
• REVISTA DE
**GESTÃO COSTEIRA
INTEGRADA**

Journal of Integrated Coastal Zone Management

**VOL. 12(2): Junho
June 2012**

<http://www.aprh.pt/rgci/>

Editor / Editors

Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos / UNIVALI

Secretariado

Ana Carneiro, Ana Estêvão, André Cardoso, Conceição Martins

Formatação e paginação / Layout

André Cardoso

Design da capa / Cover design

Flatland Design

ISSN 1646-8872

GESTÃO COSTEIRA INTEGRADA

Journal of Integrated Coastal Zone Management



ASSOCIAÇÃO
PORTUGUESA DOS
RECURSOS HÍDRICOS



Revista de Gestão Costeira Integrada

Journal of Integrated Coastal Zone Management

Volume 12, Número 2 / *Volume 12, Issue 2*
Junho 2012 / *June 2012*

www.aprh.pt/rgci/index.html / www.aprh.pt/rgci/index_eng.html

Corpo Editorial / Editorial Board

J. Antunes do Carmo
Editor delegado
(jsacarmo@dec.uc.pt)

J. Alveirinho Dias
Editor executivo
(rgci.editor@gmail.com)

Marcus Polette
Editor delegado
(mpolette@univali.br)

Comissão Científica / Scientific Committee

Adriano A. Bordalo
(Universidade do Porto,
Porto, PORTUGAL)

Ana Vila-Concejo
(University of Sydney,
Sidney, AUSTRÁLIA)

Cassiano Monteiro-Neto
(Universidade Federal Fluminense,
Niterói, RJ, BRASIL)

Frédéric Bertrand
(Université de Paris 1 (Sorbonne) Paris, FRANÇA)

João Alveirinho Dias
(Universidade do Algarve,
Faro, PORTUGAL)

Lauro J. Calliari
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Carreiros, RS, BRASIL)

Marcus Polette
(Universidade do Vale do Itajaí,
Itajaí, SC, BRASIL)

Óscar Ferreira
(Universidade do Algarve,
Faro, PORTUGAL)

Rainer Wehrhahn
(Universidade de Kiel Kiel, ALEMANHA)

Alexander Turra
(Universidade de São Paulo,
São Paulo, SP, BRASIL)

André Bustorff Fortunato
(Laboratório Nacional de Engenharia Civil,
Lisboa, PORTUGAL)

Dieter Muehe
(Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL)

Helena Granja
(Universidade do Minho, Braga, PORTUGAL)

José A. Jiménez
(Universitat Politècnica de Catalunya,
Barcelona, ESPANHA)

Luís Cancela da Fonseca
(Universidade do Algarve, Faro, PORTUGAL)

Mônica Costa
(Universidade Federal de Pernambuco,
Recife, PE, BRASIL)

Paolo Ciavola
(Università di Ferrara, Ferrara, ITÁLIA)

Ramon Gonzalez
(Universität Basel, Basel, SUIÇA)

Walter M. Widmer
(Universidade Federal do Paraná,
Matinhos, PA, BRASIL)

Alexandre Schiavetti
(Universidade Estadual de Santa Cruz,
Ilhéus, BA, BRASIL)

Antonio Klein
(Universidade do Vale do Itajaí,
Itajaí, SC, BRASIL)

Fernando Veloso Gomes
(Universidade do Porto,
Porto, PORTUGAL)

Ildeberto Mota-Oliveira
(Instituto Superior Técnico, Lisboa, PORTUGAL)

José Antunes do Carmo
(Universidade de Coimbra,
Coimbra, PORTUGAL)

Manuel Afonso-Dias
(Universidade do Algarve,
Faro, PORTUGAL)

Moyses G. Tessler
(Universidade de São Paulo,
São Paulo, SP, BRASIL)

Paulo Freire Vieira
(Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, BRASIL)

Silvio Soares Macedo
(Universidade de São Paulo,
São Paulo, SP, BRASIL)

Avaliadores / Referees (Junho 2011 - Junho 2012)

Ada Cristina Scudelari
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal, RN, BRASIL

Alexandre Maimoni Mazzer
BRASIL

Alexandre Pedrini
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Alexandre Schiavetti
Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus, BA, BRASIL

Alice Monteiro
Núcleo de Educação e Monitoramento Ambiental
Rio Grande, RS, BRASIL

Ana Matias
CIMA / Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL

Ana Rosa da Rocha Araujo
Universidade Federal de Sergipe
Aracaju, SE, BRASIL

Ângela Spengler
Petrobrás
BRASIL

António Campar de Almeida
Universidade de Coimbra
Coimbra, PORTUGAL

António Trigo Teixeira
Instituto Superior Técnico
Lisboa, PORTUGAL

Arno Maschmann de Oliveira
Universidade Federal de Alagoas
Maceió, AL, BRASIL

Áurea da Paz Pinheiro
Universidade Federal do Piauí
Teresina, PI, BRASIL

Carlos Coelho
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL

Carlos Pereira da Silva
Universidade Nova de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Cácio Antonio Tormena
Universidade Estadual de Maringá
Maringá, PR, BRASIL

Celia Regina G. Souza
Instituto Geológico do Estado de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

César Freire de Andrade
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Cibele Dias da Silveira
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

Claudia Regina dos Santos
Ministério do Meio Ambiente e da Amazonia Legal
Brasília, DF, BRASIL

Cristina Bernardes
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL

Cyl Farney Catarino de Sá
Jardim Botânico do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Daniela Trigueirinho Alarcon
Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus, BA, BRASIL

Dieter Muehe
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Dorothy Sue Dunn de Araujo
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Eduardo Manuel Ferreira Dias
Universidade dos Açores
Angra do Heroísmo, Açores,
PORTUGAL

Eduardo Siegle
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Fátima Alves
Universidade Aberta
Porto, PORTUGAL

Fátima Lopes Alves
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL

Fernando de Sousa
CEPESE
Porto, PORTUGAL

Fernando Magalhães
Instituto da Água
Lisboa, PORTUGAL

Fernando Perna
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL

Fernando Rocha
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL

Flávia Guebert
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, BRASIL

Flávio Martins
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL

Francisco Sancho
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, PORTUGAL

Francisco Taveira Pinto
Universidade do Porto
Porto, PORTUGAL

Gecely Rodrigues Alves Rocha
Universidade Federal Rural da Amazônia
Belém, PA, BRASIL

Guisla Boehs
Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus, BA, BRASIL

Icaro Aronovich da Cunha
Universidade Católica de Santos
Santos, SP, BRASIL

Ilana Rosental Zalmon
Universidade Estadual do Norte Fluminense
Campos dos Goytacazes, RJ, BRASIL

Jacqueline S. Silva-Cavalcanti
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Campus Serra Talhada, PE, BRASIL

Joana Gaspar de Freitas
Universidade Nova de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

João Luiz Nicolodi
Universidade Federal do Rio Grande
Rio Grande, RS, BRASIL

João Miguel Dias
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL

João Thadeu de Menezes
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, BRASIL

João Wagner Alencar Castro
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Jorge Dinis
Universidade de Coimbra
Coimbra, PORTUGAL

Jorge Trindade
Universidade Aberta
Lisboa, PORTUGAL

José Castro Nunes
Universidade Federal da Bahia
Salvador, BA, BRASIL

José Antunes do Carmo
Universidade de Coimbra
Coimbra, PORTUGAL

José Bonomi Barufi
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

José Bonomi Barufi
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

José Rodolfo Scarati Martins
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Lená Medeiros de Menezes
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Leonel Pereira
Universidade de Coimbra
Coimbra, PORTUGAL

Lucia Guimaraes
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Luís Cancela da Fonseca
Universidade do Algarve / CTA
Faro, PORTUGAL

Marcelo Alessandro Araujo
Universidade Estadual de Maringá
Maringá, PR, BRASIL

Marcus Barroncas Fernandes
Universidade Federal do Pará
Bragança, PA, BRASIL

Marcus Polette
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, BRASIL

Margarida Almodóvar
Instituto da Água
Lisboa, PORTUGAL

Maria Assunção Araújo
Universidade do Porto
Porto, PORTUGAL

Maria da Conceição Freitas
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Maria José Araújo
Universidade de Coimbra
Coimbra, PORTUGAL

Marinez Scherer
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

Mario Cesar Ricci
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos, SP, BRASIL

Mauricio Cetra
Universidade Federal de São Carlos
Sorocaba, SP, BRASIL

Michel Michaelovitch de Mahiques
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Milton Lafourcade Asmus
Universidade Federal do Rio Grande
Rio Grande, RS, BRASIL

Monica Ferreira da Costa
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, BRASIL

Norberto Olmiro Horn Filho
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

Paulo Alves da Silva
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL

Paulo José Talhadas dos Santos
Universidade do Porto
Porto, PORTUGAL

Paulo Maranhão
Escola Superior de Turismo e Tecnologia do Mar
Peniche, PORTUGAL

Raimundo A. Lobão de Souza
Universidade Federal Rural da Amazônia
Belém, PA, BRASIL

Raimundo N. de Lima Conceição
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, CE, BRASIL

Renato Levien
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, RS, Brasil

Rita Mascarenhas
Associação Guajiru
Cabelado, PB, BRASIL

Ronaldo Silveira Lobão
Universidade Federal Fluminense
Niterói, RJ, BRASIL

Rosemeri Carvalho Marenzi
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, BRASIL

Rui Taborada
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Simone Machado Santos
Universidade Federal de Pernambuco
Caruaru, PE, BRASIL

Sônia Seixas
Universidade Aberta
Lisboa, PORTUGAL

Theresinha Absher
Universidade Federal do Paraná
Pontal do Paraná, PR, BRASIL

Ulisses Miranda Azeiteiro
Universidade Aberta
Porto, PORTUGAL

Victor Quintino
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL

Virgínia Martins
PORTUGAL

Wagner Costa Ribeiro
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Walter Martin Widmer
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

Avaliadores / Referees (2007 - 2010)

- Abel Augusto Conceição**
Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana, BA, BRASIL
- Adélio Silva**
Hidromod
Lisboa, PORTUGAL
- Adriano Bordalo e Sá**
Universidade do Porto - ICBAS
Porto, PORTUGAL
- Alberto Carlos de Oliveira Antunes de Azevedo**
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, PORTUGAL
- Alexander Turra**
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL
- Allan Williams**
University of Wales
Swansea, U.K.
- Amílcar Carvalho Mendes**
Museu Paraense Emílio Goeldi
Belem, PA, BRASIL
- Ana Vila Concejo**
University of Sydney
Sydney, AUSTRÁLIA
- André Bustorff Fortunato**
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, PORTUGAL
- André Pacheco**
CIMA / Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL
- Andre Silva Barreto**
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, BRASIL
- Ângela Spengler**
Petrobrás
Macaé, RJ, BRASIL
- Antonio Carlos Diegues**
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL
- Antonio Fernando Härter Fetter Filho**
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, Brasil
- Antonio Fontoura Klein**
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL
- António Galopim de Carvalho**
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL
- Antonio da Silva Luis**
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL
- António Pires Silva**
Instituto Superior Técnico
Lisboa, PORTUGAL
- Aurora Rodrigues**
Instituto Hidrográfico
Lisboa, PORTUGAL
- Barbara Franz**
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL
- Bruno Miguel Vaz**
Universidade Nova de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL
- Carla Bernadete Madureira Cruz**
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL
- Carla de Abreu D'Aquino**
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL
- Carlos A. Cioce Sampaio**
Universidade Regional de Blumenau
Blumenau, SC, BRASIL
- Carlos A. França Schettini**
Universidade Federal do Ceará /
Fortaleza, CE, BRASIL
- Carlos H. de Figueiredo Lacerda**
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, BRASIL
- Carlos Roberto Soares**
Universidade Federal do Paraná
Pontal do Paraná, PR, BRASIL
- Carlos Vale**
IPIMAR
Lisboa, PORTUGAL
- César Freire de Andrade**
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL
- Charles Moore**
Algalita Marine Research Foundation
Long Beach, CA, USA
- Claudio Gonçalves Egler**
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL
- Clovis B. Castro**
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL
- Daniel A. Abraham**
Instituto Universitario Naval
Buenos Aires, ARGENTINA
- Daniele Casalbore**
Istituto di Geologia Applicata e
Geoingegneria
Roma, ITALIA
- David Valença Dantas**
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, BRASIL
- David Tudor**
Bath Spa University College
Bath, UNITED KINGDOM
- David Valença Dantas**
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, BRASIL
- Davide Franco**
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL
- Débora Peterson**
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL
- Ednilson Viana**
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL
- Eduardo Soriano-Sierra**
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL
- Elirio Ernestino Toldo Junior**
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Porto Alegre, RS, BRASIL
- Elisa Helena Leão Fernandes**
Universidade Federal do Rio Grande
- Elmo Rodrigues da Silva**
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL
- Emanuel Gonçalves**
Instituto Superior de Psicologia Aplicada
Lisboa, PORTUGAL
- Erwan Garel**
CIMA / Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL
- Estibaliz Berecibar**
Estrutura de Missão Para a Extensão da
Plataforma Continental
Lisboa, PORTUGAL
- Federico Ignacio Isla**
Universidad Nacional de Mar del Plata
Buenos Aires, ARGENTINA
- Fernando Perna**
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL
- Fernando Andres Peña Cortes**
Universidad Católica de Temuco
Temuco, CHILE
- Fernando Magalhães**
Instituto da Água
Lisboa, PORTUGAL
- Fernando Veloso Gomes**
Universidade do Porto
Porto, PORTUGAL
- Filipa S. de Brito F. de Oliveira**
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, PORTUGAL
- Filipe de Oliveira Chaves**
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, ES, BRASIL
- Francisco Barreto Caldas**
Universidade do Porto
Porto, PORTUGAL
- Francisco C. Rocha de Barros Jr**
Universidade Federal da Bahia
Salvador, BA, BRASIL
- Gilberto Fonseca Barroso**
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitoria, ES, BRASIL
- Heiko Brunken**
University of Applied Sciences
Bremen, GERMANY
- Helena Freitas**
Universidade de Coimbra
Coimbra, PORTUGAL
- Helena Granja**
Universidade do Minho
Braga, PORTUGAL
- Henk Bouwman**
North-West University
Potchefstroom, SOUTH AFRICA
- Ildeberto Mota-Oliveira**
Instituto Superior Técnico
Lisboa, PORTUGAL
- Iran Carlos Stalliviere Correa**
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Rio Grande, RS, BRASIL
- Isaac Rodrigues dos Santos**
Southern Cross University
Lismore, AUSTRÁLIA
- Isabel Luísa Soares de Albergaria Ambar**
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL
- Isabel Maria Neto da Silva Moreira**
Pontifícia Universidade Católica do Rio
de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL
- J. Alveirinho Dias**
CIMA / Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL
- Jacobus Van de Kreeke**
University of Miami
Miami, FL, USA
- Jáder Onofre de Morais**
Universidade Estadual do Ceará
Fortaleza, CE, BRASIL
- Jarbas Bonetti Filho**
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL
- João Carlos Marques**
Universidade de Coimbra
Coimbra, PORTUGAL
- João Castro**
- João Daniel Lencart e Silva**
CESAM
Aveiro, PORTUGAL
- Joao Luiz Baptista de Carvalho**
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, BRASIL
- João Pradinho Honrado**
Universidade do Porto
Porto, PORTUGAL
- José A. Jimenez**
Universitat Politècnica de Catalunya
Barcelona, ESPANHA
- José Carlos Costa**
Universidade Técnica de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL
- José Lima de Azevedo**
Universidade Federal do Rio Grande
Rio Grande, RS, BRASIL
- José Manuel Pereira Vieira**
Universidade do Minho
Guimarães, PORTUGAL
- Jose Maria de La Rosa**
Instituto Tecnológico e Nuclear
Sacavém, PORTUGAL
- Jose Maria Landim Dominguez**
Universidade Federal da Bahia
Salvador, BA, BRASIL
- José Ribeiro**
Universidade Aberta
Porto, PORTUGAL
- José Souto Rosa Filho**
Universidade Federal do Para
Belém, PA, BRASIL
- Juliana A. Ivar do Sul**
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, BRASIL
- Karim Erzini**
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL
- Karl Statterger**
Universität Kiel
Kiel, GERMANY
- Kátia Naomi Kuroshima**
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, BRASIL
- Lauro Julio Calliari**
Universidade Federal do Rio Grande
Carreiros, RS, BRASIL
- Leonel Serrano Gordo**
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL
- Leticia Knechtel Procopiak**
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Curitiba, PR, BRASIL
- Luci Cajueiro C. Pereira**
Universidade Federal do Pará
Belém, PA, BRASIL
- Luciana Slomp Esteves**
London Metropolitan University
London, U.K.
- Luciano Dalla Rosa**
Universidade Federal do Rio Grande
Rio Grande, RS, BRASIL
- Luciano Lorenzi**
Universidade da Região de Joinville
São Francisco do Sul, SC, BRASIL
- Luis Ivens Portela**
Laboratório Nacional de Engenharia
Civil
Aveiro, PORTUGAL
- Luis Menezes Pinheiro**
Universidade de Aveiro
Aveiro, PORTUGAL

Lúisa Schmidt
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Manuel Afonso Dias
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL

Manuel Neves Pereira
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL

Marcelo Sperle Dias
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Marco Alves
Wave Energy Centre (WaveC)
Lisboa, PORTUGAL

Margarida Cardoso da Silva
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, PORTUGAL

Maria Ana F. Peixe Dias
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Maria Christina Barbosa de Araújo
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal, RS, BRASIL

Maria Dam
Environment Agency Research
Traðagøta, FAROE ISLANDS,
DENMARK

Maria de Fátima Araújo
Instituto Tecnológico e Nuclear
Lisboa, PORTUGAL

Maria do Rosário Bastos
Universidade Aberta
Porto, PORTUGAL

Maria E. Bruck de Moraes
Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus, BA, BRASIL

Maria Inez Pagani
Universidade Estadual Paulista
Rio Claro, SP, BRASIL

Maria Jesus Irabien Gulias
Euskal Herriko Unibertsitatea
Bilbao, ESPANA

Maria José Costa
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Maria José Roxo
Universidade Nova de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Maria Ozilea Bezerra Menezes
Universidade Federal do Pará
Belém, PA, BRASIL

Maria Teresa Dinis
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL

Mariana Coutinho Hennemann
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

Mário Gomes Soares
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Martin Thiel
Universidad Católica del Norte
Coquimbo, CHILE

Mary J. Donohue
University of Hawaii
Honolulu, U.S.A.

