

Área temática Inec	Ambiente e sustentabilidade
Projectos de investigação	Gestão otimizada de aquíferos costeiros e a interação entre águas subterrâneas e águas superficiais – Projecto EcoManage
Investigador responsável	João Paulo Lobo Ferreira
Processo nº	0607/11/16250 e 0607/17/15488



Objectivos O projecto EcoManage teve como objectivo melhorar a capacidade dos gestores/decisores para utilizarem um sistema de conhecimento integrado da zona costeira e sua interação com a bacia hidrográfica a montante, incluindo as componentes ecológicas e sócio-económicas. Os três aspectos-chave do EcoManage foram considerar:

- 1) que a zona costeira é afectada por pressões naturais e antropogénicas originadas na bacia hidrográfica a montante;
- 2) que as actividades sócio-económicas são forças motrizes de pressões sobre o meio ambiente;
- 3) que os impactes dependem das características físicas do ecossistema que, em conjunto com as cargas antropogénicas, determinam o seu estado ecológico.

Três zonas costeiras com interesses conflituosos, devido às pressões urbana, industrial e agrícola *versus* qualidade do ambiente, foram seleccionadas para desenvolver o estudo. As zonas seleccionadas foram o Fiorde Ajsén, no Chile, o estuário de Bahía Blanca, na Argentina, e o estuário de Santos, no Brasil.

O objectivo específico deste trabalho foi o de apresentar uma reflexão global sobre a importância das águas interiores na gestão das águas costeiras resultante das actividades (pressões) na bacia hidrográfica a montante. Essa análise foi realizada em cada um dos casos de estudo do projecto EcoManage, cujas zonas costeiras apresentam distintos conflitos entre as pressões urbanas, industriais e agrícolas e a qualidade ambiental.

Os trabalhos de hidrogeologia foram desenvolvidos em três fases:

- 1) caracterização preliminar das áreas, no que se refere à geologia, hidrogeologia, quantidade e qualidade dos recursos hídricos;
- 2) diagnóstico da situação de referência e definição da situação desejada para as águas subterrâneas;
- 3) desenvolvimento de modelo matemático das águas subterrâneas com ênfase nos aspectos de quantificação da contribuição de água doce para o estuário e na poluição difusa.

Instalações experimentais mais relevantes

Na área de estudo do estuário de Bahía Blanca, Argentina, foram instalados quatro piezômetros, nas proximidades do rio Sauce Chico, com o objectivo de complementar os dados da monitorização hidrogeológica já existentes (figura 1).



figura 1 • Piezômetro instalado no âmbito do Projecto e carta geológica da área de estudo de Bahía Blanca, Argentina (cortesia da equipa da Universidad Nacional del Sur, província de Buenos Aires)

Principais desenvolvimentos

O estudo foi desenvolvido nas seguintes zonas: o Fiordo Ajsén, no Chile, o estuário de Bahía Blanca, na Argentina, e o estuário de Santos, no Brasil. A seguir, descrevem-se os resultados e as conclusões obtidos em cada uma destas áreas.

Fiordo Aysén (Chile)

O objectivo deste estudo na bacia hidrográfica do Fiordo Aysén foi o de determinar a contribuição das águas subterrâneas no fluxo das águas superficiais, a partir do método de análise do hidrograma, já aplicado nas sub-bacias do rio Claro e rio Coyhaique (figura 2). Esta bacia hidrográfica é uma área com baixa densidade populacional e precipitação superior aos 3000 mm/ano no Oeste (Andes) e inferior a 400 mm/ano no Leste (na fronteira com a Argentina). Devido a praticamente não haver exploração das águas subterrâneas nesta área, os dados disponíveis para a análise são escassos. Em função da elevada altitude e do terreno de montanha da bacia de Aysén, é importante considerar o impacto da precipitação na forma de neve e do seu derretimento nos hidrogramas e na recarga das águas subterrâneas.

