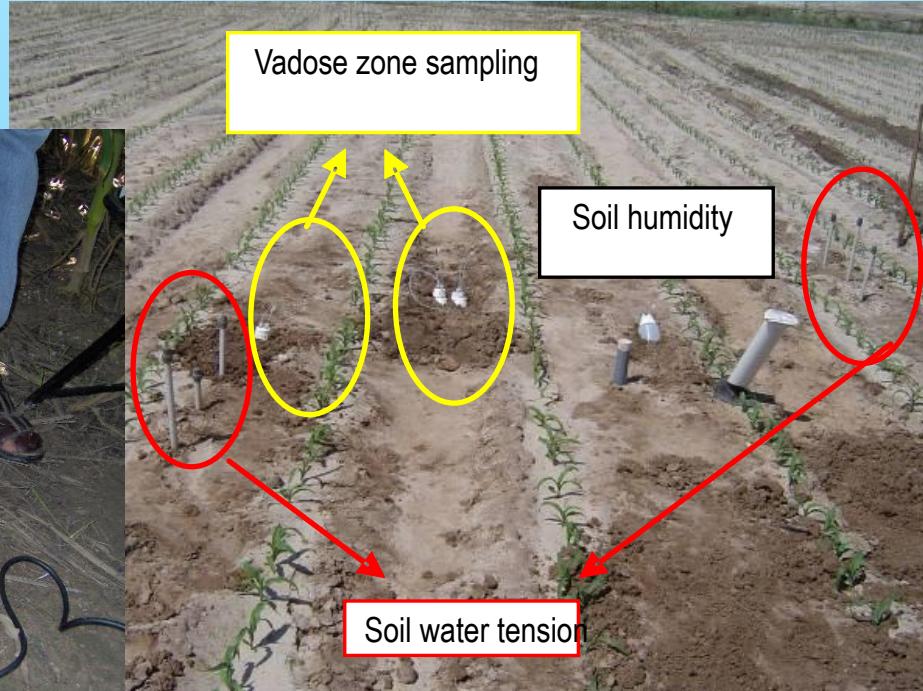
### Runoff and groundwater return flow to rivers



# MANAGEMENT OF AGRICULTURE LAND USE BASED ON GROUNDWATER SUSTAINABILITY SCENARIOS

## A Case-Study in Portugal



Framework	Objectives	Tasks	Development	Results
	<p><b>Soil sampling</b> (0 - 15 cm, 15 - 30 cm, 30 - 45 cm, 45 - 60 cm e 60 - 75 cm) for:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>o Pressure-tension curves</li><li>o Soil bulk density</li><li>o Porosity</li><li>o Textural analysis</li><li>o Physico-chemical analysis</li></ul>			<p>Vadose zone sampling</p> <p>Soil humidity</p> <p>Soil water tension</p>

# MANAGEMENT OF AGRICULTURE LAND USE BASED ON GROUNDWATER SUSTAINABILITY SCENARIOS

## A Case-Study in Portugal



Framework

Objectives

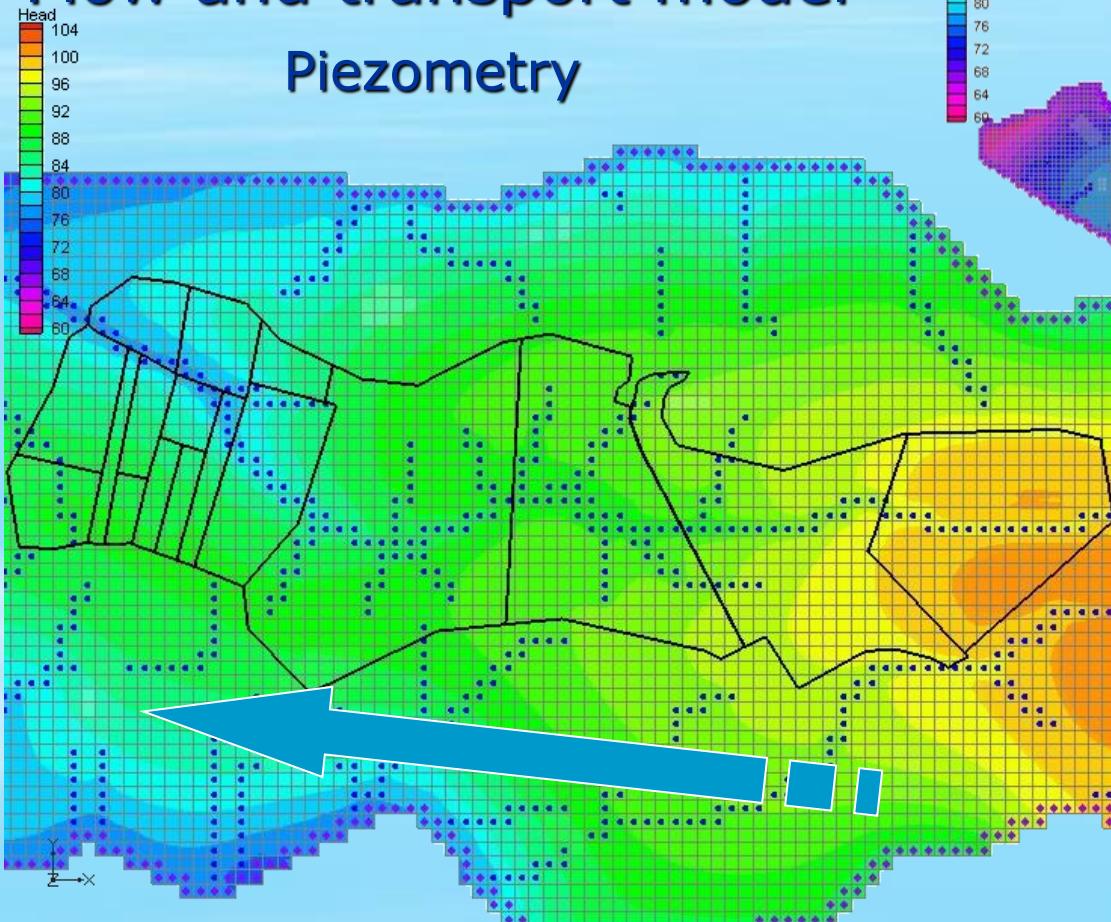
Tasks

Development

Results

### Flow and transport model

#### Piezometry



Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

80

76

72

68

64

60

Head

104

100

96

92

88

84

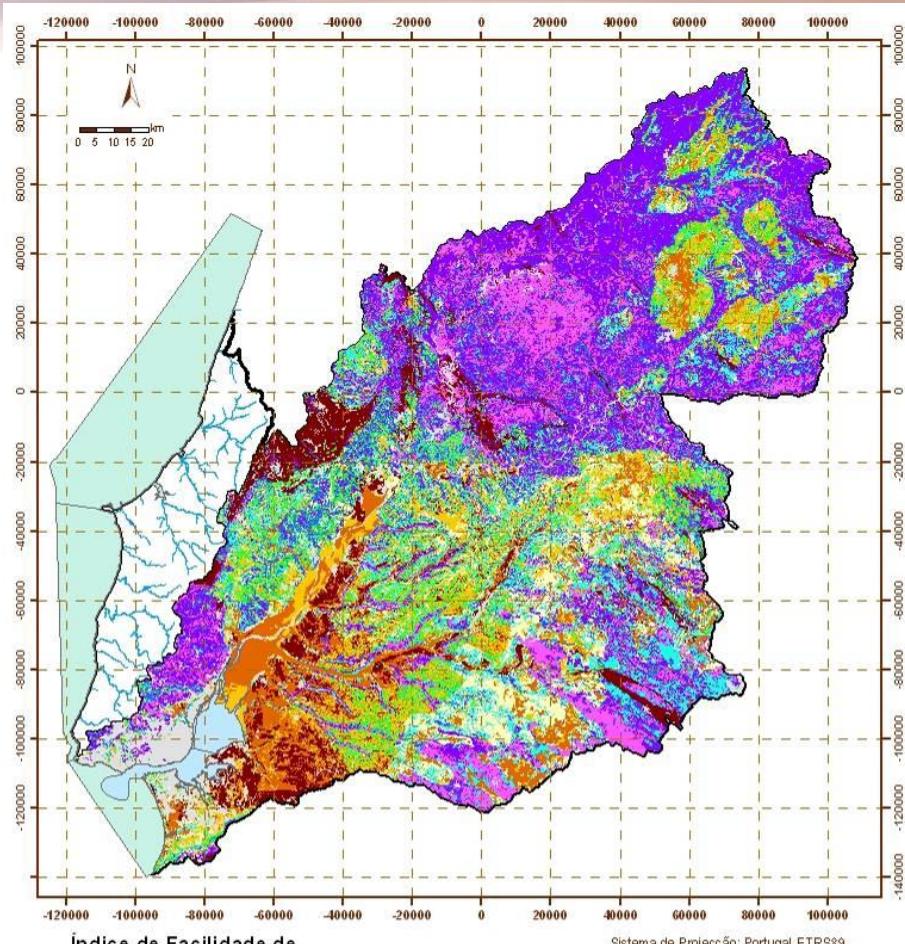
80

76

</div



## 9. RISK ASSESSMENT : INFILTRATION FACILITY INDEX



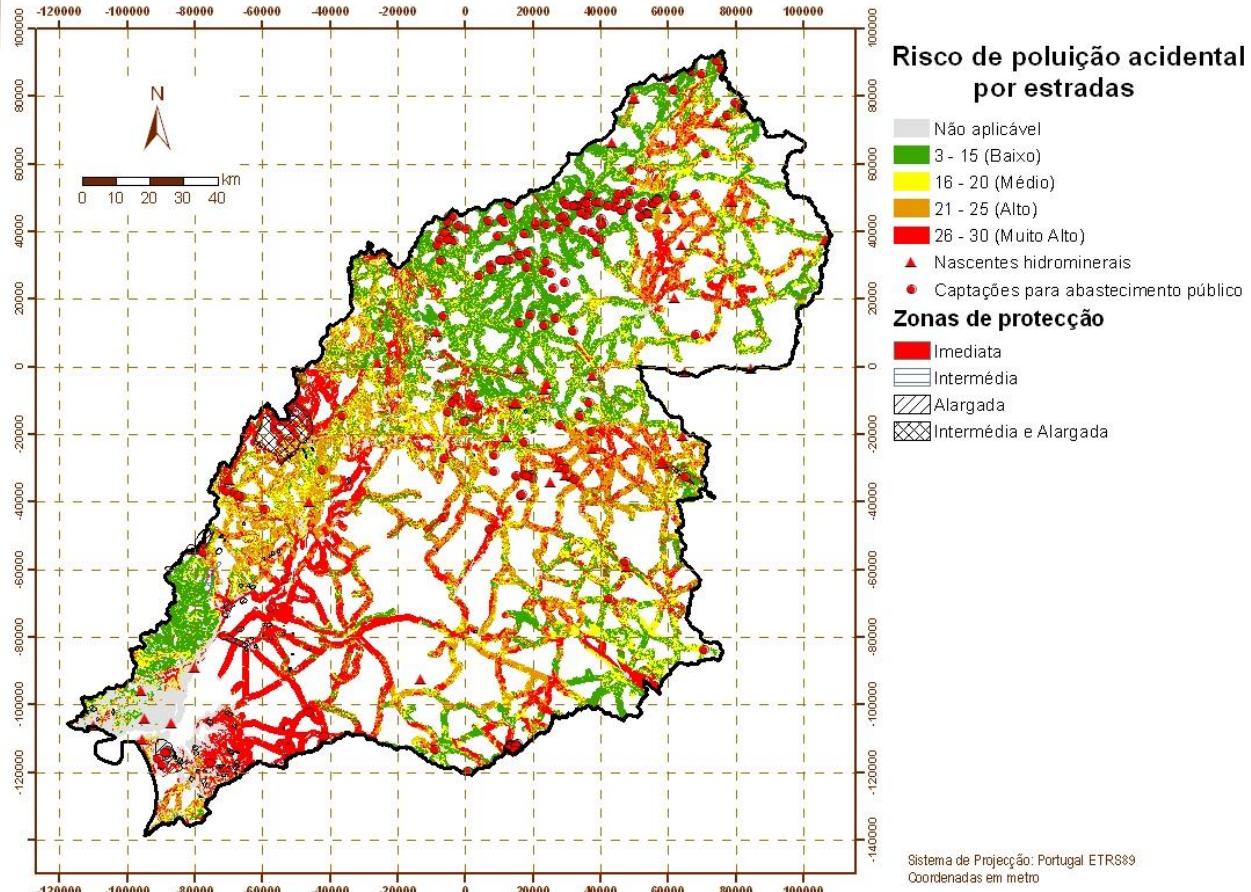
Não aplicável	—
3 - 10	—
11 - 15	—
16 - 18	—
19 - 20	—
21 - 22	—
23 - 24	—
25 - 26	—
27 - 28	—
29 - 30	—

- (1) Geology. This factor can take the IFI to its maximum value (if an area is very fractured or karstic). If not, then three other factors need to be assessed:
- (2) Soil type
- (3) Topographic slope (<2%, 2-6%, 6-12%, 12-18%, >18%)
- (4) Maximum amount of storable water in the soil that can be used for evapotranspiration - AGUT (ten classes of 50 mm ranging from <50 mm to > 450 mm).