Michele Tomoko Sato
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Mary J. Donohue
University of Hawaii
Honolulu, USA

Michele Tomoko Sato
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Miguel Henriques
Instituto de Conservação da Natureza e Biodiversidade
Lisboa, PORTUGAL

Miguel Lopes
Wave Energy Centre
Lisboa, PORTUGAL

Miguel Miranda
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Moacyr Cunha de Araujo Filho
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, BRASIL

Mônica Pereira Tognella
Universidade Federal do Espírito Santo
São Mateus, ES, BRASIL

Moyses Gonzalez Tessler
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Naína Pierri Estades
Universidade Federal do Paraná
Curitiba, PR, BRASIL

Natalia Hanazaki
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

Natasha Stanton
Observatório Nacional
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Neli Aparecida de Mello-Théry
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Nelson Gruber
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre, RS, BRASIL

Óscar Ferreira
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL

Paolo Ciavola
Università di Ferrara
Ferrara, ITALY

Paula Freire
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, PORTUGAL

Paulo Antunes Horta Junior
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

Paulo Avilez-Valente
Universidade do Porto
Porto, PORTUGAL

Paulo Cetry
Instituto Superior de Psicologia Aplicada
Lisboa, PORTUGAL

Paulo da Cunha Lana
Universidade Federal do Paraná
Pontal do Paraná, PR, BRASIL

Paulo dos Santos Pires
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, BRASIL

Paulo J. Parreira dos Santos
Universidade Federal do Pernambuco
Recife, PE, BRASIL

Paulo Pereira
Universidade Aberta
Porto, PORTUGAL

Paulo Renato Baganha Baptista
CESAM
Aveiro, PORTUGAL

Paulo R. Armanini Tagliani
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rio Grande, RS, BRASIL

Paulo Roberto Pagliosa Alves
Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, BRASIL

Pedro de Souza Pereira
Universidade Federal de Pernambuco
Recife, PE, BRASIL

Pedro Proença Cunha
Universidade de Coimbra
Coimbra, PORTUGAL

Pedro Walfir M. Souza Filho
Universidade Federal do Pará
Belém, PA, BRASIL

Philip Conrad Scott
Universidade Santa Úrsula
Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Philippe Larroude
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels
Grenoble, FRANCE

Rafael Medeiros Sperb
Universidade do Vale do Itajaí
Itajaí, SC, BRASIL

Rainer Wehrhahn
Universidade de Kiel
Kiel, ALEMANHA

Ramon Gonzalez
Universidade de Basel
Basel, SUIÇA

Ricardo Clapis Garla
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal, RN, BRASIL

Ricardo da Piedade Abreu Serrão Santos
Universidade dos Açores
Horta, Açores, PORTUGAL

Ricardo Melo
Universidade de Lisboa
Lisboa, PORTUGAL

Richard Thompson
University of Plymouth
Plymouth, U.K.

Roberto Sassi
Universidade Federal da Paraíba
João Pessoa, PB, BRASIL

Rodolfo José Angulo
Universidade Federal do Paraná
Curitiba, PR, BRASIL

Ruy Kenji Papa de Kikuchi
Universidade Federal da Bahia
Salvador, BA, BRASIL

Sebastião Brás Teixeira
ARH - Algarve
Faro, PORTUGAL

Sérgio R. da Silveira Barros
Universidade Federal Fluminense
Niterói, RJ, BRASIL

Sidnei Raimundo
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Silvio Soares Macedo
Universidade de São Paulo
São Paulo, SP, BRASIL

Tomasz Boski
Universidade do Algarve
Faro, PORTUGAL

Valeria Laneuville Teixeira
Universidade Federal Fluminense
Niterói, RJ, BRASIL

Victor Diaz del Rio
Instituto Espanhol de Oceanografia
Madrid, ESPANA

Yara Mattos
Universidade Federal de Ouro Preto
Ouro Preto, MG, BRASIL

Zysman Neiman
Universidade Federal de São Carlos
Sorocaba, SP, BRASIL

Índice / Index

Artigos / Articles

P. Laginha Silva F. Martins T. Boski R. Sampath	117	Modeling basin infilling processes in estuaries using two different approaches: an aggregate diffusive type model and a processed based model <i>Modelação do Preenchimento Sedimentar em Estuários. Comparação de duas abordagens: Modelo Difusivo de Parâmetros Agregados e Modelo de Processos Físicos</i>
Iracema Reimão Silva Abílio Carlos da Silva Pinto Bittencourt, João A. Dias José Rodrigues de Souza Filho	131	Qualidade recreacional e capacidade de carga das praias do litoral norte do estado da Bahia, Brasil <i>Recreational quality and carrying capacity of Bahia State Northern coast beaches, Brazil</i>
M. V. L. Rocha T. Moura C. J. E. M. Fortes R. Capitão M. M. Bezerra F. E. Sancho	147	Análise comparativa entre medições <i>in situ</i> e estimativas numéricas na Praia da Cornélia, Costa da Caparica, Portugal <i>Comparative analysis between in situ measurements and numerical estimations on Cornélia Beach, Costa da Caparica, Portugal</i>
Maria da Graça Neves Montse Vílchez Maria Clavero Miguel A. Losada	159	Determinação de forças actuantes em quebra-mares verticais e mistos <i>Forces on vertical and composite breakwaters</i>
Anízia Conceição Cabral de A. Oliveira Rosemeri Melo e Souza	175	Dinâmica da paisagem e proposição de cenários ambientais: um estudo da planície costeira de Estância, Sergipe, Brasil <i>Landscape dynamics and environmental scenarios: a study of Estancia coastal plain, Sergipe, Brazil</i>
Filipa S. B. F. Oliveira	195	Erosão de dunas com os modelos XBeach e Litprof <i>Dune Erosion with the XBeach and Litprof Models</i>
Geana Sousa Soares José Maria Landim Dominguez	223	Zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru, litoral norte do estado da Bahia, Brasil: classificação e controlos ambientais <i>Wetlands on Itapicuru River coastal plain, Northern littoral of the state of Bahia, Brazil: classification and environmental controls</i>
Vanessa Íris Silva da Silva Christiano Marcelino Menezes	239	Contribuição para o conhecimento da vegetação de restinga de Massarandupió, Município de Entre Rios, BA, Brasil <i>Contribution to the knowledge of the vegetation of Massarandupió Restinga, Entre Rios, BA, Brazil</i>

Notas Técnicas / Technical Notes

Ruben P. Couto Ana I. Neto Armindo S. Rodrigues	253	Limpet shell modifications at intertidal hydrothermal vents <i>Modificações na concha de lapas em fontes hidrotermais de superfície</i>
Fábio Mayo Belligotti Dieter Muehe	257	Levantamento do Perfil da Antepraia (Shoreface) com uso de Ecobatímetro Portátil e Caiaque <i>Measuring Shoreface Profiles with a Kayak and Handheld Depth Finder</i>

Modeling Basin Infilling Processes in Estuaries using two different approaches: An Aggregate Diffusive Type Model and a Process Based Model *

Modelação do Preenchimento Sedimentar em Estuários. Comparação de duas abordagens: Modelo Difusivo de Parâmetros Agregados e Modelo de Processos Físicos

P. Laginha Silva ^{@,1}, F. Martins ¹, T. Boski ¹, R. Sampath ¹

ABSTRACT

Long term basin infilling simulations are traditionally carried out using synthetic models. The usual reasons for the preference of these types of models over the more elaborated process based models are the heavy computational needs and the poor knowledge of the processes in presence.

The main objective of this article is to show that computational power and numerical methods are now reaching a state that these long term simulations can be affordably obtained using state-of-the-art process-based models. To accomplish this, the morphodynamic model, that solves explicitly the mass conservation equation for the bathymetry evolution and then actualizes the bathymetry, are used to perform long term simulations for the estuarine bathymetry evolution.

The results are compared with a traditional synthetic aggregate parameters basin infilling model of the diffusive type. It is shown that the process based models, while conceptually different, produce physically meaningful and comparable results with the diffusive type models. Moreover, they enable the simulation of conditions not allowed by the formulation of diffusive type models with acceptable computational times, as for example the addition of tide and river input.

Keywords: Morphodynamic modeling, Basin infilling, sediment dynamics, aggregate diffusive type model, Process Based Model.

RESUMO

As simulações de preenchimento sedimentar de longo termo são tradicionalmente realizadas através de modelos de parâmetros agregados. A justificação invocada para a utilização desses modelos em vez dos modelos baseados em processos físicos, mais elaborados, relaciona-se com as maiores necessidades computacionais destes últimos e com fraco conhecimento dos processos presentes.

O principal objectivo deste artigo é mostrar que actualmente o poder computacional e os métodos numéricos possibilitam que essas simulações de longo-termo possam ser resolvidas utilizando modelos de processos físicos. O modelo Mohid para além de ser morfodinâmico resolve ainda a equação de conservação de massa para a evolução da batimetria que depois actualiza a batimetria.

Os resultados são comparados com os obtidos por um modelo difusivo de preenchimento sedimentar tradicional. Embora conceptualmente diferentes, os modelos baseados em processos produzem resultados fisicamente significativos e comparáveis com os modelos do tipo difusivo. Os modelos baseados em processos permitem a simulação de condições impossíveis de formular com os modelos do tipo difusivos em escalas temporais computacionalmente aceitáveis.

Palavras-chave: Modelação Morfodinâmica, Preenchimento Sedimentar, Dinâmica Sedimentar, Modelo Difusivo de Parâmetros Agregados e Modelo de Processos Físicos

@ - Corresponding author: pisilva@ualg.pt

1 - Universidade do Algarve – CIMA, Campus da Penha 8005-139 Faro, Portugal. E-mails: pisilva@ualg.pt, fmartins@ualg.pt, tboski@ualg.pt, rmudiyanselage@ualg.pt

1. INTRODUCTION

Estuarine sediment transport presents a great challenge for scientists and coastal engineers. The interaction between the fluid (water) and the solid (dispersed sediment particles) phases is crucial in morphodynamics. The process of sediment transport and the resulting morphological evolution of estuaries gets more complex with the exposure of the estuarine systems to the natural and variable environment (climatic, geological, ecological, social, etc.).

The last half century has seen more and more developments and applications of mathematical models for estuarine flow, sediment transport and morphological evolution. The first attempts for a quantitative description and simulation of basin filling in geological times started in the late 60's of the last century (eg. Schwarzacher, 1966; Briggs & Pollack, 1967). An excellent synthesis of basin quantitative models can be found in Allen and Allen (1990). However, the quality of this modeling practice has emerged as a crucial issue of concern, which is widely viewed as the key that could unlock the full potential of computational estuarine hydraulics. Cao & Carling (2002) identify that the major factors affecting the modeling quality comprise of: (a) poor assumptions in model formulations; (b) simplified numerical solution procedure; (c) the implementation of sediment relationships of questionable validity; and (d) the problematic use of model calibration and verification as assertions of model veracity.

Most of the models used to study fluvial basin filling are of the "diffusion type" (Flemmings and Jordan, 1989). It must be noted that these types of models do not assume that the sediment transport is performed by a physical diffusive process. Rather they are diffusive type models based on mass conservation. In the "synthesist" viewpoint (Tipper, 1992; Goldenfeld & Kadanoff, 1999; Werner, 1999) the dynamics of complex systems may occur on many levels (time or space scales) and the dynamics of higher levels may be more or less independent of that at lower levels. In these types of models the low frequency dynamics are controlled by only a few important processes and the high frequency processes are not included. Contrary to this is the "reductionist" viewpoint that states that there is no objective reason to discard high frequency processes. In this viewpoint the system is broken down into its fundamental components and processes and the model is built up by selecting the important processes regardless of its time and space scale. This viewpoint was only possible to pursue in recent years due to improvement in system knowledge and computer power (Paola, 2000).

Even though the assumptions are different, Gabriel & Martins (2008) had demonstrated the applicability of a process based model (MOHID model (Miranda *et al.*, 2000)) in morphodynamic simulations to study the evolution of the estuarine bathymetry in a time scale of thousands of years through a comparison with similar simulations of both an idealized synthetic model and an intermediate model. They had compared the bed evolution during the first 750 years with the equilibrium profile obtained by Schuttelaars and Swart (2000) and with an intermediate, process-based, linearized model (Hibma *et al.*, 2003) for the same geometry and conditions of simulation. In that work the evolution of

a 1D estuary bed profile during 10000 years by MOHID model shows similar trends for most of the basin and a clear equilibrium tendency, achieved after the first 2000 years of simulations.

The primary aim of this paper is to demonstrate that it is possible to simulate the evolution of the estuarine bathymetry through a process-based hydrodynamic, sediment transport and morphodynamic model, solving explicitly the mass and momentum conservation equations. With this objective, a comparison between two mathematical models for alluvial rivers is made to simulate the evolution of the estuarine bathymetry of a conceptual 1D embayment for periods in the order of a thousand years. Although the selected bathymetry grid is a conceptual estuary its generic configuration is the same observed in the Guadiana estuary and the water and sediment discharge are typical of this estuary.

The traditional diffusive type model based on the diffusion equation (Paola, 2000), used in the "synthesist" viewpoint and the process-based model MOHID (Miranda *et al.*, 2000) are used. The results are also used to highlight some of the uncertainties inherent in such models.

A process based model is a dynamic model that is based in mathematical formulations of the more relevant physical processes. The process based model is explored to investigate the combined effect of tide, sea level rise and river discharges in the behavior and sensitivity of the estuary system. These effects cannot be simulated using the diffusive type model, due to its intrinsic assumptions.

The next sections present a brief description of the synthetic diffusion model and the limited capabilities of these types of models are highlighted. Then the major features of the process based model are described. Subsequently, the simulations layout is introduced; the results are presented and discussed. Finally the principal conclusions of the work are listed.

2. MODEL DESCRIPTION

2.1 The diffusion model and its dependencies

The basic flow equation, the continuity and Navier-Stokes equations describing (fluid) mass and momentum conservation may be considered exact at least for a pure fluid. In contrast, much remains unclear as far as the basic governing equations for sediment are concerned. Unlike "molecular" scalars like salinity or temperature, sediment constitutes a separate physical phase, the motion of which may not necessarily be the same as the motion of the fluid. The large bulk of the work on sediment transport modeling has been based on a continuum approach, where only a sediment mass conservation equation is taken, without mention of sediment momentum conservation equation (Lyn, 2007).

Described by Chris Paola (2000), the diffusion model is based on the standard diffusion equation:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \quad 1$$

Where η is the elevation of bed level (m), t time (s), x downstream distance (m) and ν the transport (diffusion) coefficient.

Diffusion is a physical process that occurs in a flow in which some property is transported by the random motion of the molecules. Diffusion is related to the stress tensor and to the viscosity. Turbulence and the generation of boundary layers are the result of diffusion in the flow. The mixing process responsible for the distribution of quantities of heat, dissolved gas and solids, and suspended sediment, is shown to consist of a uni-directional movement by turbulent mean flows, called advection, and a three-dimensional spreading action produced by the turbulent flow components, called diffusion.

The type of model described in this chapter does not assume that the sediment transport is performed by the physical diffusive process referred in the previous paragraph since it is a synthetic model based on the conservation of mass:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{-1}{C_0} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad 2$$

Where q_s is the mean sediment flux per unit width of basin (m^2/s) and the volume sediment concentration in the deposits. The diffusive nature of the Equation 2 arises from the assumption of a slope-dependent sediment flux:

$$q_s = -\nu \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad 3$$

Where $\nu = \nu C_0$. The physical meaning however is of a mass conservation equation; the diffusion coefficient embodies the parameterization of the sediment flux q_s . The diffusion equation is a mass conservation equation where the flux is parameterized as a function of the bottom slope. Instead of invoking diffusion as a mean behavior (i.e. Eq. 1), the model behaves diffusively in aggregate.

One problematic assumption for geophysical simulations is that the dimensionless (or Shields) stress τ^* must be constant within particular fluvial regimes in time and space, a difficult assumption to make in real scenarios. This is a substantial generalization, of the approach presented in Paola et al. (1992). With τ^* defined as:

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{\rho g (s-1) D} \quad 4$$

Where τ_0 is the bottom shear stress (Pa), ρ is the fluid density (Kg/m^3), s the sediment specific gravity and D the median grain size (m). This is obviously difficult to accomplish in real life situations. The bottom shear stress is used for the determination of the diffusion coefficient, as part of the formulation of the diffusion model. In this work the diffusion coefficient parameter wasn't determined by the model, instead it was considered constant and adjusted to

minimize the longitudinally integrated error between the diffusive model and the MOHID model.

Another very stringent assumption for the applicability of the diffusion model in real life situations is that boundary conditions, such as sediment supply and river flow, must be constant. The formulation of diffusive models makes impossible the inclusion of these processes. The simulation of time dependent processes, such as the impact of climate change, is thus difficult to accomplish with such models.

The model was implemented in FORTRAN 95 language using the finite differences method and an explicit temporal discretization of Equation 1:

$$\eta_i^{t+1} = \eta_i^t + \nu \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (\eta_{i+1}^t - 2\eta_i^t + \eta_{i-1}^t) \quad i = 2, 3, \dots, N-1 \quad 5$$

$$t+1 = t + \Delta t, t = 0, \dots, t_{max} \quad 6$$

2.2 The process based model and its implementation

The implementation of the process-based morphodynamic simulation is based on the finite volume MOHID modeling system. It is an open access code developed over the last 30 years in the IST (Technical University of Lisbon, Portugal). It has originally been developed for short time simulations (days to years) and is now being applied for the first time in geologic timescale studies. It is a modular system that includes, among others, models for hydrodynamics, sediment transport and sediment bed evolution (Bernardes et al., 2006).

The system architecture is object oriented (Miranda et al., 2000). The velocity fields are computed in the hydrodynamic module, using a 3D formulation with hydrostatic and Boussinesq approximations (Martins et al., 1998).

The equations are solved using the finite volume method with an ADI (Alternate Direction Implicit) discretization. The resulting equations are obtained by integration of the Navier-Stokes equations over the cells:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \bar{v} dV = & - \oint_A \bar{v} (\bar{v} \cdot \bar{n}) dA + \oint_A \nu_r \frac{\partial (\bar{v})}{\partial n} dA - g \oint_A (\eta - z) \cdot \bar{n}_{xy} dA \\ & - g \oint_A \left(\int_z^\eta \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} dz \right) \cdot \bar{n}_{xy} dA - \oint_A p_{atm} \bar{n}_{xy} dA + \int_V 2\bar{\Omega} \times \bar{v} dV \quad 7 \end{aligned}$$

Where \bar{v} is the velocity vector, V the cell volume, n the normal to the cell and Ω the velocity of the Earth rotation. Although Equation (7) is the more general 3-D equation which is part of MOHID, in the present application the 1D-vertically integrated version of this equation is used.

In the vertical direction a generic discretization method is implemented (Martins et al., 2001). At the open boundaries both imposed values and radiative conditions can be set (Coelho et al., 2002). In tidal flats, a moving boundary condition is implemented enabling the drying and flooding of cells as a function of the water level. The bottom stress is implemented implicitly using a quadratic law.

The bed evolution is computed solving the mass balance equation:

$$(1 - \eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \text{div } \vec{q}_s = \frac{\theta_s}{\rho_s} \quad 8$$

Where η is the sediment porosity, θ_s is the sediment flux between the water column and the bed ($\text{Kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$) and ρ_s is the dry sediment density (kg/m^3). In this equation: \vec{q}_s is the total sediment flux per unit width consisting of bed load and suspended load.

The bed load fluxes are computed in an orthogonal grid system of the Arakawa C type (Arakawa and Lamb, 1977). In each centre cell (Z point) the transport flow is computed. In order to compute the sediment transport in an estuary the formulation of Ackers and White (1973) is chosen. These authors developed a total transport formula for fine and coarse sediments exposed to unidirectional water current. The expression assumes that the coarse sediments are transported near the bottom, at a proportional rate to the shear stress, while the fine sediments are in a suspended load due to turbulence. The turbulence intensity depends of the energy dissipation generated by the bottom friction, resulting in a suspended load depended of the bottom shear stress. Although we had used a 1-D vertically integrated model, the MOHID model still uses the integral formulation of Ackers-White. In this 1D case, the MOHID model calculates the fluxes using the Ackers-White formulation that parameterizes the different types of sediment transport.

In a second step the different flow constituents are interpolated: the Zonal (or X) component is interpolated to the U points and in the case of 2D grid the Meridional (or Y) component is interpolated to the V points. In case of a 3D grid, to estimate the evolution of the sand thickness in the cell center (Z point) a mass balance is done.

The availability of sand in a cell is limited by the depth of the bed rock.

The system combines a model of hydrodynamic circulation (the MOHID model) with a model of transport for non-coesive sediments (module SAND). This system computes the turbulence averaged currents and determines the bathymetry evolution and its feedback action in the circulation (Martins *et al.*, 2001).

3. SIMULATION LAYOUT

The diffusive type model had a simulation layout similar to the MOHID model, trying to approximate both models to the same initial parameters, as for example: boundary conditions, grid formulations, discharge values and others.

