



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

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

Núcleo de Águas Subterrâneas

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

LNEC- Proc 0607/19/17830

RELATÓRIO CIENTÍFICO E FINANCEIRO REFERENTE AO ANO 2009

Lisboa, Novembro de 2009

Trabalho realizado para a:

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

Projecto Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas (CIAS)

entre o LNEC (Portugal), o IPT (Brasil), o Ministério dos Recursos Naturais e Ambiente da Guiné-Bissau e a Universidade Agostinho Neto (Angola)

COMPONENTE: PORTUGAL – ANGOLA (2009)

Relatório de Progresso referente ao ano de 2009

1 INTRODUÇÃO

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. Em Portugal o Doutor Lobo Ferreira, com o apoio escrito do Presidente do CT-Hidro Pro-África, Prof. Almir Cirilo, contactou a FCT visando obter financiamento (parcial) para desenvolver as actividades de cooperação previstas com Angola, nomeadamente para a realização de uma missão a Angola. Este relatório descreve as actividades desenvolvidas pela Componente: Portugal (LNEC) – Angola (Universidade Agostinho Neto) do projecto CIAS em 2009.

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 nos arquipélagos da Guiné-Bissau (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 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.

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).

3 OBJECTIVO GERAL

O 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.

4 OBJECTIVOS ESPECÍFICOS

- 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.

5 ACTIVIDADES DESENVOLVIDAS NO ANO 2009

5.1 Missão do Dr. Adriano Adão de Angola ao LNEC

O Dr. Adriano Gaspar Adão, da Universidade Agostinho Neto, deslocou-se em missão ao LNEC, de 13 de Janeiro a 13 de Fevereiro de 2009, no âmbito da cooperação

Angola-Portugal, e ao abrigo do projecto CIAS (Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas, Portugal-Brasil-Angola-Guiné-Bissau), financiada em Portugal pelo LNEC e pela FCT, e no Brasil pela CT-Hidro Pro-África e pelo IPT.

Esta missão destinou-se a realizar a reunião de lançamento desta cooperação bilateral e a efectuar troca de conhecimentos sobre a aplicação da componente de caracterização da vulnerabilidade à poluição DRASTIC, bem como de sistemas de suporte à decisão (DSS), prospecção geofísica e de SIG desenvolvidos no âmbito do projecto CIAS e do Proc. 0607/17/15405, "Recarga artificial de aquíferos recorrendo a fontes alternativas de água: integração de tecnologias avançadas e de gestão", em desenvolvimento no LNEC para o 6.º Programa Quadro da UE.

A actividade do Projecto desenvolvida no LNEC pelo Dr. Adriano Gaspar Adão compreendeu a aplicação do método DRASTIC à zona da Costa do Sol (aquífero Quelo-Luanda), localizada na faixa costeira de Angola, onde foi observada a existência de água salgada em poços aí localizados. O trabalho teve como meta traçar a cartografia da vulnerabilidade à contaminação da faixa Oriental do aquífero Quelo – Luanda, sendo a mesma o objecto de estudo e que, coincidentemente está localizado a oriente da Cidade de Luanda. Isto foi feito por forma a complementar estudos anteriores que não abrangeram a área. Trata-se de um sistema aquífero multicamadas, cujas formações aquíferas são nomeadamente, Luanda e Quelo. O trabalho iniciou-se com uma caracterização geológica e hidrogeológica do sistema aquífero. Esta caracterização incluiu e desenvolveu aspectos relacionados com a análise de parâmetros hidrogeológicos e morfológicos, bem associados a outras formas de parametrização das características intrínsecas ao aquífero, permitindo assim a adopção de um determinado valor para o índice D.R.A.S.T.I.C., que levou à definição da vulnerabilidade à contaminação da faixa em estudo.

A metodologia utilizada foi apresentada na comunicação intitulada “Avaliação da vulnerabilidade a contaminação da faixa oriental do sistema aquífero Quelo – Luanda a partir do índice D.R.A.S.T.I.C.”, elaborada pelo Dr. Adriano Adão em co-autoria com o Prof. Gabriel Luís Miguel e com o Doutor JP Lobo Ferreira. A comunicação foi apresentada ao 9º SILUSBA, realizado em Outubro de 2009, em Benguela, Luanda, pelo Dr. Adriano Adão (Resumo da comunicação no ANEXO 1).

5.2 Workshop Contributos para o conhecimento da cooperação científica portuguesa em Águas Subterrâneas com Angola e com o Brasil

No âmbito do projecto CIAS, realizou-se no LNEC, a 6 de Fevereiro de 2009, o Workshop intitulado *Contributos para o conhecimento da cooperação científica portuguesa em Águas Subterrâneas com Angola e com o Brasil*, que contou com a participação do Doutor Lobo Ferreira (Portugal), do Dr. Adriano Adão (Angola) e do Prof. Jaime Cabral (Brasil). Foi a seguinte a programação das intervenções:

- 15:00 – Introdução ao Workshop. Apresentação dos projectos de cooperação Portugal - Brasil - Angola - Cabo Verde e Guiné Bissau CIAS (Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas) e CISA (Cooperação Internacional no Semi-Árido) e o caso de estudo da cooperação portuguesa em águas subterrâneas com Angola na Bacia do rio Cunene – Doutor J.P. Lobo Ferreira, Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC.