Cursos de água  
Transição  
Costeiras



## 10. GROUNDWATER ROAD POLLUTION RISK ASSESSMENT



To support analysis of the risk of accidental pollution associated with roads, we simplified the method published by Leitão *et al.* (LNEC, 2005). We divided the scale of the IFI index into four risk classes:

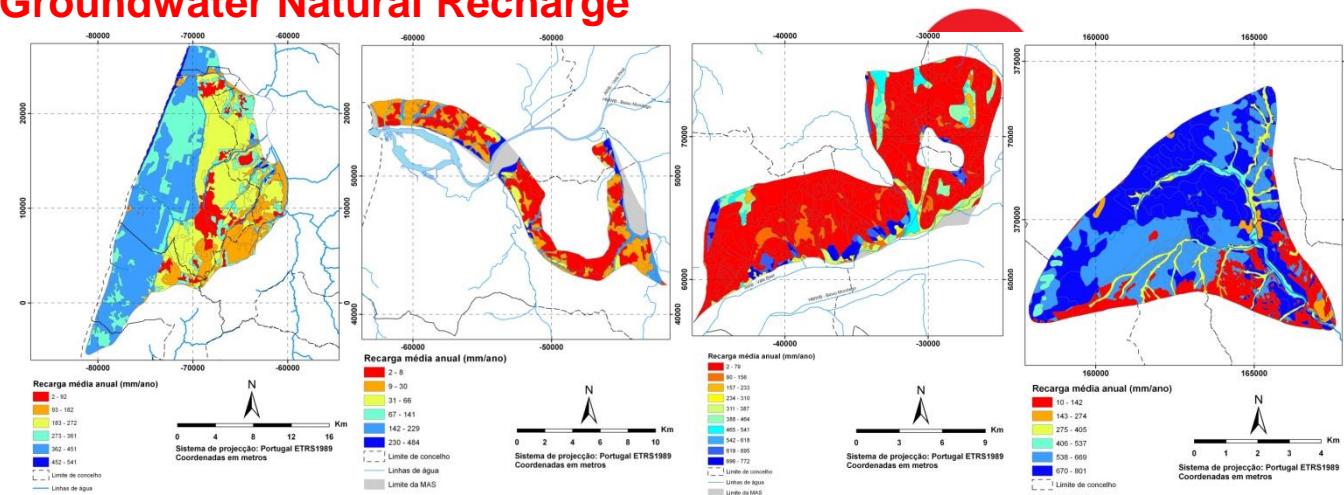
- 3-15 = Low risk
- 16 to 20 = Medium risk
- 21 to 25 = High risk
- 26 to 30 = Very high risk

The map (left) overlays the IFI analysis, road network, pumping well protection areas, springs and 1km adjacent to the road axis, allowing classification of risks of accidental groundwater pollution from roads, according to the four risk classes.



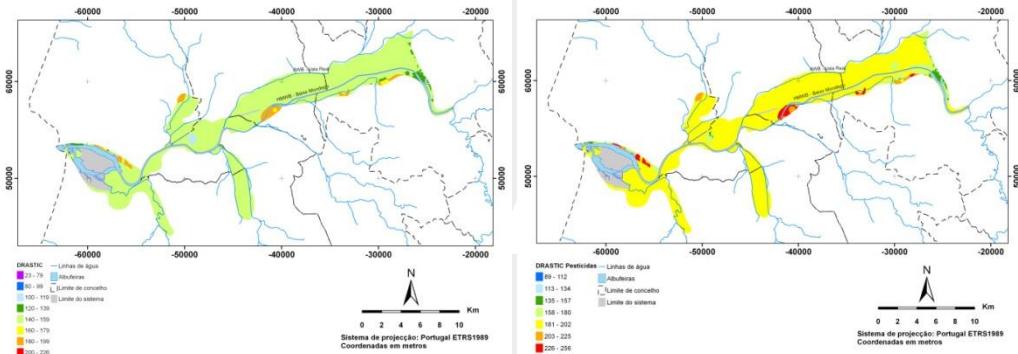
## Task 4.1 – Modelling of Groundwater Natural Recharge

- > Calculation of average annual recharge for a time series from 20 to 30 years, through the model BALSEQ\_MOD.



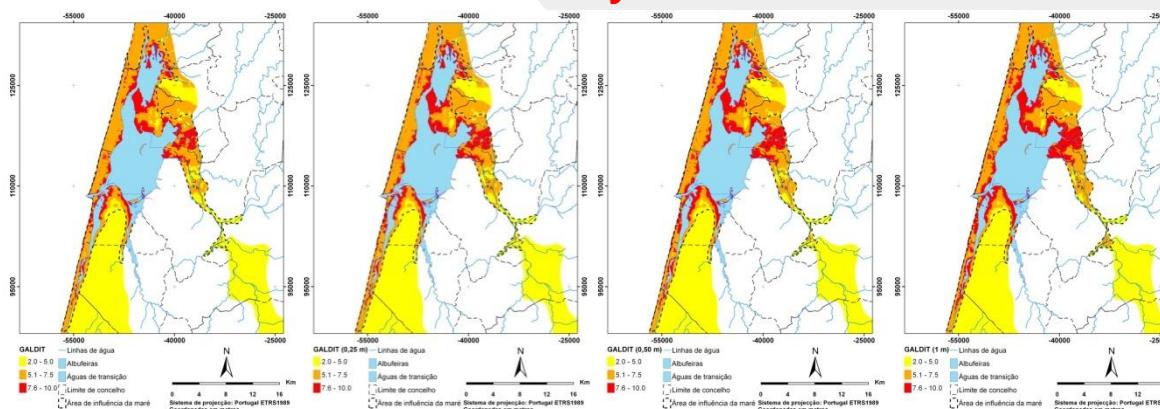
## Task 4.2 – Characterization of Groundwater Vulnerability to Pollution

- > Determination of groundwater vulnerability to pollution for all systems of the Center region through the DRASTIC method.



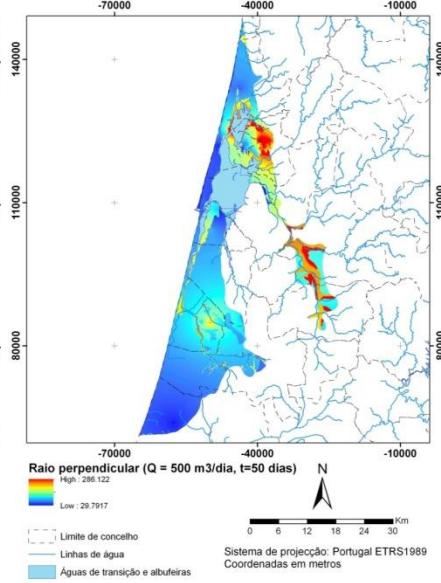
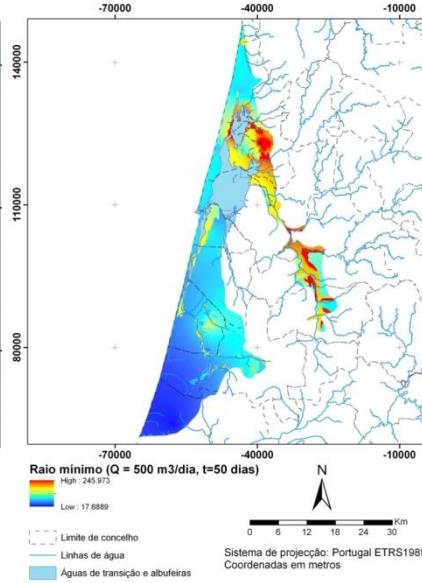
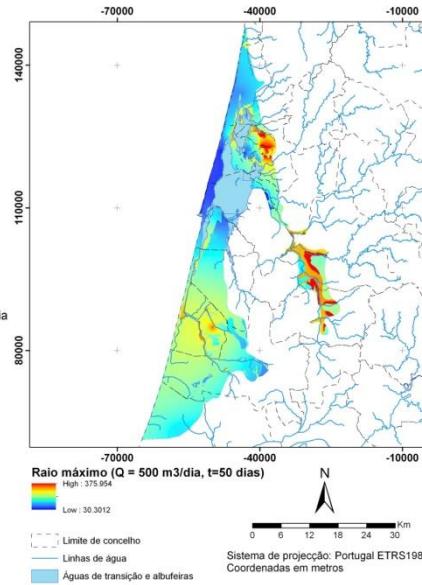
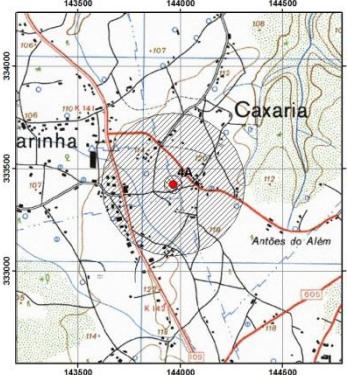
## Task 4.3 – Characterization of Groundwater Vulnerability to Saline Intrusion

- > Using the methodology GALDIT in determining vulnerability to saltwater intrusion in the current situation and in scenarios of increasing sea level.



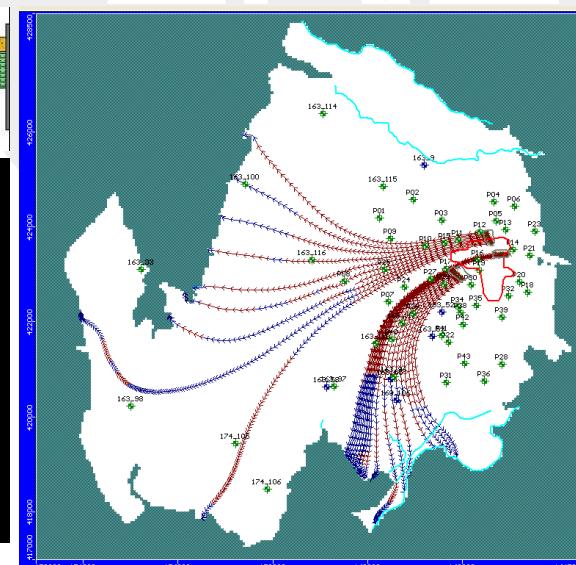
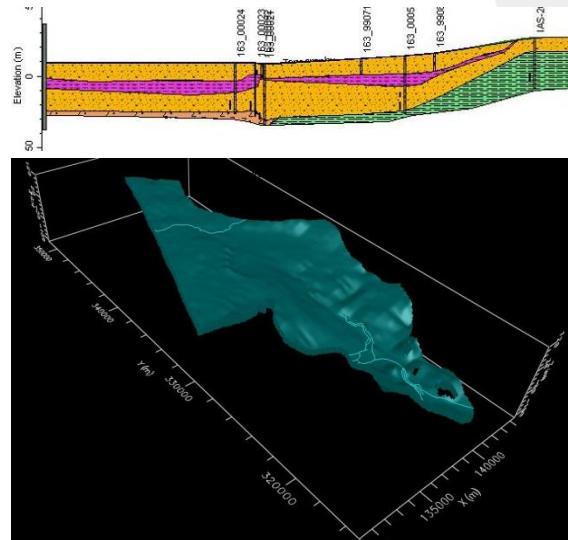
## Task 4.4 – Modeling Groundwater Wellhead Protection Areas

- > Application of methods of delimitation of protection perimeters (Krijgsman and Lobo Ferreira);



## Task 4.5 – Mathematical Modelling in Aquifer Systems

- > Creation of conceptual models of aquifer systems as a basis for decision support tools;





Plano de Gestão  
da Região Hidrográfica  
do Tejo



Plano das Bacias Hidrográficas  
das Ribeiras do Oeste

## 11. CONCLUSIONS: TAGUS RIVER BASIN GW BODIES IN GOOD STATUS BY

### **Good by 2015:**

Monforte - Alter do Chão (carbonated with decreasing NO<sub>3</sub><sup>-</sup> trend)

Pisões - Atrozela (carbonated with several parameters in bad status, small area lacking dada, no trends)

### **Good by 2021:**

Estremoz - Cano (carbonated with increasing NO<sub>3</sub><sup>-</sup> trend)

Torres Vedras (problems confined to a small area; with increasing NO<sub>3</sub><sup>-</sup> trend)

Paço (problems confined to a small area; with increasing NO<sub>3</sub><sup>-</sup> trend))

### **Good by 2027:**

Aluviões do Tejo (high values of several parameters with large travel times)

Caldas da Rainha - Nazaré (several parameters in bad status in a large area)



MINISTÉRIO DO AMBIENTE  
E DO ORDEMAMENTO DO TERRITÓRIO



Administração da  
Região Hidrográfica  
do Tejo I.P.



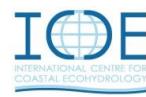
HIDROPROJECTO

ENGENHARIA E GESTÃO, S.A.