A schematic bathymetry of a tidal basin was constructed with 50 cells of 1 Km by 1 Km size, covering an area with 50 km length and 1 km width (Figure 1). The initial bed depth was imposed with a linear variation from 0 m at the head of the estuary to 10 m at the mouth. By convention the depth values are assumed to be positive, negative values denoting positions above the sea level.

A continuous run of 1000 years was performed with the MOHID model and the diffusive type model. For the MOHID model simulations a typical total river flow of $332,15 \text{m}^3/\text{s}$ with a sediment concentration of $1 \text{kg}/\text{m}^3$ was divided among five upstream cells of the estuary and every concentration discharge was injected in each cell starting 48 km until 44 km downstream, identical to the simulation layout of the diffusive type model. The river discharge values were selected as the mean flow and the highest sediment concentration observed on the Guadiana basin, on the hydrometric and sedimentologic station *Pulo do Lobo* (SNIRH, 2009).

From the same INAG database (SNIRH, 2009) it was used the annual flow distribution although it doesn't have a full 100 years extent time series of the daily mean flow because the registries only started after October 1940. As a result, the temporal flow distribution used in this simulation consists of a 100 year replication by a one year record in the station *Pulo do Lobo* (reference 27L/01H). The year 1960 was selected as a representative flow distribution in this area due to be a heterogeneous year with two main annual events of higher flows.

The SNIRH database does not possess for *Pulo do Lobo* station a correspondent sediment distribution, but only a group of scattered measurements of sediment concentrations during a four year period from February 1982 to February 1985. To construct a temporal series of sediment concentration the higher sediment concentration was chosen as representative of a worst case scenario and a direct distribution relationship between sediment concentration and flow was performed.

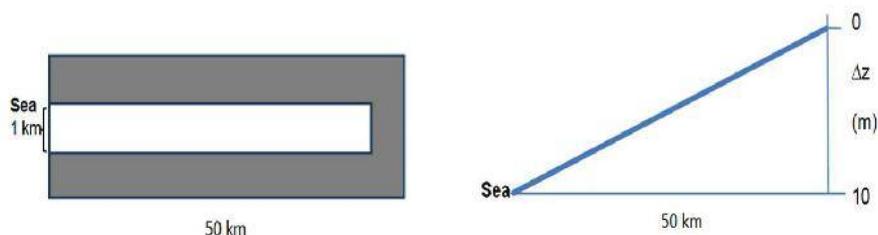


Figura 1. Batimetria esquemática de um estuário conceptual utilizado nas simulações. As células a cinzento simbolizam a terra.

Figure 1. Schematic bathymetry of a conceptual estuary used in the simulations. Land cells in grey.

For stability reasons the time step (Δt) used in the MOHID model was set to 60s (Courant number = 1.3835).

For all the MOHID model simulations, a null gradient boundary was applied at the open ocean boundary. This type of boundary assumes that the sediment concentration at the open boundary during ebb is equal to the interior concentration adjacent to the boundary. During flood, the concentration of sediment entering the system is obtained from a first order relaxation equation to a fixed exterior value with an infinitely large decay time. The standard method follows the equation:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\Phi_{ref} - \Phi}{\tau} \quad 9$$

Where Φ is the relaxed variable, corresponding to the concentration at the open boundary, Φ_{ref} is the reference external value and τ is the relaxation time scale. The variable τ controls the mixture between the property offshore and the property inside the estuary that runs out during ebb time. If τ is too large the boundary value is equal to Φ_{ref} (instantaneous mixture).

The MOHID model does not have a fix bottom elevation on the open boundary as the diffusive type model, enabling the formulation of a tidal wave entering the estuary.

The system was also forced by tide in the open boundary by its most important component: a single M_2 tide with constant amplitude of 1.75 m and a reference vertical level (hydrographic zero). The value used is normally used as the reference level in Portugal due to the lowest low tide in the coastal and estuarine zones in Portugal, which in the Port of Lisbon was register as equal to 2.2m.

To validate the results, several MOHID simulations were performed with non-cohesive sediment typical of medium sand with a d_{50} value of 400 μm (Wentworth, 1922) being this the representative value for the sediment existing in the Guadiana Estuary Basin.

Just as an example, with the characteristics referred previously, the MOHID model takes approximately 7h to obtained results for a 100 years run with a 2.3GHz dual-core Intel Core i5 processor.

In the case of the diffusive type model, the grid is the same used by the MOHID model with identical number of mesh points, 50 cells (N). A constant time step Δt (86400s) was used. t_{max} is the duration of the simulation (seconds). In this case 1000 years was considered.

As already mentioned in the chapter 2 – Model Description, the diffusion coefficient of the model was adjusted to minimize the longitudinally integrated error between the diffusive model and the MOHID model. The value of the diffusion coefficient (ν) was considered constant in all the system and equal to 0.077m²/s.

In the grid cells with discharge points (described below), a sediment source, S_{sed} , was added to Equation 5:

$$S_{sed} = \frac{Q_{sed}}{\Delta x} \quad 10$$

Assuming that Q_{sed} is the sediment flux (m²/s) obtained by Equation 8 and equal to -2.5×10^{-5} m²/s, where Q_w is the water discharge (m³/s), C_{sed} the sediment concentration (kg/m³) and ρ_{sed} the sediment density (kg/m³). Note that Q_{sed} is a negative value due to the localization of the source be on the right of the grid.

$$Q_{sed} = -\frac{Q_w \times C_{sed}}{\rho_{sed} \times \Delta x} \quad 11$$

The S_{sed} was divided in five discharge points among the five upstream cells of the estuary, from a downstream distance of 44 km to 48 km. For this grid cells Equation 5 becomes:

$$\eta_i^{t+1} = \eta_i^t + \nu \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (\eta_{i+1}^t - 2\eta_i^t + \eta_{i-1}^t) - \frac{S_{sed}}{5} \times \Delta t, \quad i = N-6, \dots, N-2 \quad 12$$

In this type of model it is not possible to add to the simulations any other estuary processes like the water river discharge, the tide or the sea level rise. Instead the water motion is driven by point sources from a downstream distance of 44 km to 48 km.

In the boundary limits, cells 1 and N, different assumptions were implemented: In the open boundary, cell 1, η was assumed to be constant in time and equal to 10m:

$$\eta_1^{t+1} = 10 \quad 13$$

Near the river boundary, last grid cell, it was imposed a gradient boundary condition, where the variable η was assumed to be the same of grid cell N-1 in time $t+1$:

$$\eta_N^{t+1} = \eta_{N-1}^{t+1} \quad 14$$

4. RESULTS

Both models have different physical assumptions and for this reason the results obtained with the two models will not be equivalent. Nevertheless, the main assumptions are the same: 1D schematic bathymetry, bathymetry gradient along the estuary and sediment discharge. In the subsequent sections the results obtained with each model are presented.

4.1 Results of the diffusive type model

With the diffusive type model it was possible to simulate 1000 years evolution of the sediment bathymetry showing a progressive infilling of the estuary basin (Figure 2).

In the analysis of the results it must be noted that the basin infilling process obtained by this model is the result of the simplified process acting as a diffusive wave. It can be observed that the sediment piles up along the estuary with time in a quasi-equilibrium fashion. This result reveals typical behavior of diffusion, showing a constant gradient of the bottom elevation. The diffusion model results only

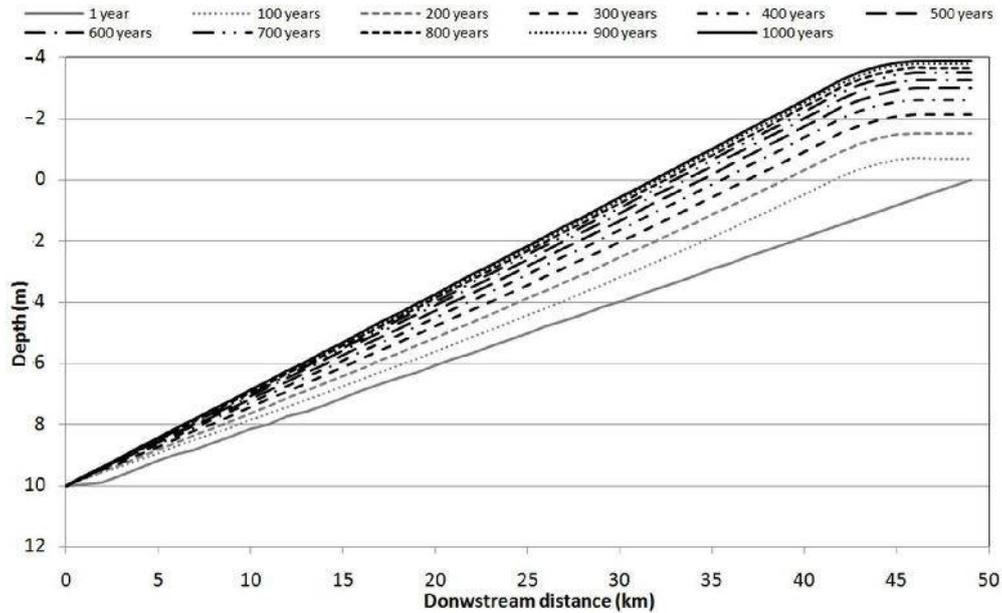


Figura 2. Preenchimento sedimentar em 1000 anos obtido pelo modelo de parâmetros agregados do tipo difusivo.

Figure 2. Basin infilling in 1000 years obtained by the diffusive type model.

have in stationary regime a constant gradient. At the end of 1000 years this final solution tends to a linear solution. The intermediary solutions (transients) could not be linear but due to the fact of the evolution is too small these transient solutions are approximately linear.

With the analysis of the results from the diffusive type model, it is not possible to observe any erosive process or other physical process that acts in a real estuary basin except the consequent elevation of the sediment bathymetry. At the open boundary, the bottom elevation is fixed in the formulation of the diffusion model, not allowing any erosion or deposition of sediment to be observed in this point.

The results accomplished by the diffusive model confirm the major drawback of these models: to achieve erosion a negative diffusion coefficient would be needed. Quantitatively the results show a maximum sediment deposition upstream with 4m of sediment accumulation decreasing downstream without any sediment deposition observed at the estuary.

4.2 Results of the process based MOHID Model

The results obtained by the MOHID model, for the same 1000 year simulation are presented in Figure 3. As already referred in the Simulation Layout chapter, by convention the MOHID model in its formulation assumes depth values positive and positions above the sea level negative.

The bed evolution shows a less diffusive character when compared to the diffusive model. This is expected since the process based model explicitly includes the physical processes controlling the sediment transport and consequently the bed evolution. In fact, the bottom develops as a result of a river discharge with water and sediment input. Also, by physical

processes that drive the hydrodynamic and the sediment transport. All this physical processes described before and included in the formulation of the model MOHID permits results physically more credible than the diffusive solution.

The quasi-equilibrium nature of the results are thus not observed, being alternatively observed a transient evolution of the infilling wave.

As the simulation advances in time, the results of the MOHID model show a tendency for a stationary state similar to the one attained with the 1000 year simulation from the diffusive type model. The main difference observed in the process-based model results is that the erosion process is visible in the lower part of the estuary basin, due to the tidal energy, a process not included in the diffusive model. The erosive process reaches a maximum value of approximately 2 meters at the mouth, and is present up to 32 km from the mouth before the infilling wave reaches that position. It can also be observed that both models attain a maximum sediment height of 4 meters near the head. It should be noted that in the process based model the last two cells remain constant because they are used as a boundary condition.

4.3 Behavior and sensitivity of the process based model

The previous set of simulations has helped to compare both models and to understand its behavior. A subsequent set of 100 year simulations were prepared to show the practical applicability of the process based model and to study the sensitivity of the system to variations in sediment characteristics and forcing. The diffusive model cannot be applied to these situations due to its formulation. Table 1 summarizes the conditions of each simulation, including the reference simulations described in sections 4.1 and 4.2.

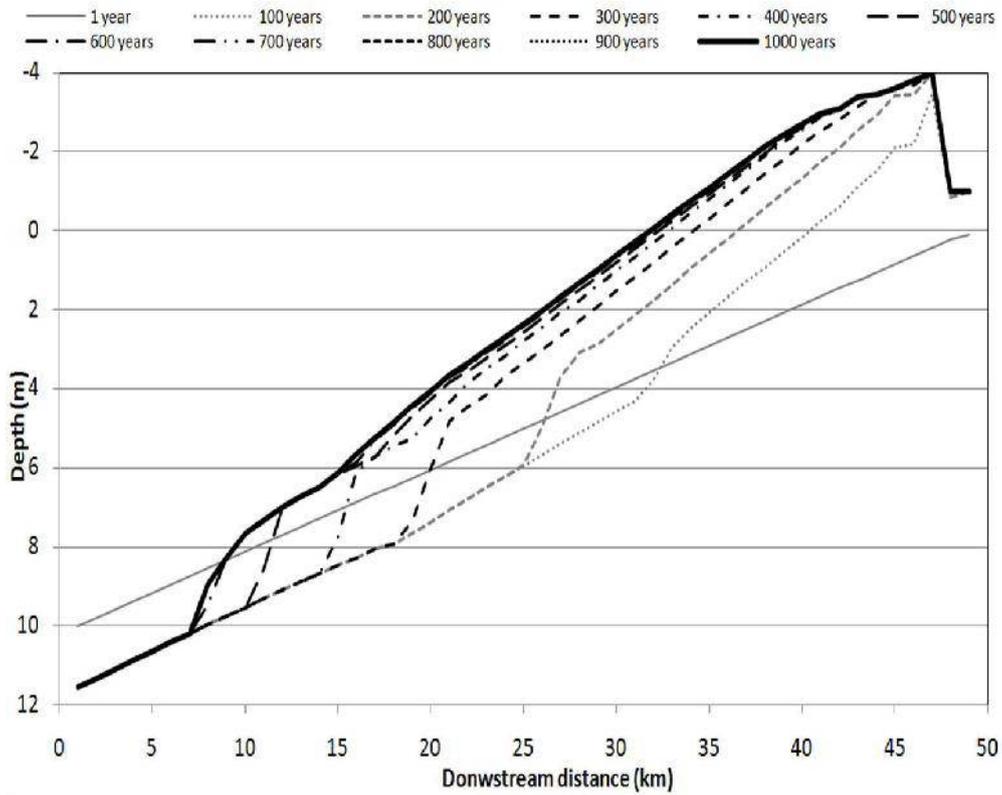


Figura 3. Preenchimento sedimentar em 1000 anos obtido pelo modelo baseado em processos (modelo MOHID).

Figure 3. Basin infilling in 1000 years obtained by the process based model (MOHID Model).

Tabela 1. Condições impostas às simulações do modelo MOHID e do modelo de parâmetros agregados do tipo difusivo.
Table 1. Simulations conditions of the MOHID model and diffusion type model runs.

Run Reference	Tide Forcing	Sea level rise	River flow	River Sediment Concentration	Sediment source	Sediment granulometry (Wentworth, 1922)	Figure
Diffusion run	No tide	none	none	none	$2.5077 \times 10^{-8} \text{m/s}$	none	Fig. 2
Reference run	M2, 1.75m	none	Constant: $332.27 \text{m}^3/\text{s}$	Constant: $1 \text{kg}/\text{m}^3$	none	Medium sand $d_{50}=400 \mu\text{m}$	Fig. 3
Run test 1	M2, 1.75m	none	Constant: $332.27 \text{m}^3/\text{s}$	Constant: $1 \text{kg}/\text{m}^3$	none	Medium sand $d_{50}=200 \mu\text{m}$	Fig. 6
Run test 2	M2, 1.75m	none	none	none	none	Medium sand $d_{50}=200 \mu\text{m}$	Fig. 7
Run test 3	M2, 1.75m	8.8mm/yr	Constant: $332.27 \text{m}^3/\text{s}$	Constant: $1 \text{kg}/\text{m}^3$	none	Medium sand $d_{50}=200 \mu\text{m}$	Fig. 8
Run test 4	M2, 1.75m	none	Variable: annual temporal series	none	none	Medium sand $d_{50}=200 \mu\text{m}$	Fig. 9

The Figures 4 and 5 summarizes the results of the MOHID model for the Residual Velocity (Figure 4) and Residual Velocity Fluxes (Figure 5).

The Residual Velocity is a time averaged velocity (m/s) during the period of the simulation and the Residual Velocity Fluxes is a time averaged specific flow divided by the average grid cell thickness in m/s which is the specific flow (m²/s) divided by the average thickness of the grid cell in meters during the period of the simulation.

The purpose of the Run test 1 is to understand the

influence of the sediment properties on the infilling process. The reference run (Figure 3) uses medium sand with a granulometry of 400 µm. These results are compared to the results of Figure 6 obtained using fine sand with a granulometry of 200 µm.

It can be seen that the infilling process does not evolve in this system when a fine sand supply is used. Moreover, if the initial bed sediment is of the same type, as is the case in this simulation, the system starts to erode until an equilibrium state is reached. This is a physically plausible

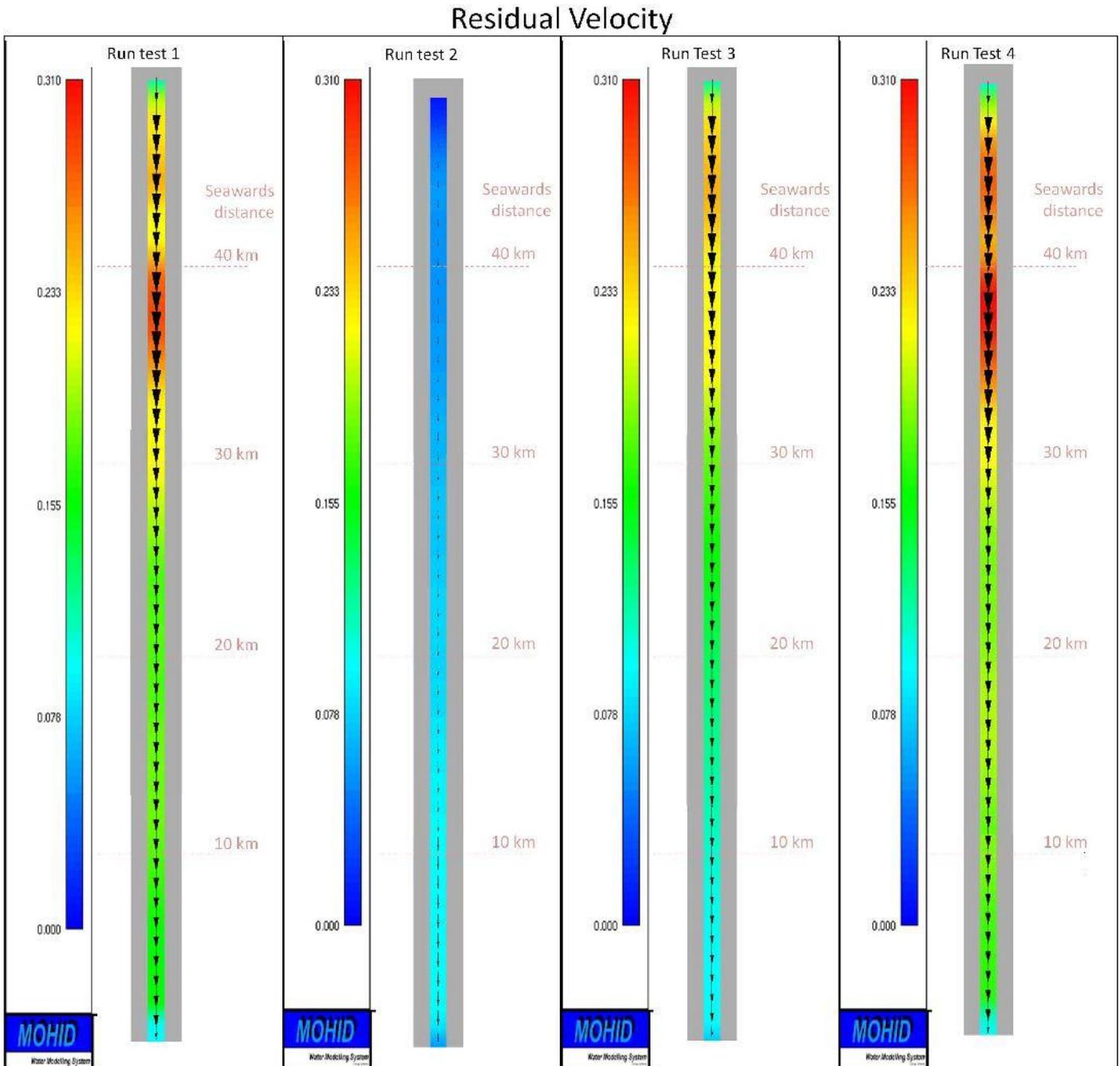


Figura 4. Fluxos das velocidades residuais para as simulações testes realizadas pelo modelo MOHID. As setas indicam o vector velocidade quantitativamente e a sua direcção, montante ou jusante.