O método de separação do fluxo do curso de água mediante o hidrograma (que requer dados de precipitação e fluxo superficial) foi associado com o modelo diário de degelo de neve, que considera o parâmetro temporal e os distintos padrões nos quais a neve derretida se encontra disponível para o escoamento superficial ou a recarga subterrânea. Este modelo foi baseado nos seguintes dados disponíveis: topografia, cobertura vegetal, diversas variáveis meteorológicas e climáticas. Assumindo que certas condições são cumpridas, o escoamento básico calculado é uma estimativa da recarga

que ocorre no sistema. A estimativa da recarga das águas subterrâneas varia em média de 3,65 mm/d, na bacia de rio Claro, a 1,15 mm/d na bacia de Coyhaique (figura 3). Estes resultados reflectem o gradiente, na precipitação, ocasionado pelo efeito orográfico, assim como as massas de ar (ventos) que atravessam os Andes. Esta diferença também reflecte variações topográficas e de cobertura vegetal.

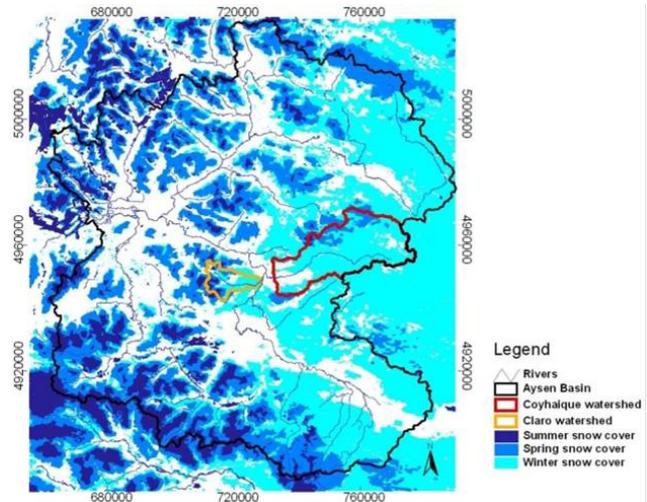


figura 2 • Bacia hidrográfica do Fiordo Aysén

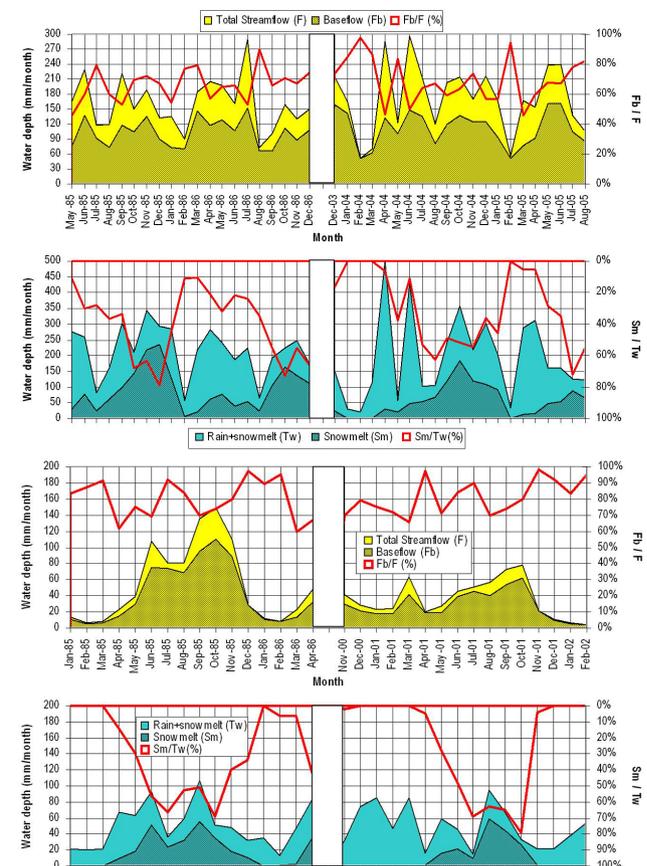


figura 3 • Resultados obtidos para as sub-bacias hidrográficas do rio Claro (esquerda) e do rio Coyhaique (direita)

A metodologia utilizada neste estudo permite aos hidráulicos (e outros) obter uma estimativa de recarga, na ausência de dados locais fiáveis sobre a precipitação na forma de neve e a sua relação com as águas subterrâneas (Yarrow & Oliveira, 2006).