A Subsidiary of



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL





## 12. RECOMENDATIONS: EXAMPLE OF MEASURES TO BE IMPLEMENTED (2012-2027)

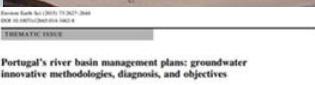
Medidas de Base	Legislação a que se refere
<b>Pormenorização das medidas</b>  <b>MEDIDAS DE BASE:</b> <b>Área Temática – Qualidade da água:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>■ Articulação com a Direcção Regional da Agricultura para acompanhamento e fiscalização da implementação dos Planos de Acção para as zonas vulneráveis aos nitratos (Portaria n.º 83/2010 de 10 de Fevereiro) e do Código de Boas Práticas Agrícolas (CBPA)</li><li>■ Avaliação da eficácia da aplicação das medidas preconizadas (CBPA, PDR 2007-2013, PNUEA, PNPOP) na melhoria do Estado Químico geral das águas subterrâneas subjacentes</li><li>■ Análise dos principais problemas e dificuldades identificados após alguns anos de implementação do CBPA e análise de medidas ou processos alternativos</li><li>■ Criação de um sistema de apoio à adequação dos fertilizantes e pesticidas às necessidades das Culturas</li><li>■ Criação de estímulos financeiros aos produtos agrícolas que venham a ser produzidos sob as boas práticas recomendadas</li><li>■ Criação de incentivos à prática da agricultura biológica</li><li>■ Desenvolvimento de áreas piloto, em articulação com proprietários de explorações agrícolas, para avaliação de possibilidades de substituição de fertilizantes químicos por águas residuais ricas em matéria orgânica</li></ul>	<b>MB-III.1</b> Medidas destinadas a melhorar a qualidade das massas de águas subterrâneas afectadas por nitratos de origem agrícola  <b>Decreto-Lei 235/97 (DL 68/99)</b> - zonas vulneráveis à contaminação causada por nitratos de origem agrícola



# LABORATÓRIO NACIONAL D'ENGENHARIA CIVIL

<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-014-3462-8>

## Obrigado / Thank you / 謝謝 / Merci



Received: 21 November 2013; Accepted: 17 June 2014; Published online: 30 July 2014  
Springer Online First DOI: 10.1007/s12665-014-3462-8

**Abstract** The European Union Water Framework Directive aims to protect surface water bodies and marine waters, ensuring their protection and recovery and to integrate environmental objectives through the implementation of programs and measures to achieve river basin management plans (RBMPs). For this purpose, information systems have been developed to support the management of water resources effectively and efficiently, within the process of characterization and modeling of quantitative and qualitative aspects of the water body, and for solving the projected climate change scenarios. This paper addresses the development of the first RBMP for Portugal by KRMIP, exemplified for the Tagus and the Mondego River Basins. The RBMP is based on the scenario of the evolution of the hydrological regime due to climate change, assuming projected for 2020–2050 for the aquifer system of Tâmega-Vouga (West Iberian Peninsula). The methodology used for the RBMP is methodology to classify regional surface water bodies in hydrological regimes, which is described in detail. The procedure is presented. A synthesis of the diagnosis and the proposed actions for the two basins is presented. The full report is published by the Commission that develops the Green Deal, the Environment and Climate Change, LNEC and ECIU, in Lobo-Fonseca et al. (*Cooperative Hydroproject*, SUECCE).

J. P. Lobo-Fonseca (✉), T. R. Leitão, M. M. Oliveira  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC,  
Av. das Forças Armadas, Edifício II, 1649-026 Lisboa, Portugal  
e-mail: jlobo@lne.pt  
T. R. Leitão  
e-mail: tleitao@lne.pt  
M. M. Oliveira  
e-mail: mola@lne.pt



# GROUNDWATER IN THE NEW EU WATER MANAGEMENT PLANS

- **Integrated River Basin Management and Integrated Water Resource Management**

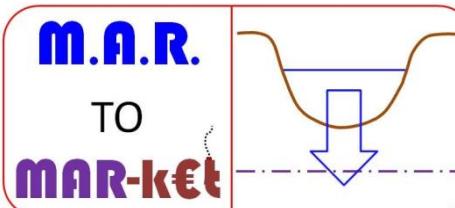
- EU Experience of 10 Years WFD Implementation (2002 / 2012)

- The Portuguese RBMP Experience

- > 1. GROUNDWATER IN TAGUS AND OESTE RIVER BASINS MANAGEMENT PLANS
    - > 2. GROUNDWATER QUANTITATIVE ASSESSMENT
    - > 3. HYDROGEOLOGY ASSESSMENT IN 3D
    - > 4. FULFILMENT OF LEGAL OBLIGATIONS
    - > 5. DIAGNOSIS: IMPLICATIONS OF CLIMATE CHANGE FOR GROUNDWATER RECHARGE
    - > 6. GROUNDWATER QUALITATIVE ASSESSMENT (WATER BODIES)
    - > 7. GROUNDWATER QUALITATIVE ASSESSMENT (WELLS)
    - > 8. FOCUS ON AGRICULTURAL PRESSURES
    - > 9. RISK ASSESSMENT : INFILTRATION FACILITY INDEX
    - > 10. GROUNDWATER ROAD POLLUTION RISK ASSESSMENT
    - > 11. CONCLUSIONS: e.g. TAGUS RIVER BASIN GW BODIES IN GOOD STATUS BY 2015/2021/2027
    - > 12. RECOMENDATIONS: EXAMPLE OF MEASURES TO BE IMPLEMENTED (2012-2027)

- **Interaction with actors and dissemination**

Develop and demonstrate solutions, based on **Managed Aquifer Recharge (MAR)** in nine case studies, with inclusion of ecological modelling, economic incentives and risk aspects.



# MARSOL: Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought

The Mediterranean region is suffering from increasing **water scarcity**, which is further exacerbated by climate change, high population density, and high water consumption by agricultural, industrial, and urban uses. Not only quantity but also **quality** is of increasing importance, e.g. due to intensive use of fertilizers and seawater intrusion. Meanwhile, **large water quantities are lost** to the Mediterranean Sea as surface runoff, river discharge, discharge of treated and untreated wastewater, and as discharge of excess water from various sources during periods of low demand. This water can be used in principle for the **controlled (re-)filling of exploited aquifers by artificial infiltration**, referred to as **Managed Aquifer Recharge (MAR)**.

## 1. Lavrion Technological & Cultural Park, Greece

→ Development and implementation of advanced sensors

- Treated wastewater effluents
- Infiltration basins
- Replenishment of exploited aquifer
- Combating seawater intrusion
- Soil Aquifer Treatment



## 2. Algarve and Alentejo, Portugal

→ River water infiltration at three sites

- Surface water
- Infiltration basins
- Wells
- Improving the ecological and chemical status of the aquifer



## 3. Arenales, Castile and Leon, Spain

→ River water infiltration in two catchments

- Surface water
- Treated wastewater effluents
- Infiltration ponds, artificial wetlands, drainage ditches
- Replenishment of exploited aquifer
- Soil Aquifer Treatment



## Demonstration Sites

For the project eight demonstration sites have been selected to represent different MAR purposes and hydrological settings.

- MARSOL follows an holistic approach, which considers different:
- Recharge water sources
  - Recharge techniques
  - MAR objectives



## 8. South Malta Coastal Aquifer, Malta

→ Create a seawater intrusion barrier at a coastal wastewater treatment plant

- Treated municipal sewage effluent
- Injection boreholes
- Combating seawater intrusion



## 7. Menashe Infiltration Basin, Hadera, Israel

→ Aquifer storage of surplus water from the Hadera desalination plant

- Desalinated water
- Infiltration basin
- Seasonal storage and aquifer storage recovery of surplus desalinated water



## 6. Serchio River Well Field, Tuscany, Italy

→ River bank infiltration with an advanced monitoring network

- Surface water
- Induced river bank filtration
- Improving groundwater quantity and quality
- Continuous monitoring and automated operations



## The Project

- 21 Partners
- 36 months, starting 12/2013
- Total budget ~ 8.0 million EUR
- EU contribution ~ 5.2 million EUR



## MARSOL Project—Main Objectives

- Demonstrate at 8 field sites that MAR is a sound, safe, and sustainable strategy to increase the availability of freshwater under conditions of water scarcity.
- Improve the state of MAR applications to enable **low-cost, high-efficiency MAR solutions** that will create market opportunities for European industry and SMEs (MAR to Market).
- Promote the advantages of MAR by tailored training and dissemination programs to enable and accelerate market penetration.
- Deliver a key technology to face the challenge of increasing water scarcity in the Mediterranean region of southern Europe and other regions of the world.

## Tools to Reach the Objectives

- Data collection
- Monitoring (improvement of sensors, new sensors)
- Improvement of MAR devices (planning, design, and maintenance)
- Modelling (to simulate the impact of MAR on aquifer hydrology and hydrogeochemistry)
- Scenario analysis
- Development of a Decision Support System
- Definition of guidelines and policies
- Increase of public participation within Public Private Partnership (PPP) schemes
- Market analysis on the potential market exploitation solutions



Participants of the MARSOL kick-off meeting in Darmstadt, Germany, January 2014



an 10-FFT

Funded project

www.marsol.eu

coordinated by:

Prof. Dr. Christoph Schölkopf

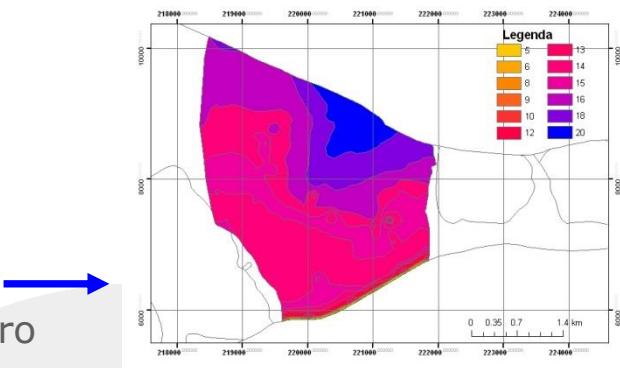
Technische Universität Darmstadt

mar@tuhh.de | tuedarmstadt.de



# Main Results/Conclusions

- Methodology to identify preliminary candidate areas to implement artificial recharge (GABA-IFI Index)

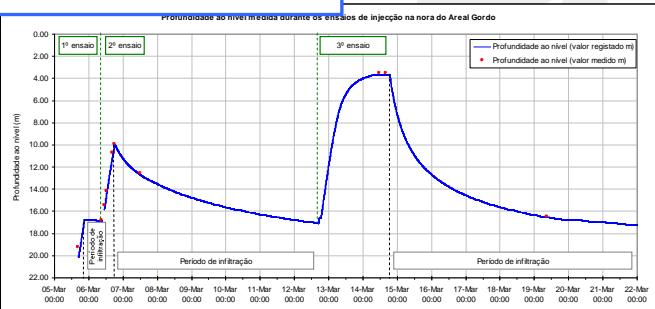


- Artificial recharge infiltration and tracer tests in Campina de Faro

**1) Areal Gordo test site**  
3 Infiltration basins



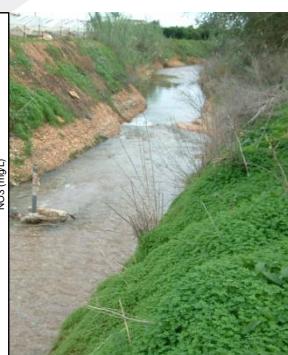
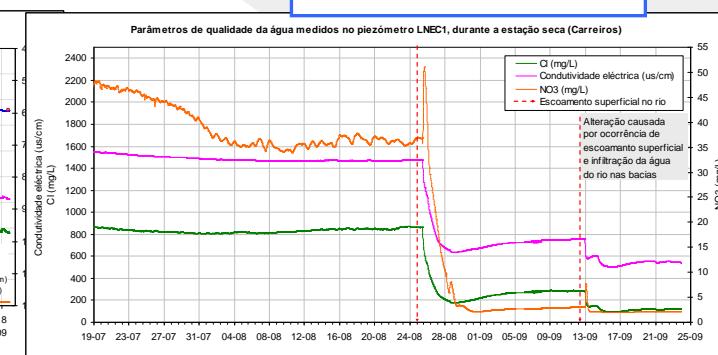
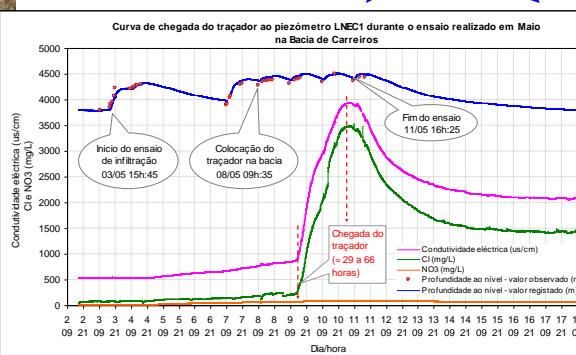
**2A) Areal Gordo test site**  
Injection tests in large diameter well "nora"



**3) Carreiros test site**  
2 Infiltration basins  
in the river bed



**2B) Areal Gordo test site**  
Injection test in medium diameter well



# ARTIFICIAL AQUIFER RECHARGE EXPERIMENTS IN THE PORTUGUESE CAMPINA DE FARO CASE-STUDY AREA, DEVELOPED IN THE FRAMEWORK OF GABARDINE PROJECT

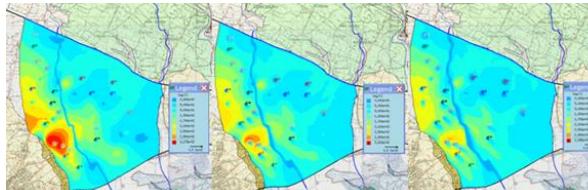
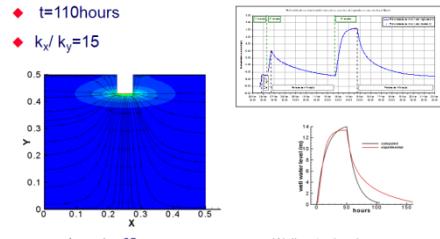
- Flow and transport groundwater modeling for different artificial recharge scenarios in Campina de Faro