- 15:30 – Realidade das Águas Subterrâneas em Angola: particularização ao estudo da vulnerabilidade das águas subterrâneas do aquífero Quelo-Luanda – Prof. Adriano Adão, Professor Assistente do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola.
- 16:00 – Introdução ao Projecto SUBSIn - Utilização do InSAR na detecção e caracterização de subsidência e deslizamentos do solo na região de Lisboa, e apresentação da componente Águas Subterrâneas – Prof.^a Sandra Heleno, Núcleo de Engenharia Sísmica e Sismologia, ICIST, Instituto Superior Técnico (IST/UTL) e Mestre Luís Oliveira, Bolseiro no Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC.
- 16:30 – A problemática da sobreexploração das águas subterrâneas: Considerações sobre o risco de subsidência na planície fluvial marinha da cidade do Recife (Brasil) – Prof. Jaime Cabral, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Pesquisador do Grupo de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco.
- 17:00 – Debate

No ANEXO 2 apresenta-se o Poster de divulgação do Workshop.

5.3 Desenvolvimento do modelo matemático das águas subterrâneas do aquífero Quelo-Luanda no LNEC

No âmbito das actividades do LNEC para a componente portuguesa do Projecto *Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas (CIAS)* entre o LNEC (Portugal) e a Universidade Agostinho Neto (Angola), o LNEC procedeu à avaliação da vulnerabilidade à intrusão marinha do aquífero costeiro Quelo-Luanda usando o método GALDIT, desenvolvido num projecto de cooperação Portugal-Índia, pelo LNEC e pela Universidade de Goa. Com vista à realização de uma análise mais precisa sobre o estado da intrusão marinha da área de estudo de Luanda, foi também desenvolvido no LNEC, um modelo matemático com utilização do programa FEMWATER (interface GMS v6.5). O objectivo do trabalho de modelação foi simular diferentes cenários de subida do nível médio do mar, para posterior incorporação no parâmetro L do método GALDIT. No ANEXO 3 apresentam-se os resultados obtidos, numa comunicação apresentada ao 9º SILUSBA, realizado em Outubro de 2009, em Benguela, Luanda, pelo Doutor JP Lobo Ferreira. A comunicação intitulada “Avaliação da vulnerabilidade à intrusão marinha do aquífero costeiro Luanda-Quelo usando o método GALDIT”, foi elaborada pela Eng^a Patrícia Terceiro em co-autoria com o Doutor JP Lobo Ferreira, o Prof. Gabriel Luís Miguel e o Dr. Adriano Adão.

5.4 Missão do Doutor JP Lobo Ferreira a Angola

A missão do Doutor JP Lobo Ferreira a Angola desenvolveu-se de 25 de Outubro a 4 de Novembro de 2009. Durante a sua estadia, além da participação activa do Doutor Lobo Ferreira no 9º SILUSBA, em Benguela, como Membro da Comissão Científica e apresentador de diversas comunicações do LNEC, de sua autoria ou em co-autoria, foram feitas importantes reuniões de trabalho em Luanda e em Benguela, nomeadamente:

- Com o Director Nacional para o Desenvolvimento Tecnológico, Prof. Gabriel Luís Miguel, em Benguela;
- Com a Chefe de Divisão de Higiene Alimentar e Águas do Instituto Nacional de Saúde, Dra. Maria Antónia Sanazenge, em Luanda; e ainda
- Com os Profs. César Alaminos e Adriano Adão da Universidade Agostinho Neto.

Foi feita uma palestra, com a duração de 2 horas, para professores, alunos e convidados da Universidade Agostinho Neto, pelo Doutor Lobo Ferreira, em 3 de Novembro. A palestra incorporou a apresentação de resultados de projectos de cooperação luso-angolanos e luso-tunisinos, co-financiados pela FCT, e desenvolvidos pelo LNEC para áreas de estudo de Angola, Tunísia e Portugal.

6 Planeamento de actividades para 2010

Para 2010 estão planeadas as seguintes actividades:

- Participação do Doutor Lobo Ferreira no Júri da Tese de Mestrado do Dr. Adriano Adão, na Universidade Agostinho Neto.
- Dinamização pelo Doutor Lobo Ferreira de um grupo de trabalho com entidade luso-angolanas visando estimular novas acções relacionadas com a “Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas”, e a elaboração de uma candidatura europeia à chamada em curso do 7º Programa-Quadro (durante 2010). Para tal foram também estabelecidos contactos com a Deltares da Holanda e o GEUS da Dinamarca.
- Estas iniciativas pretendem alargar, em 2010, os contactos já efectuados pelo LNEC com a Universidade Agostinho Neto de Luanda, que se apresentam neste relatório do projecto, à Guiné-Bissau, através de uma parceria com a Direcção Nacional de Águas da Guiné-Bissau, a desenvolver no âmbito do Projecto CIAS.