Bahía Blanca (Argentina)

No Estuário de Bahía Blanca (figura 4) o principal objectivo foi elaborar o diagnóstico da situação de referência e a análise da contribuição das águas subterrâneas para a qualidade das águas do estuário (Leitão *et al.*, 2007).

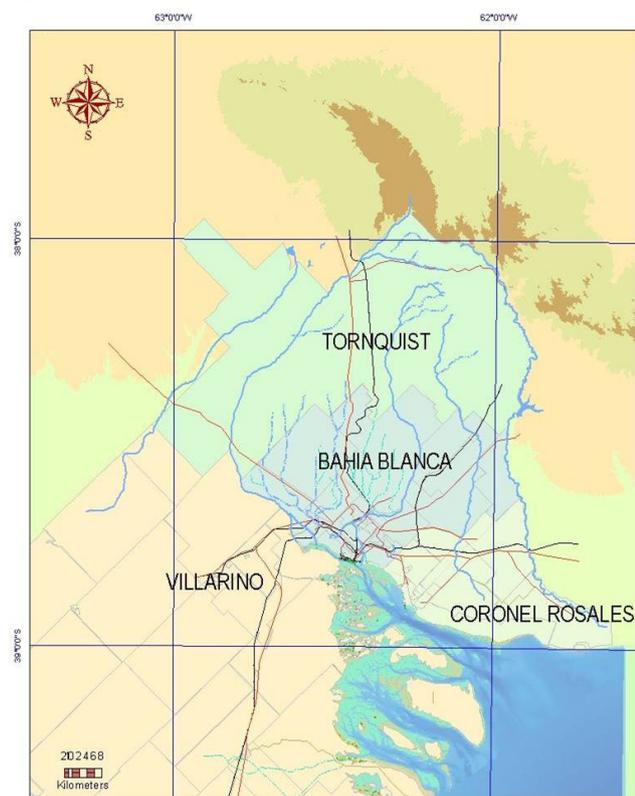


figura 4 • Estuário de Bahía Blanca

Com este objectivo o trabalho foi desenvolvido em duas fases: (1) avaliação das principais pressões existentes e (2) análise do estado de qualidade das águas através de um conjunto de indicadores definidos no âmbito do projecto.

O trabalho incluiu a caracterização geral da área de estudo, as principais pressões existentes, a geologia, os solos, a geomorfologia e a tectónica, a hidrologia, a hidrogeologia e a qualidade das águas.

A influência das pressões pode ser visualizada na alteração da qualidade das águas do rio Napostá Grande, indicada a partir de amostragens realizadas mensalmente no rio desde 1997, antes e após a cidade de Bahía Blanca (figura 5). No que se refere às águas subterrâneas na bacia hidrográfica do rio Napostá Grande, observa-se a elevação da salinidade na direcção das áreas de descarga. Este enriquecimento de sais nas águas subterrâneas é devido à evapotranspiração e à circulação das águas no aquífero dentro da bacia, e atinge as concentrações máximas na área costeira, a sua área de descarga natural. A

situação actual das condutividades eléctricas indica que não ocorreram grandes variações desde a década de 90 até o presente.