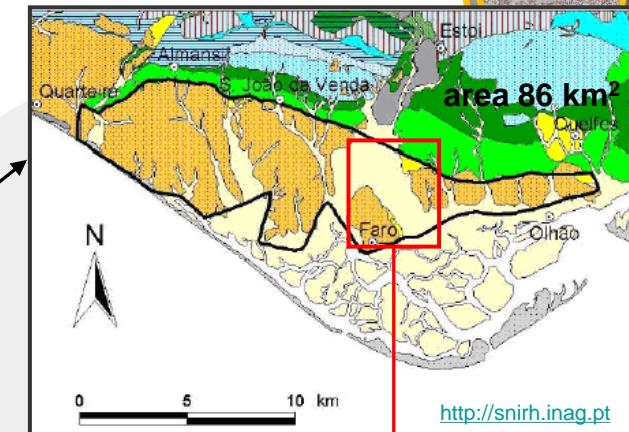
LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



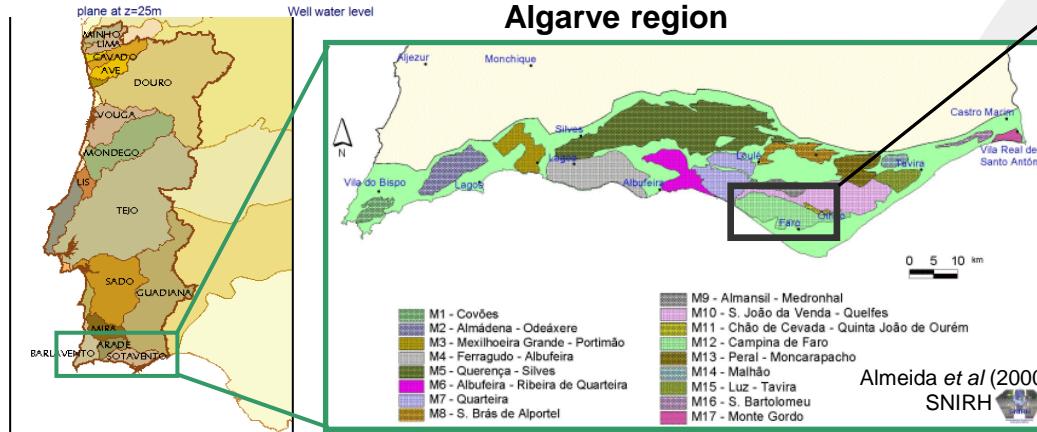
## Portuguese Infiltration well



Aquifer system of  
Campina de Faro

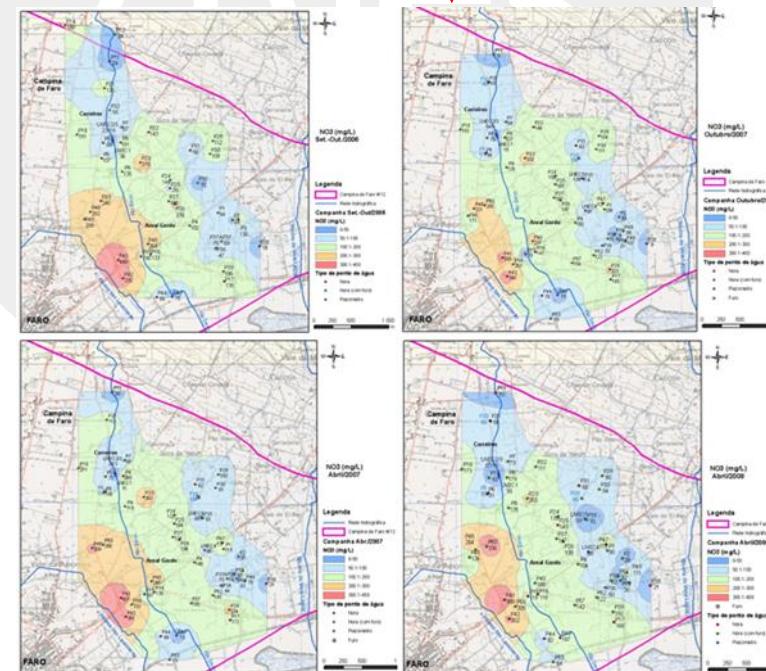
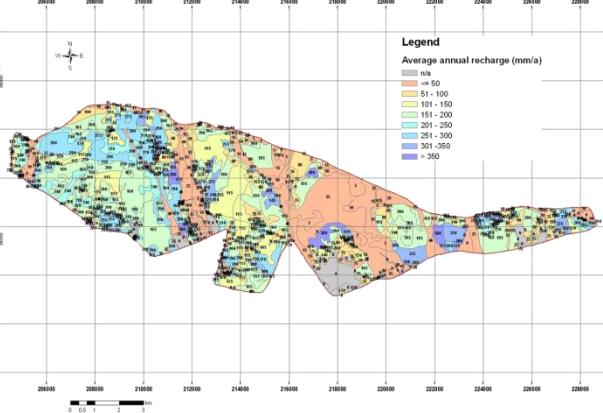
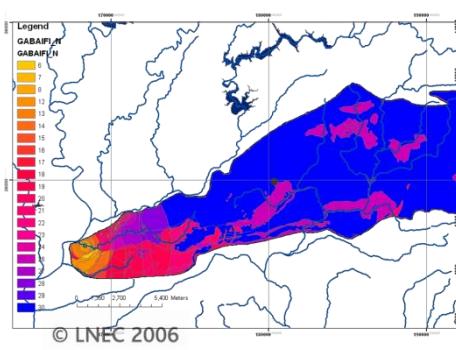


Algarve region



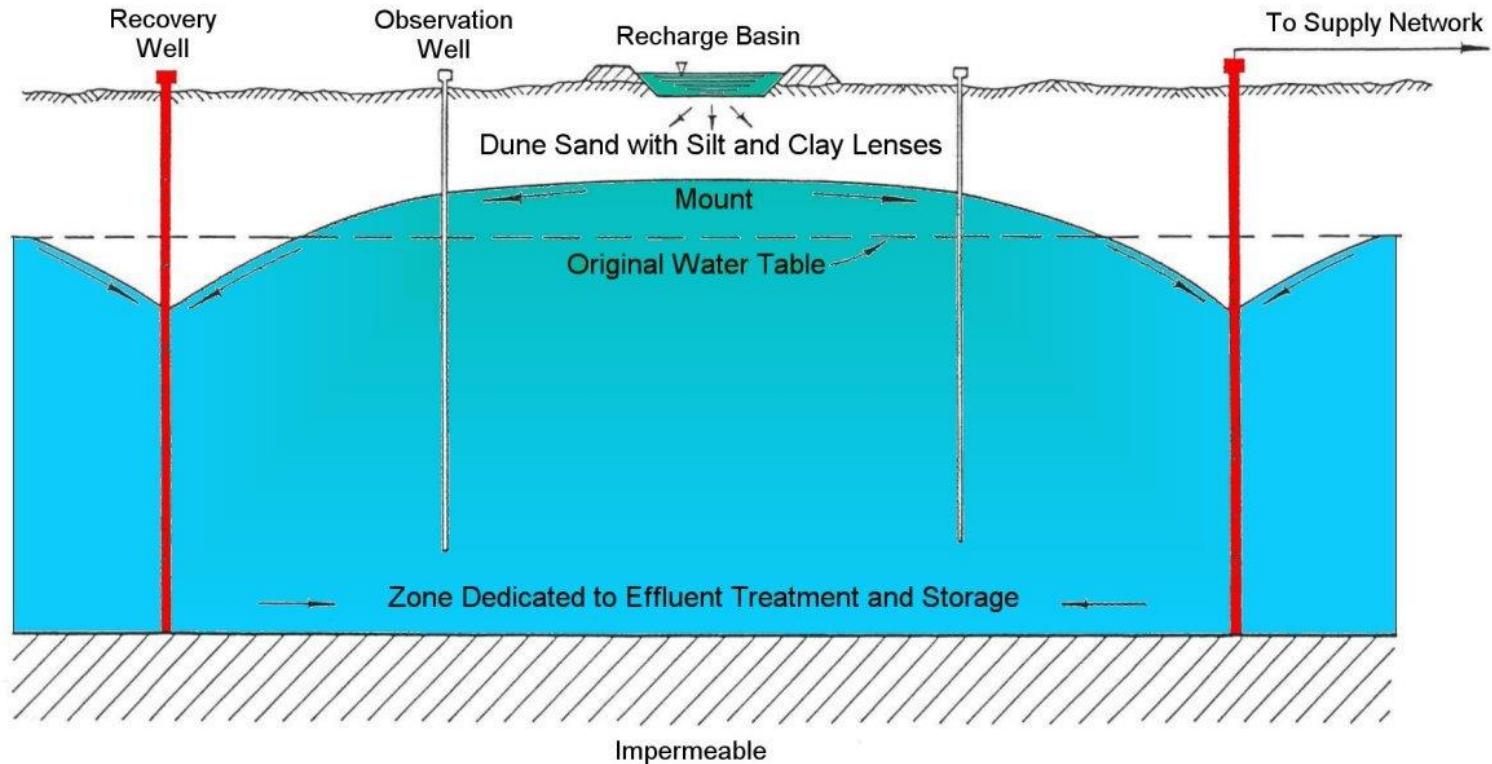
## GABA-IFI<sub>N</sub>

## Aquifer recharge





# Simplified Recharge-pumping scheme

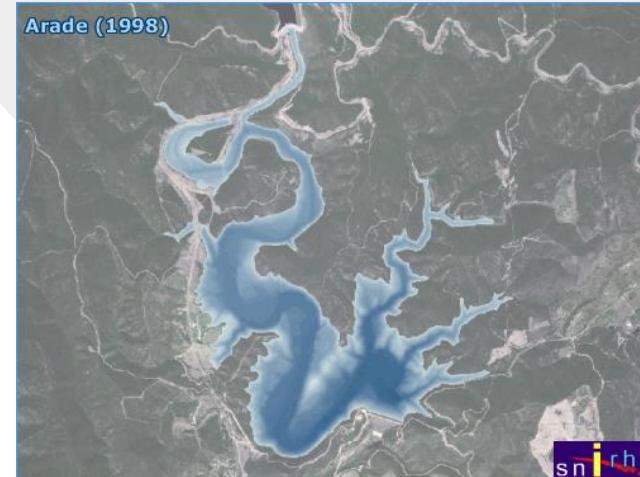


Recharge - Recovery Scheme

# Sources for the artificial recharge : Quantity

Dam	Hydrological year	Depth discharge ( $\times 10^3$ m $^3$ )	Surface discharge ( $\times 10^3$ m $^3$ )	Total discharge ( $\times 10^3$ m $^3$ )
ARADE	2000/2001	37 499.20	19 256.70	56 755.90

Dam	Hydrological year	Depth discharge ( $\times 10^3$ m $^3$ )	Surface discharge ( $\times 10^3$ m $^3$ )	Total discharge ( $\times 10^3$ m $^3$ )
ARADE	1995/96	0	81 255.39	81 255.39
	1996/97	0	42 599.62	42 599.62
	1997/98	8 556.65	113 762.30	122 318.97
<b>TOTAL (<math>\times 10^3</math> m<math>^3</math>)</b>				<b>246 173.98</b>