7 Conclusões

Foi fundamental o apoio financeiro recebido da FCT para viabilizar a missão do Doutor Lobo Ferreira a Angola. A missão foi muito proveitosa, tendo sido estabelecidos contactos fundamentais para a prossecução da Cooperação do LNEC com a Universidade Agostinho Neto, em Águas Subterrâneas. As actividades desenvolvidas na missão constituíram uma parte fundamental da componente portuguesa do Projecto *Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas (CIAS)* em desenvolvimento pelo LNEC (Portugal), o IPT (Brasil), o Ministério dos Recursos Naturais e Ambiente da Guiné-Bissau e a Universidade Agostinho Neto (Angola).

Lisboa, 25 de Novembro de 2009

O Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas

A handwritten signature in dark ink, consisting of stylized, overlapping letters that appear to be 'JPF'.

João Paulo Lobo Ferreira
Investigador-Coordenador (Dr.-Ing. Habil.)

8 ANEXOS

8.1 ANEXO 1 – Resumo da comunicação Apresentada no 9º SILUSBA pelo Dr. Adriano Adão

9º SILUSBA (Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa)

Avaliação da vulnerabilidade a contaminação da faixa oriental do sistema aquífero Quelo – Luanda a partir do índice D.R.A.S.T.I.C.

Adriano Gaspar ADÃO

Mestrando e Professor Assistente do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola
adrianogaspara@yahoo.com.br

Gabriel Luís Miguel

Doutor em Ciências Ambientais e Professor Auxiliar do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto Luanda, Angola, gabrielmig@gmail.com

João Paulo LOBO FERREIRA

Doutor em Engenharia Civil, Investigador-Coordenador no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) - Portugal
lferreira@lnec.pt

Resumo

O presente trabalho teve como meta traçar a cartografia da vulnerabilidade a contaminação da faixa Oriental do aquífero Quelo – Luanda, sendo a mesma o objecto de estudo e que, coincidentemente está localizado a oriente da Cidade de Luanda.

Isto foi feito por formas a complementar estudos anteriores que não abrangeram a área.

Trata-se de um sistema aquífero multicamadas, cujas formações aquíferas são nomeadamente, Luanda e Quelo.

Este trabalho iniciou com uma caracterização geológica e hidrogeológica do sistema aquífero. Esta caracterização incluiu e desenvolveu aspectos relacionados com a análise de parâmetros hidrogeológicos e morfológicos, bem associados a outras formas de parametrização das características intrínsecas ao aquífero, permitindo assim a adopção de um determinado valor para o índice D.R.A.S.T.I.C. que levou a definição da vulnerabilidade a contaminação da faixa em estudo.

Nesta comunicação apresenta-se os resultados obtidos com a aplicação deste índice ao aquífero para avaliação da sua vulnerabilidade a contaminação.

Palavras chave: vulnerabilidade, contaminação, índice DRASTIC.

8.2 ANEXO 2 – Poster de divulgação do Workshop Contributos para o conhecimento da cooperação científica portuguesa em Águas Subterrâneas com Angola e com o Brasil



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



UFPE
Universidade Federal
de Pernambuco

WORKSHOP

Contributos para o conhecimento da cooperação científica portuguesa
em Águas Subterrâneas com Angola e com o Brasil

Sexta-feira, 6 de Fevereiro de 2009, 15:00 às 17:30h

LNEC, Pequeno Auditório, Avenida do Brasil, 101, Lisboa

PROGRAMA

15:00 – *Introdução ao Workshop. Apresentação dos projectos de cooperação Portugal - Brasil - Angola - Cabo Verde e Guiné Bissau CIAS (Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas) e CISA (Cooperação Internacional no Semi-Árido) e o caso de estudo da cooperação portuguesa em águas subterrâneas com Angola na Bacia do rio Cunene - Doutor J.P. Lobo Ferreira, Chefe do Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC.*

15:30 – *Realidade das Águas Subterrâneas em Angola: particularização ao estudo da vulnerabilidade das águas subterrâneas do aquífero Quelo-Luanda - Prof. Adriano Adão, Professor Assistente do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola.*

16:00 – *Introdução ao Projecto SUBSIn - Utilização do InSAR na detecção e caracterização de subsidência e deslizamentos do solo na região de Lisboa, e apresentação da componente Águas Subterrâneas - Prof.ª Sandra Heleno, Núcleo de Engenharia Sísmica e Sismologia, ICIST, Instituto Superior Técnico (IST/UTL) e Mestre Luis Oliveira, Bolseiro no Núcleo de Águas Subterrâneas do LNEC.*

16:30 – *A problemática da sobreexploração das águas subterrâneas: Considerações sobre o risco de subsidência na planície fluvial marinha da cidade do Recife (Brasil) – Prof. Jaime Cabral, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil e Pesquisador do Grupo de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco.*

17:00 - Debate



Apoios e patrocínios:



FCT

Financiamento e Apoio à Investigação



Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

8.3 ANEXO 3 – Resumo da comunicação Apresentada no 9º SILUSBA pelo Doutor JP Lobo Ferreira

9º SILUSBA (Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa)

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA DO AQUÍFERO COSTEIRO LUANDA-QUELO USANDO O MÉTODO GALDIT

Patrícia TERCEIRO

Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Núcleo de Águas Subterrâneas, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, aterceiro@lnec.pt

João Paulo LOBO FERREIRA

Doutor em Engenharia Civil, Investigador-Coordenador no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Portugal, lferreira@lnec.pt

Gabriel LUÍS MIGUEL

Doutor em Ciências Ambientais e Professor Auxiliar do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto Luanda, Angola, gabrielmig@gmail.com

Adriano ADÃO

Mestrando e Professor Assistente do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade Agostinho Neto, Luanda, Angola, adrianogaspara@yahoo.com.br

RESUMO

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. Geralmente é possível obter os dados hidrogeológicos necessários à caracterização dos parâmetros GALDIT. Foi desenvolvido um procedimento que permite a combinação ponderada dos vários factores em função da sua importância no fenómeno de intrusão marinha. O sistema inclui a atribuição de pesos, a classificação dos parâmetros GALDIT em classes, a sua

combinação para obtenção de um valor numérico e a atribuição de uma classificação qualitativa ao índice GALDIT.

