



MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P.

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE
Núcleo de Águas Subterrâneas

Proc. 0607/19/17830

COOPERAÇÃO INTERNACIONAL EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – CIAS

PROJECTO DE COOPERAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA ENTRE O LNEC (PORTUGAL), O IPT (BRASIL), O MINISTÉRIO DOS RECURSOS NATURAIS E AMBIENTE DA GUINÉ-BISSAU E A UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO (ANGOLA) COM SUPORTE FINANCEIRO DA FCT (PORTUGAL) E DO MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, FUNDO SECTORIAL DE RECURSOS HÍDRICOS – CTHIDRO, DO BRASIL

Trabalho realizado para a:

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

Lisboa, Agosto de 2010

COOPERAÇÃO INTERNACIONAL EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (CIAS)

Relatório científico do ano 2010

Apresenta-se o desenvolvimento científico efectuado pelo LNEC no âmbito do projecto CIAS na área de estudo costeira da Guiné-Bissau, nomeadamente avaliando a vulnerabilidade à intrusão marinha por eventuais subidas do nível do mar da ordem dos 0,25, 0,5 e 1 m, tirando partido do método GALDIT, desenvolvido no LNEC e na Universidade de Goa, Índia, no âmbito do projecto COASTIN financiado pela União Europeia.

INTERNATIONAL COOPERATION ON GROUNDWATER (CIAS)

Scientific report concerning the year of 2010

This report presents the scientific results of LNEC component of CIAS project, including the evaluation of salt water intrusion in Guinea-Bissau costal zone, due to potential sea level rises of 0.24, 0.5 and 1 m. The method used, called GALDIT, was developed at LNEC, Portugal, and at the University of Goa, India, in the framework of the EU sponsored COASTIN project.

COOPERATION INTERNATIONALE EN EAU SOUTERRAINE (CIAS)

Rapport scientifique pour l'année 2010

Ce rapport présent les résultats scientifiques du composant LNEC dans le cadre du Project CIAS. Ça inclue l'application de la méthode GALDIT, développé au LNEC, Portugal, et à l'Université de Goa, Inde, dans le cadre du Project COASTIN financée par l'Union Européenne. Cette méthode a permit d'évaluer la vulnérabilité à l'intrusion de l'eau de la mer dans les aquifères côtiers de la Guinée-Bissau, en utilisant des scenarios de monté de l'eau de la mer de 0,25, 0,5 et 1m.

SUMÁRIO EXECUTIVO

A Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas (CIAS) é um projecto financiado pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico no âmbito do Programa de Cooperação Temática em Matéria de Ciência e Tecnologia (ProÁfrica) e pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal, coordenados respectivamente, pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, e LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil e com a participação da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco), DGRH (Direcção Geral de Recursos Hídricos da Guiné-Bissau), UAN (Universidade Agostinho Neto de Angola) e INGR (Instituto Nacional de Gestão das Águas de Cabo Verde), além de outras instituições ou órgãos colaboradores.

O presente relatório descreve as actividades desenvolvidas pelo NAS no âmbito da Cooperação. O método GALDIT, que permite avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos à intrusão marinha foi aplicado à zona de influência da maré da Guiné-Bissau. Apresentam-se aqui os resultados obtidos, assim como a respectiva análise.

ÍNDICE DO TEXTO

1	INTRODUÇÃO	1
2	DESCRIÇÃO DO MÉTODO GALDIT	3
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	6
3.1	LOCALIZAÇÃO	6
3.2	GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA.....	8
4	APLICAÇÃO DO MÉTODO GALDIT	10
4.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	14
5	CONCLUSÕES	16
6	BIBLIOGRAFIA.....	18
	ANEXO I	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Localização da área de estudo (Fonte: Google Earth, BRGM e Azinhaga, 2007)	7
Fig. 2 – Localização dos furos existentes na Guiné-Bissau (Fonte: DGRH Guiné-Bissau)	8
Fig. 3 – Carta Hidrogeológica da Guiné-Bissau (Fonte: Azinhaga, 2007).....	9
Fig. 4 – Parâmetro G.....	10
Fig. 5 – Parâmetro A.....	11
Fig. 6 – Parâmetro L (situação de referência).....	11
Fig. 7 – Parâmetro L (0,25 m)	12
Fig. 8 – Parâmetro L (0,50 m)	12
Fig. 9 – Parâmetro L (1 m)	12
Fig. 10 – Parâmetro D.....	13
Fig. 11 – Parâmetro I	13
Fig. 12 – Parâmetro T	14
Fig. 13 – Índice GALDIT (situação de referência)	14
Fig. 14 – Índice GALDIT (0,25 m)	15
Fig. 15 – Índice GALDIT (0,50 m)	15
Fig. 16 – Índice GALDIT (1 m)	15
Fig. 17 – Resultados GALDIT obtidos para as zonas costeiras do Parque Nacional de Cacheu (São Domingos) e de Catió (Calar)	16
Fig. 18 – Necessidade de realocação de alguns dos furos constantes na base de dados para a ilha de Bolama.....	16

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros GALDIT	4
Quadro 2 – Classes de vulnerabilidade	4
Quadro 3 – Parâmetro G: ocorrência de aquíferos	5
Quadro 4 – Parâmetro A: condutividade hidráulica.....	5
Quadro 5 – Parâmetro L: nível piezométrico (acima do nível do mar)	5
Quadro 6 – Parâmetro D: distância à linha de costa.....	6
Quadro 7 – Parâmetro I: Impacte do estado actual da intrusão marinha na região	6
Quadro 8 – Parâmetro T: espessura do aquífero.....	6

AGRADECIMENTOS

Às Presidências das instituições parceiras do Projecto CIAS – Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas, nomeadamente do LNEC, do IPT e da UFPE (Brasil), da Universidade Agostinho Neto (Angola) e da Direcção Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau, pela disponibilização de boas condições financeiras e operacionais para o desenvolvimento do Projecto.

Ao Prof. Almir Cirilo, Prof. Titular da Universidade Federal de Pernambuco (em Recife e Caruaru, PE, Brasil) e Presidente do CT-Hidro Pró-África, pela dinâmica que teve no lançamento do Projecto CIAS em 2007.

À Cooperação Portuguesa, no âmbito do Protocolo em curso entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) com os seus correspondentes nos PLOP, nomeadamente ao responsável pelo Protocolo no LNEC, Eng.º Mora Ramos do LNEC, pelo apoio financeiro à primeira missão do Eng. JP Lobo Ferreira à Guiné-Bissau, no primeiro semestre de 2010.

A sua Excelência o Ministro da Energia e Recursos Naturais da Guiné-Bissau, Eng.º Higinio Lopes Cardoso, ao Director-Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau, Eng.º Inussa Baldé, e ao Presidente do Laboratório de Engenharia da Guiné-Bissau (LEGUI), Eng.º Pedro Ialá, pelo apoio prestado à missão do Eng.º JP Lobo Ferreira à Guiné-Bissau em Junho de 2010, e pela cedência dos dados utilizados neste estudo.

À Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal (FCT) pelo apoio financeiro à segunda missão do Eng.º JP Lobo Ferreira à Guiné-Bissau, no segundo semestre de 2010, para apresentação dos resultados que se divulgam neste Relatório, e discussão de futuras oportunidades de cooperação.

COOPERAÇÃO INTERNACIONAL EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – CIAS

Relatório científico referente ao ano de 2010

1 Introdução

As próximas secções contêm uma breve apresentação do projecto CIAS, assim como os principais objectivos da Cooperação.

1.1 Apresentação do projecto

Em 2007 realizou-se uma reunião conduzida pelo Presidente do CT-Hidro Pró-África, Prof. Almir Cirilo, com os participantes do 8º SILUSBA (Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial), organizado pela APRH e ABRH em Novembro desse ano em São Paulo, Brasil. Na sequência do convite feito nessa reunião pelo Prof. Almir Cirilo foi submetida pelo IPT (de São Paulo, Brasil) uma proposta ao Projecto “Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas (CIAS)” a desenvolver com o LNEC (Portugal), o Ministério dos Recursos Naturais e Ambiente da Guiné-Bissau e a Universidade Agostinho Neto (Angola). O financiamento pelo CT-Hidro Pró-África foi atribuído em finais de 2007, destinado ao Brasil e aos PALOP, sendo o Dr. José Luiz Albuquerque do IPT de São Paulo o coordenador das actividades no Brasil e o Doutor Lobo Ferreira do LNEC o coordenador das actividades em Portugal.

No projecto CIAS pretende-se desenvolver metodologias para a avaliação de recursos hídricos subterrâneos de regiões insulares e zonas costeiras, considerando-se distintas situações hidrogeológicas e climatológicas, de acordo com a realidade existente nas zonas costeiras e nos arquipélagos da Guiné-Bissau (*e.g.* Bijagós) e em zonas costeiras de Angola. Está prevista a utilização de modelos conceptuais fundamentados e ferramentas matemáticas apropriadas, que permitirão a extensão dos conhecimentos hidrogeológicos brasileiros e portugueses (IPT e LNEC) aos parceiros angolanos e guineenses, visando a solução dos problemas locais.