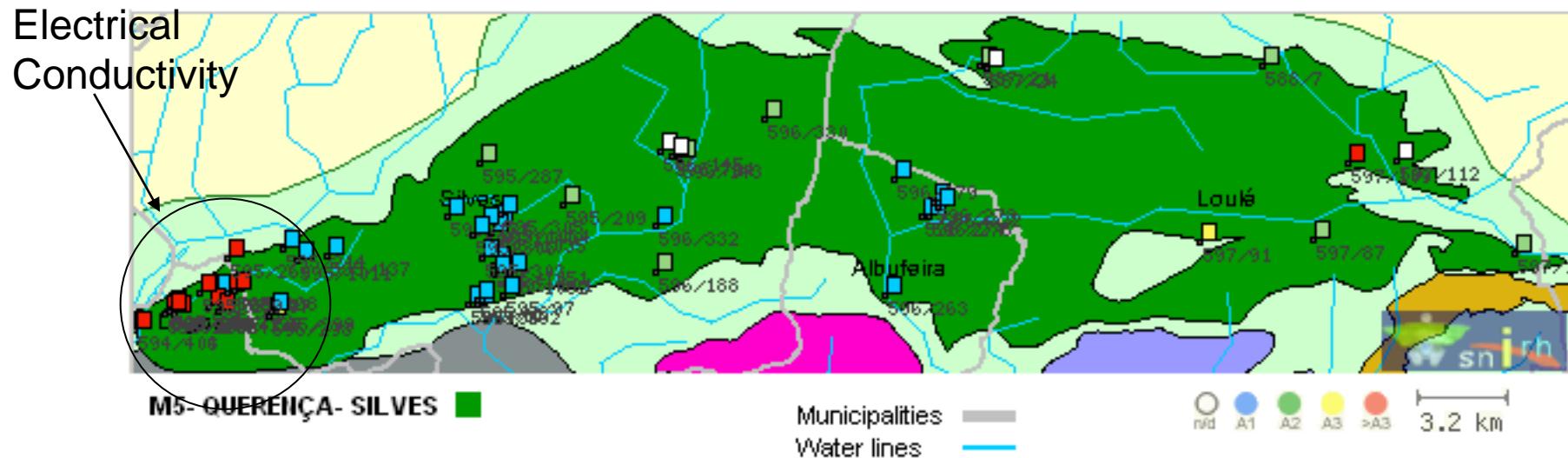


# During the extreme drought of 2004/2005



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

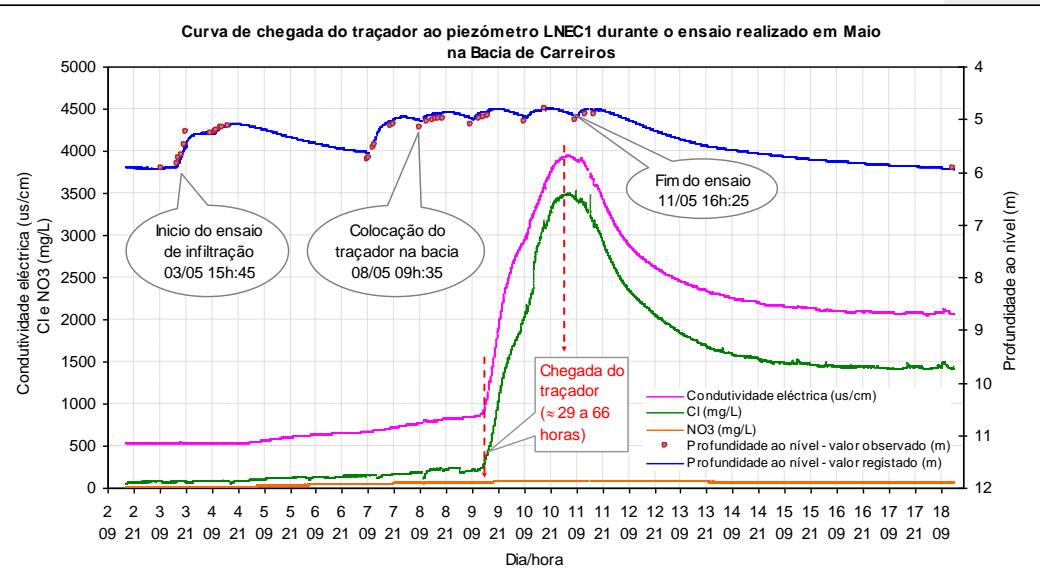
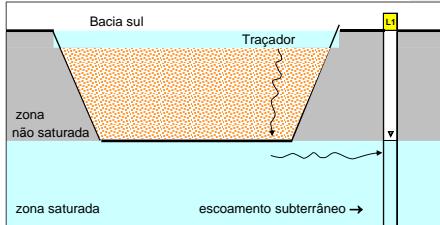
	Volume of withdrawal water (*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Percentage
Agriculture	23.79	47.31%
Urban supply of the <i>Águas do Algarve</i> regional system of Algarve	14.25	28.34%
Urban supply of the local municipalities	12.25	24.36%
Private users	Not Available	-
Total	50.29	100%



# Results from continuous monitoring (groundwater and surface water) in Rio Seco artificial recharge basins during winter time (Out.2007/Mar.2008) Carreiros test site

## Natural recharge monitoring

- ✓ Continuous monitoring in three piezometers



## Artificial recharge experiments

- ✓ Electrical resistivity assessment

May 2007



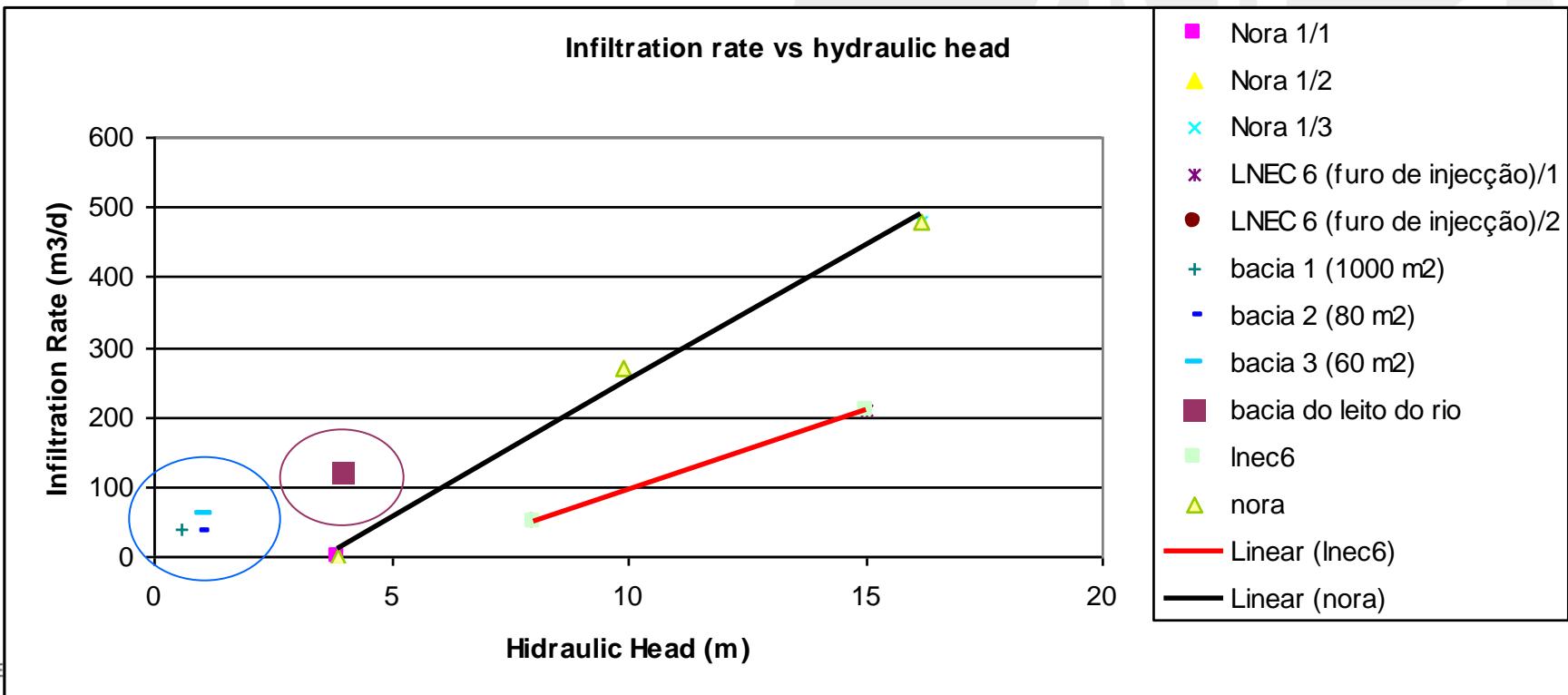
# Correlation infiltration rates vs hydraulic head and soil types



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

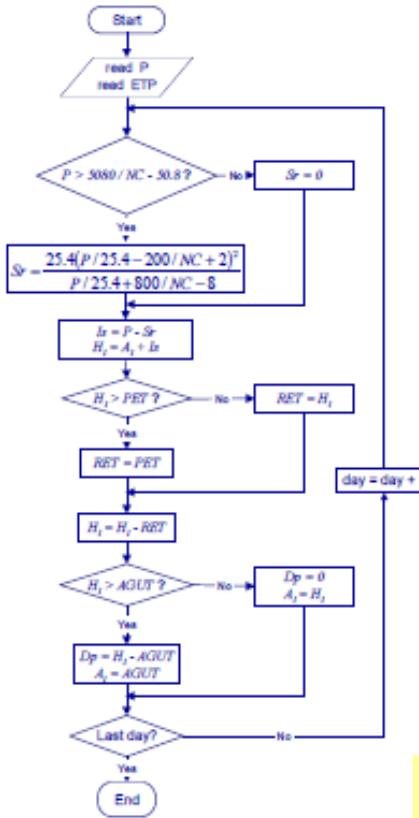


Test site Algarve	Infiltration rate (m <sup>3</sup> /d)	Hydraulic Head (m)	Soil type
Nora 1/1 (5 m diameter)	0.27	3.85	yellow sand
Nora 1/2 (5 m diameter)	270	9.88	yellow sand
Nora 1/3 (5 m diameter)	480	16.19	yellow sand
LNEC 6/1 (0.5 diameter)	208	15	yellow sand
LNEC 6/2 (0.5 diameter)	50	8	yellow sand
bacia 1 (1000 m <sup>2</sup> )	40	0.6	red sand
bacia 2 (80 m <sup>2</sup> )	37	1	brown sand
bacia 3 (60 m <sup>2</sup> )	60	1.025	yellow sand
bacia do leito do rio (80 m <sup>2</sup> )	120	4	yellow sand

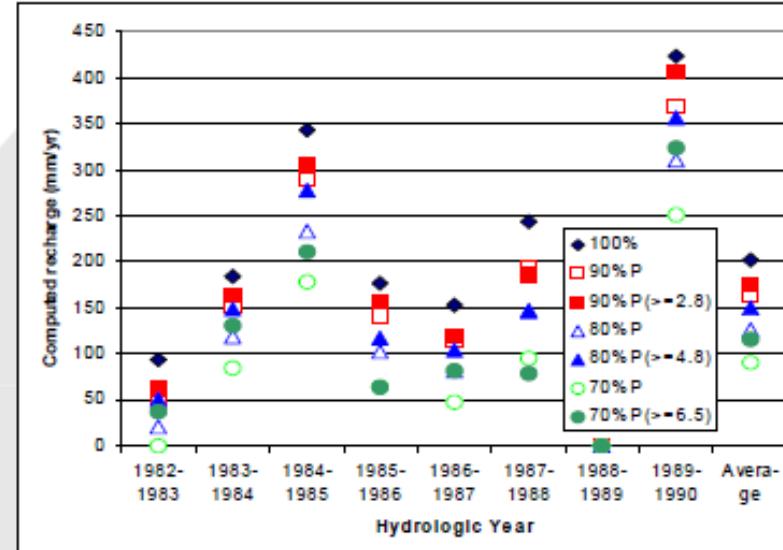
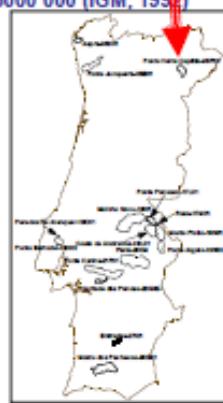
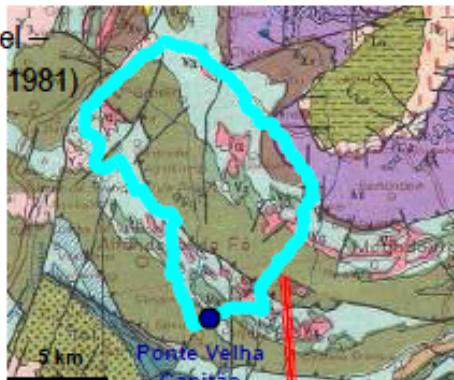


# Estudos LNEC

Sequential daily water balance model –  
the **BALSEQ** model (Lobo Ferreira, 1981)

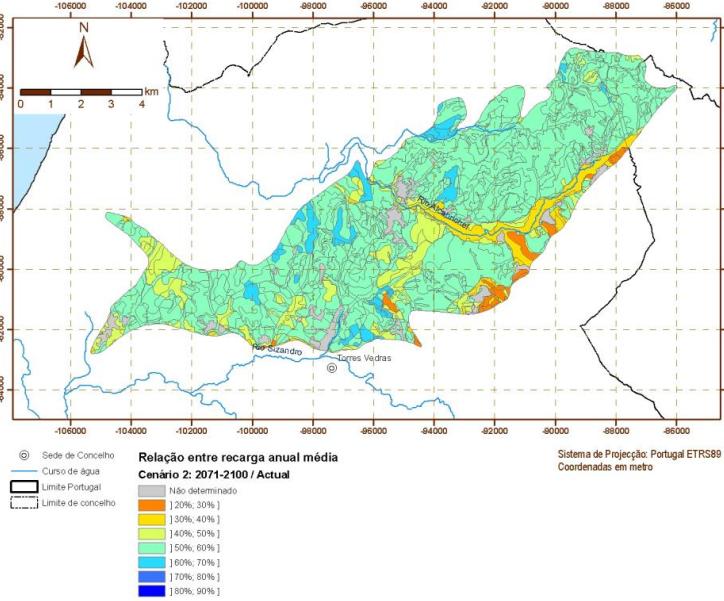
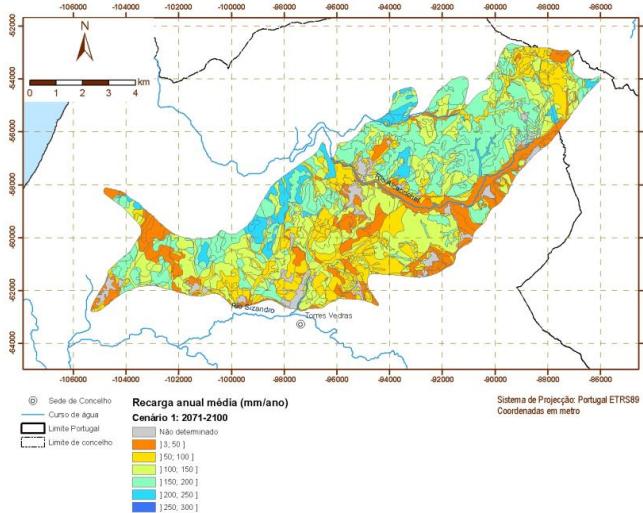
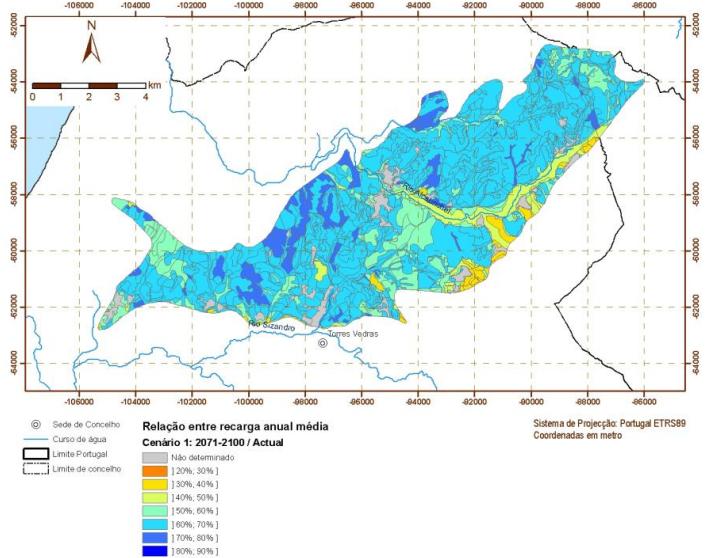
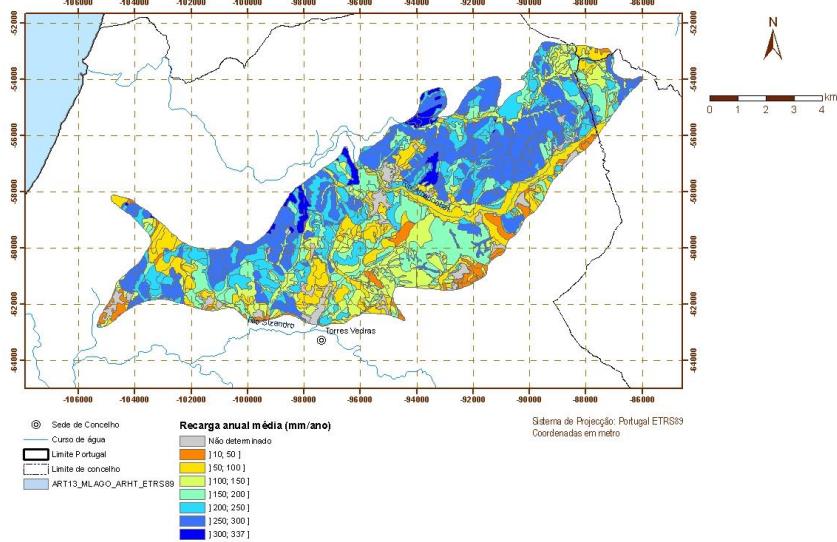