Nesta comunicação apresenta-se uma aplicação do método ao sistema aquífero costeiro Luanda-Quelo, em Angola.

Palavras-Chave: Águas subterrâneas, vulnerabilidade à intrusão marinha, método GALDIT, aquífero Luanda-Quelo, modelação matemática

1 INTRODUÇÃO

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 (nesta comunicação 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.

2 O MÉTODO GALDIT

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	≤ 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 impacte 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”	Relação $Cl^-/[HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ em epm 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 DO AQUÍFERO LUANDA-QUELO

3.1 Localização

A República de Angola situa-se na costa ocidental de África, a sul do Equador, entre os paralelos 4° 22' e 18° 02' Sul. Tem uma área de 1 246 700 km² e 1 650 km de linha de costa banhada pelo oceano Atlântico. A sua fronteira terrestre tem um comprimento de 4 837 km, limitada a Norte pela República Democrática do Congo e o Congo (Brazaville), a Este pela Zâmbia e a Sul pela Namíbia. A nível administrativo, Angola divide-se em 18 províncias, sendo Luanda a capital do país.

O território angolano pode-se dividir em três zonas: a orla costeira, o planalto central e as terras altas. As zonas costeiras são geralmente baixas e arenosas a Sul, e bastante agrestes a Norte. A estreita planície litoral eleva-se bruscamente em direcção ao interior,

configurando o planalto, que ocupa 65% do território com cotas compreendidas entre os 1 000 e 1 600 m, enquanto que as terras altas se situam a mais de 2 000 m de altitude. Os principais rios nascem no planalto central, e partem em três direcções: Atlântico (situado a Oeste), Sul-Sudeste e Norte. Das 77 bacias hidrográficas angolanas as principais correspondem aos rios Congo (Zaire), Kwanza, Cunene, Cubango, Queve e Zambeze (Miguel, 2006).

O aquífero Luanda-Quelo localiza-se na província de Luanda e numa parte na província de Bengo. Tem uma extensão de cerca de 2 060 km², e a sua superfície é determinada pelo afloramento das formações Quelo, Luanda, Cacuaco, Bom Jesus e Funda. A Figura 1 mostra a localização do aquífero em estudo.



Figura 1 – Localização da área de estudo Luanda-Quelo (Fonte: Miguel, 2006)

A população estimada para a área Luanda-Quelo é de aproximadamente 4,2 milhões de habitantes em 2005, o que corresponde aproximadamente 27% da população angolana (Miguel, 2006).

Angola apresenta clima tropical. A região costeira é relativamente húmida, com uma precipitação média anual acima dos 600 mm, que diminui em direcção ao Sul. A temperatura média anual situa-se próximo dos 26° C (Miguel, 2006).

3.2 Geologia e Hidrogeologia

De modo simplificado pode-se considerar que a estratigrafia em torno de Luanda se define por quatro formações principais: Quelo, Luanda, Cacuaco e Quifangondo, dispostas de forma sub-horizontal. A formação Quelo sobrepõe às restantes, que só afloram em alguns sectores, cf. a Figura 2.

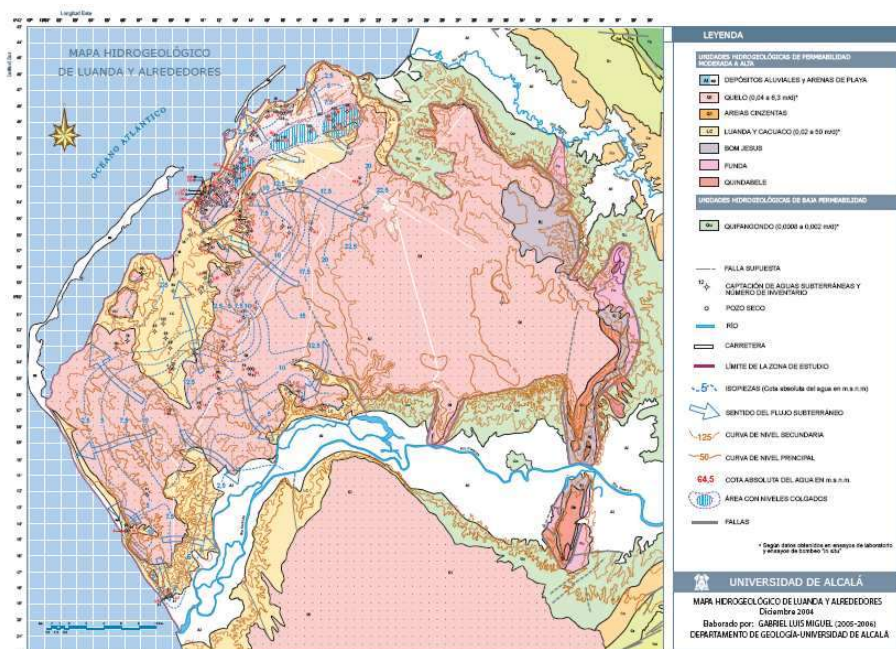


Figura 2 – Mapa hidrogeológico de Luanda e arredores (Fonte: Miguel, 2006)