Para as zonas costeiras e ilhas dos arquipélagos da Guiné-Bissau (*e.g.* Bijagós), o conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos é ainda incompleto. Para a região costeira de Luanda, em Angola, foi desenvolvida recentemente (em 2006) uma Tese de Doutoramento pelo Prof. Gabriel Luís Miguel, da Universidade Agostinho Neto de Luanda, na Universidade de Alcalá de Henares, em Espanha.

Os parâmetros a analisar serão divididos nos seguintes grupos: (1) caracterização quantitativa e qualitativa dos recursos hídricos subterrâneos; (2) caracterização da utilização/procura de águas subterrâneas; e (3) vulnerabilidade à poluição dos aquíferos. Conceptualmente os dados serão subdivididos em: (a) parâmetros estáveis (*ex.*: valores de permeabilidades) e (b) parâmetros variáveis (*ex.*: níveis piezométricos, caudais explorados, procura actual e futura, entre outros). O projecto iniciou-se em 2008 e tem a duração de 3 anos.

1.2 Instituições Envolvidas

A Instituição Coordenadora do Projecto é o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo por meio da FIPT – Fundação de Apoio ao IPT.

Participam no Projecto, para além da instituição coordenadora, a UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, UFRPE – Universidade Federal Rural de Pernambuco, ambas do Brasil, o Serviço de Gestão dos Recursos em Água na DGRH/DAAS (Guiné Bissau), o LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal), o Instituto Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (Cabo Verde) e a Universidade Agostinho Neto, Luanda (Angola).

1.3 Objectivos

O principal objectivo deste projecto é promover cooperação entre instituições de pesquisa voltadas para a solução dos problemas relacionados com a gestão sustentável de águas subterrâneas em aquíferos costeiros, incluindo a quantificação dos recursos, o estudo da intrusão salina e a protecção das águas subterrâneas.

Os principais objectivos específicos da Cooperação são os seguintes:

- Cooperação com a Guiné-Bissau e com Angola nos campos de conhecimento da hidrogeologia e suas áreas de apoio, com vista à caracterização do quadro actual e busca de soluções para os problemas de salinização de poços de abastecimento em áreas costeiras;
- Realização de missões técnicas brasileiras à Guiné-Bissau e a Angola, procurando viabilizar o intercâmbio de conhecimento de metodologias aplicadas ao estudo de aquíferos costeiros;
- Realização de eventos (workshops) conjuntos sobre a temática de interesse para a gestão das águas subterrâneas costeiras na Guiné-Bissau e em Angola; e
- Transferência de conhecimentos, visando o desenvolvimento de trabalhos académicos (e.g. teses de Mestrado e/ou de Doutoramento) com orientação de especialistas do LNEC (Portugal) e do IPT (Brasil), nomeadamente para o desenvolvimento de metodologias de avaliação, quantificação e mitigação da intrusão de cunhas salinas em aquíferos costeiros.

1.4 Actividade desenvolvida no LNEC em 2010 no âmbito do CIAS

A actividade desenvolvida no LNEC no âmbito do CIAS tem três objectivos principais:

- Caracterizar a vulnerabilidade actual à intrusão marinha na área de influência da maré na zona costeira da Guiné-Bissau e prever os efeitos de uma eventual subida do nível do mar devido a alterações climáticas (subida do nível médio do mar de 0,25 m, 0,50 m e 1 m). Para tal foi utilizado o método GALDIT;
- Analisar os dados de base geológicos e hidrogeológicos cedidos pela Direcção Geral dos

Recursos Hídricos da Guiné-Bissau, à escala nacional e à escala local (e.g. para a região do Parque Nacional de Cacheu e para Catió), de forma a identificar áreas críticas onde é necessário colmatar lacunas de conhecimento hidrogeológico;

- Analisar a possibilidade de desenvolver um modelo matemático de águas subterrâneas para aplicação a um caso de estudo Guineense (eventualmente à ilha de Bolama).

Foi também preparada uma apresentação com o objectivo de divulgar o trabalho desenvolvido (cf. Anexo I), que será oportunamente apresentada a um encontro científico.

2 Descrição do método GALDIT

A intrusão salina em aquíferos costeiros é um dos fenómenos que pode influenciar a qualidade da água subterrânea nas áreas afectadas pela subida do nível médio do mar. A sobreexploração destes aquíferos é uma das principais causas deste fenómeno, já que o incremento dos volumes de água captados pode resultar na diminuição do nível de água subterrânea. Como consequência, a interface água doce / água salgada avança para o interior do continente, dando origem à salinização não só da água como também do solo.

Lobo Ferreira *et al.* (2007) definiram vulnerabilidade à intrusão salina (neste relatório designada de marinha por ser proveniente do mar) como “a sensibilidade da qualidade da água subterrânea a uma extracção imposta ou à subida do nível do mar, determinada pelas características intrínsecas do aquífero”. Esta definição relaciona-se com a definição de vulnerabilidade à poluição de aquíferos (“a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero e do tipo de poluente”), proposta por Lobo Ferreira e Cabral (1991). O método GALDIT refere-se a um aspecto específico de vulnerabilidade que se pode enquadrar dentro do campo mais vasto das metodologias de vulnerabilidade à poluição/alteração da qualidade das águas subterrâneas.

Os factores mais importantes que controlam a intrusão marinha em aquíferos costeiros são os seguintes: Ocorrência de águas subterrâneas (tipo do aquífero: não confinado, confinado ou semi-confinado); Condutividade hidráulica do Aquífero; Nível piezométrico (acima do nível do mar); Distância à linha de costa; Impacto da existência de fenómenos de intrusão marinha na área; e espessura da camada do aquífero em estudo. O método foi denominado GALDIT do seu acrónimo em inglês (Groundwater occurrence (aquifer type; unconfined, confined and leaky confined); Aquifer hydraulic conductivity; Depth to groundwater Level above the sea; Distance from the shore (distance inland perpendicular from shoreline); Impact of existing status of sea water intrusion in the area; and Thickness of the aquifer, which is being mapped). A caracterização espacial de cada um destes factores, e a sua combinação conjunta permite obter um índice ponderado que representa a vulnerabilidade à intrusão marinha do sistema aquífero costeiro em estudo.

O método GALDIT foi desenvolvido por Chachadi e Lobo Ferreira (2001) com o objectivo de avaliar a vulnerabilidade à intrusão marinha das regiões costeiras de clima tropical da Índia, no âmbito do projecto COASTIN. Embora tenha sido criado considerando condições particulares do litoral indiano, uma vez que incorpora aspectos universais do funcionamento dos aquíferos costeiros, a sua aplicação é possível em

qualquer região costeira. Posteriormente, o método foi modificado pelos autores, sendo utilizada neste trabalho a versão descrita em Chachadi e Lobo Ferreira (2007).

Os valores dos parâmetros variam entre 2,5 e 10 que correspondem, respectivamente, a uma vulnerabilidade à intrusão marinha baixa e alta. De forma geral, estes valores são atribuídos a partir de tabelas que fazem a correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o valor do parâmetro associado. Os coeficientes de ponderação variam entre 1 e 4, valores que são associados, respectivamente, aos parâmetros com menor e maior influência na vulnerabilidade, de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros GALDIT

Parâmetro GALDIT	Valor do Coeficiente de Ponderação
G – Ocorrência de Aquíferos	1
A – Condutividade Hidráulica	3
L – Nível piezométrico (acima do nível do mar)	4
D – Distância à linha de costa	4
I – Impacte do estado actual da intrusão marinha na região	1
T – Espessura do aquífero	2

Conhecido o valor de cada parâmetro, o índice GALDIT é calculado utilizando todos os parâmetros, através da Equação 1 (Chachadi e Lobo Ferreira, 2007):

$$\text{Índice GALDIT} = (1 \cdot G + 3 \cdot A + 4 \cdot L + 4 \cdot D + 1 \cdot I + 2 \cdot T) / 15 \quad (1)$$

As classes de vulnerabilidade GALDIT, que se encontram descritas no Quadro 2, são definidas em função do índice calculado utilizando a equação anterior (Chachadi e Lobo Ferreira, 2007). Os parágrafos seguintes descrevem com maior detalhe cada um dos parâmetros.