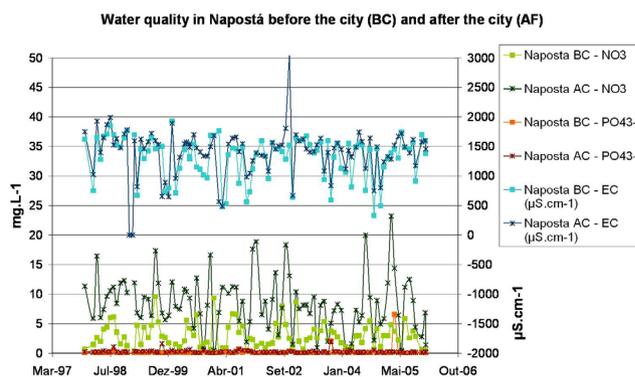


figura 5 • Qualidade da água superficial do rio Napostá Grande, antes e após a cidade de Bahía Blanca

Outra área de importância no que se refere à qualidade das águas subterrâneas é a região costeira de Ing. White. As condutividades eléctricas no local encontram-se entre os 47600 e os 108100 $\mu\text{S.cm}^{-1}$, constatam-se, também, elevadas concentrações de cloreto de sódio, típico das águas que apresentam baixa circulação e um tempo de residência elevado. Os resultados deste estudo indicaram contaminação por metais pesados em distintos poços da região de Ing. White, facto este relacionado com actividades industriais. Observou-se, também, contaminação difusa por hidrocarbonetos, com concentrações elevadas nas proximidades dos depósitos de combustíveis.

Os resultados apresentados para a área de Sauce Chico, referem-se à análise de amostras colectadas em dois poços de monitorização. Estes resultados indicam a presença de fácies bicarbonatadas e cloretada-sódicas. Não é observada a alteração da qualidade desde 1997, no que se refere à condutividade eléctrica, nitrato e fósforo, que apresentaram valores normais para águas superficiais.

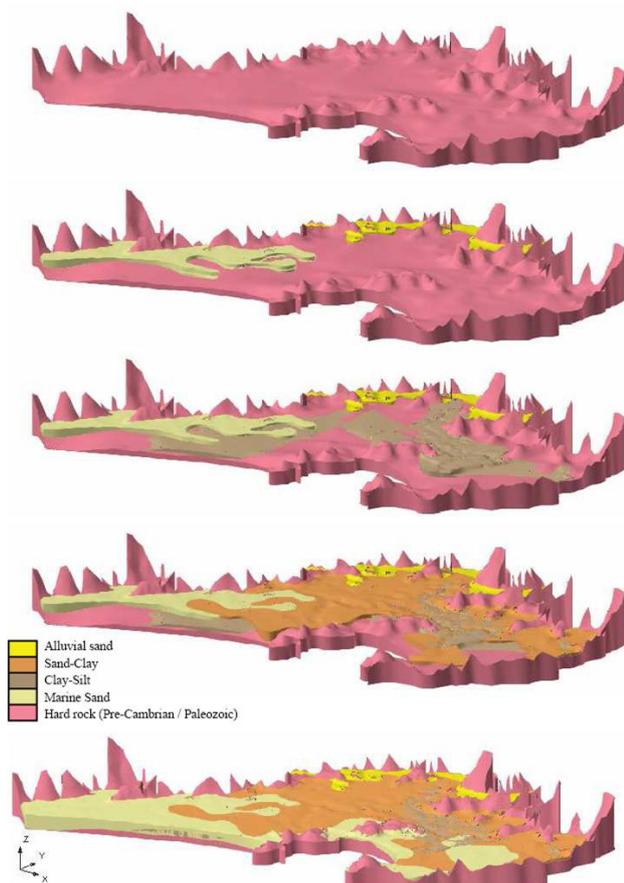
No caso da bacia de Sauce Chico, as águas subterrâneas apresentaram concentrações iónicas com aumento na direcção do estuário, indicando o enriquecimento iónico desde a área de recarga até à área de descarga natural, o Estuário de Bahía Blanca. As elevadas salinidades e condutividades eléctricas na área de descarga podem ser associadas com as piezometrias, os baixos gradientes hidráulicos indicando elevado tempo de permanência e favorecendo a evapotranspiração e a infiltração vertical, em comparação com o fluxo horizontal.