As formações Quelo e Luanda são de carácter marcadamente detrítico. Embora recorrentemente apresentem argilas, sobretudo na formação Luanda, são os sedimentos arenosos os que melhor caracterizam a natureza desta região. A formação Cacucaco é composta por calcarenitos bioclásticos, constituindo corpos maciços, embora também se encontrem presentes níveis descontínuos de calcários pouco cimentados. A formação Quifangondo, apesar da presença de alguns níveis calcários, constitui-se como uma unidade de carácter argiloso, exceptuando a sua parte superior, determinando que esta formação possa constituir um nível de base, com permeabilidade muito baixa. Assim, a água subterrânea mantém-se armazenada e em circulação no seio das formações superiores.

Os valores de permeabilidade obtidos em laboratório para as fácies mais representativas das formações Quelo e Luanda, nos trabalhos desenvolvidos por Miguel (2006), permitem interpretar que ambas as unidades se comportam de forma semelhante no que respeita ao movimento da água subterrânea. O autor, no seu estudo, refere que o aquífero Quelo-Luanda apresenta um comportamento geral multicamada, com um carácter essencialmente livre, embora também se manifeste como semiconfinado (ou eventualmente confinado). O nível piezométrico regional do sistema encontra-se em geral a profundidades consideráveis (60 a 100 m), não obstante se encontrarem alguns níveis suspensos existentes à escala local.

As espessuras do sistema variam desde valores inferiores a 100 m, para as formações Quelo-Luanda e Cacucaco em torno de Luanda, e superiores a 500 m no sector meridional da região.

3.3 Qualidade da água subterrânea

As águas subterrâneas têm um contacto prolongado com as rochas e materiais por onde circulam. Este facto contribui de forma decisiva para a definição da composição química destas águas, cujas características mineralógicas são adquiridas pelo contacto com os materiais que constituem o meio por onde circulam.

A Figura 3 mostra o mapa de isocondutividades e fácies hidrogeoquímicas do aquífero Quelo-Luanda e, em pormenor, a área de aplicação do método GALDIT, que se

descreve nas próximas secções. Como se pode verificar pela Figura 3 os valores de condutividade eléctrica variam desde cerca de 2 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ até aos 17 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, apontando para a possível salinização da água subterrânea nesta área. Verifica-se igualmente que é na faixa litoral que os valores de condutividade eléctrica se apresentam mais elevados, diminuindo à medida que aumenta a distância à linha de costa.

A mesma Figura 3 contém diferentes representações do diagrama de Stiff. Destaca-se aqui a representatividade das águas cloretadas sódicas neste sector, indiciando a mistura de água doce com água salgada. Miguel (2006) aponta as bombagens excessivas, assim como as profundidades inadequadas das captações próximas da costa, como possíveis causas da intrusão marinha. A fácies sulfatada cálcica, embora também presente, é menos representativa nesta área. Pode, no entanto, representar um episódio intermédio da evolução geoquímica da água.

Estes dados provêm de campanhas realizadas nos anos 2002/03 e 2003/04.