Quadro 2 – Classes de vulnerabilidade

Classes de vulnerabilidade	Índice GALDIT
Vulnerabilidade elevada	$\geq 7,5$
Vulnerabilidade moderada	5 – 7,5
Vulnerabilidade baixa	2,5 – 5
Vulnerabilidade muito baixa	$\leq 2,5$

Ocorrência de Aquíferos (G) – refere-se ao tipo de aquífero, que pode ser confinado, livre, semi-confinado ou limitado por uma ou mais fronteiras. Os autores referem que a ocorrência de intrusão marinha depende do tipo de aquífero. Assim, em condições naturais, os aquíferos livres são mais susceptíveis à intrusão marinha do que os aquíferos confinados, uma vez que estes possuem a protecção de uma carga hidráulica superior à pressão atmosférica. Contudo, quando há exploração, o aquífero confinado torna-se de todos o mais vulnerável, devido à formação de um maior cone de rebaixamento e descarga instantânea de água para as captações durante a bombagem. Os aquíferos semi-confinados são menos susceptíveis uma vez que não só possuem uma carga hidráulica superior à que existiria num aquífero livre, como também podem manter ao longo do tempo pelo menos uma parte dessa carga através da drenância a partir dos aquíferos circundantes. Os aquíferos separados do mar por uma barreira impermeável encontram-se mais protegidos da intrusão marinha, sendo os menos vulneráveis a este

fenómeno (Novo, 2007; Chachadi e Lobo Ferreira, 2007). Os últimos autores ressaltam que, no caso de sistemas multi-aquífero, se pode atribuir o valor 10 ao aquífero confinado. O Quadro 3 mostra o valor do índice atribuído por tipo de aquífero.

Quadro 3 – Parâmetro G: ocorrência de aquíferos

Classes “ocorrência de aquíferos”	Valor do índice
Aquífero confinado	10
Aquífero livre	7,5
Aquífero semi-confinado	5
Aquífero limitado (recarga e/ou barreira impermeável alinhada paralelamente à linha de costa)	2,5

Condutividade hidráulica (A) – este parâmetro é utilizado para medir a velocidade de fluxo de água no aquífero, para o mar. A condutividade hidráulica de um aquífero define-se como a sua capacidade em transmitir água e depende da porosidade eficaz e da fracturação em rochas consolidadas. A condutividade hidráulica influencia a dimensão da intrusão marinha ou seja, quanto mais elevado for o seu valor maior será o avanço da cunha marinha. A intrusão marinha tende a ser maior não só nos períodos de estio, quando a recarga é menor, como também em regiões sujeitas à sobreexploração, já que o rebaixamento do nível de água doce promove o avanço da água do mar para o continente (Novo, 2007). O Quadro 4 contém as diferentes classes e valores deste parâmetro.

Quadro 4 – Parâmetro A: condutividade hidráulica

Classes “condutividade hidráulica”	Intervalo (m/d)	Valor do índice
Elevada	> 40	10
Média	10 – 40	7,5
Baixa	5 – 10	5
Muito Baixa	< 5	2,5

Nível piezométrico (acima do nível do mar) (L) – refere-se ao nível de água subterrânea medido em relação ao nível do mar. É um parâmetro bastante importante, uma vez que permite determinar a carga hidráulica que faz recuar o avanço da cunha salina. Neste parâmetro deve ser considerada apenas a variação temporal de longo período dos níveis de água. As diferentes classes e respectivos valores deste parâmetro encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetro L: nível piezométrico (acima do nível do mar)

Classes “nível piezométrico (acima do nível do mar)”	Intervalo (m)	Valor do índice
Elevada	< 1	10
Média	1 – 1,5	7,5
Baixa	1,5 – 2	5
Muito Baixa	> 2	2,5

Distância à linha de costa (D) – o impacto da intrusão marinha geralmente diminui com o aumento da distância na perpendicular à linha de costa, apresentando valores máximos junto da linha litoral. O Quadro 6 apresenta os valores atribuídos a este parâmetro.

Quadro 6 – Parâmetro D: distância à linha de costa

Classes “distância à linha de costa”	Intervalo (m)	Valor do índice
Muito Perto	< 500	10
Perto	500 – 750	7,5
Meia distância	750 – 1000	5
Longe	> 1000	2,5

Impacte do estado actual da intrusão marinha na região (I) – reflecte o desequilíbrio que pode existir entre a água do mar e a água doce, por alteração do equilíbrio hidráulico em condições naturais, como resultado da actividade antropogénica já existente na zona. Chachadi e Lobo Ferreira (2001) recomendam a utilização da razão $Cl/[HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ como um dos possíveis critérios de avaliação da intrusão marinha em aquíferos costeiros. Na ausência de dados hidroquímicos pode usar-se informação recolhida no campo ou dos próprios utilizadores da água. O Quadro 7 ilustra os valores para este parâmetro.

Quadro 7 – Parâmetro I: Impacte do estado actual da intrusão marinha na região

Classes “impacte do estado actual da intrusão marinha na região”	Razão $Cl/[HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ na água doce	Valor do índice
Alta	> 2	10
Média	1,5 – 2	7,5
Baixa	1 – 1,5	5
Muito baixa	< 1	2,5

Espessura do aquífero (T) – a espessura do aquífero e a espessura saturada do aquífero confinado desempenha um papel importante no controlo da intrusão marinha. Quanto maior for a espessura do aquífero maior a extensão da intrusão.

Quadro 8 – Parâmetro T: espessura do aquífero

Classes “espessura do aquífero”	Intervalo (m)	Valor do índice
Grande	> 10	10
Média	7,5 – 10	7,5
Pequena	5 – 7,5	5
Muito pequena	< 5	2,5

3 Caracterização da área de estudo

O método GALDIT foi aplicado à zona de influência de maré da Guiné-Bissau. As secções seguintes descrevem com maior pormenor a sua localização e referem as suas características mais relevantes para este trabalho.

3.1 Localização

A República da Guiné-Bissau localiza-se na costa ocidental de África, entre os paralelos 10° 50' e

12° 20'N e os meridianos 13° 90' e 16° 43'W. Faz fronteira a norte com o Senegal, a este e sudeste com a Guiné-Conacri e a sul e oeste com o oceano Atlântico. O país tem uma área de 36.125 Km² e, além do território continental, integra ainda cerca de oitenta ilhas que constituem o arquipélago dos Bijagós. O país está dividido em 9 regiões e 37 sectores administrativos.

Depois da sua independência só foram realizados dois recenseamentos, nos anos 1979 e 1991. Assim a população estimada para 2005 feita pelo Instituto Nacional de Estatística e Recenseamento é de 1.310.3007 habitantes.

O clima é tropical húmido e apresenta duas estações anuais. A estação seca estende-se de Novembro a Abril e a estação das chuvas vai de Maio até Outubro. A precipitação média anual oscila entre 1500 mm a norte e 2000 mm a sul e a temperatura média varia entre os 24 e os 27 °C. A humidade média é bastante acentuada (cerca de 70%), sendo principalmente influenciada pelo regime do vento, pela precipitação e pela proximidade da costa.

Os recursos hídricos da Guiné-Bissau são na maior parte constituídos pela precipitação que cai anualmente, pelas águas superficiais dos rios provenientes dos países vizinhos (Corubal na Guiné-Conakry e Geba no Senegal) e pelas águas subterrâneas. Podem-se diferenciar três bacias hidrográficas principais, de norte a sul: Rio Cacheu (Rio Canjambari), Rio Geba e Rio Corubal.

A Fig. 1 mostra a localização da área de estudo. A linha a tracejado, na imagem inferior, separa a área sob a influência da maré, sendo esta a zona à qual foi aplicado o método GALDIT.

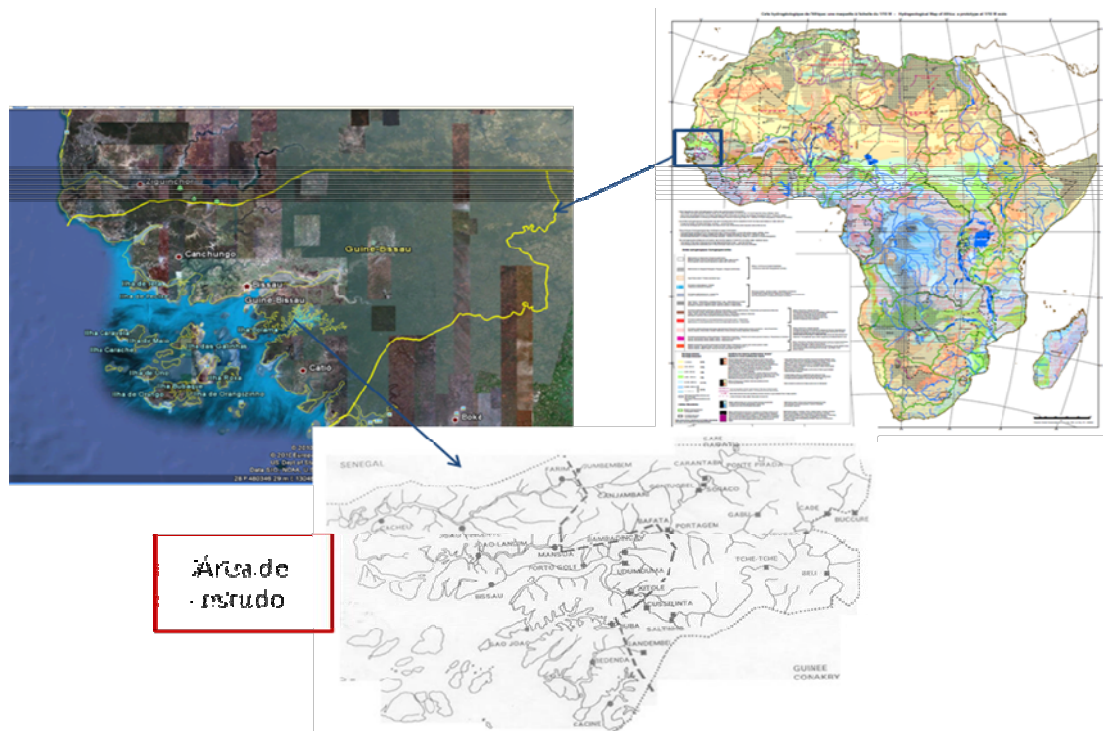


Fig. 1 – Localização da área de estudo (Fonte: Google Earth, BRGM e Azinhaga, 2007)

A Fig. 2 contém a localização dos furos existentes na Guiné-Bissau e que constituem a base de

dados da qual se retirou a informação necessária à realização deste estudo. Estes dados foram fornecidos pelo Director-Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau.