Figure 4. Residual velocity fluxes for the simulations test performed by the MOHID model. The arrows indicate the velocity vector quantitatively and its direction, upstream or downstream.

Residual Velocity Fluxes

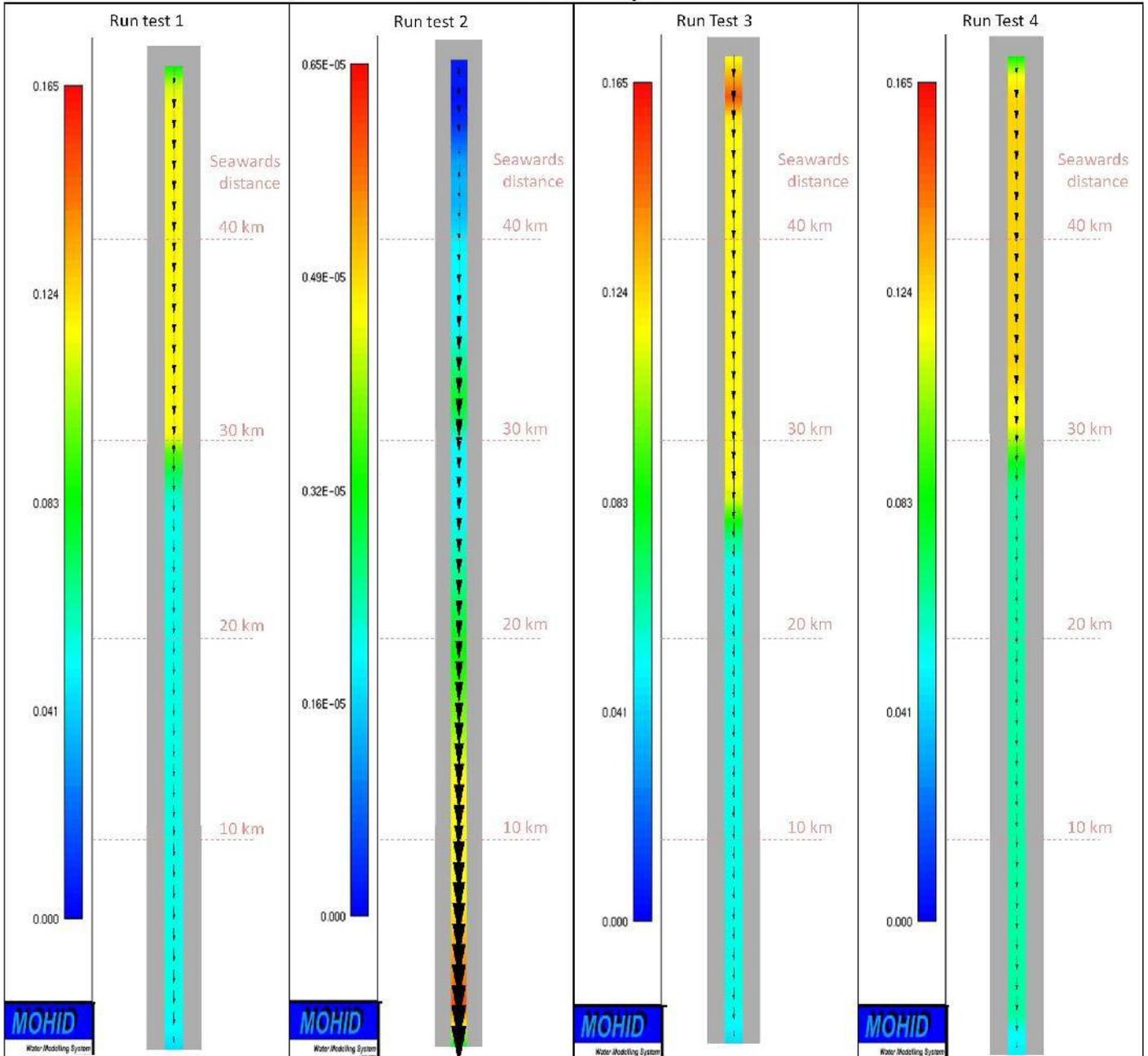


Figura 5. Velocidades residuais para as simulações testes realizadas pelo modelo MOHID. As setas indicam o vector velocidade quantitativamente e a sua direcção, montante ou jusante.

Figure 5. Residual velocities for the simulations test performed by the MOHID model. The arrows indicate the velocity vector quantitatively and its direction, upstream or downstream.

evolution that could not be achieved by the traditional diffusive models where erosion cannot be accounted for. The bottom evolution observed in the Run-test 1 (Figure 6) could be corroborate with the residual velocities of the system (Figure 4). At the river point of discharge is detected a light increase of the velocity (Figure 4), causing an erosive process that transports sediment and deposits immediately afterwards at 43km seawards (Figure 5). Due to this fact, the water column depth diminishes leading the velocity to increase (Figure 4) and consequently the existence of a new

erosive event (Figure 6). Afterwards the velocity stabilizes but still capable of eroding the sediment bottom.

The purpose of the second test is to understand how river forcing modifies the morphodynamic evolution. To evaluate this, the Run-test 2 (Figure 7) was performed without the forcing of river discharge (water or sediment) only with tide.

The results of the Run-test 1 (Figure 6) present the expected erosion at the head of the estuary when compared with the Run-test 2 (Figure 7). The run of Figure 7, without

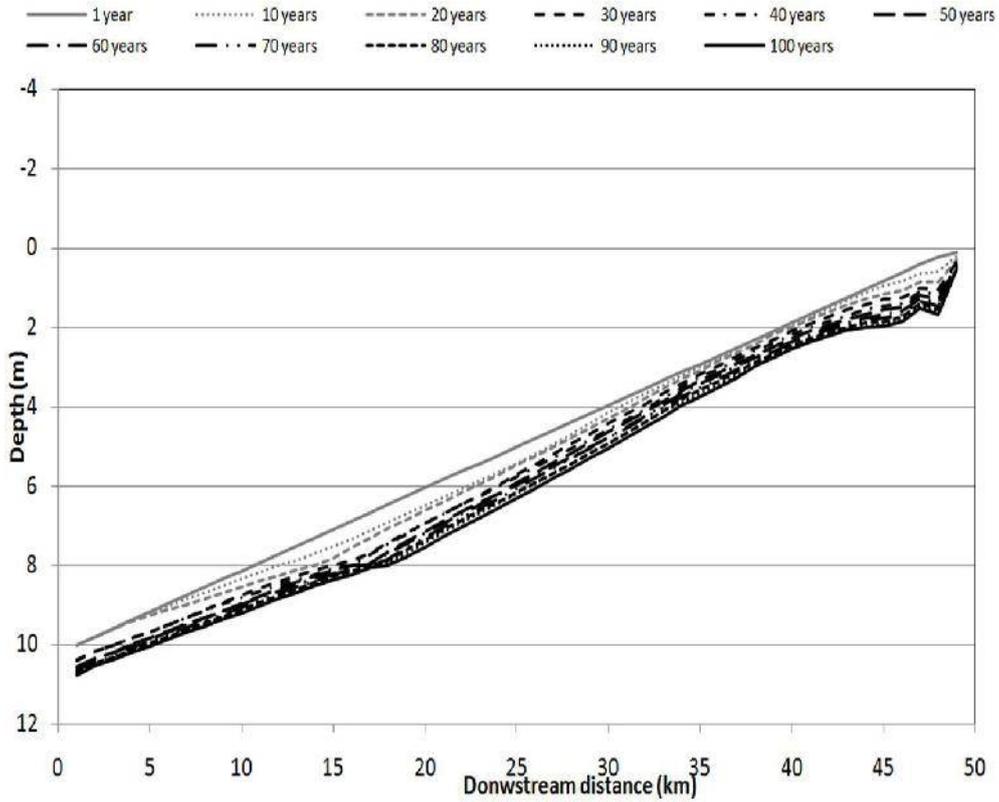


Figura 6. Evolução da batimetria para um período de 100 anos com a adição da componente tidal M2 mais a subida do nível do mar de 88cm por século (8.8mm/ano).

Figure 6. Evolution of the bed depth for the period of 100 years with the addition of a tidal component M2 plus a sea level rise of 88 cm per century (8.8 mm/yr).

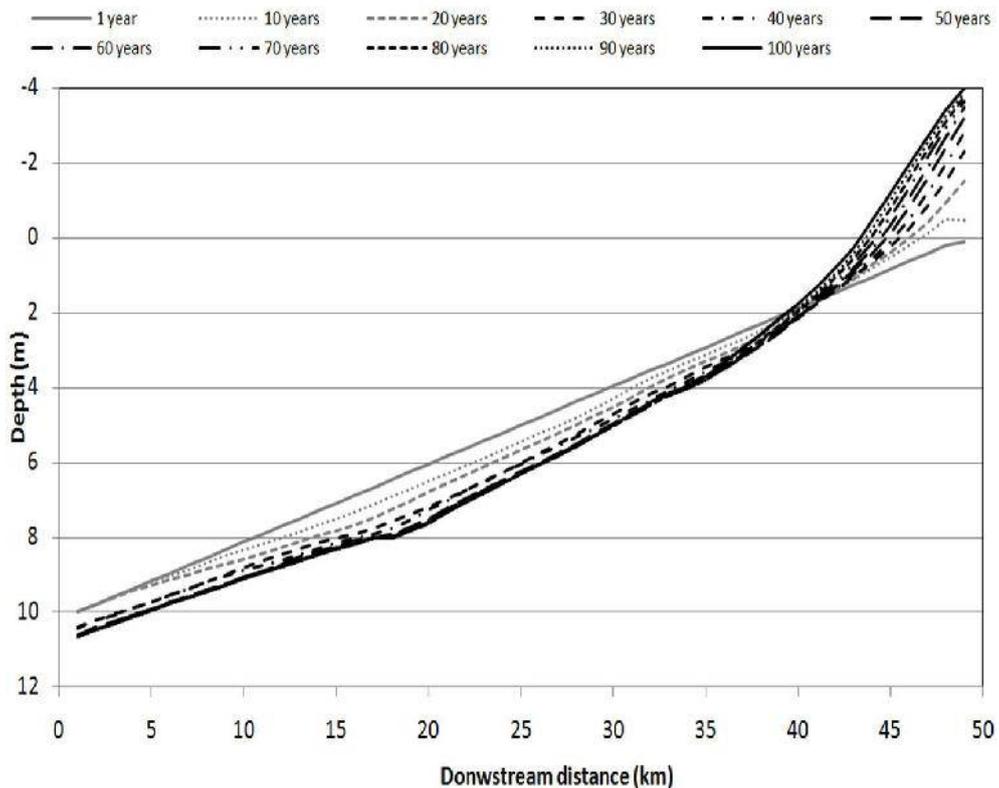


Figura 7. Evolução da batimetria para um período de 100 anos sem a adição da descarga de água e sedimentos a montante.

Figure 7. Evolution of the bed depth for the period of 100 years without the addition of water and sediment discharge at the head of the river.

river discharge, displays a pronounced sediment accretion on the head of the estuary. This is due to the lack of energy in that region to promote erosion. In reality the tidal wave is deformed resulting in a tidal asymmetry that favors downward sediment transport in the lower reaches and landward transport in the upper reaches, resulting in the accumulation visible in Figure 7.

This phenomenon is possible to observe in Figure 5 where the first two cells RunTest2 are visible a reversal of the direction of the residual velocities fluxes, with the first two cells having an upstream direction. In the rest of the system, the residual velocity fluxes (Figure 5) are directed downstream, justifying the loss of sediment downstream through the increase of the residual velocities fluxes. The residual velocities (Figure 4) only show very small velocities in all the system in general, with higher residual velocities downstream.

Between 40 and 30km upstream the residual velocities fluxes (Figure 5) inverts and increases and the residual velocities show a considerable higher values. These phenomena could be explained by velocities reaching the capability of remobilize sediment. For this reason it's possible to observe the sediment accumulation upstream (Figure 7) being maximum only in the first cells and decreasing downstream until no more sediment accumulates and the velocities fluxes shows the capability of remobilize the sediment in the system and thus eroding the river bottom.

Still, between 30 and 25km seawards the residual velocity fluxes decreases. This event corresponds to the same area that is displayed in Figure 7 where is visible a reduced erosion. From 25km downstream, the residual velocity and velocity fluxes increase being higher in the last cell, corresponding to the erosive process observed in the Figure 7 in this same area.

Note that the results achieved for this run-test 2 corresponds to residual velocities fluxes very small when compared with the other runs. A possible explanation could be related to the only system forcing be a tidal wave entering the estuary through the open boundary, in opposition with the other run-tests that all have a water and sediment discharge at the head of the river.

The effect of sea level rise was then investigated in the third test, adding to the M2 tidal wave of the ocean boundary a value of 88 cm per century with the objective of simulate the global sea level rise (SRES, 2001). This value was chosen as the model maximum of the total sea level change for the worst scenario given by the Special Report on Emissions Scenarios (SRES). The SRES was prepared in 2001 by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for the Third Assessment Report (TAR). The river discharge of water and sediment was maintained constant. The results obtained in this simulation can be observed on Figure 8.

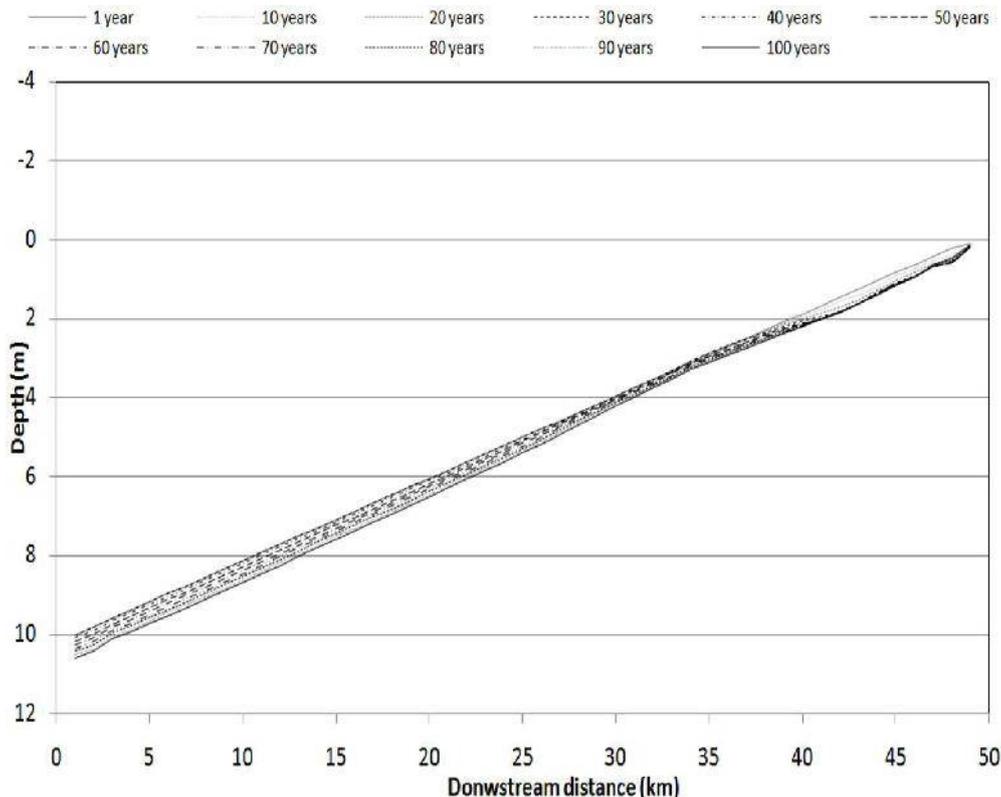


Figura 8. Evolução da batimetria para um período de 100 anos com a adição da componente tidal M2 mais a subida do nível do mar de 88cm por século (8.8mm/ano).

Figure 8. Evolution of the bed depth for the period of 100 years with the addition of a tidal component M2 plus a sea level rise of 88 cm per century (8.8 mm/yr).

The results obtained show that sea level rises produces globally, much smaller erosion (Figure 8) when compared with the constant level situation (Figure 6) present in the Run-test 1. A slight sediment accretion zone can also be identified in the middle part of the estuary. This behavior is confirmed by classic infilling models that show a strong correlation between basin infilling and sea level rise (Paola *et al.*, 2000). The residual velocities and velocities fluxes (Figure 4 e 5) shows a higher residual velocity at 45km upstream that get smaller from this point seawards. These results demonstrate smaller residual velocities and velocities fluxes when compared with the Run-test 1, confirming the assumption documented previously.

Finally to examine the influence of constant versus variable river discharge, a fourth test was implemented, including a variable annual flow distribution at the head of the estuary and a tidal forcing without the addition of the sea level rise. The results for this simulation can be observed in Figure 9 and shall be compared with the Reference run (Figure 3).

The results show a remarkable erosion process on the head of the estuary, resulting from the increase in river velocity (Figure 4) caused by the river discharge and consequent erosion capacity. Immediately, seaward of this area the estuary bed stabilizes, with the sediment supply and the erosion process acting in an almost equilibrium way. Further downstream of the estuary, higher erosion processes occur along the estuary bed similar to the results already achieved

in Run-test 2 (Figure 4, 5 and 8), with the difference that the residual velocity fluxes are higher than in the Run-test 2 due to the sediment availability from the erosive process close to the river discharge.

5. FINAL CONCLUSIONS

The results presented show that the current computational power and numerical modeling techniques enable the use of process based models, which explicitly describes the physical processes, to simulate long term basin infilling processes. The simulation of the estuarine bathymetry evolution achieved by the process-based model MOHID present the same trend obtained using the traditional diffusion model. Additionally, more detailed simulations are possible due to the physical processes included in the process-based model. In the MOHID results it is possible to observe more comprehensive and realistic results because this type of model includes processes that are impossible for a diffusive type model to describe. Due to this, it was possible to investigate the combined effect of tide, sea level rise and river discharges in the process based model. The results demonstrate the feasibility of using process based models to perform studies with a time scale of 10000 years. This is an advance relative to the use of diffusive type models, enabling the use of variable forcing.

In the future the process based model will be confronted with geological data of the Guadiana estuary to evaluate the similitude of the results.