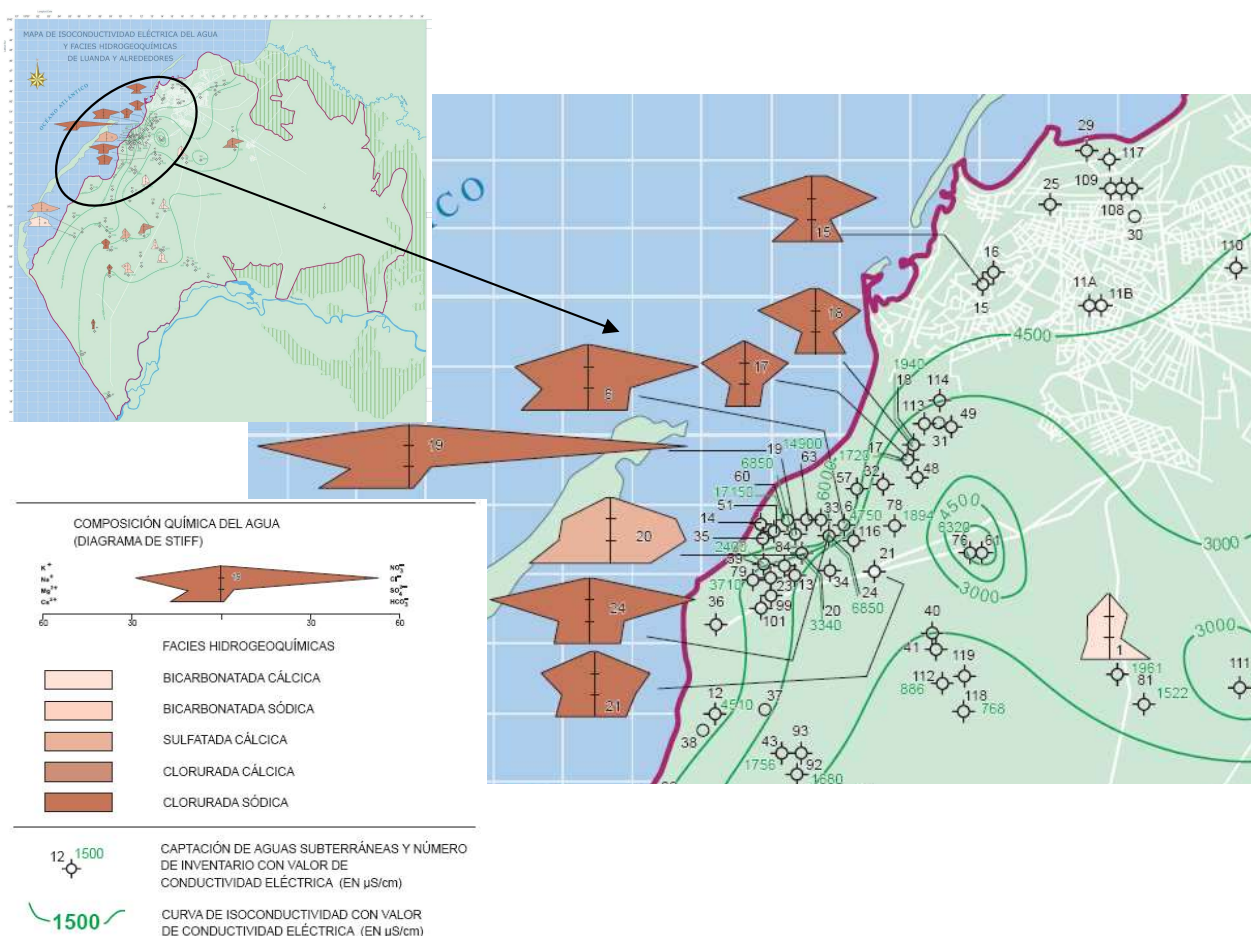


Figura 3 – Mapa de isocondutividades e fácies hidrogeoquímicas (Fonte: Miguel, 2006)

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO GALDIT

O método GALDIT foi aplicado à zona da Costa do Sol, localizada na faixa costeira, onde foi observada a existência de água salgada em poços aí localizados. A área de estudo, com de cerca de 40 km², foi delimitada considerando a superfície topográfica e o sentido de fluxo subterrâneo, cf. o mapa hidrogeológico apresentado na Figura 2. O limite Sudoeste foi definido por um rio existente na região. A Figura 4 apresenta a

localização da área de estudo em pormenor, assim como os poços onde foram efectuadas medições de níveis piezométricos. A Figura 5 mostra o perfil hidrogeológico da zona da Costa do Sol, que apresenta camadas intercaladas de areias e argilas.