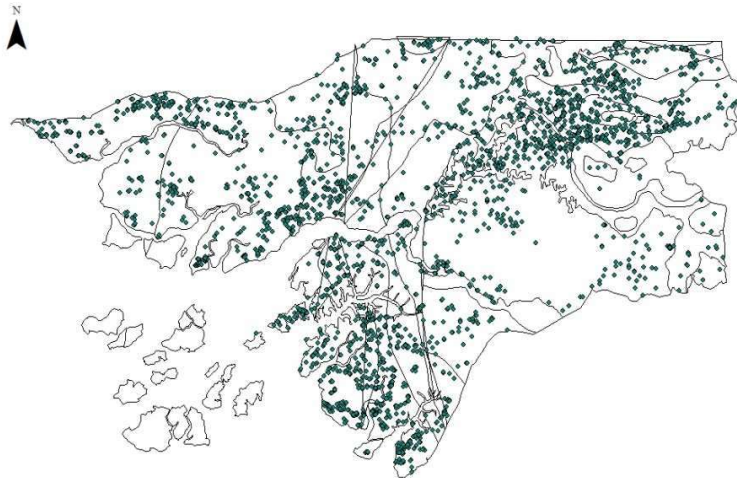


Fig. 2 – Localização dos furos existentes na Guiné-Bissau (Fonte: DGRH Guiné-Bissau)

3.2 Geologia e Hidrogeologia

A constituição geológica da Guiné-Bissau é relativamente simples, apresentando duas formações. A formação mais recente é a mesocenozóica, que inclui a zona costeira e faz parte da grande bacia sedimentar Senegal-Mauritânia. Aqui, os sedimentos mais recentes do quaternário estão depositados em associação com não só com os processos recentes de sedimentação (vales, praias, mangais, bancos) como também com um mais antigo, o paleozóico. Esta formação situa-se na zona leste do país, e é formado por granitos e conglomerados (Azinhaga, 2007).

Do ponto de vista geomorfológico, a Guiné-Bissau encontra-se dividida em 5 unidades principais, *cf.* Azinhaga, (2007):

- Planalto litoral - a altitude média atinge cerca de 20 a 25 m, cortada por vários rios de norte a sul. A topografia é plana e coberta por mangais.
- Planície de Bafatá – a altitude média varia entre 25 e 50 m.
- Peneplanície de Gabú – a altitude média varia entre 50 e 100 m.
- Colinas de Boé – a altitude média ultrapassa os 300 m. São constituídas pelo maciço contínuo de Fouta Djallon presente no território guineense.
- Zonas de transição de Oio e Forrea.

Em relação à hidrogeologia, o país encontra-se dividido em duas unidades principais. A Este predomina o maciço antigo, enquanto a Oeste predomina a formação sedimentar mesocenozóica.

O maciço antigo é constituído por rochas antigas, compreendendo rochas eruptivas pré-câmbricas, grés e xistos do Devoniano, com uma espessura total superior a 5000 m. A parte superior do maciço possui fracturas abertas até 80 m de profundidade, que podem dar origem a sistemas aquíferos

descontínuos de extensão limitada (Azinhaga, 2007).

A bacia sedimentar é constituída por formações argilo-arenosas e gresosas, assim como por terrenos marno-calcarios, do período mesozóico ao quaternário. As formações sedimentares que constituem os aquíferos são (Azinhaga, 2007):

- Cretácico superior – a hidrogeologia das zonas inferior e média é praticamente desconhecida. A profundidade varia entre os 400 e os 800 m, tendo-se detectado a presença de água salgada.
- Período do Maestriciano até ao Miocénico Superior – Aqui pode existir diferentes formações aquíferas. Os grés maestricianos (até 500 m de espessura) são os que apresentam melhor produtividade.
- O Paleoceno / Eoceno, com uma espessura até 300 metros, contém horizontes de calcário, que constituem excelentes aquíferos.
- O Oligoceno (50 a 120 metros de espessura) constitui um bom aquífero arenoso a nordeste de Bissau, tornando-se calcárico na parte ocidental e argiloso na parte oriental.
- Os calcários e arenitos calcários do Miocénico inferior e médio (até 80 metros de espessura) constituem bons aquíferos, mas limitados e descontínuos. Os diferentes horizontes dos aquíferos são separados por formações semi-permeáveis ou de baixa permeabilidade, cujas características fazem supor a existência de comunicações verticais por drenagem

A Fig. 3 mostra a Carta Hidrogeológica da Guiné-Bissau.

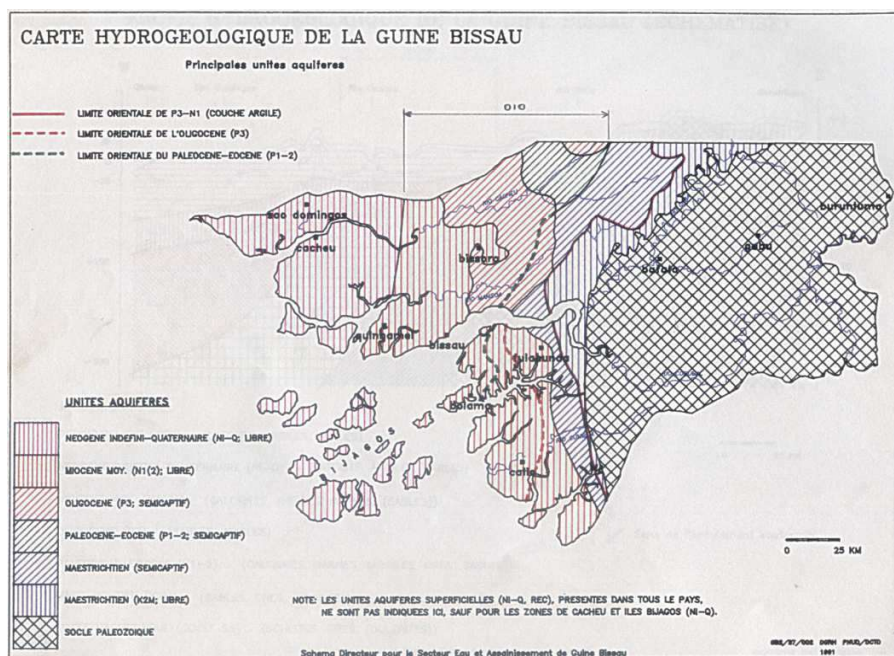


Fig. 3 – Carta Hidrogeológica da Guiné-Bissau (Fonte: Azinhaga, 2007)

A infiltração da precipitação ocorre onde aflora e sub-aflora o maciço e a bacia sedimentar. O Maestriciano e os outros aquíferos subjacentes são explorados por bombeamentos.

4 Aplicação do método GALDIT

O método GALDIT foi aplicado à área sob a influência da maré na Guiné-Bissau. Embora a metodologia GALDIT devesse ser aplicada considerando as propriedades hidráulicas e características das faixas costeiras, optou-se por utilizar as propriedades médias dos sistemas aquíferos nos casos onde não se dispunha de informação específica para a área em análise.

Os dados utilizados nesta análise foram fornecidos pelo Director-Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau. Os parágrafos seguintes descrevem a aplicação do método à zona de estudo e justificam os índices atribuídos a cada parâmetro.

Parâmetro G – Na zona de estudo encontram-se dois tipos diferentes de aquíferos: livre e semi-confinado. Existe também uma zona de fixe (base) paleozóico (“socle paléozoïque”) onde, de acordo com Azinhaga (2007), podem existir sistemas aquíferos descontínuos de extensão limitada. Assim, e de acordo com o Quadro 3, atribuiu-se um índice de 7,5 ao aquífero livre, de 5 ao aquífero semi-confinado e de 2,5 à zona de fixe (base) paleozóico (Fig. 4).