NC = 80  
AGUT = 100 mm  
hi = 0 mm  
  
9 years  
Avg P = 715 mm/yr



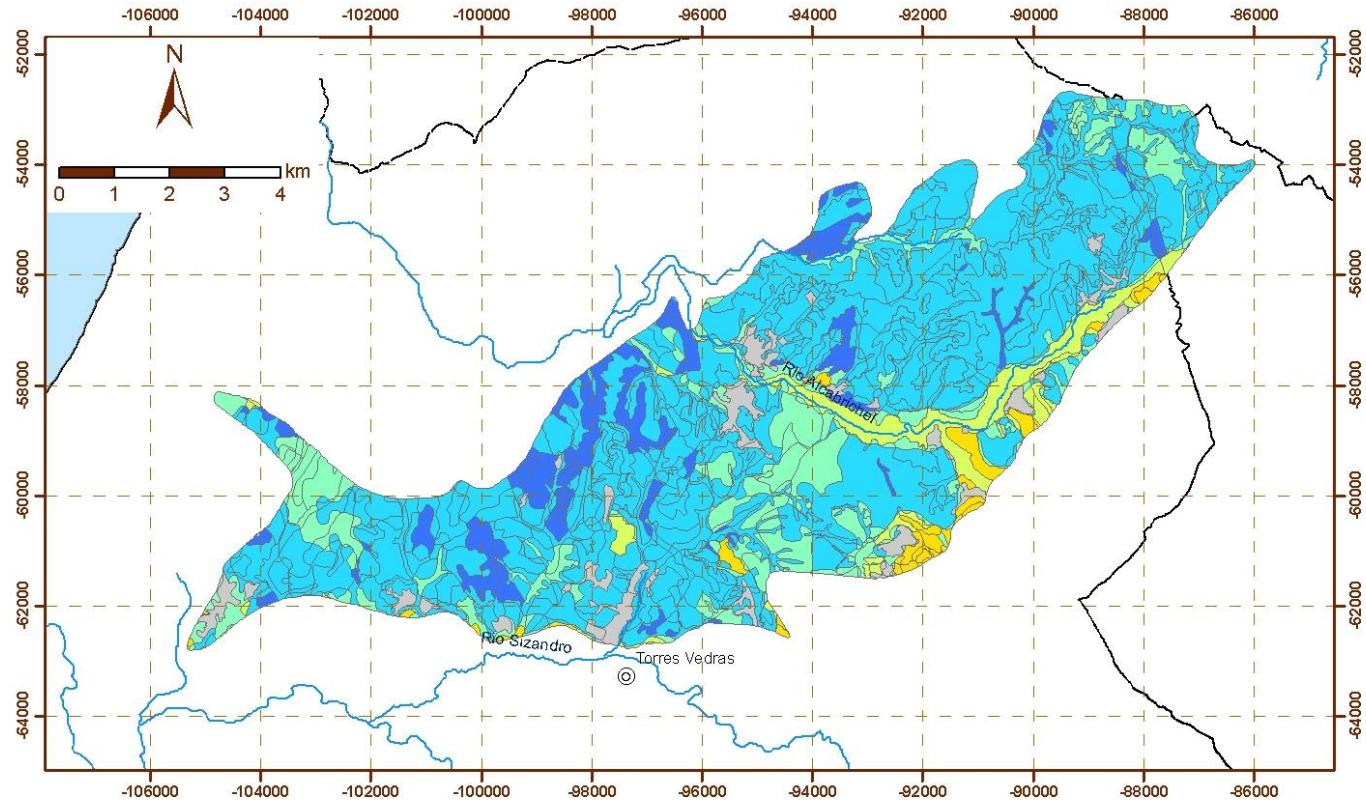
- Starting point: source precipitation series - SPS

- 90 % of SPS
  - (1) applying the percentage factor to the SPS – only diminishes the daily amount of precipitation
- 80 % of SPS
  - (2) considering a cut-off value for daily precipitation so that the sum of daily precipitation values larger than that cut-off value would result in the required percentage of SPS – assumes that climatic changes always produce more intensive precipitation episodes
- 70 % of SPS





# Estudos LNEC – Planos de Bacia



○ Sede de Concelho

— Curso de água

— Limite Portugal

— Limite de concelho

Não determinado

[120%; 30%]

[130%; 40%]

[140%; 50%]

[150%; 60%]

[160%; 70%]

[170%; 80%]

[180%; 90%]



## EXAMPLES OF INNOVATIVE METHODOLOGIES



Administração da  
Região Hidrográfica  
do Norte I.P.



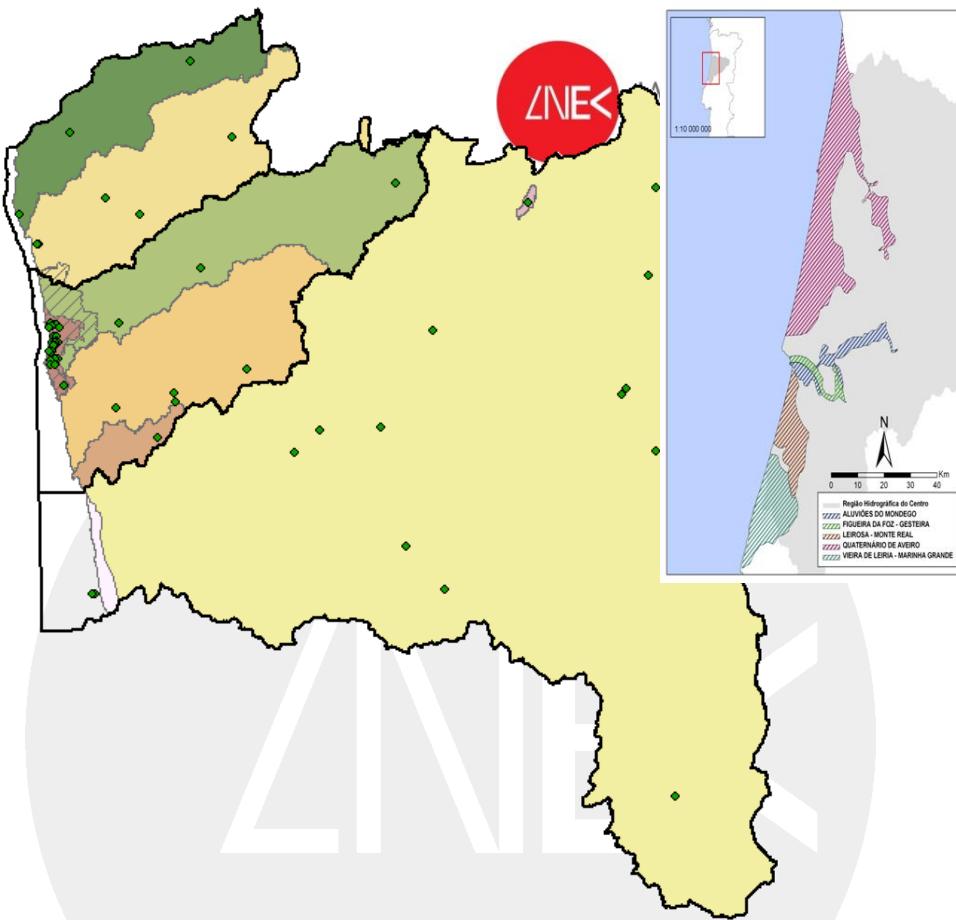
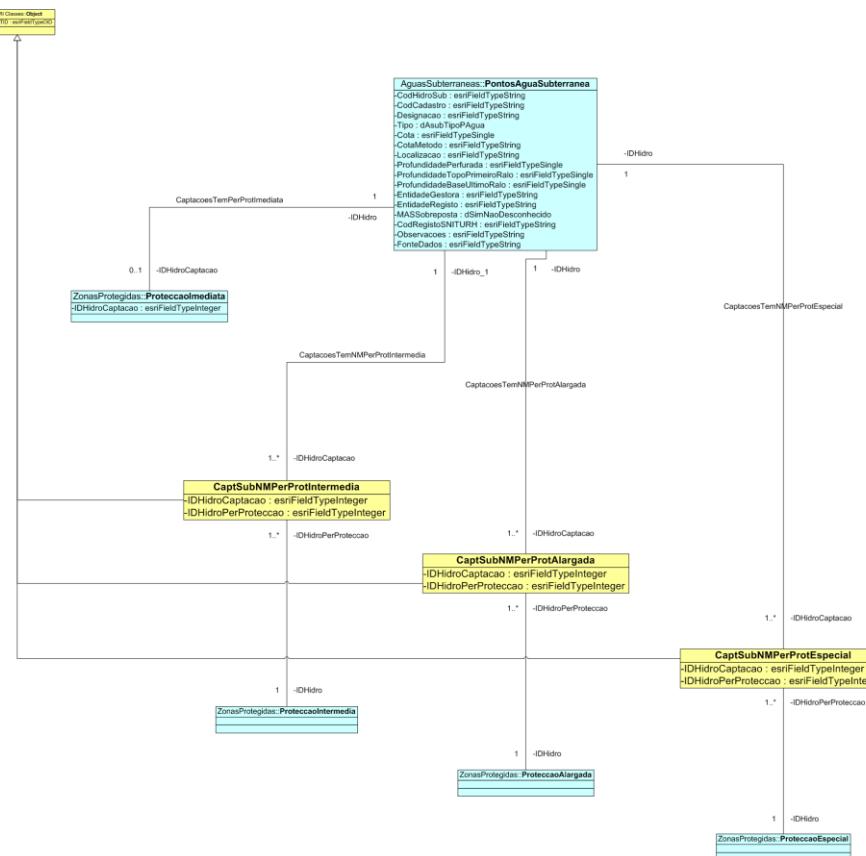
Administração da  
Região Hidrográfica  
do Centro I.P.



Administração da  
Região Hidrográfica  
do Alentejo I.P.