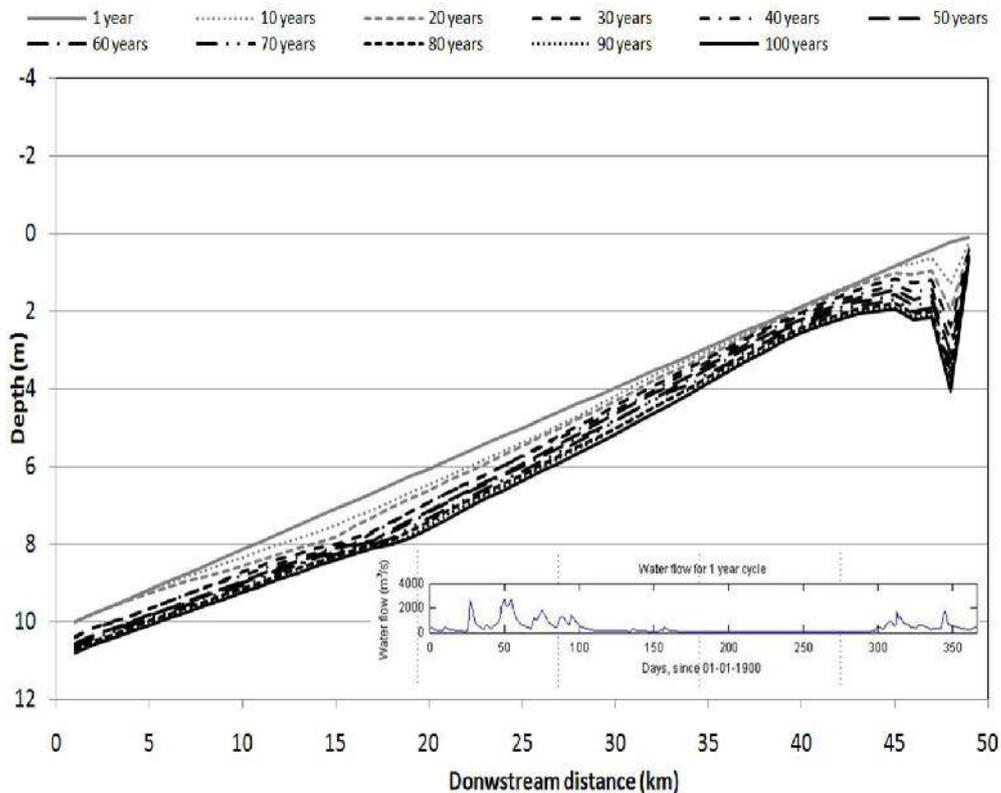


Figura 9. Evolução da batimetria para um período de 100 anos com a distribuição anual do escoamento do rio a montante variável.

Figure 9. Evolution of the bed depth for the period of 100 years with a variable annual flow distribution at the head of the river.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the EVEDUS PTDC/CLI/68488/2006 Research Project.

REFERENCES

- Ackers, P.; White, W.R. (1973) – Sediment Transport: New Approach and Analysis. *Journal of the Hydraulics Division* (ISSN: 0044-796X), 99(11):2041-2060. ASCE - (American Society of Civil Engineers), Reston, Virginia, U.S.A.
- Allen, P.A.; Allen, J.R. (1990) – *Basin Analysis: Principles and Applications*. 445p., Blackwell Scientific Publications, Oxford, U.K. ISBN: 0632024232
- Arakawa, A.; Lamb, V.R. (1977) – Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *In: J. Chang (ed.), Methods in Computational Physics*, 17: 173-265, Academic Press, New York, NY, U.S.A. ISBN: 0124608175.
- Bernardes, M.E.C.; Davidson, M.A.; Dyer, K.R.; George, K.J. (2006) – Towards medium term (order of months) morphodynamic modelling of the Teign estuary, UK. *Ocean Dynamics*, 56(3-4):186-197. DOI: 10.1007/s10236-005-0039-9.
- Briggs, L.I.; Pollack, H.N. (1967) – Digital model of evaporate sedimentation. *Science*, 155(3761):453-456. DOI: 10.1126/science.155.3761.453.
- Cao, Z.; Carling, P.A. (2002) - Mathematical modeling of alluvial rivers: reality and myth. Part 2: Special issues. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water & Maritime Engineering*, 154(4):297-307. DOI: 10.1680/wame.2002.154.4.297.
- Carter, T.R.; la Rovere, E.L. (2001) - Developing and Applying Scenarios. *In: McCarthy, J.J.; Canziani, O. F.; Leary, N.A.; Dokken, D.J.; White, K.S. (eds.), Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*, pp.145-190, Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Contribution of Working Group II, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. ISBN: 0521807689. Available: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/pdf/wg2TARchap3.pdf
- Coelho, H.; Neves, R.; White, M.; Leitão P.; Santos, A. (2002) - A Model for Ocean Circulation on the Iberian Coast. *Journal of Marine Systems*, 32(1-3):153-179. DOI: 10.1016/S0924-7963(02)00032-5.
- Flemmings, P.B.; Jordan, T.E. (1989) – A synthetic stratigraphic model of foreland basin development. *Journal of Geophysical Research* (ISSN 0148-0227), 94(B4):3851-3866, AGU - American Geophysical Union., New York, NY, U.S.A..
- Gabriel, S.; Martins, F. (2008). – First Results of a Long Term Morphodynamic Process Based Model. *Journal of Coastal Research* (ISSN: 0749-0258), SI56(2):952-955. Available: http://e-geo.fcsh.unl.pt/ICS2009/_docs/ICS2009_Volume_II/952.955_S.Gabriel_IC2009.pdf
- Goldenfeld, N.; Kadanoff, L.P. (1999) – Simple lessons from complexity. *Science*, 284(5411):87-89. DOI: 10.1126/science.284.5411.87.
- Hibma, A.; Schuttelaars, H.M.; Wang, Z.B. (2003) – Comparison of longitudinal equilibrium profiles of estuaries in idealized and process-based models. *Ocean Dynamics*, 53(3):252-269. DOI: 10-1007/s10236-003-0046-7.
- Lyn, D.A. (2007) – Turbulence Models for Sediment Transport Engineering. *In: Garcia, M. H. (ed.), Sedimentation Engineering: Processes, Management, Modeling and Practice*, pp.763-826, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, U.S.A. ISBN: 9780784408148.
- Martins, F.; Neves, R.; Leitão, P. (1998) – A three-dimensional hydrodynamic model with generic vertical coordinate. *In: V. Babovic & L. C. Larsen (eds.), Hydroinformatics '98: proceedings of the third International Conference on Hydroinformatics*, Vol. 2, pp. 1403-1410, Leiden, The Netherlands. ISBN: 9789054109853. Available: <http://sapientia.ualg.pt/bitstream/10400.1/124/1/MARThr.pdf>
- Martins, F.; Neves, R.; Leitão, P.; Silva, A. (2001) - 3D modeling in the Sado estuary using a new generic coordinate approach. *Oceanologica Acta*, 24(Supplement 1):51-62. DOI: 10.1016/S0399-1784(01)00092-5.
- Miranda, R.; Braunschweig, F. ; Leitão, P. ; Neves, R. ; Martins, F. ; Santos A. (2000) – MOHID 2000 - A coastal integrated object oriented model. *In: W.R. Blain & C.A. Brebbia (eds.), Ecology and the Environment (Hydraulic Engineering Software VIII)*, 40:393-401. DOI: 10.2495/HY000371.
- Paola, C. (2000) – Quantitative models of sedimentary basin filling. *Sedimentology*, 47(Supplement):121-178. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2000.00006.x
- Paola, C.; Heller, P.L.; Angevine, C.L. (1992) – The large-scale dynamics of grain-size variation in alluvial basins, 1: Theory. *Basin Research*, 4(2):73-90, Laramie, WY, U.S.A. DOI: 10.1111/j.1365-2117.1992.tb00145.x
- Schuttelaars, H.M.; de Swart, H.E. (2000) – Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments. *Journal of Geophysical Research*, 105(C10):24105-24118. DOI: 10.1029/2000JC900110.
- Schwarzacher, W. (1966) – Sedimentation in a subsiding basin. *Nature*, 210(5043):1349-1350. DOI: 10.1038/2101349a0.
- Tipper, J.C. (1992) – Landforms developing and basing filling: Three-dimensional simulation of erosion, sediment transport, and deposition. *In: R. Pflug & J.W. Harbaugh (eds.), Computer Graphics in Geology. Lectures Notes in Earth Sciences*, Vol. 41, pp.155-170. Springer-Verlag, Berlin, Germany. DOI: 10.1007/BFb0117794.
- Wentworth, C.K. (1922) – A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5):377-392. Available <http://www.jstor.org/stable/30063207>.
- Werner, B.T. (1999) – Complexity in natural landform patterns. *Science*, Vol. 284, 284(5411):102-104. DOI: 10.1126/science.284.5411.102.

Qualidade recreacional e capacidade de carga das praias do litoral norte do estado da Bahia, Brasil *

Recreational quality and carrying capacity of Bahia State Northern coast beaches, Brazil

Iracema Reimão Silva^{@, 1}, Abílio Carlos da Silva Pinto Bittencourt²,
J. A. Dias³, José Rodrigues de Souza Filho⁴

RESUMO

O litoral norte do estado da Bahia compreende sete municípios - Lauro de Freitas, Camaçari, Mata de São João, Entre Rios, Esplanada, Conde e Jandaíra - em aproximadamente 200 km de litoral. Os três primeiros apresentam um litoral com urbanização consolidada ou em processo de consolidação, já os demais, apresentam, na maioria de sua extensão, praias desertas ou semi-desertas, com pouca ou nenhuma urbanização do seu litoral. Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade recreacional e a capacidade de carga das praias do litoral norte da Bahia, bem como os seus limites ecológicos, oferecendo subsídios aos planos de uso e ocupação deste litoral. A qualidade recreacional das praias estudadas foi avaliada a partir da análise de 20 (vinte) indicadores de qualidade geoambiental e 12 (doze) de infraestrutura, classificados em diferentes graus de atratividade. De acordo com o método de estudo empregado, as praias de Vilas do Atlântico, Buraquinho, Itacimirim, Praia do Forte, Imbassaí e Subaúma foram classificadas como de alta qualidade recreacional, e as praias de Busca Vida, Interlagos, Santo Antônio, Porto Sauípe, Massarandupió, Baixio e Sitio do Conde como de baixa qualidade recreacional. No primeiro caso, a maior parte das praias apresentou zonas abrigadas para banho e uma boa oferta de restaurantes e meios de hospedagem, não existindo evidências de lançamento de efluentes, nem estruturas antropogênicas que dificultem o uso. Já naquelas classificadas como de baixa qualidade recreacional, em geral, não existem zonas abrigadas para banho nem uma boa infraestrutura turística e de serviços. Com relação à capacidade de carga, as praias de Buraquinho, Vilas do Atlântico, Ipitanga, Itacimirim, Interlagos, Santo Antônio, Praia do Forte e Barra do Itariri apresentaram os menores valores de capacidades de carga (inferiores a 10.000 pessoas/dia), considerando uma área ideal de 10 m²/usuário. Por outro lado, as praias com maior capacidade de carga, acima de 30.000 usuários/dia, são as de Massarandupió, Sitio do Conde, Baixio e Costa Azul. As praias de Buraquinho, Barra do Jacuípe, Itacimirim, Praia do Forte, Imbassaí, Porto Sauípe, Massarandupió, Baixio, Barra do Itariri, Costa Azul e Mangue Seco apresentaram um limite ecológico mais restritivo para a capacidade de carga - estabelecido com base em características da cobertura vegetal, número de ecossistemas nas

@ - Autora correspondente: iracema@pesquisador.cnpq.br; silvair@ufba.br

1 - Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente, Instituto de Geociências, Rua Caetano Moura, 123 - Federação - CEP40210-340 - Salvador, Bahia, Brasil.

2 - Universidade Federal da Bahia, Laboratório de Estudos Costeiros, CPGG, Instituto de Geociências, Rua Caetano Moura, 123 - Federação - CEP40210-340 - Salvador, Bahia, Brasil.

3 - CIMA - Centro de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Algarve, Edifício 7, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal.

4 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Campus Uruçuca. Rua Dr. João Nascimento S/Nº - Centro Uruçuca, Bahia, Brasil.

proximidades da praia e densidade de construções fixas - e apenas a praia de Ipitanga apresentou um limite ecológico menos restritivo. Por fim, recomenda-se que os planos de gestão considerem de forma integrada as características recreacionais das praias, baseadas em parâmetros geoambientais e de infraestrutura, e a sua capacidade de carga, considerando os limites ecológicos e de acomodação destas praias.

Palavras-chave: qualidade recreacional, capacidade de carga, gerenciamento costeiro.

ABSTRACT

The Beaches of Bahia State Northern Coast are stretched over seven municipalities - Lauro de Freitas, Camaçari, Mata de São João, Entre Rios, Esplanada, Conde and Jandaíra - approximately 200 km of coastline. The first three counties are closer to the Salvador Metropolitan Area (the State Capital). They include mostly urbanized and developed coastline segments, or sections being developed. The remaining counties present mostly pristine or uninhabited coastlines interrupted by occasional lightly-occupied areas. This study is aimed at evaluating the recreational quality and carrying capacity of these beaches, as well as its ecological constraints, providing scientific basis for local development planning. The recreational quality of these beaches was evaluated based on an approach involving indicators geo-environmental quality indicators (twenty) and available infrastructure (twelve). These indicators were identified and described during fieldwork (data collecting) undertaken between October 2010 and January 2011. The indicators were classified under three different levels of attractiveness: 1 for the lowest and 3 for the highest quality. The average area occupied per person (current scenario) was estimated for all beaches. The available area was measured and the carrying capacity was estimated based on "user perception" of "ideal occupation" for recreational activities. According to this approach, the beaches of Vilas do Atlântico, Buraquinho, Itacimirim, Praia do Forte, Imbassaí and Subaúma were classified as providing high recreational quality for their users. Conversely, the beaches of Busca Vida, Interlagos, Santo Antônio, Porto Sauípe, Massarandupió, Baixio and Sitio do Conde were classified as providing low recreational quality. In the first group, most beaches had naturally sheltered areas allowing safe water activities and a reasonable service infrastructure (restaurants and lodging). In addition, these beaches are apparently free of sewage and other man-made structures impacting recreational activities. Most beaches classified as providing low recreational quality offered no naturally protected areas for water activities or acceptable recreational infrastructure such as restaurants, snack bars, restrooms, lodging, etc. Regarding the carrying capacity analysis, the beaches of Buraquinho, Vilas do Atlântico, Ipitanga, Itacimirim, Interlagos, Santo Antonio, Praia do Forte and Barra do Itariri presented recreational area during low tide inferior to 100,000 m², comprising the lowest values for carrying capacity (<10,000 people/day). The study assumes 10 m²/person (user) as the ideal carrying capacity scenario. The beaches classified as having superior carrying capacity are Massarandupió, Sitio do Conde, Baixio and Costa Azul, all superior to 300,000 m² and carrying capacity beyond 30,000 users/day. Buraquinho, Barra do Jacuípe, Itacimirim, Praia do Forte, Imbassaí, Porto Sauípe, Massarandupió, Baixio, Barra do Itariri, Costa Azul and Mangue Seco beaches presented more restrictive carrying capacity limits – based on parameters such as plant cover, vulnerable ecosystems (mangroves, coral reefs, lagoons and dunes) near the coastline and density of man-made permanent structures within the coastal strip (50 meters from the shoreline). Only Ipitanga beach presented less restrictive ecological limits. The remaining beaches of Costa dos Coqueiros Region showed intermediate ecological limits. Therefore, most beaches included in the present study should have implemented tools for limiting their use based on their ability to accommodate users and provide them with recreational services. Although Ipitanga beach has presented less restrictive ecological limits, one must be aware of its low carrying capacity. Tourism and beach development planning must take into account geo-environmental and infrastructure constraints for they will affect recreational quality. Beaches providing superior recreational quality tend to attract more users but occupation must respect local ecological limits. Therefore, each beach must be dedicated to uses consistent with their capabilities and constraints.

Keywords: recreational quality, carrying capacity, local development planning.

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, as praias, com as suas diversas possibilidades de usos recreacionais, além do seu valor cênico e ecológico, constituem uma das principais motivações vultuosos investimentos (Hall, 2001; Midaglia, 2001; Coriolano & Silva, 2005; Ergin *et al.*, 2006). Neste contexto, a avaliação da qualidade recreacional das praias através de indicadores geoambientais e das infraestruturas existentes, pode orientar os planos de gestão municipal, direcionando investimentos, de forma a garantir uma melhor utilização do litoral.

Por outro lado, o aumento do uso das praias como recurso recreacional criou a necessidade de se estabelecer a sua capacidade de carga, representando o número máximo de utilizadores que podem ser acomodados em uma determinada praia sem detrimento da sua qualidade recreacional (Archer & Cooper, 2001; Williams & Gill,

2001; Silva, 2002; Polette & Raucci, 2003; Silva *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2009). Todavia, em tais trabalhos nota-se, em geral, uma preocupação e uma ênfase focadas muito mais em questões sociais, com estudos baseados principalmente na capacidade de acomodação do que na sustentabilidade dos sistemas naturais. Uma outra questão a ser considerada é que, como a capacidade de carga tem como base a área útil de praia e esta é determinada num determinado momento para ser utilizada nos vários anos seguintes, por vezes os próprios investimentos (urbanos, infra-estruturais e outros) são guiados por esse valor de capacidade de carga. Todavia, como a praia é um sistema muito dinâmico, a área útil, ou faixa recreativa, é variável, sendo maior em uns anos e menor em outros, o que significa que a capacidade de carga também pode variar de maneira significativa.

Existe uma grande dificuldade em se estabelecer qual o limite de alteração dos sistemas naturais, induzida por

atividades recreacionais, que se poderia considerar aceitável nos ecossistemas costeiros, uma vez que uma situação ideal, que deve ser usada como parâmetro de comparação, depende do comportamento e preferência dos usuários. No que tange à preferência, como apontam Haggett (2001) e Morgan (1999), a percepção dos visitantes sobre as qualidades ambiental e recreacional de uma praia pode ser influenciada por diversos fatores que, por sua vez, refletirão em diferentes preferências de usos. Quanto ao comportamento, Polette & Raucci (2003), por exemplo, o consideram como um fator indutor de muitos problemas resultantes do uso recreacional das praias. Dessa maneira, o comportamento e a preferência dos usuários constituem fatores dinâmicos e diferenciados que podem variar amplamente com o tipo de usuário, do local e do período analisado, relativizando, assim, o estabelecimento de níveis de tolerância a eventuais alterações nos ecossistemas costeiros. Por outro lado, embora no entendimento de Murphy (2001) e Williams & Gill (2001) a ênfase deva ser dada para as condições desejáveis

para uma área e não para a carga de uso que ela pode tolerar, o estabelecimento de parâmetros de tolerância de uso, sejam eles ecológicos, de infraestrutura ou sociais, gera subsídios importantes para os planos de gestão.

A vocação turística da costa do estado da Bahia tem sido comprovada através de vultosos investimentos turísticos implementados especialmente nas últimas duas décadas, gerando uma intensificação nos processos de urbanização e ocupação do litoral (Silva *et al.*, 2008). O litoral norte do estado da Bahia, denominado Costa dos Coqueiros, compreende sete municípios: Lauro de Freitas, Camaçari, Mata de São João, Entre Rios, Esplanada, Conde e Jandaíra (Fig. 1). Ele abriga uma diversidade natural que inclui ecossistemas variados - dunas, lagos, recifes de corais, manguezais, brejos e praias - em aproximadamente 200 km de litoral. Essa diversidade ecológica, ao lado de uma facilidade de acesso, desperta a atração de visitantes e empresários, representando hoje um importante vetor de crescimento turístico do Estado da Bahia (Silva *et al.*, 2008).