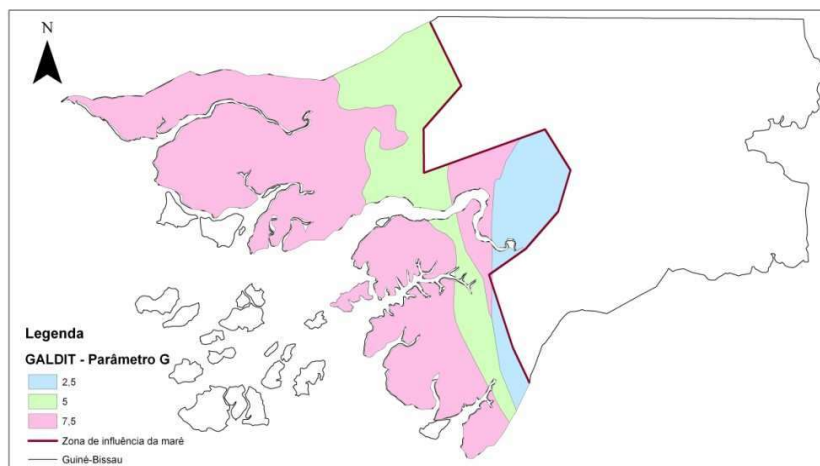


Fig. 4 – Parâmetro G

Parâmetro A – Os valores de condutividade foram calculados a partir dos valores de transmissividade fornecidos pelo Director-Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau. Para os pontos onde não se dispunha desta informação, utilizou-se um ábaco para atribuir o valor de condutividade, tendo-se atribuído a cada material um valor de condutividade da mesma ordem de grandeza dos valores já conhecidos. Os valores de condutividade variam entre 0,0108 m/d e 11,712 m/d, tendo-se atribuído a este parâmetro os índices de 2,5, 5 e 7,5 o que corresponde a uma condutividade muito baixa a média (cf. Quadro 4 e Fig. 5).

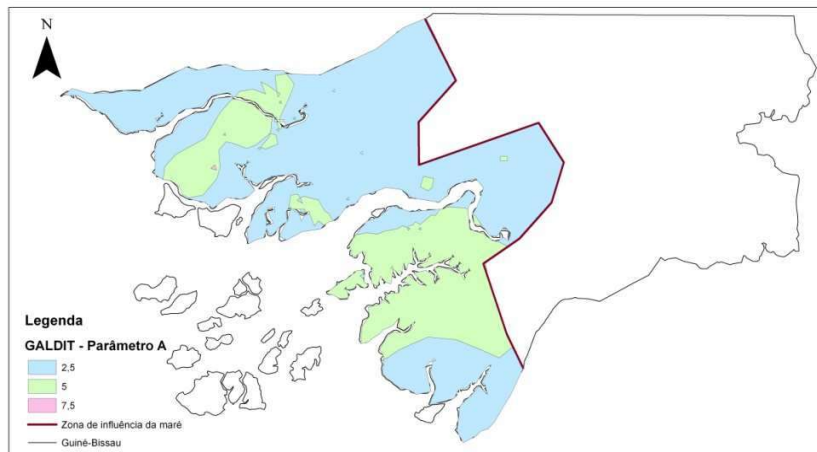


Fig. 5 – Parâmetro A

Parâmetro L – A altura acima do nível do mar foi obtida através dos dados de campanhas de monitorização constantes na informação fornecida pelo Director-Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau. A Fig. 6 mostra a distribuição do nível piezométrico, podendo-se observar que os valores medidos se incluem nas quatro classes previstas no método GALDIT para este parâmetro.

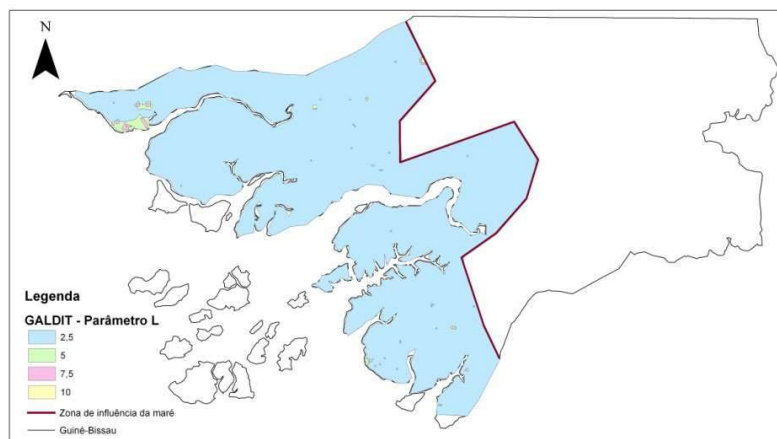


Fig. 6 – Parâmetro L (situação de referência)

Com vista à caracterização da vulnerabilidade à intrusão marinha face a uma eventual subida do nível do mar na área de influência da maré na zona costeira da Guiné-Bissau devido a alterações climáticas, recalculou-se o nível piezométrico da situação de referência, considerando uma subida do nível médio do mar de 0,25 m, 0,50 m e 1 m. As Fig. 7, Fig. 8, e Fig. 9 mostram os respectivos mapas.

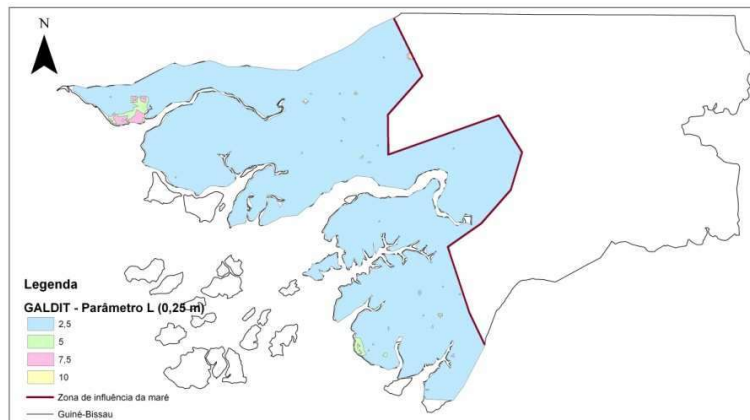


Fig. 7 – Parâmetro L (0,25 m)

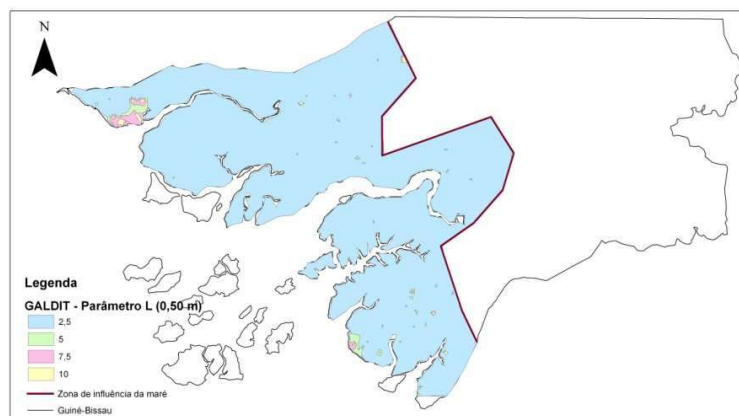


Fig. 8 – Parâmetro L (0,50 m)

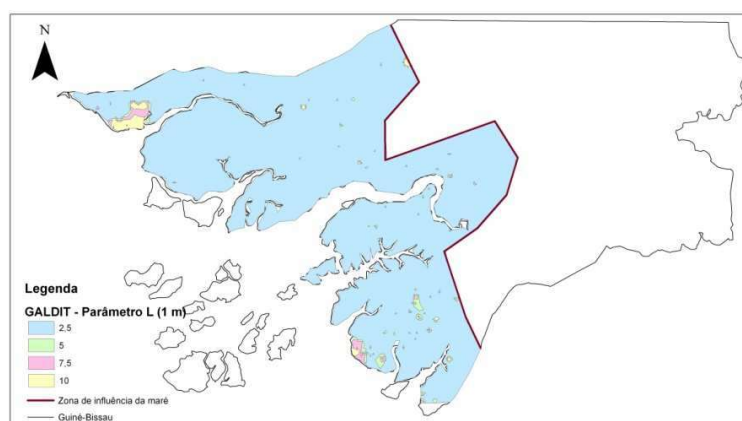


Fig. 9 – Parâmetro L (1 m)

Parâmetro D – O parâmetro distância à linha da costa foi determinado através do cálculo de três distâncias na perpendicular à linha da costa, de 500, 750 e 1000 m respectivamente, *cf.* a Fig. 10.