**Charneca, N.; Jesus, G.; Oliveira, M. M.; Furtado, D.; Oliveira, A. (2011) - "Modelos de partilha de dados de recursos hídricos associados à execução dos planos de gestão de bacia hidrográfica das regiões hidrográficas Integradas na área de Jurisdição da ARH do Norte, I.P. - Relatório 6: Relatório Final de Projecto". Relatório 170/2011 - NTI/NAS, 50 pp.**

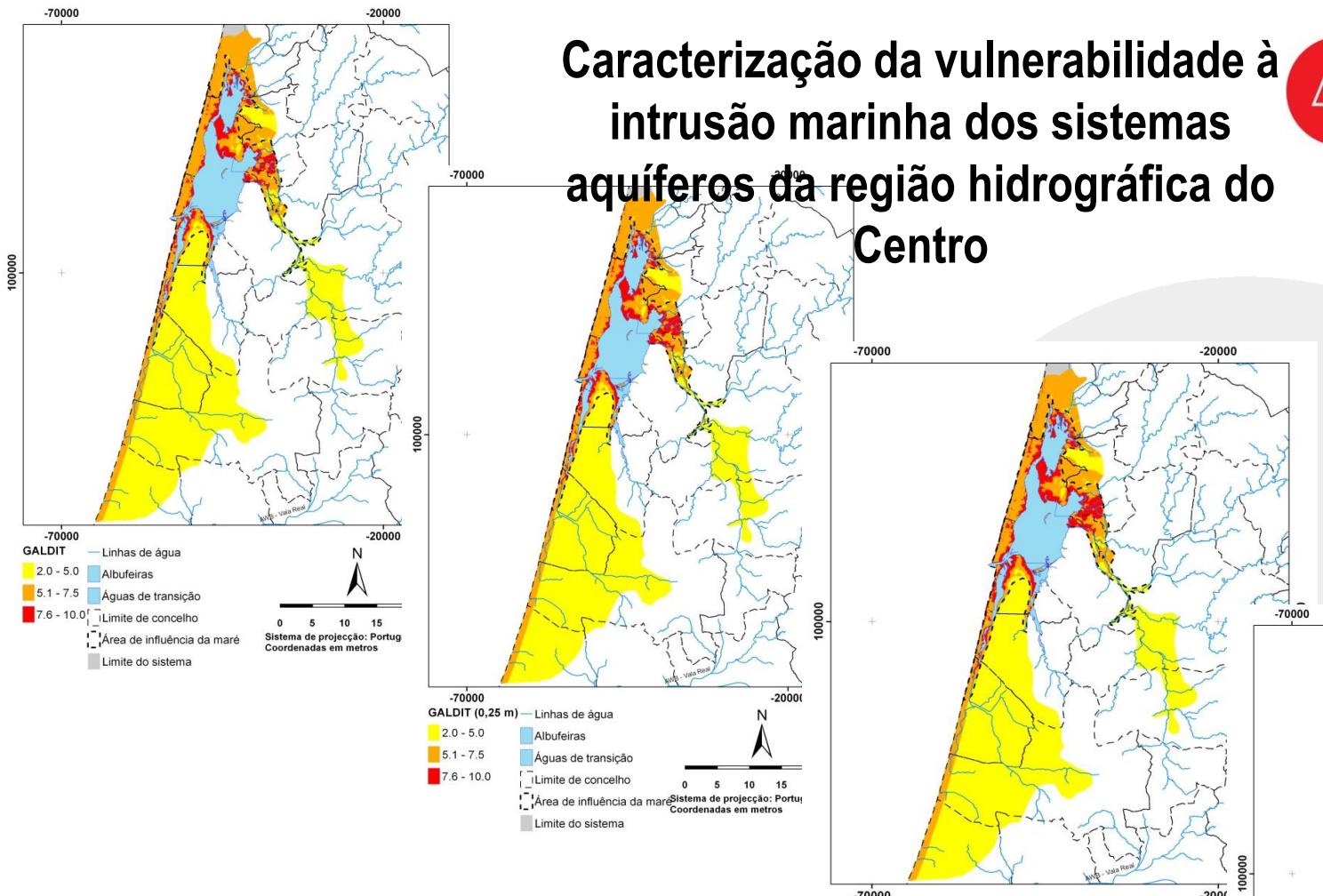
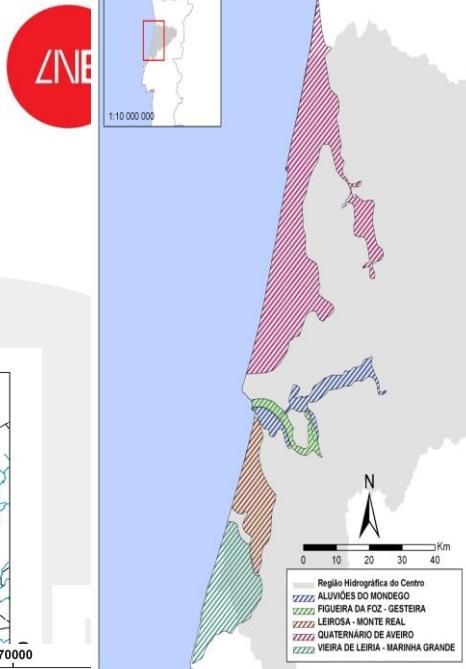
**Charneca, N.; Oliveira, M. M.; Oliveira, A. (2011) - "Modelação de dados geográficos e modelação matemática dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos para o planeamento e gestão dos recursos hídricos sob Jurisdição da ARH do Centro, I.P. - Relatório 2: Modelo lógico de dados geográficos de suporte ao planeamento e gestão de recursos hídricos". Relatório 163/2011 - NTI/NAS, 182 pp.**



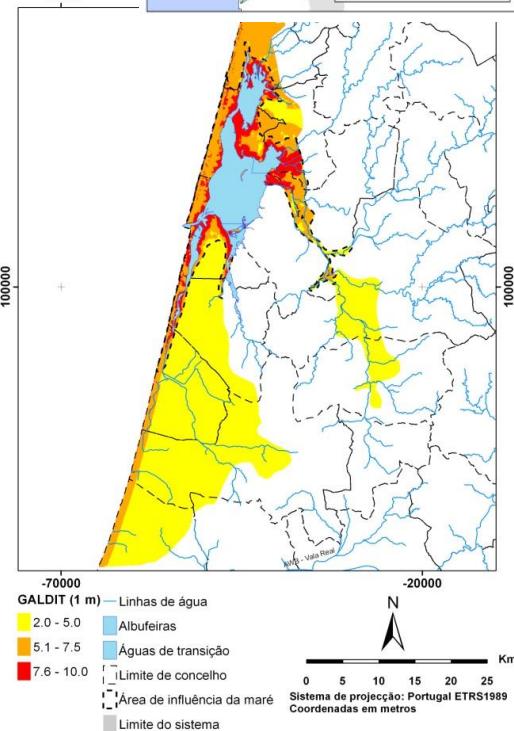
# **Modelo de Dados Geográficos do SI.ADD para suporte aos resultados dos PGRH da ARH do Norte e da ARH do Centro**

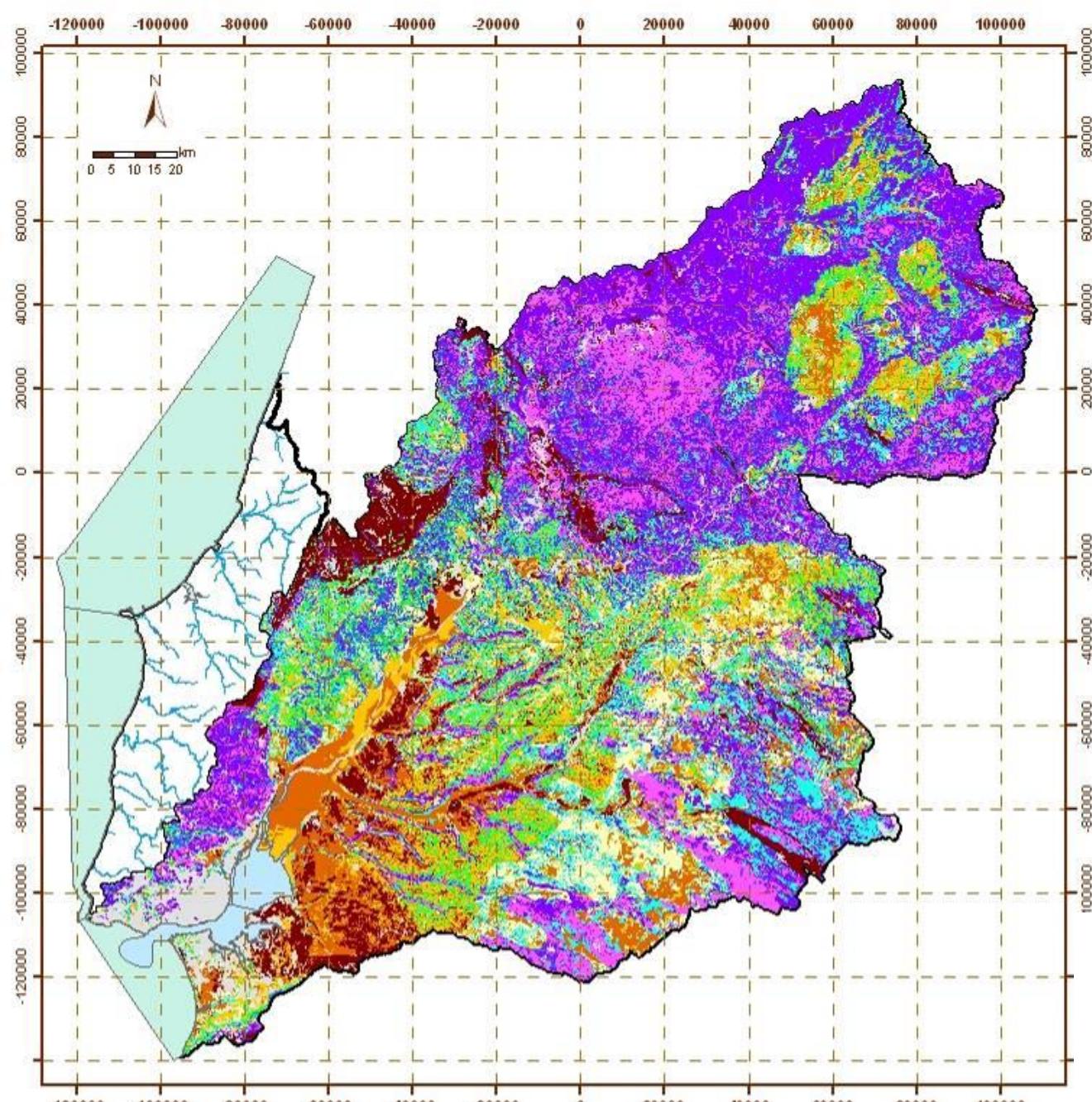
# Águas subterrâneas

# Caracterização da vulnerabilidade à intrusão marinha dos sistemas aquíferos da região hidrográfica do Centro



O método **GALDIT**, desenvolvido por Chachadi e Lobo Ferreira (2001), foi aplicado aos sistemas aquíferos que estão sob a influência dos efeitos de maré, permitindo avaliar a faixa litoral potencialmente sujeita a intrusão marinha em função de uma eventual subida do nível do mar (0,25 m, 0,50 m e 1 m).




**Índice de Facilidade de Infiltração (IFI)**

 Sistema de Projeção: Portugal ETR89  
Coordenadas em metro

### Índice de Facilidade de Infiltração:

O índice de facilidade de infiltração, desenvolvido por Oliveira e Lobo Ferreira (2002) requer a caracterização de quatro factores. O primeiro factor é geológico, e só por si pode fazer o IFI assumir o seu valor máximo (se for uma área carsificada ou muito fracturada). Caso não assuma o valor máximo então são caracterizados outros três factores: tipo de solo (A, B, C ou D), declive do terreno (<2%, 2-6%, 6-12%, 12-18%, >18%), quantidade máxima de água armazenável no solo e que pode ser utilizada para a evapotranspiração - AGUT (dez classes de 50 mm de intervalo, desde < 50 mm a > 450 mm). A cada classe é atribuído um índice entre 1 e 10, que no final se somam para produzir o IFI. O índice máximo (IFI = 30) significa as condições mais favoráveis para a infiltração e é obtido para um solo tipo A, declive do terreno <2% e AGUT < 50mm. Identificadas as zonas com IFI elevado (mais favoráveis à infiltração), estas deverão ser validadas com observações de campo, informações de residentes acerca do comportamento destas áreas durante a ocorrência de chuva, ou outro tipo de informação.