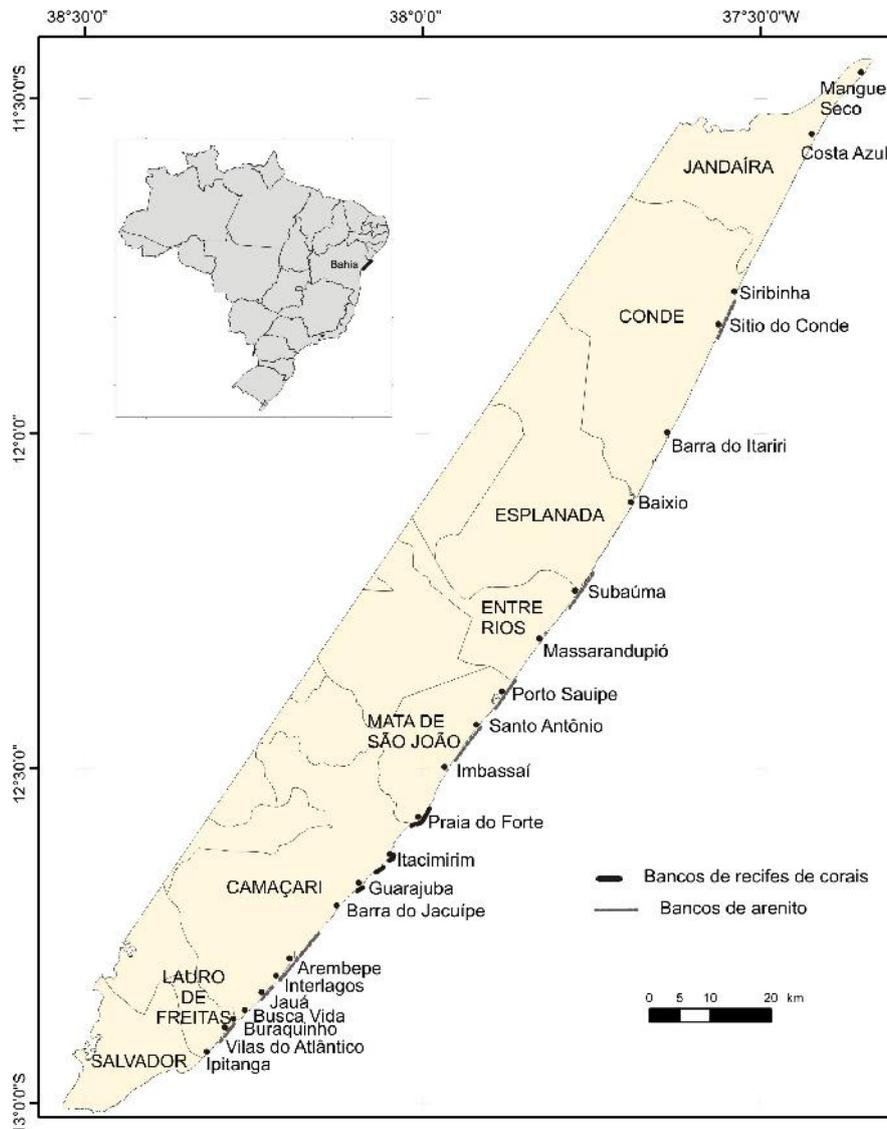


Figura 1. Limites municipais, praias estudadas e localização dos bancos de arenito e recifes de coral no Litoral Norte do Estado da Bahia.

Figure 1. County limits, studied beaches, sandstone banks and coral reefs on Bahia State Northern Coastline.

A Costa dos Coqueiros apresenta micromarés semidiurnas sem desigualdades, com amplitude média de sizígia situando-se em torno de 1,8 m (Dominguez *et al.*, 1996). É delimitada na sua parte mais interna por depósitos semi-consolidados da Formação Barreiras, (Martin *et al.*, 1980; Dominguez *et al.*, 2009), de idade miocênica (Suguio & Nogueira, 1999). Depósitos quaternários, representados fundamentalmente por terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos são encontrados em quase toda a extensão da região costeira, bem como um cordão-duna ao longo de quase toda a linha de costa (Martin *et al.*, 1980). Localmente, ocorrem também depósitos flúvio-lagunares e um extenso campo de dunas na região de Mangue Seco. Ainda ao longo da linha de costa ocorrem, pontualmente, bancos de recifes de corais e de arenitos de praia (Martin *et al.*, 1980, Dominguez *et al.*, 1996, Leão & Kikuchi, 1999). Todos esses locais formam conjuntos de inegável beleza cênica, o que justifica a forte atração para as atividades de turismo, recreação e lazer.

A ocupação da Costa dos Coqueiros não tem se dado de forma homogênea. O município de Lauro de Freitas, localizado na zona metropolitana de Salvador, apresenta um grau de urbanização elevado, com adensamento urbano concentrado principalmente no seu litoral. O município de Camaçari apresenta duas situações diferenciadas em relação à ocupação de seu litoral: praias que se inserem dentro de condomínios fechados - e que, muitas vezes, dificultam o acesso aos banhistas, ainda que esta seja uma prática inconstitucional - como Busca Vida e Interlagos, e praias que apresentam, na maior parte de sua extensão, acesso aberto ao público em geral, como Arembepe e Jauá. Ainda que nesses dois casos a urbanização seja intensa, a ocupação do espaço se dá de forma diferenciada, no primeiro caso existindo um padrão de ocupação com um maior ordenamento do uso do espaço, o que não é observado no segundo, com uma ocupação livre do espaço costeiro. A partir do município de Mata de São João para norte, o litoral apresenta apenas alguns pequenos núcleos urbanizados, como em Subaúma, Baixio e Sítio do Conde, e extensos trechos de praias desertas (Silva *et al.*, 2008; Bittencourt *et al.*, 2010). Para os próximos anos, contudo, estão previstos grandes investimentos para esta região, como, por exemplo, o que é noticiado pelo jornal "A Tarde" de 28/12/2008: cerca de 750 milhões de reais para a construção de equipamentos turísticos e residenciais em Baixio, o que deverá impactar fortemente este trecho do litoral. Neste contexto, além do conhecimento já disponível no que tange à dinâmica sedimentar costeira da região de estudo (*e.g.*, Bittencourt *et al.*, 2010; Dominguez *et al.*, 1996), é de fundamental importância a realização de estudos referentes à qualidade recreacional e capacidade de carga das suas praias, bem como aos limites ecológicos da região em apreço, que possam subsidiar os planos de uso e ocupação deste litoral. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo a realização de tais estudos nas praias que apresentam as maiores demandas por usuários ao longo da Costa dos Coqueiros.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Avaliação da qualidade recreacional das praias

A qualidade recreacional das praias da Costa dos Coqueiros foi avaliada a partir da análise de indicadores de qualidade

geoambiental e de infraestrutura, extraídos de Leatherman (1997), Silva *et al.*, (2003) e Araújo & Costa (2008). Para tanto, foram utilizados, para aplicação no presente trabalho, os indicadores aqui considerados como mais significativos para o alcance dos objetivos propostos, sendo 20 indicadores de qualidade geoambiental (Tabela 1) e 12 de infraestrutura para uso recreacional (Tabela 2), avaliados a partir de caminhamentos feitos ao longo das praias estudadas no período entre outubro de 2010 e janeiro de 2011 (primavera/verão), durante finais de semana e feriados, nos horários de maior frequência de banhistas (12 às 15h).

Quanto aos critérios propostos pelos autores acima citados para a avaliação desses indicadores, no presente trabalho foram feitas poucas modificações, em função das características locais. Neste estudo, devido à grande variabilidade de preferências dos usuários em diferentes locais, todos os indicadores foram considerados com o mesmo peso na determinação da qualidade das praias.

Os indicadores foram classificados em diferentes graus de atratividade, sendo para cada um deles atribuídos valores de 1 a 3 (1- baixa qualidade; 2- qualidade intermediária; 3- alta qualidade). Os indicadores 7 e 19 (Tabela 1) foram classificados em apenas duas categorias. A qualidade recreacional de cada praia foi expressa pela média aritmética dos valores atribuídos a cada um dos indicadores geoambientais e de infraestrutura. Esta média aritmética, conforme indicado no Tabela 6, foi feita dividindo-se o somatório dos valores encontrados para cada praia por 32, que representa o número de indicadores considerados na análise.

Como, em geral, as praias apresentaram significativas variações espaciais, tanto ambientais como de ocupação e infraestrutura, foram consideradas as características representativas dos trechos de maior demanda para atividades recreacionais, tendo sido padronizada uma extensão de 1 km dentro da área de maior uso destas praias, segundo observação local.

2.1.1 Indicadores da Qualidade Geoambiental (Tabela 1)

Na avaliação de áreas para banho, no que tange ao grau de exposição às ondas (indicador 1), foram consideradas como praias expostas aquelas com franca atuação das ondas; como praias parcialmente abrigadas, aquelas onde bancos de arenito de praia ou de recifes de corais criam localmente uma pequena região protegida; e, como praias abrigadas, aquelas onde estas estruturas protegem a costa da ação das ondas em pelo menos 50% da extensão da praia.

Com relação à vulnerabilidade de processos erosivos (indicador 9), foram consideradas como praias com vulnerabilidade baixa a erosão aquelas que não apresentam evidências de erosão; com vulnerabilidade alta, as praias com significativas evidências de erosão (escarpa erosiva nos terraços marinhos holocênicos ou no cordão-duna, coqueiros caídos, coqueiros com raízes expostas e existência de estruturas de proteção) na maior parte de sua extensão e, com vulnerabilidade média, as praias com algumas evidências pontuais desses indicadores de erosão, conforme critérios utilizados em Silva *et al.*, (2007).

As estruturas antropogênicas (indicador 10) (normalmente estruturas de proteção contra erosão, como

muros de contenção e enrocamentos) ou naturais (indicador 11) (normalmente bancos de arenito) que dificultam o uso da praia foram consideradas como poucas quando ocupam uma extensão inferior a 30% do comprimento da praia e, muitas, quando ocupam uma extensão superior a esta.

Na avaliação da tipologia do litoral (indicador 12), foi considerada como muito urbanizada a praia com mais de 70% de construções fixas em uma faixa costeira de 50m a partir da linha de preamar máxima; pouco urbanizada, com 30 a 70% de construções e, abaixo de 30%, foi considerada como muito pouco urbanizada, seguindo critérios de percentuais utilizados em Silva *et al.*, (2008).

Foram consideradas como evidências de descarga de esgoto (indicador 19) a) a constatação visual de esgoto na praia, b) as informações de moradores ou comerciantes locais sobre esse tipo de ocorrência e, c) quando da presença de estruturas (como fossas) que indiquem a descarga eventual de esgotos, já que não existem análises disponíveis acerca da balneabilidade destas praias. Com relação às presenças de óleo ou piche, algas e água viva (respectivamente, indicadores 16, 18 e 20), foram consideradas como freqüentes quando de ocorrências superiores a dez itens por quilômetro linear de praia e, com pouca quantidade, quando inferiores a este valor.

2.1.2. Indicadores da Qualidade de Infraestrutura (Tabela 2)

Para os indicadores referentes à presença de sanitários e banheiros (indicador 1), lanchonete, bares e restaurantes (indicador 2), meios de hospedagem (indicador 3), telefone público (indicador 5), facilidades para recreação (indicador 6) e animais domésticos (indicador 12), foram considerados como poucos quando constatados menos de três ocorrências ao longo do quilômetro de praia e zona costeira adjacente (até 50m a partir da zona de pós-praia) analisados. No caso da presença de estacionamento (indicador 4), foi considerada a disponibilidade de vagas para veículos levando em conta a demanda de cada praia, a partir da estimativa visual das condições de estacionamento durante o verão. O transporte público (indicador 7) foi considerado restrito quando está disponível apenas em um ponto específico dentro do trecho analisado.

2.2 Avaliação da capacidade de carga

Os mesmos trechos de 1 km selecionados para a avaliação da qualidade recreacional das praias estudadas no presente trabalho foram utilizados para a avaliação da capacidade de carga das mesmas. Esses trechos foram segmentados em células de 50 m de comprimento (compreendendo as zonas do pós-praia e da face da praia) e medidas, em cada uma delas, as suas larguras inicial e final. A partir desses valores foi calculada a área de cada célula. Em cada célula foi então realizada a contagem do número de pessoas. Essas contagens foram sempre realizadas no horário de 11:00 às 16:00 h, considerado como de maior freqüência pela observação do local, o que foi confirmado a partir de fotografias. Para isso, considerou-se a Praia do Forte como referência, sendo fotografada entre 8:00 e 18:00 horas, a cada hora, a fim de possibilitar a identificação do fluxo de usuários durante o

dia. Buscou-se sempre realizar a contagem, bem como as medidas de cada célula de praia, durante finais de semana e feriados, quando havia um maior fluxo de frequentadores e em horários durante ou próximos à baixa-mar. Foi então calculada a relação entre a área de cada célula e o número de frequentadores, encontrando, assim, a área, em metros quadrados, de praia disponível para cada usuário. A contagem dos frequentadores foi realizada nas zonas denominadas de ativa (face da praia, local próximo ao mar e usado, por exemplo, para a prática de jogos como frescobol) e de *solarium* (pós-praia, local onde as pessoas tomam banho de sol e usam cadeiras e sombreros) (Pollete & Raucci, 2003). Durante esta contagem, nas praias de Arembepe, Praia do Forte e Baixo () - representativas, respectivamente, de condição de uso intenso, intermediário e baixo - foram realizadas, de maneira aleatória, 40 entrevistas intencionais em cada uma delas, sendo os usuários questionados quanto ao tamanho da área de praia que consideram ideal para o seu uso, indicado a partir de fotografias tiradas previamente nestas praias, representando três situações diferentes de ocupação da praia: com 1 a 4, 4 a 8 e 8 a 12 m² disponíveis por usuário. Assim, para cada praia estudada foi estimada a) a área média utilizada por usuário (nível de uso atual), b) a área disponível para acomodação dos usuários e c) a capacidade de carga a partir da percepção predominante entre os usuários das praias de Arembepe, Praia do Forte e Baixo quanto ao tamanho da área de praia ideal que consideram para seu uso.

2.3 Avaliação do limite ecológico da capacidade de carga (Tabela 3)

Segundo Silva (2002), a capacidade de carga ecológica pode ser definida como o limite máximo de uso recreativo que uma determinada área ou ecossistema pode suportar sem que ocorra um declínio irreversível de seus valores ecológicos, ou seja, sem que o limite de resiliência seja ultrapassado. O limite de uso, estabelecido geralmente em planos de gestão, normalmente variam de acordo com os parâmetros de impacto avaliados, definidos principalmente em função dos objetivos de gestão de cada área, devendo-se considerar sempre os limites de resiliência dos sistemas naturais.

Como consideram Silva *et al.*, (2008), nos locais de maior demanda turística a vegetação original na beira-mar (no pós-praia e zona costeira adjacente) é, geralmente, retirada, sendo substituída por uma vegetação exógena, ou cede lugar para a construção de restaurantes, casas, pousadas, hotéis, etc., sendo este um importante parâmetro de avaliação da alteração da paisagem costeira (Cin & Simeoni, 1994). Essas construções alteram a paisagem natural, dificultam o acesso à praia e interferem na dinâmica costeira. Além disso, em praias com grande demanda recreacional, o pisoteio pode danificar a vegetação, especialmente em praias com dunas, podendo, inclusive amplificar localmente as taxas de recuo da linha de costa devido à movimentação de dunas anteriormente estabilizadas pela vegetação.

A estimativa do limite ecológico da capacidade de carga das praias estudadas neste trabalho foi baseada na avaliação dos seguintes indicadores: a) características da cobertura vegetal, b) número de ecossistemas sensíveis (manguezais, recifes de coral, lagoas e dunas) nas proximidades da praia e

Tabela 1. Indicadores de Qualidade Geoambiental utilizados para as praias do Litoral Norte da Bahia [modificado de Leatherman (1997), Silva et al., (2003) e Araújo & Costa (2008)].

Table 1. Geo-environmental Quality Indicators applied to Bahia State Northern Beaches [modified from Leatherman (1997), Silva et al., (2003) and Araújo & Costa (2008)].

INDICADORES AVALIADOS	GRAU DE ATRATIVIDADE		
	BAIXO (1)	MÉDIO (2)	ALTO (3)
1.Áreas para banho ³	Praia exposta	Parcialmente abrigada	Praia abrigada
2.Grandes ondas (> 1m) quebrando diretamente na face da praia ^{1,2,3}	Frequentes	Ocasionalmente presentes	Ausentes
3.Correntes de retorno ^{1,3}	Frequentes	Ocasionalmente presentes	Ausentes
4.Declividade face da praia ^{1,2,3}	Muito inclinada (> 10°)	Inclinação moderada (5° - 10°)	Pouco inclinada (<5°)
5.Material componente da face da praia ^{1,2,3}	Rocha ou argila	Seixos, grânulos, areia grossa	Areia fina ou média
6.Coloração do sedimento praial ^{1,2,3}	Escura	Bege	Clara (branco)
7.Clareza da água (verão) ^{1,2,3}	Alta turbidez		Baixa turbidez
8.Largura da face da praia na maré baixa ^{1,2,3}	Estreita (<10m)	Intermediária (10 – 30m)	Larga (>30m)
9.Vulnerabilidade à erosão costeira ^{1,3}	Alta	Média	Baixa
1. 10.Estruturas antropogênicas que dificultem a circulação do usuário na praia ^{1,2,3}	Muitas	Poucas	Ausentes
11.Estruturas naturais que dificultem o uso da praia (ex. bancos de arenitos de praia) ^{1,2}	Muitas	Poucas	Ausentes
2. 12.Tipologia do litoral de acordo com o grau de ocupação urbana ^{1,3}	Muito urbanizado	Pouco urbanizado	Muito pouco urbanizado
13.Construções fixas ^{1,3}	No pós-praia	Na zona cost. adjacente ao pós-praia	Ausentes
3. 14.Ecosistemas sensíveis associados à praia (recifes de corais, dunas, manguezais etc) ^{1,3}	Ausentes	Presença de um ecossistema	Presença de pelo menos dois ecossistemas
15.Cobertura vegetal no pós-praia ^{1,3}	Sem vegetação em mais de 50% da extensão	Com vegetação não nativa em mais de 50% da extensão	Com vegetação nativa em mais de 50% da extensão
16.Óleo ou piche na praia ou na água ^{1,3}	Frequente	Pouca quantidade	Ausente
17.Acumulação de lixo marinho (itens por km linear de praia) ^{1,2,3}	> 100 unidades	100 – 30 unidades	< 30 unidades
18.Algas na areia ou na coluna d'água ^{1,3}	Frequentes	Pouca quantidade	Ausente
19.Descarga de esgoto (na praia ou no mar) ^{1,2,3}	Presente		Ausente
20.Água viva ^{1,3}	Frequente	Pouca quantidade	Ausente

Indicadores utilizados por: ¹Leatherman (1997), ²Silva et al. (2003) e ³Araújo e Costa (2008).

Tabela 2. Indicadores de Qualidade de Infraestrutura utilizados para as praias do Litoral Norte da Bahia [modificado de Leatherman (1997), Silva et al., (2003) e Araújo & Costa (2008)].

Table 2. Infrastructure Quality Indicators applied to Bahia State Northern Beaches [modified from Leatherman (1997), Silva et al., (2003) and Araújo & Costa (2008)].