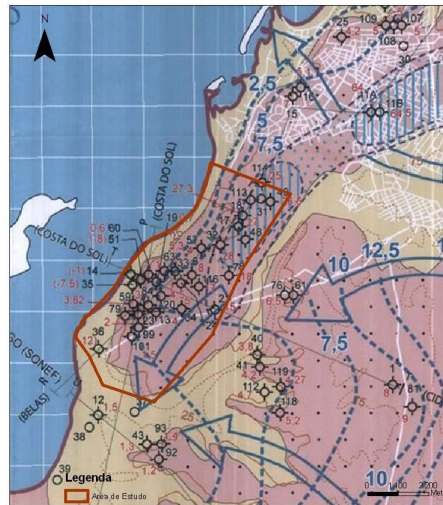


Figura 4 – Localização em pormenor da área de estudo

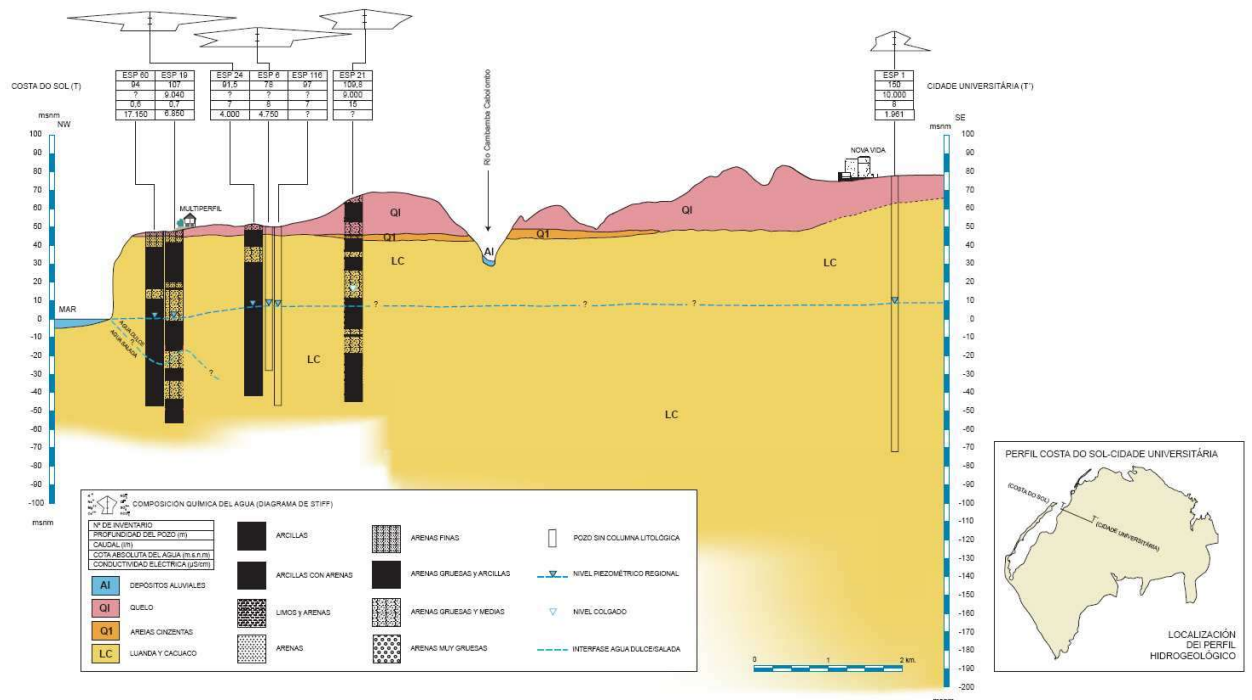


Figura 5 – Perfil hidrogeológico da Costa do Sol à Cidade Universitária (Fonte: Miguel, 2006)

Embora a metodologia GALDIT devesse ser aplicada considerando as propriedades hidráulicas e características das faixas costeiras, optou-se por utilizar as propriedades médias do sistema aquífero nos casos onde não se dispunha de informação específica para a área em análise.

Parâmetro G – o carácter essencialmente livre do aquífero Luanda-Quelo corresponde a um índice de 7,5 para este parâmetro (cf. Quadro 3).

Parâmetro A – Miguel (2006), em ensaios de bombagem realizados num poço localizado na área de estudo, obteve um valor de cerca de 2 m/d para a condutividade hidráulica, tendo-se adoptado esse valor para a totalidade da zona em análise. Atribuiu-se assim um índice de 2,5 a este parâmetro, o que corresponde a uma condutividade muito baixa, cf. o Quadro 4.

Parâmetro L – a altura do nível da água acima do nível do mar foi obtida através dos dados das campanhas de monitorização realizadas por Miguel (2006). A Figura 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.

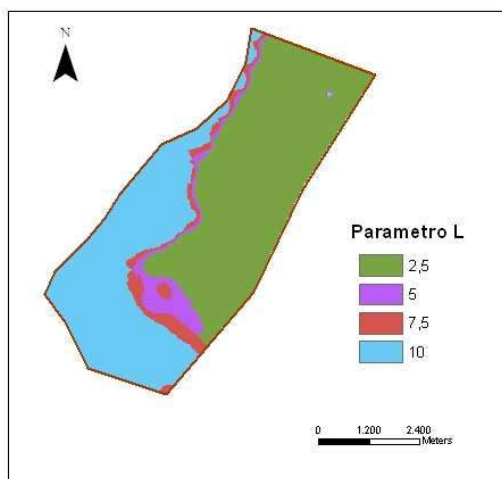


Figura 6 – Parâmetro L

Parâmetro D – o parâmetro distância à linha de costa foi determinado através do cálculo de três distâncias na perpendicular à linha de costa, de 500, 750 e 1000 m, respectivamente, cf. a Figura 7.

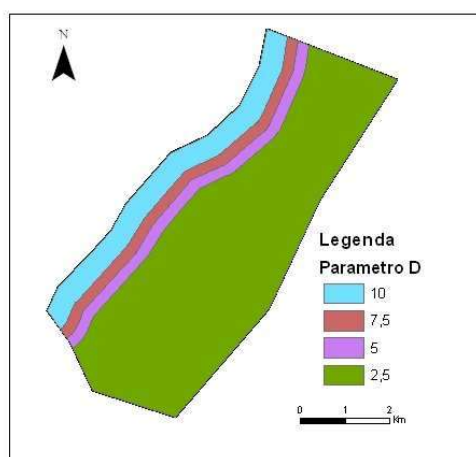


Figura 7 – Parâmetro D

Parâmetro I – Miguel (2006) fez uma análise preliminar do estado da intrusão marinha no aquífero Luanda-Quelo, recorrendo à relação entre as concentrações dos iões cloro (Cl^-) e bicarbonato (HCO_3^-). O Quadro 9 mostra os resultados obtidos pelo autor para a relação $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$, na campanha realizada em Setembro de 2001, para os poços localizados na área de estudo. Através da sua análise, é possível observar que três dos

poços apresentam para esta relação um valor superior a 2 o que corresponde a um impacto elevado do estado da intrusão marinha (cf. o Quadro 7). Neste caso, considerou-se como nula a geralmente baixa contribuição do ião CO_3^{2-} , uma vez que não dispõe de informação relativa ao seu valor. A Figura 8 mostra o mapa da distribuição espacial destes valores, obtido através de uma interpolação IDW (Inverse Distance Weighted - Inverso do Peso da Distância)