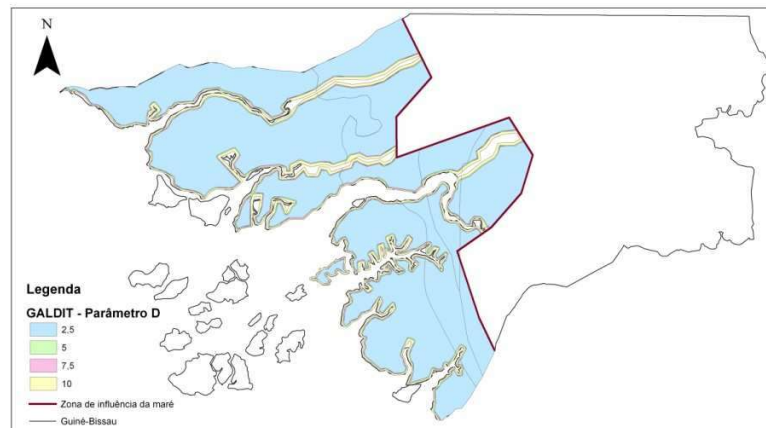


Fig. 10 – Parâmetro D

Parâmetro I – uma vez que não se dispunha de dados relativos à relação entre as concentrações dos iões cloreto (Cl^-) e bicarbonato (HCO_3^-), optou-se por utilizar os valores da concentração de cloretos, disponíveis para alguns poços localizados na área de estudo. A Fig. 11 mostra o mapa da distribuição espacial destes valores, obtido através de uma interpolação IDW (*Inverse Distance Weighted* - Inverso do Peso da Distância).

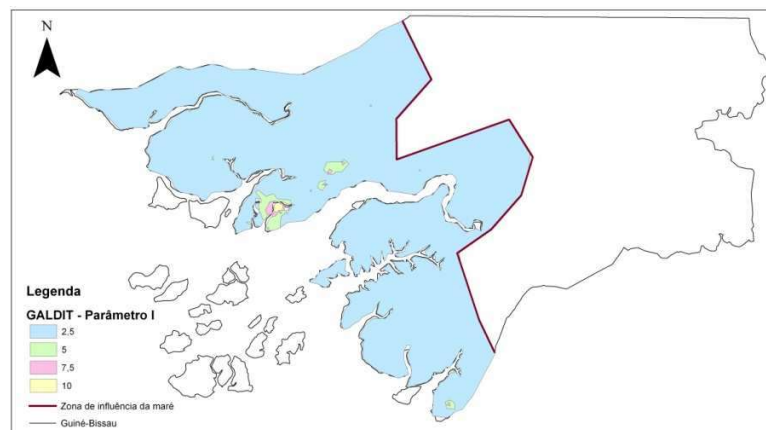


Fig. 11 – Parâmetro I

Parâmetro T – A espessura da área de estudo foi determinada através da profundidade total dos furos localizados na área de estudo. A Fig. 12 mostra o mapa resultante da interpolação destes valores.

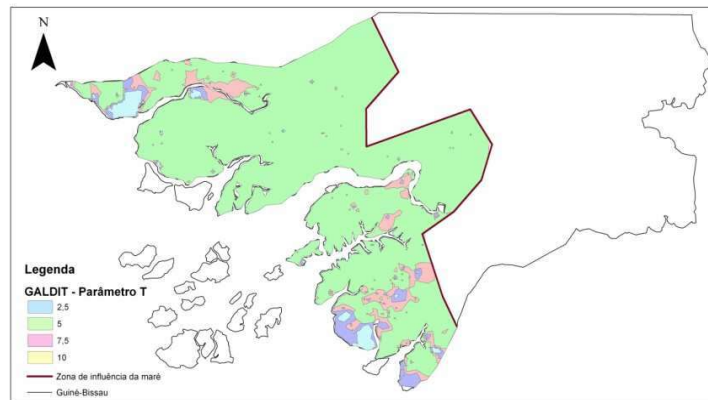


Fig. 12 – Parâmetro T

4.1 Análise dos Resultados

O índice GALDIT foi calculado substituindo na Equação (1) os valores dos índices obtidos para cada uma das classes que constituem o método. A Fig. 13 mostra o mapa do índice de vulnerabilidade, onde é possível verificar que para esta área foram obtidas todas as classes de vulnerabilidade previstas no método (*cf.* o Quadro 2). As Fig. 14, Fig. 15 e Fig. 16 ilustram o índice GALDIT obtido para os cenários de subida do nível médio do mar simulados. É possível verificar um aumento da vulnerabilidade, que se traduz pelo alargamento das zonas com vulnerabilidade moderada e alta. Este aumento é mais visível nas zonas costeiras Noroeste, na região do Parque Nacional de Cacheu, e Sudoeste, na zona costeira de Catió, em Calar.

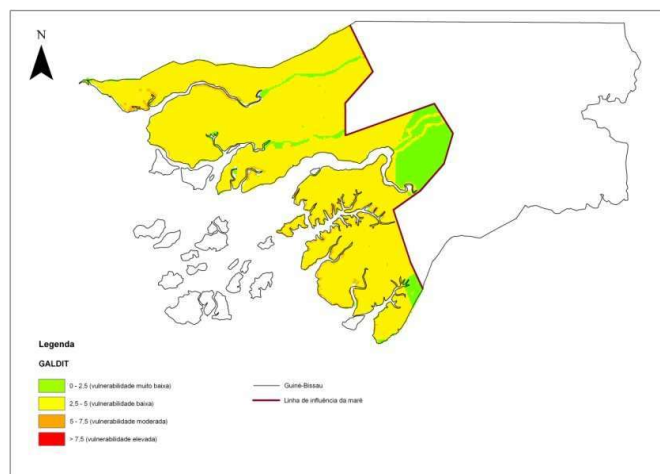


Fig. 13 – Índice GALDIT (situação de referência)

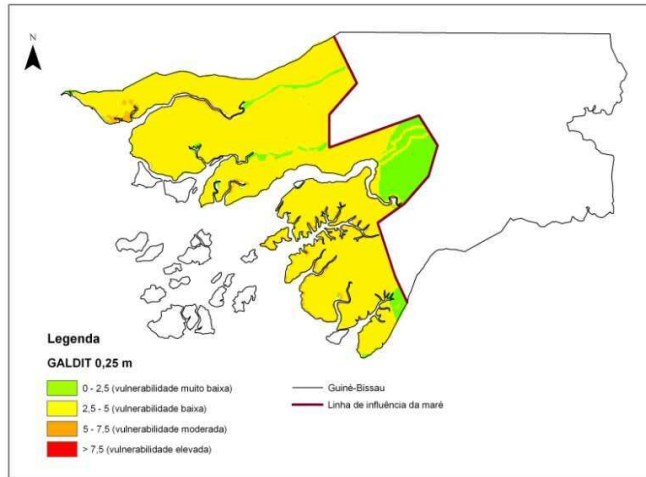


Fig. 14 – Índice GALDIT (0,25 m)

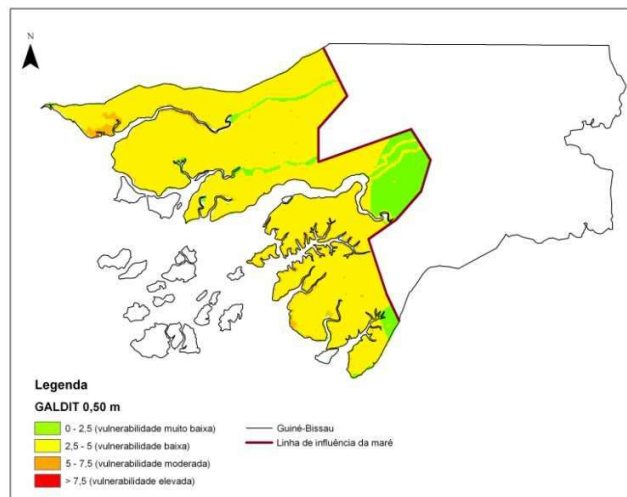


Fig. 15 – Índice GALDIT (0,50 m)

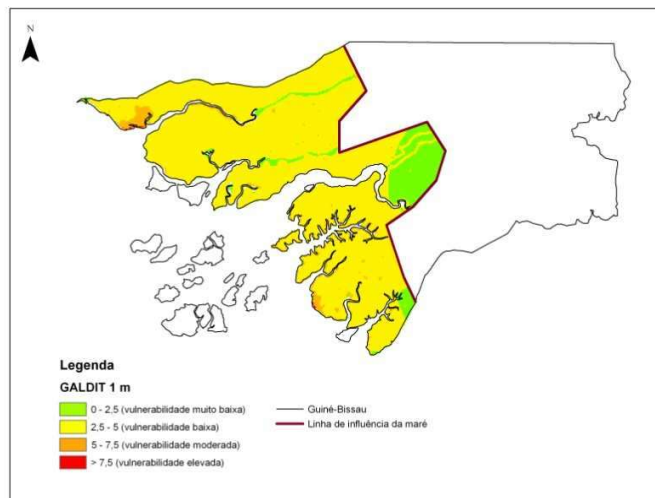


Fig. 16 – Índice GALDIT (1 m)

5 Conclusões

O método GALDIT, desenvolvido por Chachadi e Lobo Ferreira (2001), foi aplicado à zona de influência da maré em Guiné-Bissau, 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). Da análise efectuada constatou-se que as zonas potencialmente mais afectadas pela intrusão marinha são as zonas costeiras Noroeste, na região do Parque Nacional de Cacheu, e Sudoeste, na zona costeira de Catió, em Calar (cf. Fig. 17).