Conclui-se ser necessário tomar medidas no sentido de controlar e melhorar as principais pressões da região, causadas pela rejeição das águas residuais da cidade de Bahía Blanca, pela poluição proveniente da actividade agrícola e pela zona industrial de Ing. White de forma a obter os benefícios necessários à melhoria da qualidade das águas interiores e estuarinas.

Com base neste estudo, foi elaborado um plano de monitorização visando suprir lacunas existentes entre os forças motrizes as pressões e o estado.

Santos (Brasil)

O Estuário de Santos está localizado na Unidade de *Gerenciamento de Recursos Hídricos n.º 7*, que é a bacia Hidrográfica da Baixada Santista. Esta bacia apresenta uma área de 2789 km². O estudo teve por objectivo quantificar e mapear a contribuição das águas subterrâneas do aquífero poroso, por quilómetro de linha de costa, para o estuário de Santos, no intuito de colaborar com o entendimento da dinâmica das águas doces na bacia e a sua influência na circulação e qualidade hídrica estuarina. Não foram consideradas as descargas provenientes das rochas cristalinas do aquífero fracturado. Foi elaborado o modelo matemático do escoamento subterrâneo para uma área de 835 km², sendo os resultados da contribuição do volume de águas interiores subterrâneas para o estuário representativos desta área de estudo. O trabalho de modelação incluiu dados geológicos (figura 6), hidrogeológicos e de clima.



Source: after DAE (1979), SUGUIO & MARTIN (1978), PERROTA et al., (2004) and IPT (1981)

figura 6 • Visualização em 3D das fases de deposição de sedimentos que formam o aquífero poroso na Baixada Santista

Para a caracterização da recarga do aquífero foram aplicadas duas metodologias, nomeadamente o balanço hídrico sequencial diário a nível do solo e a técnica de decomposição do hidrograma de escoamento superficial (no caso das bacias hidrográficas dos rios Cubatão, Mogi e Quilombo). Os valores de recarga foram estimados em cerca de 900 mm/ano para precipitações da ordem dos 3300 mm/ano.

O modelo de escoamento subterrâneo foi desenvolvido, inicialmente, em estado estacionário, utilizando o software: ArcView, ArcInfo e GMS com os módulos BOREHOLES, TIN, SOLIDS, MAP e MODFLOW, além dos programas ArcView e ArcInfo. O resultado obtido foi utilizado como dado de entrada do modelo em estado transitório, no qual foi possível calcular a variação da descarga de água subterrânea para o estuário ao longo do ano (mensalmente).

Dos resultados obtidos pode concluir-se que a descarga de águas subterrâneas para o estuário depende do aquífero, da sua localização e do uso do solo. A descarga é menor em aquíferos bem drenados, porque a descarga se faz directamente para as valas urbanas ou para a rede de linhas de drenagem naturais. Há elevada descarga directamente para o oceano Atlântico nas áreas de Praia Grande e de Santos. Os menores valores obtidos para a descarga foram as áreas de afloramento do cristalino e nas ilhas de menor dimensão. Os resultados indicam que a descarga total de águas subterrâneas é de aproximadamente 877x10³ m³/d. A descarga total de águas subterrâneas para o estuário, em termos de percentagem da precipitação, foi calculada em 8% e 17% que escoam adicionalmente como escoamento de base na rede de drenagem superficial (figura 7) (Mancuso e Lobo-Ferreira, 2007).

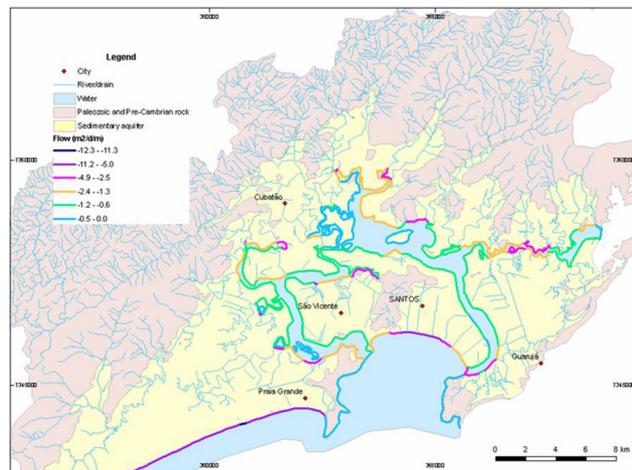


figura 7 • Resultados do modelo com a descarga de águas subterrâneas do aquífero sedimentar para o estuário de Santos