Quadro 9 – Relação $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ para o parâmetro I do método GALDIT

Designação do Poço	Relação $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$
Esp.6 – Samy	2,87
Esp.17 – R&S	2,84
Esp.18 – Imporcar	1,48
Esp.21 – Tesmi	1,73
Esp.23 – Catraio	1,09
Esp.24 – Muxiri	3,38

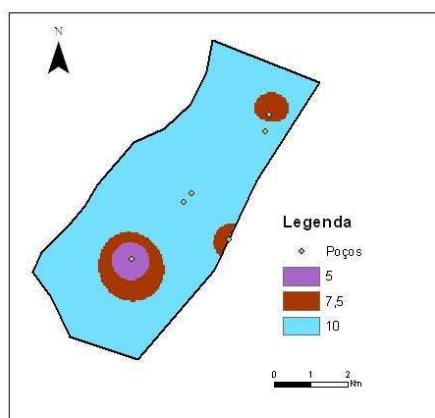


Figura 8 – Parâmetro I

Parâmetro T – A espessura da área de estudo varia entre os 12 e os 104 m, o que corresponde à classe “grande” atribuída pelo método GALDIT a este parâmetro. Assim, atribui-se à totalidade da área de estudo um índice de valor 10, cf. o Quadro 8.

O índice GALDIT foi calculado substituindo na Equação (1) os valores dos índices obtidos para cada uma das classes que constituem o método. A Figura 9 mostra o mapa do índice de vulnerabilidade, onde é possível verificar que para esta área foram obtidas duas classes de vulnerabilidade: moderada e alta (cf. o Quadro 2).

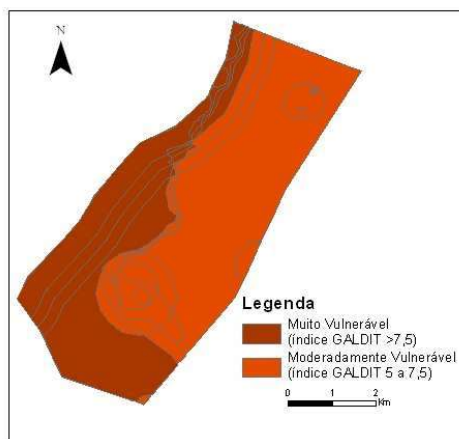


Figura 9 – Índice GALDIT

5 MODELAÇÃO MATEMÁTICA NA ÁREA DE ESTUDO

Com vista à realização de uma análise mais precisa sobre o estado da intrusão marinha da área de estudo, encontra-se em desenvolvimento um modelo matemático com utilização do programa FEMWATER (interface GMS v6.5). O objectivo do trabalho de modelação é simular diferentes cenários de subida do nível médio do mar, para posterior incorporação no parâmetro L do método GALDIT. Apresenta-se nesta comunicação a simulação efectuada para a situação de referência.

O FEMWATER é um modelo tridimensional de elementos finitos, que permite simular tanto o escoamento como o transporte de massa nas zonas saturada e não saturada, incluindo os casos de regimes dependentes da densidade.

Esta secção apresenta o modelo conceptual e os resultados preliminares obtidos.

5.1 Modelo conceptual

Na elaboração do modelo conceptual é necessário considerar os limites a modelar, os parâmetros hidráulicos do material geológico, o fluxo de entrada e o fluxo de saída da região. O modelo conceptual foi obtido recorrendo não só à informação em SIG, como também a outra informação disponível para a área de estudo.

Os limites do modelo foram definidos conforme o exposto na Secção 4 (Figura 4). Relativamente à espessura do sistema aquífero, optou-se por considerar a profundidade dos poços localizados na área, como base. No que concerne aos parâmetros hidráulicos considerou-se para o modelo uma condutividade hidráulica de 2,0 m/d (cf. Secção 4). A recarga utilizada no modelo foi de 50 mm por ano. Este valor foi obtido considerando o valor excepcional de 250 mm/ano que, de acordo com Miguel (2006), deve ocorrer a cada 5 ou 10 anos no aquífero de Luanda-Quelo. Por último, os valores de extracção considerados no modelo foram os medidos por Miguel (2006), nos poços localizados na Figura 4. O valor total da extracção na área aproxima-se dos 2000 m³/d, embora não se disponha de informação sobre o volume extraído em todos os poços.

5.2 Análise dos resultados

Tendo em conta os valores apresentados na secção anterior, procedeu-se à corrida do modelo em regime estacionário. A Figura 10 apresenta o resultado obtido para esta corrida, realizada com o programa FEMWATER (interface GMS v6.5). Da análise da referida Figura é possível constatar o rebaixamento freático junto ao litoral, revelando o problema da intrusão marinha verificado na zona. Os valores obtidos pela corrida do modelo são aproximadamente semelhantes aos valores medidos por Miguel (2006) por piezómetros na região na zona Norte da área simulada. Contudo, o modelo necessita de

BIBLIOGRAFIA

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.

MIGUEL, G.L. (2006). Caracterización hidrogeológica y ambiental de Luanda y su alrededores (Angola). Departamento de Geologia da Universidade de Alcalá.

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.