INDICADORES AVALIADOS	GRAU DE ATRATIVIDADE		
	BAIXO (1)	MÉDIO (2)	ALTO (3)
1.Sanitários e banheiros em boas condições ^{1,2,3}	Ausentes	Poucos	Quantidade Adequada
2.Lanchonetes, bares e restaurantes ^{1,2,3}	Ausentes	Poucos	Quantidade Adequada
3.Meios de hospedagem ³	Ausentes	Poucos	Quantidade Adequada
4.Estacionamento ³	Ausente	Poucos	Quantidade Adequada
5.Telefone público a pouca distância da praia ³	Ausente	Poucos	Quantidade Adequada
6.Facilidades para recreação (quadras, aluguel de caiaques etc) ^{1,2,3}	Ausentes	Poucas	Quantidade Adequada
7.Transporte público ^{1,2,3}	Ausente	Restrito	Disponibilidade Adequada
8.Acesso a praia ^{1,2,3}	Inadequado	Adequado (não pavimentado)	Adequado (pavimentado)
9.Diferença de nível até a praia ³	Desnível, com escada ou rampa inadequadas	Desnível, com escada ou rampa adequadas	Sem desnível
10.Ciclovias ³	Não disponível	Inadequada	Adequada
11.Salva-vidas ^{1,3}	Ausentes	Poucos	Quantidade Adequada
12.Animais domésticos ^{1,3}	Frequentes	Pouco frequentes	Ausentes

Indicadores utilizados por: ¹Leatherman (1997), ²Silva et al. (2003) e ³Araújo e Costa (2008).

Tabela 3. Indicadores utilizados para a avaliação do limite ecológico da capacidade de carga das praias do Litoral Norte da Bahia.

Table 3. Indicators used to assess carrying capacity ecological limits for Bahia State Northern Beaches.

INDICADORES AVALIADOS	ÍNDICE		
	1	2	3
COBERTURA VEGETAL	Com vegetação nativa em mais de 50% da extensão da praia	Com plantação de coqueiros ou outros tipos de culturas não nativas (>50%)	Sem vegetação em mais de 50% da extensão da praia
CONSTRUÇÕES FIXAS	Em menos de 30% da extensão da praia	Entre 30 e 70% da extensão da praia	Em mais de 70% da extensão da praia
ECOSSISTEMAS SENSÍVEIS ASSOCIADOS À PRAIA	Pelo menos dois tipos	Apenas um tipo	Ausência

c) densidade de construções fixas numa faixa costeira de 50 m de largura a partir da linha de costa. Para cada um destes parâmetros foi associado um valor de 1 a 3. O somatório dos valores encontrados foi usado como indicativo de um limite ecológico mais restritivo (valores entre 3 e 5), limite intermediário (valores entre 6 e 7) e um limite ecológico menos restritivo para capacidade de carga (valores entre 8 e 9). Deve-se, contudo, salientar o caráter simplista e experimental desta análise, com um número reduzido de indicadores, que deverá ser ampliada em estudos posteriores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Qualidade Recreacional

As tabelas 4 e 5 mostram, respectivamente, os valores atribuídos, por praia, a cada um dos indicadores avaliados referentes às qualidades geoambiental e de infraestrutura, bem como os índices resultantes de qualidade geoambiental e de infraestrutura, de cada praia, representados pelo somatório destes valores. A variação desses índices ao longo do litoral, bem como o valor médio dos mesmos, estão expressos na figura 2. Por esta figura constata-se que as curvas de variação destes índices apresentam, de uma maneira geral, um notável paralelismo entre as praias de Ipitanga (A) e Baixio (R), o que inexistente daí até Mangue Seco (X). Em relação ao primeiro trecho costeiro, uma região que tem recebido historicamente investimentos em infraestrutura ao longo da linha de costa (Silva *et al.*, 2008), é razoável esperar que, quanto melhores as condições geoambientais das praias, tanto maior deve ser a demanda por elas para recreação e lazer, o que, conseqüentemente, também é esperado ser acompanhado por uma maior oferta de infraestrutura, que, no entanto, pode vir a comprometer a qualidade geoambiental destas praias. Quanto ao segundo trecho costeiro, trata-se de uma área muito pouco antropizada, com características rurais (Alva, 2003; Silva *et al.*, 2008), que não tem sido ainda alvo de significativos investimentos em infraestrutura visando atrair usuários na busca de recreação e lazer (Silva *et al.*, 2008).

A tabela 6 mostra a qualidade recreacional das praias do Litoral Norte do Estado da Bahia, em função dos índices das qualidades geoambiental e de infraestrutura, expressos nas tabelas 4 e 5, respectivamente. Pela tabela 6, constata-se que as praias de Vilas do Atlântico, Buraquinho, Itacimirim, Praia do Forte, Imbassai e Subaúma foram classificadas como de alta qualidade recreacional. Na maior parte destas praias (Tabelas 4 e 5) existem zonas abrigadas para banho e uma boa oferta de restaurantes e meios de hospedagem, não existindo evidências de esgoto (não existem dados de balneabilidade para estas praias), nem estruturas antropogênicas que dificultem o uso (Fig. 3 e 4). Já as praias de Busca Vida, Interlagos, Santo Antônio, Porto Sauípe, Massarandupió, Baixio e Sitio do Conde (Tabelas 4 e 5) apresentaram uma qualidade recreacional baixa, principalmente devido à ausência de zonas abrigadas para banho e a falta de infraestrutura recreacional, como a presença de restaurantes, lanchonetes, sanitários, meios de hospedagem e facilidades para recreação (Fig. 5 e 6).

Deve-se salientar, contudo, que a oferta de equipamentos como bares e restaurantes a beira mar, apesar de aumentarem a qualidade de infraestrutura das praias, muitas vezes

interferem na dinâmica costeira local, acelerando, por exemplo, processos erosivos. Muitos destes empreendimentos não são autorizados pelas prefeituras locais e funcionam de forma irregular.

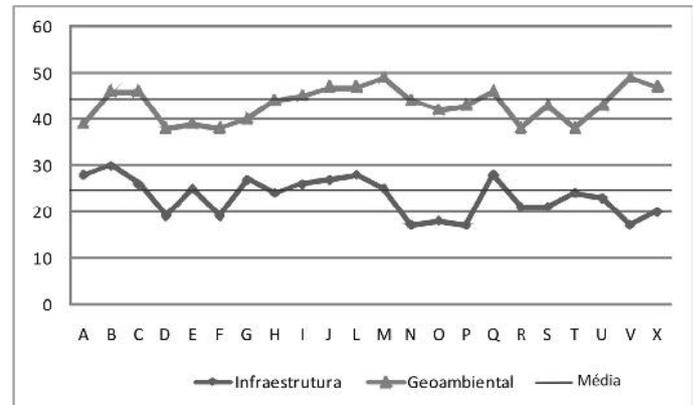


Figura 2. Índices das qualidades geoambiental e de infraestrutura para as praias do Litoral Norte do Estado da Bahia (ver tabelas 4 e 5): A-Ipitanga; B-Vilas do Atlântico; C-Buraquinho; D-Busca Vida; E-Jauá; F-Interlagos; G-Arembepe; H-Barra do Jacuípe; I-Guarajuba; J-Itacimirim; L-Praia do Forte; M-Imbassai; N-Santo Antônio; O-Porto Sauípe; P-Massarandupió; Q-Subaúma; R-Baixio; S-Barra do Itariri; T-Sítio do Conde; U-Siribinha; V-Costa Azul; X-Mangue Seco.

Figure 2. Geo-environmental and infrastructure Indicators for Bahia State Northern Coast Beaches (see Tables 4 and 5): A-Ipitanga; B-Vilas do Atlântico; C-Buraquinho; D-Busca Vida; E-Jauá; F-Interlagos; G-Arembepe; H-Barra do Jacuípe; I-Guarajuba; J-Itacimirim; L-Praia do Forte; M-Imbassai; N-Santo Antônio; O-Porto Sauípe; P-Massarandupió; Q-Subaúma; R-Baixio; S-Barra do Itariri; T-Sítio do Conde; U-Siribinha; V-Costa Azul; X-Mangue Seco.

3.2 Avaliação da Capacidade de Carga

O nível de uso ideal das praias, segundo a percepção dos frequentadores das praias de Baixio, Arembepe e Praia do Forte – na sua maioria originários da própria localidade ou de cidades vizinhas, no caso das duas primeiras, e de outras regiões ou estrangeiros, no caso de Praia do Forte, conforme indicado durante as entrevistas – foi de 8 a 12 m² de área por usuário, tendo sido então utilizado para o cálculo da capacidade de carga ideal o valor médio de 10 m² por usuário. Não se deve desconsiderar, contudo, que foi feita uma aproximação, extrapolando a preferência dos usuários entrevistados na amostragem para um padrão geral representativo das praias analisadas no presente estudo.

O fluxo de usuários durante o período das 8 às 18:00 horas na Praia do Forte (fotos tiradas no dia 9 de janeiro de 2011) aponta para uma maior concentração entre 12 e 15 horas (Fig. 7), o que foi também extrapolado para todas as demais praias do presente estudo.

Tabela 4. Valores atribuídos às praias para cada indicador de qualidade geoambiental avaliado. É também mostrado o índice de qualidade geoambiental de cada praia (ver Tabela 1).
Table 4. Values assigned to beaches regarding each geo-environmental quality Indicator evaluated. It also shows geo-environmental quality indicators for Bahia State Northern Beaches (see Table 1).

INDICADORES AVALIADOS	VALORES ATRIBUÍDOS ÀS PRAIAS PARA CADA INDICADOR AVALIADO																					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	X
1. Áreas para banho	1	2	1	1	2	1	2	1	3	3	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1
2. Grandes ondas (>1m) quebrando diretamente na face da praia	1	2	1	1	2	1	2	1	3	3	3	2	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1
3. Correntes de retorno	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1
4. Declividade da face da praia	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
5. Material componente da face da praia	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6. Coloração do sedimento praiat	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3
7. Clareza da água (verão)	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8. Largura da face da praia na maré baixa	2	2	3	2	2	2	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	3	3	2	2	2	3
9. Vulnerabilidade à erosão costeira	1	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
10. Estruturas antropogênicas que dificultem a circulação do usuário na praia	2	3	3	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
11. Estruturas naturais que dificultem o uso da praia	2	2	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3	2	1	3	3	3
12. Tipologia do litoral de acordo com o grau de ocupação urbana	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	3	2	3	2	3	2	2	3	3	3
13. Construções fixas	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	2	3	1	3	1	1	2	3	3
14. Ecossistemas sensíveis associados à praia	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	1	3	2	1	1	2	2
15. Cobertura vegetal no pós-praia	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2
16. Óleo ou piche na praia ou na água	3	3	3	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
17. Acumulação de lixo marinho	2	3	3	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2
18. Algas na areia ou na coluna d'água	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	3	2	2	2	2
19. Descarga de esgoto	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
20. Água viva	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3
21.																						
22. TOTAL (Índice de Qualidade Geoambiental)	39	46	46	38	39	38	40	44	45	47	47	49	44	42	44	43	46	43	38	43	49	47

PRAIAS: A-Ipitanga; B-Vilas do Atlântico; C-Buraquinho; D-Busca Vida; E-Jauá; F-Interlagos; G-Arembepe; H-Barra do Jacupe; I-Guarajuba; J-Itacimirim; L-Praia do Forte; M-Imbassai; N-Santo Antônio; O-Porto Saupe; P-Massarandupió; Q-Subatama; R-Baixio; S-Barra do Itariri; T-Sítio do Conde; U-Siribinha; V-Costa Azul; X-Mangue Seco.

Tabela 5. Valores atribuídos às praias para cada indicador de qualidade de infraestrutura avaliado. É também mostrado o índice de qualidade de infraestrutura de cada praia (ver Tabela 2).

Table 5. Values assigned to beaches regarding each infrastructure quality indicator evaluated. It also shows infrastructure quality indicators for Bahia State Northern Beaches (see Table 2).

INDICADORES AVALIADOS	VALORES ATRIBUÍDOS ÀS PRAIAS PARA CADA INDICADOR AVALIADO																					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	X
• Sanitários e banheiros	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1
• Lanchonetes, bares e restaurantes	3	2	3	1	3	1	3	2	3	3	3	2	1	1	1	3	2	2	2	2	2	2
• Meios de hospedagem	3	3	2	2	3	1	3	2	3	3	3	3	1	1	1	3	2	2	2	2	1	3
• Estacionamento	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	3	2	2	2	2	1	1
• Telefone público a pouca distância da praia	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1
• Facilidades para recreação	2	2	1	2	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
• Transporte público	3	3	2	2	3	2	3	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	1	2	2	1	2
• Acesso a praia	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1	1	3	2	2	3	3	1	1
• Diferença de nível até a praia	3	3	3	1	1	2	2	2	1	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3
• Ciclovias	1	3	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
• Salva-vidas	2	3	2	1	2	1	3	2	3	3	3	3	1	2	1	3	2	1	1	1	1	1
• Animais domésticos	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3
TOTAL (Índice de Qualidade de Infraestrutura)	28	30	26	19	25	19	27	24	26	27	28	25	17	18	18	28	19	21	24	23	17	20

PRAIAS: A-Ipitanga; B-Vilas do Atlântico; C-Buraquinho; D-Busca Vida; E-Jauá; F-Interlagos; G-Arembepe; H-Barra do Jacuípe; I-Guarajuba; J-Itacimirim; L-Praia do Forte; M-Imbassai; N-Santo Antônio; O-Porto Sauípe; P- Massarandupió; Q-Subaúma; R-Baixio; S-Barra do Itariri; T-Sítio do Conde; U-Siribinha; V-Costa Azul; X-Mangue Seco.

Tabela 6. Qualidade Recreacional das praias do Litoral Norte da Bahia, em função dos índices das qualidades geoambiental e de infraestrutura (ver tabelas 4 e 5).

Table 6. Recreational Quality for Bahia State Northern Beaches, according to geo-environmental and infrastructure quality indicators (see Tables 4 and 5).

PRAIAS	SOMATÓRIO DOS ÍNDICES DE QUALIDADE GEOAMBIENTAL E DE INFRAESTRUTURA	MÉDIA ARITMÉTICA*	QUALIDADE RECREACIONAL 1,8 – 1,9 BAIXA 2,0 – 2,2 MÉDIA 2,3 – 2,4 ALTA**
IPITANGA	67	2,1	MÉDIA
VILAS DO ATLÂNTICO	76	2,4	ALTA
BURAQUINHO	72	2,3	ALTA
BUSCA VIDA	57	1,8	BAIXA
JAUÁ	64	2,0	MÉDIA
INTERLAGOS	57	1,8	BAIXA
AREMBEPE	67	2,1	MÉDIA
BARRA DO JACUÍPE	68	2,1	MÉDIA
GUARAJUBA	71	2,2	MÉDIA
ITACIMIRIM	74	2,3	ALTA
PRAIA DO FORTE	75	2,3	ALTA
IMBASSAI	74	2,3	ALTA
SANTO ANTÔNIO	61	1,9	BAIXA
PORTO SAUÍPE	60	1,9	BAIXA
MASSARANDUPIÓ	60	1,9	BAIXA
SUBAÚMA	74	2,3	ALTA
BAIXIO	59	1,8	BAIXA
BARRA DO ITARIRI	64	2,0	MÉDIA
SÍTIO DO CONDE	62	1,9	BAIXA
SIRIBINHA	66	2,1	MÉDIA
COSTA AZUL	66	2,1	MÉDIA
MANGUE SECO	67	2,1	MÉDIA

*somatório dos índices/ 32 (número total de indicadores)

** 1,8 representa o valor mínimo encontrado e 2,4 o valor máximo.



Figura 3. Praia do Forte – classificada como de alta qualidade recreacional.

Figure 3. Praia do Forte Beach – classified as “high recreational quality”.



Figura 6. Ausência de infraestrutura recreacional na praia de Porto Sauípe.

Figure 6. Lack of recreational infrastructure on Porto Sauípe beach.



Figura 4. Praia de Subaúma – classificada como de alta qualidade recreacional.

Figure 4. Subaúma Beach – classified as “high recreational quality”.



Figura 7. Fluxo de usuários na Praia do Forte durante o período de 8 às 18:00h.

Figure 7. User dynamics in Praia do Forte beach between 8 a.m. and 6 p.m.



Figura 5. Ausência de infraestrutura recreacional na praia de Baixio.

Figure 5. Lack of recreational infrastructure on Baixio beach.

Tabela 7. Área de praia disponível, nível de uso atual e capacidade de carga ideal para as praias da Costa dos Coqueiros.**Table 7.** Beach area available, current use level and ideal carrying capacity Costa dos Coqueiros Beaches.

Município	Praias	Área de praia disponível para acomodação dos usuários *(m ²)	Nível de uso atual por praia (área média utilizada por banh./rec.) (m ²)(jan/ fev de 2011)	Capacidade de carga ***
Lauro de Freitas	Ipitanga	50.000	5,5	5.000
	Vilas do Atlântico	36.000	8	3.600
	Buraquinho	17.500	10	1.750
Camaçari	Busca Vida	120.000	40	12.000
	Jauá	100.000	4	10.000
	Interlagos	60.000	70	6.000
	Arembepe	195.000	2,4	19.500
	Barra do Jacuípe	160.000	12	16.000
	Guarajuba	180.000	6	18.000
	Itacimirim	50.000	18	5.000
	Mata de São João	Praia do Forte	72.000	13,5
Imbassaí		160.000	20	16.000
Santo Antônio		60.000	PD**	6.000
Porto Sauípe		165.000	60	16.500
Entre Rios	Massarandupió	364.000	PD	36.400
	Subaúma	159.000	20	15.900
Esplanada	Baixio	501.000	25	50.100
Conde	Barra do Itariri	80.000	45	8.000
	Sítio do Conde	475.000	50	47.500
	Siribinha	125.000	60	12.500
Jandaíra	Costa Azul	750.000	PD	75.000
	Mangue Seco	280.000	40	28.000

* Calculada a partir da largura da praia (pós-praia e face da praia) na baixa-mar.

** PD – praia deserta no dia da visita.

*** n° de pessoas por dia, considerando um nível de uso, de acordo com a preferência dos entrevistados, de 10 m² por usuário.

A área de praia disponível por usuário em Arembepe, nos locais de maior concentração (Fig. 8, Tabela 7), representa o menor valor encontrado nas praias da Costa dos Coqueiros, sendo inferior àqueles encontrados por Silva *et al.*, (2009) para o trecho de maior concentração de usuários na praia de Itapoá, em Salvador (entre 4 e 10 m²/pessoa), e por Silva *et al.*, (2008), nas praias mais frequentadas de Porto Seguro, no sul da Bahia (entre 6 e 9 m²/pessoa). É também inferior aos encontrados por Silva *et al.*, (2006) na praia de Boa Viagem, em Recife (2,9 e 40,5 m²/pessoa). Estes valores estão também fora do intervalo de conforto proposto por De Ruyck (1997) para praias da África do Sul (6,3 a 25 m²/pessoa).

As praias com menor capacidade de carga social, estimada com base na área de praia disponível para acomodação dos usuários e na área ideal para uso, são as de Buraquinho, Vilas do Atlântico, Ipitanga, Itacimirim, Interlagos, Santo Antônio, Praia do Forte e Barra do Itariri todas com áreas disponíveis para acomodação na maré baixa inferiores a 100.000 m² e com capacidades de carga inferiores a 10.000 pessoas/dia, considerando uma área ideal de 10 m²/usuário (Tabela 7). Por outro lado, as praias com maior capacidade de carga são as de Massarandupió, Sítio do Conde, Baixio e Costa Azul, todas com áreas superiores a 300.000 m² e capacidades de carga acima de 30.000 usuários/dia (Tabela 7). Contudo, na maior parte da extensão destas quatro praias



Figura 8. Uso intenso da praia de Arembepe.
Figure 8. Intensive use on Arembepe beach.

não existe atualmente nenhum tipo de ocupação, sendo áreas com imensas plantações de coqueiros (Fig. 5) ou campos de duna que, em geral, concentram seus usuários apenas em um pequeno trecho, onde existem facilidades de acesso e infraestrutura.