O índice DRASTIC de vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas foi calculado com base nos mapas de geologia, de solos, dados de altimetria e de precipitação. O índice DRASTIC obtido varia entre 117 e 176, indicando vulnerabilidade baixa/média a vulnerabilidade alta, com um índice médio de 152. A classe de vulnerabilidade alta está associada aos aquíferos sedimentares das formações cenozóicas, enquanto que as classes de vulnerabilidade baixa/média se associam às formações da base (paleozóicas e pré-câmbricas) (Oliveira et al., 2005).

A partir da elaboração do modelo conceptual, e elaboração do modelo matemático de fluxo do aquífero poroso, foi possível quantificar a massa de contaminante transportada pelas águas

subterrâneas, da área do Antigo Lixão de Alemoa para o estuário de Santos. Esta fase do estudo requereu o detalhamento dos dados em termos de geologia, hidrogeologia, altimetria e precipitação. Dos resultados obtidos pode concluir-se que a descarga de águas subterrâneas e de contaminantes para o estuário se faz principalmente para as valas construídas e para a rede de linhas de drenagem naturais. A descarga de contaminantes máxima proveniente da área do Antigo Lixão de Alemoa para o estuário foi calculada em 1 750,49 mg/ano para o benzeno, 533,10 mg/ano para o tolueno, 8 247,04 mg/ano para o chumbo e 646,03 mg/ano para o cádmio (figura 8) (Leite e Toporovski, 2008).



figura 8 • Plumões de contaminação por cádmio nas águas subterrâneas do aquífero poroso, na área do Lixão da Alemoa

Equipa de trabalho LNEC

Nome	Função
João Paulo Lobo Ferreira	Investigador responsável
Teresa E. Leitão	Investigadora Principal
Manuel Mendes Oliveira	Investigador Auxiliar

Equipa de trabalho Externa

Nome	Observações
Dr. Malva Mancuso; Dr. Cláudio B.B. Leite e Cláudia Zveibel Toporovski	IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (Brasil)
Ing. Fabiana Limbozzi	IADO (Argentina)
PhD student Matthew Yarrow	Universidade do Chile, Laboratorio de Modelación Ecológica, Facultad de Ciencias
Dr. Paola Almeida e PhD student Laura D'Aiotti	Universidade de Trieste, Itália
Profs. A. G. Bonorino, J. Carrica e E.R. Albouy	Universidad Nacional del Sur (provincia de Buenos Aires, Argentina)

Outras fontes de financiamento

Financiado pelo 6.º Programa-Quadro da Comissão Europeia – Contrato n.º INCO-CT-2004-003715 (Dez. 2004 – Nov. 2007).

Publicações mais relevantes internacionais

Revistas e Livros

- Limbozzi, F. e Leitão, T.E.
Characterization of Bahía Blanca main existing pressures and their effects on the state indicators for surface and groundwater quality, in Neves, R., Baretta, J., Mateus, M. eds. IST PRESS - Perspectives on integrated Coastal Zone Management in South America, pp. 333-349. 2008.
- Mancuso, M.A., Lobo-Ferreira, J. P. Albuquerque Filho, J.L.
Groundwater assessment of Santos Estuary, in Neves, R., Baretta, J., Mateus, M. eds. IST PRESS. Perspectives on integrated Coastal Zone Management in South America, pp. 387– 406. 2008.
- Oliveira M.M, Lobo-Ferreira, J. P., Yarrow, M.
Groundwater recharge assessment, in Neves, R., Baretta, J., Mateus, M. eds. IST PRESS. Perspectives on integrated Coastal Zone Management in South America, pp. 103–112. 2008.
- Lobo-Ferreira, J. P. e Oliveira M.M.
Groundwater vulnerability to pollution and to sea water intrusion in coastal aquifers, in Neves, R., Baretta, J., Mateus, M. eds. IST PRESS. Perspectives on integrated Coastal Zone Management in South America, pp 113–122. 2008.