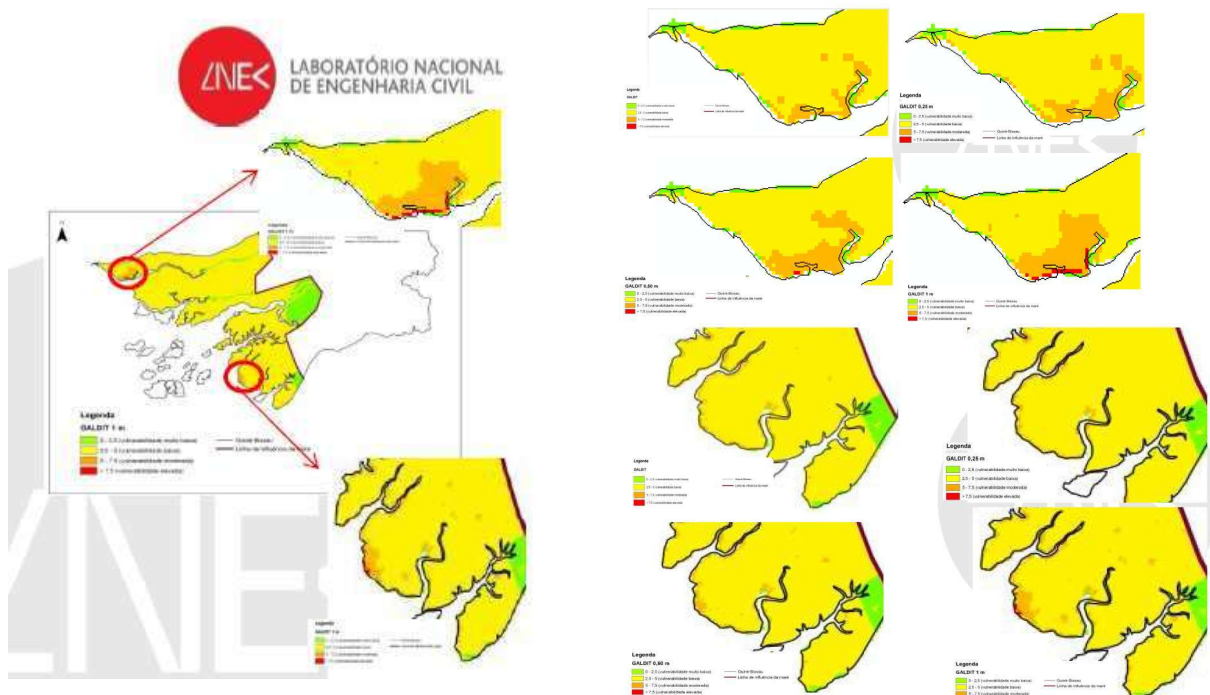


Fig. 17 – Resultados GALDIT obtidos para as zonas costeiras do Parque Nacional de Cacheu (São Domingos) e de Catió (Calar)

Para permitir o desenvolvimento do modelo matemático de águas subterrâneas da ilha de Bolama é necessário realocar alguns dos furos constantes na base de dados (que neste momento se situam no mar, cf. Fig. 18), actualizar os dados piezométricos da zona e obter nova informação geológica da ilha.



Fig. 18 – Necessidade de realocização de alguns dos furos constantes na base de dados para a ilha de Bolama

Recomenda-se, assim, reforçar a análise efectuada com novos dados hidrogeológicos, a obter no âmbito do projecto Gestão Integrada dos Recursos de Água da Guiné-Bissau (GIRA), de forma a robustecer a análise efectuada, nomeadamente obtendo mapas fundamentais de apoio à gestão sustentável da zona costeira, no que respeita à utilização e protecção dos recursos hídricos subterrâneos.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil,

Agosto de 2010

VISTOS

AUTORIAS

O Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas

João Paulo de Cárcomo Lobo Ferreira

A Directora do Departamento de Hidráulica e
Ambiente

Rafaela de Saldanha Matos

Patrícia Terceiro
Bolseira no Núcleo de Águas Subterrâneas
Mestre em Engenharia do Ambiente

João Paulo de Cárcomo Lobo Ferreira
Doutor em Engenharia Civil, Investigador-
Coordenador no Núcleo de Águas Subterrâneas

6 Bibliografia

AZINHAGA, P. (2007). *Elaboration de la politique régionale de l'eau pour l'Afrique occidentale. Rapport Guinée – Bissau*. Unité de Coordination des Ressources en Eau, Communauté Economique des Etats de L'Afrique de L'Ouest.

CHACHADI, A.G; LOBO FERREIRA, J.P. (2001). *Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method*. COASTIN – a coastal policy research newsletter, n.º4, pp. 7-9.

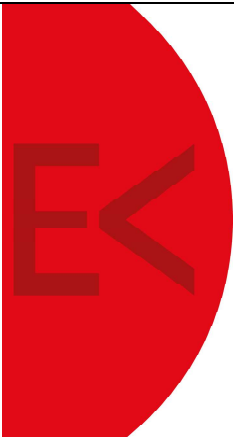
CHACHADI, A.G; LOBO FERREIRA, J.P. (2007). *Sea water intrusion vulnerability using GALDIT method: Part 2 – GALDIT indicators description*. In Lobo Ferreira, J.P; Vieira, J. (eds) – *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, pp. 172-180.


LOBO FERREIRA, J.P.; CABRAL, M. (1991). *Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources*, in the framework of the Meeting of the "European Institute for Water, Groundwater Work Group. Bruxelas.

LOBO FERREIRA, J.P.; CHACHADI, A.G.; DIAMANTINO, C.; HENRIQUES, M.J. (2007). *Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 1 application to the Portuguese aquifer of Monte Gordo*. In Lobo Ferreira, J.P; Vieira, J. (eds) – *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, pp. 161-171.

NOVO, M.E. (2007). *Alterações climáticas e seus impactos nos recursos hídricos subterrâneos em ilhas de pequena dimensão (caso de estudo: Açores – Ilha Terceira)*. Universidade dos Açores, Doutoramento em Engenharia do Ambiente.


Anexo I






AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA DA ZONA DE INFLUÊNCIA DE MARÉ DA GUINÉ-BISSAU

Patricia TERCEIRO (LNEC)
 João Paulo LOBO FERREIRA (LNEC)
 Inussa BALDE (DGRH Guiné-Bissau)
 Luis OLIVEIRA (LNEC)





© LNEC 2006



AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA DA ZONA DE INFLUÊNCIA DE MARÉ DA GUINÉ-BISSAU

Sumário:

1. Introdução
 - a) Intrusão marinha
 - b) Vulnerabilidade à intrusão marinha
 - c) Objectivo do estudo
2. Método GALDIT
3. Caracterização da zona de estudo
 - a) Localização
 - b) Geologia e Hidrogeologia
4. Aplicação do método GALDIT
5. Conclusões
6. Agradecimentos

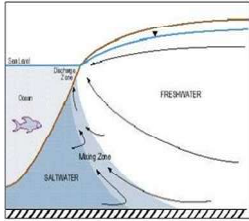
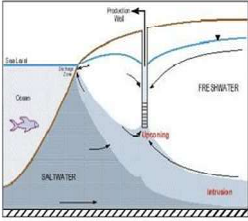



© LNEC 2006

1a) Intrusão marinha

➢ Fenómeno que pode influenciar a qualidade da água subterrânea nas áreas afectadas pela subida do nível médio do mar.

➢ A sobreexploração destes aquíferos é uma das principais causas deste fenómeno, já que o incremento dos volumes de água captados pode resultar na diminuição do nível de água subterrânea – avanço da interface água doce / água salgada para o interior do continente, dando origem à salinização não só da água como também do solo.

© LNEC

1b) Vulnerabilidade à intrusão marinha

“Sensibilidade da qualidade da água subterrânea a uma extração imposta ou à subida do nível do mar, determinada pelas características intrínsecas do aquífero”.

1c) Objectivos do estudo

➢ Caracterizar a vulnerabilidade actual à intrusão marinha na área de influência da maré na zona costeira da Guiné-Bissau e prever os efeitos de uma eventual subida do nível do mar devido a alterações climáticas (subida do nível médio do mar de 0,25 m, 0,50 m e 1 m).

➢ Análise dos dados de base geológicos e hidrogeológicos cedidos pela Direcção Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau, à escala nacional e à escala local (e.g. para a região do Parque Nacional de Cacheu e para Catió) de forma a identificar áreas críticas onde é necessário colmatar lacunas de conhecimento hidrogeológico.

➢ Análise da possibilidade de desenvolvimento de um modelo matemático de águas subterrâneas para aplicação a um caso de estudo Guineense (eventualmente à ilha de Bolama).

© LNEC 2006

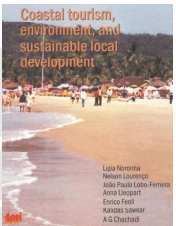

2) Método GALDIT (1)

➢ Desenvolvido por Chachadi e Lobo Ferreira (2001) com o objectivo de avaliar a vulnerabilidade à intrusão marinha das regiões costeiras.