Não aplicável

— Cursos de água

3 - 10

Transição

11 - 15

Costeiras

16 - 18

19 - 20

21 - 22

23 - 24

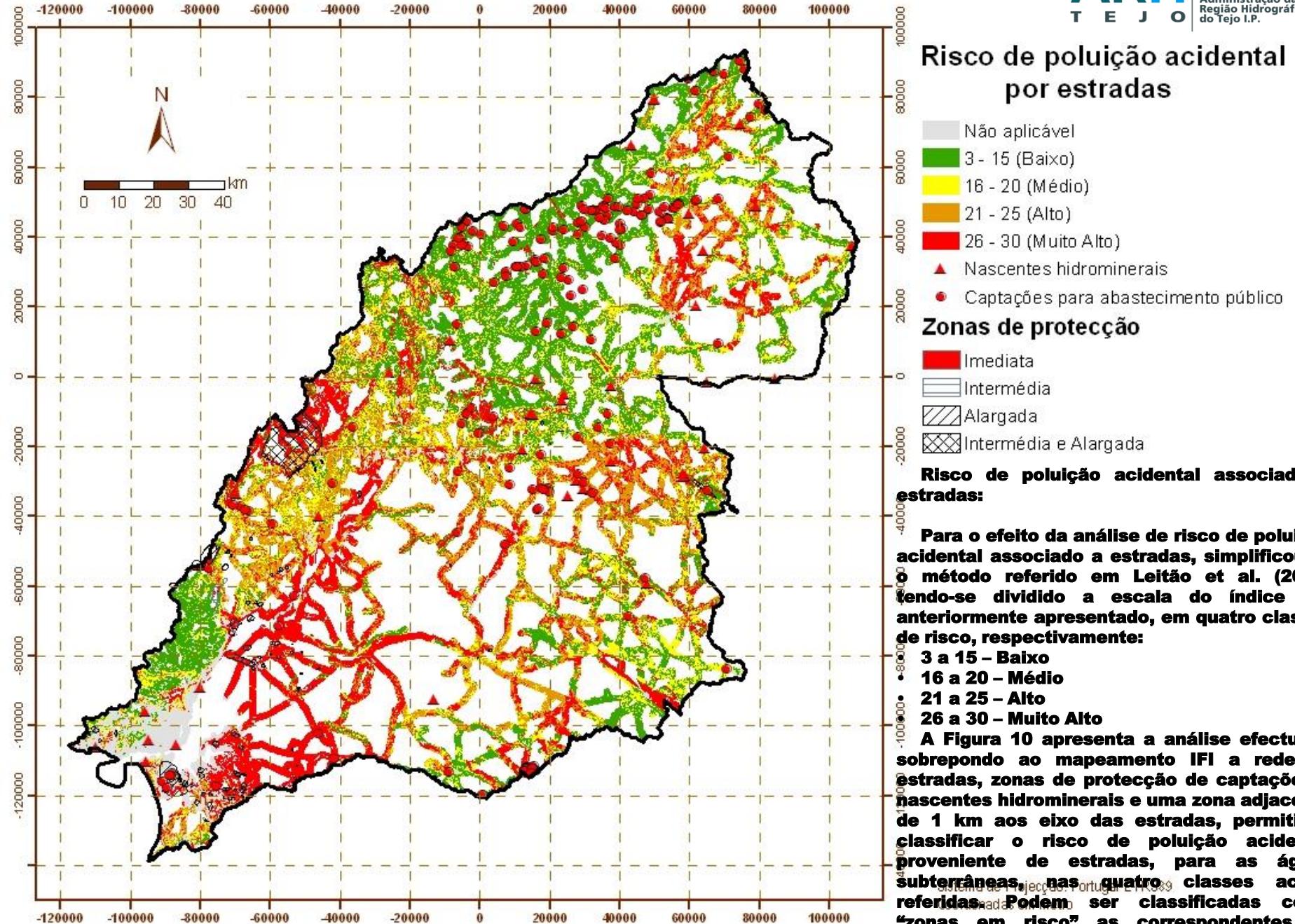
25 - 26

27 - 28

29 - 30

29 - 30

## Risco de poluição accidental por estradas





CONGRESO IBÉRICO SOBRE LAS AGUAS  
SUBTERRÁNEAS: DESAFÍOS DE LA GESTIÓN PARA EL  
SIGLO XXI

Zaragoza, 14-17 de septiembre de 2011

Con la colaboración de:



Associação Internacional de Hidrogeólogos  
Grupo Portugués



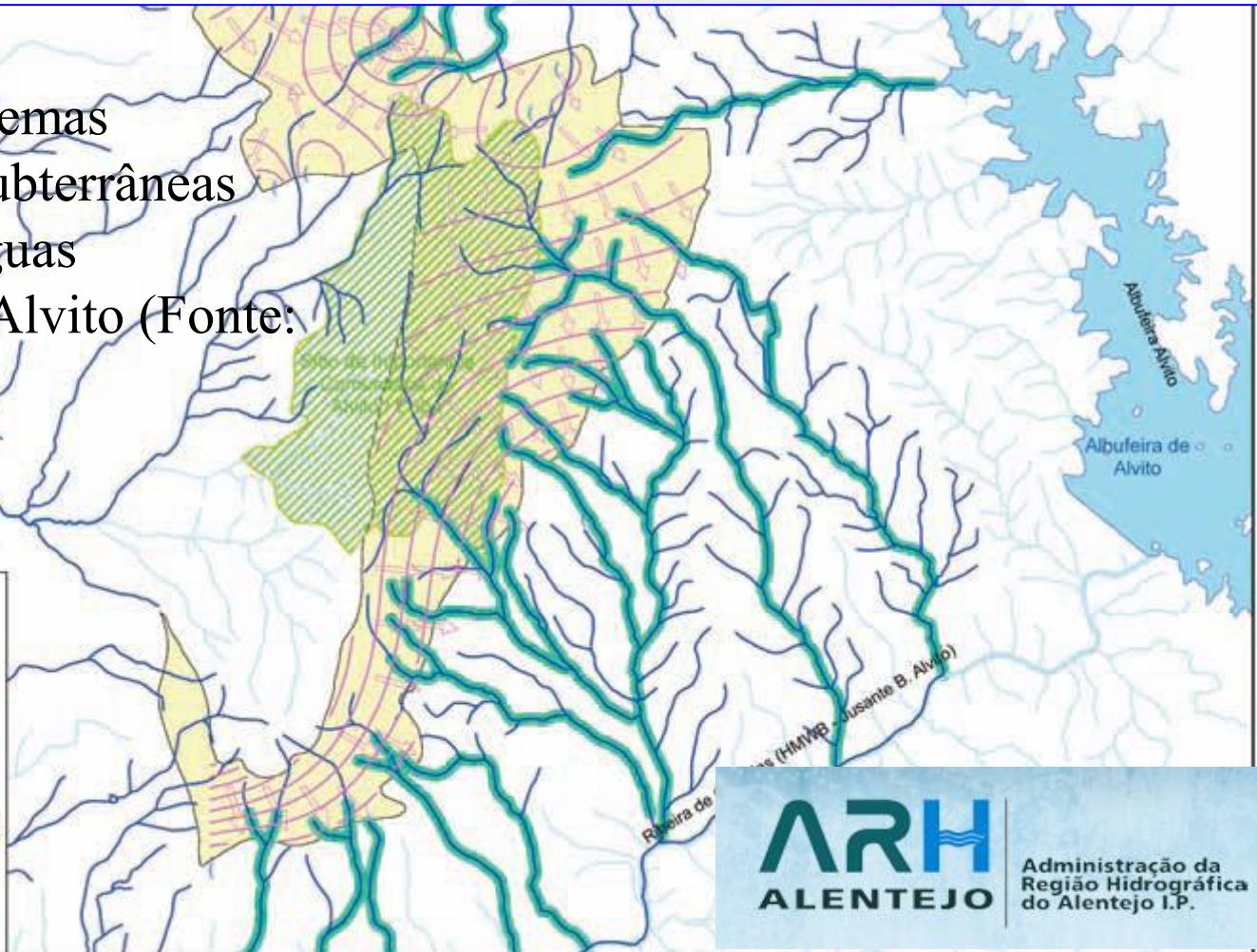
Association Internationale des Hydrogéologues  
Comité Français d'Hydrogéologie



Identificação de Ecossistemas  
dependentes das águas subterrâneas  
associados à massa de águas  
subterrâneas de Viana – Alvito (Fonte:  
Monteiro *et al.*, 2011).

Legenda

- Pontos de Observação Piezométrica
- Isopiezas/Direções de fluxo (Viana-Alvito)
- Rede Hidrográfica conectada - S. A. Viana - Alvito
- Rede Hidrográfica (Art.º 13)
- Rede Hidrográfica 1:25 000
- Ecossistemas Dependentes de águas Subterrâneas
- Massa de água artificial
- Zona Protegida (Sítios de Importância Comunitária)
- Sistema Aquífero de Viana-Alvito





Pormenorização das medidas	Medidas de Base	Legislação a que se refere
<p><b>MEDIDAS DE BASE:</b></p> <p><b>Área Temática – Qualidade da água:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Articulação com a Direcção Regional da Agricultura para acompanhamento e fiscalização da implementação dos Planos de Acção para as zonas vulneráveis aos nitratos (Portaria n.º 83/2010 de 10 de Fevereiro) e do Código de Boas Práticas Agrícolas (CBPA)</li> <li>▪ Avaliação da eficácia da aplicação das medidas preconizadas (CBPA, PDR 2007-2013, PNUEA, PNPOP) na melhoria do Estado Químico geral das águas subterrâneas subjacentes</li> <li>▪ Análise dos principais problemas e dificuldades identificados após alguns anos de implementação do CBPA e análise de medidas ou processos alternativos</li> <li>▪ Criação de um sistema de apoio à adequação dos fertilizantes e pesticidas às necessidades das Culturas</li> <li>▪ Criação de estímulos financeiros aos produtos agrícolas que venham a ser produzidos sob as boas práticas recomendadas</li> <li>▪ Criação de incentivos à prática da agricultura biológica</li> <li>▪ Desenvolvimento de áreas piloto, em articulação com proprietários de explorações agrícolas, para avaliação de possibilidades de substituição de fertilizantes químicos por águas residuais ricas em matéria orgânica</li> </ul>	<b>MB-III.1</b> Medidas destinadas a melhorar a qualidade das massas de águas subterrâneas afectadas por nitratos de origem agrícola	<b>Decreto-Lei 235/97</b> (DL 68/99) - zonas vulneráveis à contaminação causada por nitratos de origem agrícola



## Pormenorização das medidas

### MEDIDAS DE BASE:

#### Área Temática – Qualidade da água:

- Contratualização com agricultores, contemplando um pagamento compensatório (e eventualmente tornar esse contrato obrigatório para os agricultores de zonas particulares onde a concentração em nitrato supera os 100 mg/L) da utilização de práticas tais como:
  - aplicação exclusiva de azoto por via foliar em certas culturas (pomares, olival, vinha)
  - aplicação de adubos azotados de libertação lenta e de forma localizada em suporte de gel, minimizando a migração do azoto para o solo (culturas com sementeira de precisão ou plantação – milho e hortícolas)
  - fraccionamento das aplicações azotadas ao longo do ciclo, com doses máximas autorizadas por aplicação (todas as culturas)
  - utilização de culturas específicas (cereais ou culturas forrageiras) após culturas em que os níveis de adubação azotada é mais significativo, para extração de compostos de azoto residuais existentes no solo, evitando a sua lixiviação
- Campanhas de sensibilização e apoio aos agricultores sobre a problemática da contaminação com nitratos, nomeadamente através da colocação de cartazes informativos nas cooperativas agrícolas onde são comprados os fertilizantes com compostos azotados



## Pormenorização das medidas

### MEDIDAS DE BASE:

#### Área Temática – Quantidade da água:

- Minimização das perdas de água no transporte e distribuição em sistemas de rega existentes
- Reconversão dos métodos de rega através do levantamento de novas necessidades de infra-estruturação e modernização dos perímetros de rega públicos, de forma a minimizar os consumos
- Criação de um sistema de apoio à adequação dos volumes de rega às necessidades hídricas das Culturas [p.e. equivalente ao Sistema Agrometeorológico para a Gestão da Rega no Alentejo (SAGRA)]

#### Área Temática – Gestão de riscos e valorização do domínio hídrico:

- Comparação económica para o horizonte de 2015 dos (1) custos inerentes à aplicação de técnicas de desnitrificação nas captações para abastecimento público com (2) os custos inerentes às campanhas de sensibilização e informação dos agricultores, fiscalização do cumprimento das medidas de restrição de uso de compostos azotados e monitorização da evolução da qualidade da água na massa de água subterrânea, numa área piloto do sistema aquífero
- Aplicação de medidas de desnitrificação *in situ* em abastecimentos fora de uso por excesso de nitratos e em áreas onde há excesso de nitratos ( $> 50 \text{ mgNO}_3/\text{L}$ )
- Selagem de furos com elevada concentração em nitratos que explorem mais do que um sistema aquífero, estando o superior, de pior qualidade, a contaminar o inferior



## Pormenorização das medidas

### MEDIDAS SUPLEMENTARES

#### Área Temática 6 – Monitorização, investigação e conhecimento:

- Projecto para as zonas vulneráveis do Tejo e de Estremoz-Cano:
  - Utilizar os dados obtidos através da rede de monitorização de nitratos da ARH Tejo para análise da distribuição da concentração de: (1) nitrato, (2) coliforme fecal e estreptococos e (3) substâncias activas dos pesticidas, de forma a gerar mapas de isolinhas da concentração e poder associar a ocorrência de elevados valores às diferentes fontes de contaminação (fertilizantes agrícolas, explorações pecuárias, fossas domésticas perdedoras)
  - Desenvolvimento de modelos numéricos de transporte reactivo (simulação do fluxo subterrâneo, transporte de solutos e reacções geoquímicas) para (1) avaliar as direcções e velocidade de transporte do nitrato, (2) identificar e quantificar a eficiência dos processos geoquímicos naturais (oxidação de pirite, oxidação de matéria orgânica) que contribuem para a desnitrificação, (3) [avaliar o impacte das medidas que são aplicadas](#) (redução da aplicação de fertilizantes azotados, cessação de perdas de águas residuais domésticas e pecuárias), (4) e do efeito de diluição proporcionado pela recarga natural
  - [Propor potenciais medidas de redução das concentrações que envolvam processos de desnitrificação](#)
- Projecto para determinação da [origem dos nitratos e sulfatos em zonas agropecuárias](#), através do uso de traçadores (p.e. sulfamidas de origem veterinária)



## **Bom até 2015:**

- Monforte - Alter do Chão (é carbonatado e já tem tendência decrescente do NO<sub>3</sub>)
- Pisões - Atrozela (é carbonatado e tem vários parâmetros mal mas parece limitado no espaço; há falta de dados; sem tendências)

## **Bom até 2021:**

- Estremoz - Cano (é carbonatado mas ainda tem tendência crescente do NO<sub>3</sub>)
- Torres Vedras (problemas relativamente limitados no espaço; com tendência crescente do NO<sub>3</sub>)
- Paço (problemas relativamente limitados no espaço; com tendência crescente do NO<sub>3</sub>)

## **Bom até 2027:**

- Aluviões do Tejo (tem valores elevados em vários parâmetros e tem uma dinâmica lenta?)
- Caldas da Rainha - Nazaré (tem vários parâmetros mal numa extensa área)



Obrigado pela vossa atenção !