Reuniões técnico-científicas

- Mancuso, M.A; Lobo-Ferreira, J. P.; Filho, J.L.A.
Using GIS and modeling to assess groundwater discharge to Santos Estuary, Brazil. XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems, Lisbon, 17 a 21 de Setembro de 2007, 10 pp. Publicação em CD-ROM e in Ribeiro, L.; Chambel, A.; Condeso de Melo, M.T. (Eds) "Abstract Book". 2007.
- Yarrow, M.; Oliveira, M.M.
Incorporating snowmelt in the surface flow hydrograph separation method to estimate groundwater recharge. XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems, Lisbon, 17 a 21 de Setembro de 2007, 10 pp. Publicação em CD-ROM e in Ribeiro, L.; Chambel, A.; Condeso de Melo, M.T. (Eds) "Abstract Book", pp. 216–217. 2007.
- Lobo-Ferreira, J. P., Leitão, T.E. Oliveira, M.M., Mancuso, M.A, Limbozzi, F., Yarrow, M.
Contributo das águas interiores na gestão de zonas costeiras. Os casos de estudo do projecto ECOMANAGE. 9.º Congresso da Água. APRH. Cascais, Lisboa. 2 a 4 de Abril de 2008. 20 pp. 2008.

Publicações mais relevantes nacionais

Relatórios

- Oliveira M.M., Henriques, M.J., Ferreira, J.P.
Integrated Ecological Coastal Zone Management System. SIG mapping of hydrogeologic parameters including groundwater recharge assessment and vulnerability to pollution. Deliverable 2.6. 67 pp. 2005.
- Yarrow, M. e Oliveira, M.M.
ECOMANAGE - Integrated Ecological Coastal Zone Management System. Deliverables 2.6 & 2.8 - CHILE. D2.6 – SIG mapping of hydrogeologic parameters, including groundwater recharge assessment and vulnerability to pollution & D2.8 – Groundwater flow and transport components of the global estuary model. Relatório 379/2006 – NAS, LNEC, 2006.
- Mancuso, M.A e Lobo-Ferreira, J.P.
Groundwater modeling of the sedimentary aquifer on Santos Estuary basin using GIS mapping of hydrogeologic parameters (Deliverable 2.8–1st Part: Santos Estuary - Quantity). Relatório 231/2007 – NAS, LNEC, 2007.
- Leitão, T.E., Limbozzi, F., Melo, W., Oliveira, M.M., Carrica, J. E Albouy, E.R.
ECOMANAGE – Integrated Ecological Coastal Zone Management. Deliverable 2.7 – Diagnosis of the Reference Situation and Definition of a Target Situation related to Groundwater Bahía Blanca Estuary. Relatório 237/07 – NAS, LNEC, 69 pp. 2007.
- Leite, C.B.B. E Toporovski, C.Z.
ECOMANAGE – Integrated Ecological Coastal Zone Management. Deliverable 2.7 – Groundwater Quality Modelling. Contaminant transport modelling in the Alemoa area aquifer on Santos estuary basin. Relatório 148/08 – NAS, LNEC, 16 pp. 2008.
- Oliveira M.M., Limbozzi, F., Carrica, J.C., Albouy, E.R., Lobo-Ferreira, J. P.
Integrated Ecological Coastal Zone Management System. Deliverables 2.6 & 2.8 – ARGENTINA. D2.6 - SIG mapping of hydrogeologic parameters, including groundwater recharge assessment and vulnerability to pollution & D2.8 - Groundwater flow and transport components of the global estuary model (2nd Part: Bahía Blanca Estuary). Relatório, LNEC, 95 pp. 2005.