➢ Os factores mais importantes que controlam a intrusão marinha são:

- Ocorrência de águas subterrâneas (tipo do aquífero: não confinado, confinado ou semi-confinado);
- Condutividade hidráulica do aquífero;
- Nível piezométrico (acima do nível do mar);
- Distância à linha de costa;
- Impacte da existência de fenómenos de intrusão marinha na área;
- Espessura da camada do aquífero em estudo

O método foi denominado GALDIT do seu acrónimo em inglês.

© LNEC 2006

2) Método GALDIT (2)

➢ Valor de cada parâmetro varia entre 2,5 e 10 (corresponde, respectivamente, a uma vulnerabilidade à intrusão marinha baixa e alta).

➢ Os valores são, de forma geral, atribuídos a partir de tabelas que fazem a correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o valor do parâmetro associado.

➢ Coeficientes de ponderação variam entre 1 e 4 (parâmetros com menor e maior influência na vulnerabilidade, respectivamente)

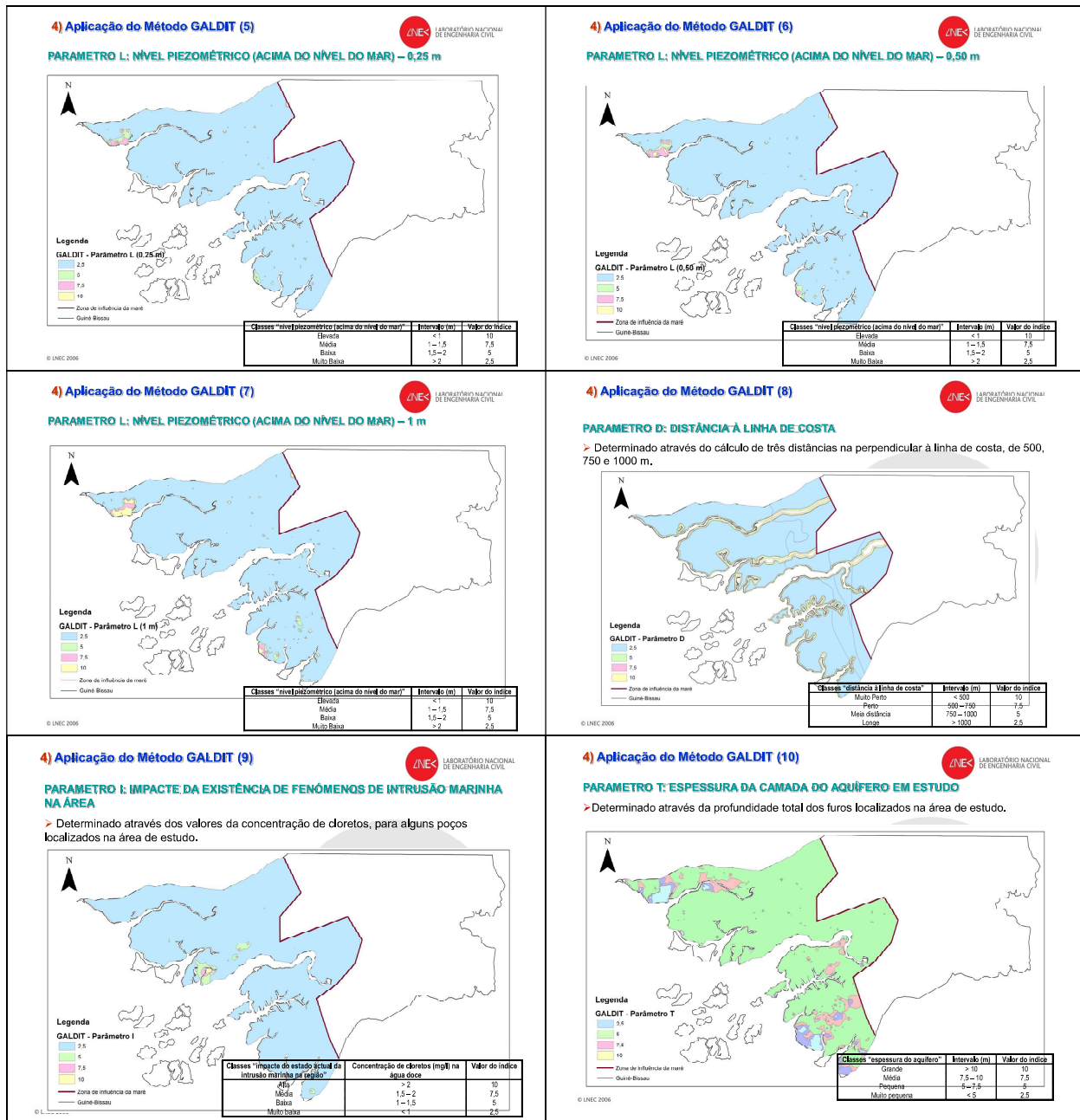
Parâmetro GALDIT	Valor do Coeficiente de Ponderação
G – Ocorrência de Aquíferos	1
A – Condutividade Hidráulica	3
L – Nível piezométrico (acima do nível do mar)	4
D – Distância à linha de costa	4
I – Impacte do estado actual da intrusão marinha na região	1
T – Espessura do aquífero	2

Equação: Índice GALDIT = $(1 \cdot G + 3 \cdot A + 4 \cdot L + 4 \cdot D + 1 \cdot I + 2 \cdot T) / 15$

Classes de vulnerabilidade	Índice GALDIT
Vulnerabilidade elevada	≥ 7,5
Vulnerabilidade moderada	5 – 7,5
Vulnerabilidade baixa	≤ 5

Classes de vulnerabilidade GALDIT definidas em função do índice calculado pela Equação.

© LNEC 2006



<p>4) Aplicação do Método GALDIT (11) Índice GALDIT</p> <p>© LNEC 2006</p>	<p>4) Aplicação do Método GALDIT (11) Índice GALDIT: Parque Nacional de Cacheu (São Domingos)</p> <p>© LNEC 2006</p>
<p>4) Aplicação do Método GALDIT (11) Índice GALDIT: Catió - Calar</p> <p>© LNEC 2006</p>	<p>5) Conclusões</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ O método GALDIT, desenvolvido por Chachadi e Lobo Ferreira (2001), foi aplicado à zona de influência da maré em Guiné-Bissau, 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). ➢ Da análise constatou-se que as zonas potencialmente mais afectadas pela intrusão marinha são as zonas costeiras Noroeste, nomeadamente na região do Parque Nacional de Cacheu e Sudoeste, nomeadamente na zona costeira de Catió, em Calar. ➢ Recomenda-se reforçar a análise efectuada com novos dados hidrogeológicos, a obter no projecto GIRA, de forma a robustecer a análise efectuada, nomeadamente obtendo mapas fundamentais de apoio à gestão sustentável da zona costeira, no que respeita à utilização e protecção dos recursos hídricos subterrâneos. ➢ Para permitir o desenvolvimento do modelo matemático de águas subterrâneas da ilha de Bolama é necessário relocalizar alguns dos furos constantes na base de dados (que neste momento se situam no mar), actualizar os dados piezométricos da zona e obter nova informação geológica da ilha. <p>© LNEC 2006</p>
<p>6) Agradecimentos</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, no âmbito do Projecto CIAS – Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas, entre o LNEC, o IPT e a UFPE (Brasil), a Universidade Agostinho Neto (Angola) e a Direcção Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau. ✓ À Cooperação Portuguesa, no âmbito do Protocolo em curso entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) com os seus correspondentes nos PLOP, nomeadamente ao responsável pelo Protocolo no LNEC, Eng.º Mora Ramos do LNEC, pelo apoio financeiro à primeira missão do Eng. JP Lobo Ferreira à Guiné Bissau, em 2010, ✓ À Fundação para a Ciência e Tecnologia de Portugal (FCT) pelo apoio financeiro à segunda missão do Eng.º JP Lobo Ferreira à Guiné Bissau, em 2010. ✓ A sua Excelência o Ministro da Energia e Recursos Naturais da Guiné Bissau, Eng.º Higino Lopes Cardoso, ao Director-Geral dos Recursos Hídricos da Guiné-Bissau, Eng.º Inussa Baldó, e ao Presidente do Laboratório de Engenharia da Guiné-Bissau (LEGUI), Eng.º Pedro Talá, pelo apoio prestado à missão do Eng.º JP Lobo Ferreira à Guiné-Bissau em Junho de 2010, e pela cedência dos dados utilizados neste estudo. <p>© LNEC 2006</p>	<p>Obrigado pela vossa atenção!</p> <p>Visita de sua Excelência o Ministro da Energia e Recursos Naturais da Guiné-Bissau, Dr. Higino Lopes Cardoso, à praia de Vanda em 09/06/2010, no âmbito do Projecto CIAS.</p> <p>© LNEC 2006</p>