Deve-se ainda salientar que, com relação à definição dos limites de cada praia, utilizados no cálculo da área disponível para acomodação dos usuários, existe normalmente uma dificuldade para estabelecer estes limites, seja em campo ou através de mapas, exceto quando estes são representados por algum elemento fisiográfico, como, por exemplo, no limite norte de Baixo (Fig. 1) (limite definido pelo rio Inhambupe). Esta dificuldade pode gerar uma imprecisão nos valores calculados (Tabela 7), como ocorreu, por exemplo, na definição do limite entre as praias de Massarandupió e Subaúma, entre Siribinha e Sítio do Conde e entre Costa Azul e Mangue Seco. Além disso, devido à escala regional da pesquisa, nomes locais (que não constam em mapas e guias do litoral) associados a um determinado trecho de uma praia não foram considerados, assim, por exemplo, a praia de Baixo foi delimitada ocupando todo o litoral do município de Esplanada.

3.3 Limite Ecológico da Capacidade de Carga

Ao longo do litoral em estudo é muito comum a substituição da vegetação original pela plantação de coqueiros, mantendo características de baixa urbanização, como ocorre, por exemplo, em quase toda a extensão do litoral entre Subaúma e Mangue Seco (Fig. 5) (Tabela 8).

Ao longo da Costa dos Coqueiros, construções fixas à beira-mar estão presentes principalmente na praia de Ipitanga. Em Busca Vida, Jauá, Interlagos, Arembepe e Guarajuba elas ocorrem com percentuais entre 30 e 70% da extensão total da linha de costa (Fig. 9) (Tabela 8).

A ocorrência de ecossistemas sensíveis às ações antropogênicas, como manguezais, recifes de corais, lagoas e dunas, associados à praia, são importantes indicadores de

vulnerabilidade ambiental e sinalizam um limite ecológico mais restritivo. Os recifes de corais ocorrem entre as praias de Barra do Jacuípe e Praia do Forte (Leão, 1996), os manguezais ocorrem normalmente próximos às desembocaduras fluviais, as lagoas são comuns em diversos trechos do litoral, como em Guarajuba e Baixo, e as dunas apresentam uma maior ocorrência nas praias de Santo Antônio, Massarandupió, Costa Azul e Mangue Seco.



Figura 9. Construções fixas na praia de Arembepe.
Figure 9. Man-made structures on Arembepe beach.

As praias de Buraquinho, Barra do Jacuípe, Itacimirim, Praia do Forte, Imbassá, Porto Sauípe, Massarandupió, Baixo, Barra do Itariri, Costa Azul e Mangue Seco apresentaram um limite ecológico mais restritivo para a capacidade de carga e apenas a praia de Ipitanga apresentou um limite ecológico menos restritivo. As demais praias da Costa dos Coqueiros apresentaram um limite ecológico intermediário (Tabela 8).

4. CONCLUSÕES

Ao longo da Costa dos Coqueiros foi constatado haver, de uma maneira geral, um notável paralelismo no comportamento das curvas de variação dos índices de qualidade geoambiental e de infraestrutura das praias entre Ipitanga e Baixo, o que não se observou entre Baixo e Mangue Seco (Fig. 2). No primeiro trecho, mais próximo a Salvador, mais populosos e acessível, apresenta também boas condições geoambientais de suas praias, de uma maneira geral, o que atrairá assim uma maior demanda de usuários e, como decorrência, uma maior oferta de infraestrutura, circunstâncias essas inexistentes no segundo trecho.

Lembrando-se ainda, como dito anteriormente, que um aumento de infraestrutura normalmente vem acompanhado de maiores taxas de uso e maiores riscos de degradação dos seus ecossistemas.

A avaliação conjunta dos índices geoambientais e de infraestrutura indicou uma alta qualidade recreacional para

Tabela 8. Limite ecológico para a capacidade de carga das praias da Costa dos Coqueiros (ver tabela 3).**Table 8.** Ecological constraints for carrying capacity of Costa dos Coqueiros beaches (see Table 3).

PRAIAS	COBERTURA VEGETAL	CONSTRUÇÕES FIXAS	ECOSSISTEMAS SENSÍVEIS	LIMITE ECOLÓGICO DA CAPACIDADE DE CARGA*
Ipitanga	3	3	3	9
Vilas do Atlântico	2	1	3	6
Buraquinho	2	1	2	5
Busca Vida	2	2	2	6
Jauá	2	2	2	6
Interlagos	2	2	2	6
Arembepe	2	2	3	7
Barra do Jacuípe	2	1	2	5
Guarajuba	2	2	2	6
Itacimirim	2	1	2	5
Praia do Forte	2	1	2	5
Imbassaí	2	1	1	4
Santo Antônio	2	1	2	5
Porto Sauípe	2	1	2	5
Massarandupió	2	1	2	5
Subaúma	2	1	3	6
Baixio	2	1	1	4
Barra do Itariri	2	1	2	5
Sítio do Conde	2	1	3	6
Siribinha	2	1	3	6
Costa Azul	2	1	2	5
Mangue Seco	2	1	2	5

* 3 a 5 – mais restritivo; 6 a 7 – intermediário; 8 a 9 – menos restritivo.

as praias de Vilas do Atlântico, Buraquinho, Itacimirim, Praia do Forte, Imbassaí e Subaúma e uma baixa qualidade recreacional para as praias de Busca Vida, Interlagos, Santo Antônio, Porto Sauípe, Massarandupió, Baixio e Sítio do Conde (Tabela 6).

As praias de Buraquinho, Vilas do Atlântico, Ipitanga, Itacimirim, Interlagos, Santo Antônio, Praia do Forte e Barra do Itariri apresentaram as menores áreas disponíveis para acomodação (inferiores a 100.000 m²) e capacidades de carga inferiores a 10.000 pessoas/dia, considerando uma área ideal de 10 m²/usuário (Tabela 7). Já as praias de Massarandupió, Sítio do Conde, Baixio e Costa Azul apresentaram as maiores áreas disponíveis para acomodação (superiores a 300.000 m²) e capacidades de carga superiores a 30.000 usuários/dia (Tabela 7). As praias de Ipitanga, Arembepe, Jauá, Guarajuba

e Vilas do Atlântico (Fig. 1), no que tange ao nível de uso atual, são as únicas do litoral norte que apresentaram valores de área disponível por usuário inferiores a 10 m² (Fig. 8).

As praias que apresentaram um limite ecológico mais restritivo para a capacidade de carga (Buraquinho, Barra do Jacuípe, Itacimirim, Praia do Forte, Imbassaí, Porto Sauípe, Massarandupió, Baixio, Barra do Itariri, Costa Azul e Mangue Seco) (Tabela 8) devem, preferencialmente, experimentar maiores restrições de uso, evitando, por exemplo, o “turismo de massa” ou em grandes grupos, ou seja, vocacionando-as para outro tipo de turismo, como, por exemplo, o ecoturismo. Ademais, nestas praias devem ser respeitados os limites legais impostos pela Constituição do Estado da Bahia (Capítulo VIII) que proíbe qualquer construção, inclusive muros, numa faixa de 60 m a partir da linha de preamar máxima.

Esta restrição deve ser observada especialmente para praias como Buraquinho, Itacimirim, Praia do Forte e Imbassaí que apresentaram um baixo limite ecológico (Tabela 8) e uma alta qualidade recreacional (Tabela 6), o que se reflete em uma alta demanda turística. Some-se a isso o fato de estas praias apresentarem uma baixa capacidade de carga (Tabela 7).

Outras praias, como Baixo e Costa Azul, ainda preservam suas características naturais, alteradas apenas pelas extensas plantações de coqueiros, que ocupam quase todo o litoral de Subaúma a Mangue Seco (Fig. 9). Nestas praias, desertas ou semi-desertas, apesar de sua ampla capacidade de carga (acima de 50.000 pessoas por dia), seria recomendável gerenciá-las no sentido de restringir a sua capacidade de carga (ou seu nível de uso) devido ao seu limite ecológico ser baixo e, por isso, mais restritivo (Tabela 8). Em geral, a infraestrutura recreacional é muito precária nestas praias e a ocorrência de grandes ondas e correntes de retorno (Tabela 4) diminuem a sua segurança para banho. Por outro lado, a praia de Ipitanga, com características claramente urbanas, apresenta, entre todas as praias analisadas, o limite ecológico menos restritivo (Tabela 8), devendo-se atentar, contudo, para a sua baixa capacidade de carga (Tabela 7).

Por fim, acreditamos que os resultados do presente estudo poderão fornecer significativos subsídios para a gestão ambiental da Costa dos Coqueiros, auxiliando na tomada de decisões a respeito de investimentos para o desenvolvimento do setor de turismo e sua compatibilização com as questões relativas ao uso do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo financiamento da pesquisa e I. R. Silva e A. C. S. P. Bittencourt agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

- Alva, E.N. (2003) - *Vetor Norte: um projeto de desenvolvimento sustentável para o Litoral Norte da Bahia*. 65p, Fundação Onda Azul/MMA/Conder, Salvador, BA, Brasil. Disponível em <http://www.ondazul.org.br/downloads/arquivos/25.pdf>
- Araujo, M.C.B. de; Costa, M.F. (2008) - Environmental Quality Indicators for Recreational Beachs Classification. *Journal of Coastal Research*, 24(6):1439-1449, doi: 10.2112/06-0901.1.
- Archer, B.; Cooper, C. (2001) - Os Impactos positivos e negativos do turismo. In: Theobald, W.F. (org.), *Turismo Global*, pp.10-20, Editora Senac, São Paulo, Brasil. ISBN: 8573591773.
- Bittencourt, A.C.S.P.; Livramento, F.C.; Dominguez, J.M.L.; Silva, I.R. (2010) - Tendências de longo prazo à erosão costeira num cenário perspectivo de ocupação humana: litoral norte do estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências* (ISSN: 2177-4382), 40(1):125-137. Disponível em <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/rbg/article/view/14592/13311>
- Cin, R.D.; Simeoni, U. (1994) - A Model for Determining the Classification, Vulnerability and Risk in the Southern Coastal Zone of the Marche (Italy). *Journal of Coastal Research*, 10(1):18-29.
- Coriolano, L.N.M.T.; Silva, S.B.M. (2005) - *Turismo e Geografia: abordagens críticas*. 173p., Editora UECE, Fortaleza, Brasil. ISBN: 8575642588
- De Ruyck, M.C.; Soares, A.G.; McLachlan, A. (1997) - Social Carrying Capacity as a Management Tool for Sandy Beaches. *Journal of Coastal Research*, 13(3): 822-830.
- Dominguez, J.M.L.; Andrade, A.C.S.; Almeida, A.B.; Bittencourt, A.C.S.P. (2009) - The Holocene Barrier Strandplains of the State of Bahia. In: Dillenburg, S. R. & Hesp, P.A. (eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil (Lecture Notes in Earth Sciences)*, pp. 253-288, Springer-Verlag, Berlin / Heidelberg, Alemanha. ISBN: 978-3540250081.
- Dominguez, J.M.L.; Leão, Z.M.A.N.; Lyrio, R.S. (1996) - *Litoral Norte do Estado da Bahia*. XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia, Roteiro de Excursão, 67p., Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, SP, Brasil
- Ergin, A.; Williams, A.T. & Micaleff, A. (2006) - Coastal Scenery: Appreciation and Evaluation. *Journal of Coastal Research*, 22(4): 958-964. DOI: 10.2112/04-0351.1
- Haggett, P. (2001) - *Geography: A Global Synthesis*. 4ª edição, 833p., Prentice Hall, Harlow, Inglaterra. ISBN: 978-0582320307.
- Hall, C.M. (2001) - Trends in ocean and coastal tourism: the end of the last frontier? *Ocean & Coastal Management*, 44(9-10):601-618. DOI: 10.1016/S0964-5691(01)00071-0
- Leão, Z.M.A.N. (1996) - The coral reefs of Bahia: morphology, distribution and the major environmental impacts. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (ISSN: 0001-3765), 68(3):439-452, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Leão, Z.M.A.N.; Kikuchi, R.K.P. (1999) - The Bahian Coral Reefs – from 7000 years BP to 2000 years AD. *Ciência & Cultura* (ISSN 0009-6725), 51:262-273, Campinas, SP, Brasil.
- Leatherman, S.P. (1997) - Beach Rating: A Methodological Approach. *Journal of Coastal Research*, 13(1):253-258.
- Martin, L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Vilas Boas G.S.; Flexor J.M. (1980) - Texto Explicativo para o Mapa Geológico do Quaternário Costeiro do Estado da Bahia. 57p, Companhia de Pesquisa Mineral, Secretaria de Minas e Energia, Salvador, BA, Brasil.
- Midaglia, C.L.V. (2001) - Turismo e Meio Ambiente no Litoral Paulista: Dinâmica da Balneabilidade das Praias. In: Lemos, A.I.G. (ed.), *Turismo: Impactos Sócio-Ambientais*, pp-33-56, Editora Hucitec, São Paulo, Brasil. ISBN: 8527103435.
- Morgan, R. (1999) - Preferences and Priorities of Recreational of Beach Users in Wales, UK. *Journal of Coastal Research*, 15(3): 653-667.
- Murphy, P.E. (2001) - Turismo e Desenvolvimento Sustentado. In: Theobald, W.F. (org.), *Turismo Global*. pp. 30-40, Editora Senac, São Paulo, Brasil. ISBN: 8573591773.
- Polette, M.; Raucci, G.D. (2003) - Methodological Proposal for Carrying Capacity Analysis in Sandy Beaches: A Case Study at the Central Beach of Balneário Comboriú (Santa

- Catarina, Brazil). *Journal of Coastal Research*, SI35:94-106.
- Silva, C. Pereira da (2002) - Beach Carrying Capacity Assessment: How important is it? *Journal of Coastal Research*, SI36:190-197.
- Silva, I.R.; Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Silva, S.B.M. (2003) - Uma Contribuição à Gestão Ambiental da Costa do Descobrimento (Litoral Sul do Estado da Bahia): Avaliação da Qualidade Recreacional das Praias. *Geografia* (0100-7912), 28: 397-413, Rio Claro, SP, Brasil.
- Silva, I.R.; Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Silva, S.B.M. (2007) - Potencial de Danos Econômicos Face à Erosão Costeira, Relativo às Praias da Costa do Descobrimento – Litoral Sul do Estado da Bahia. *Pesquisas em Geociências* (ISSN 1807-9806), 34(1):35-44, Porto Alegre, RS, Brasil. Disponível em <http://www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br/3401/03-3401.pdf>
- Silva, I.R.; Bittencourt, A.C.S.P.; Silva, S.B.M.; Dominguez, J.M.L.; Souza Filho, J.R. (2008) - Nível de antropização X nível de uso das praias de Porto Seguro/BA: subsídios para uma avaliação da capacidade de suporte. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 8(1):1-13. http://www.aprh.pt/rgci/pdf/revista8f1_5.pdf
- Silva, I.R.; Souza Filho, J.R.; Barbosa, M.; Rebouças, F.; Machado, R.S. (2009) - Diagnóstico Ambiental e Avaliação da Capacidade de Suporte das Praias do Bairro de Itapoã, Salvador, Bahia. *Revista Sociedade e Natureza* (1982-4513), 21(1):71-84, Uberlândia, MG, Brasil.
- Silva, J.S.; Barbosa, S.C.T.; Leal, M.M.V.; Lins, A.R.; Costa, M.F. (2006) - Ocupação da praia da Boa Viagem (Recife/PE) ao longo de dois dias de verão: um estudo preliminar. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* (ISSN: 1809-9009), 1(2):91-98.
- Silva, S.B.M.; Silva, B.C.N.; Carvalho, S.S. (2008) - Metropolização e turismo no litoral norte de Salvador: de um deserto a um território de enclaves? In: Carvalho, I. & Pereira, G.C. (org.), *Como anda Salvador e sua Região Metropolitana*, pp. 189-211, Edufba, Salvador, BA, Brasil. ISBN: 8523203931. Disponível on-line em http://ufba.academia.edu/GilbertoCorso/Books/933296/Como_Anda_Salvador.
- Suguió, K.; Nogueira, A.C.R. (1999) - Revisão Crítica dos Conhecimentos Geológicos sobre a Formação (ou Grupo?) Barreiras do Neógeno e o seu Possível Significado como Testemunho de Alguns Eventos Geológicos Mundiais. *Geociências* (ISSN: 1980-900X), 18:461-479, Rio Claro, SP, Brasil.
- Williams, P.W.; Gill, A. (2001) - Questões de Gerenciamento da Capacidade de Carga Turística. In: Theobald, W.F. (org.), *Turismo Global*, pp. 45-55, Editora Senac, São Paulo, Brasil. ISBN: 8573591773.

Análise comparativa entre medições in situ e estimativas numéricas na Praia da Cornélia, Costa da Caparica, Portugal *

Comparative analysis between in situ measurements and numerical estimations on Cornélia Beach, Costa da Caparica, Portugal

M. V. L. Rocha ^{@,1}, T. Moura ², C. J. E. M. Fortes ², R. Capitão ², M. M. Bezerra ², F. E. Sancho ²

RESUMO

Este artigo aborda a análise comparativa entre as medições de agitação marítima efectuadas na Praia da Cornélia (Costa da Caparica, Portugal), durante os dias 12 a 14 de Maio de 2010, e os resultados numéricos da aplicação do modelo não-linear do tipo Boussinesq, COULWAVE. Esta análise tem como principal objectivo a avaliação do desempenho deste modelo numérico na simulação da propagação de ondas em condições reais, pretendendo evidenciar, deste modo, as suas potencialidades e limitações.

As condições de fronteira do modelo foram geradas com base em séries temporais de elevação medidas a uma profundidade aproximada de 7.6 m (relativa ao zero hidrográfico – ZH). Os valores numéricos (elevação da superfície livre e a componente transversal da velocidade horizontal) foram obtidos em todo o domínio de cálculo, e em particular, nas posições dos sensores de pressão e de um correntómetro electromagnético colocado junto à linha de costa. Nas posições dos instrumentos são apresentadas análises comparativas no domínio do tempo e estatísticas de conjunto, que servem para a validação das simulações e a quantificação das diferenças observadas entre os resultados numéricos e as medições efectuadas. Analisou-se também a influência nos resultados da escolha de diferentes valores do parâmetro de início da rebentação. Finalmente, apresentam-se também resultados da análise espectral, usando dois métodos espectrais distintos (Fourier e Wavelet), para avaliar a capacidade do modelo COULWAVE na simulação de efeitos não-lineares.

Verificou-se que o modelo simula razoavelmente bem a evolução da onda desde a posição mais ao largo até à praia, antes da ocorrência de rebentação, bem como a velocidade transversal junto à costa. Em geral, tem uma maior capacidade para reproduzir as alturas do que os períodos de onda. É de notar a existência de diferenças por vezes significativas entre os valores medidos e os valores estimados pelo modelo numérico, principalmente nas zonas menos profundas, após a rebentação. No caso da velocidade transversal verifica-se que o modelo simula bastante bem a ordem de magnitude dos valores medidos, mas tem limitações em descrever o seu andamento, verificando-se, em geral, a sobrestimação da componente transversal. Ao nível espectral, o modelo é capaz de representar bastante bem a presença das frequências de maior energia registadas, mas tem dificuldades em representar a forma do espectro e a distribuição de energia por períodos ao longo do tempo, principalmente após a rebentação.

Com esta abordagem pretende-se ter uma maior confiança na utilização generalizada do modelo numérico para caracterização da agitação marítima em zonas costeiras e em escalas temporais e espaciais maiores, necessárias numa perspectiva de gestão costeira operacional.

Palavras-chave: Propagação das ondas, Rebentação, Modelação Numérica, Praia da Cornélia.

@ - Autor correspondente

1 - LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal; CESAM, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal
e-mail: m.rocha@ua.pt,

2 - LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, e-mails: theogrm@gmail.com, jfortes@lnec.pt, rcapitao@lnec.pt, mbezerra@ualg.pt, fsancho@lnec.pt

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis between field data collected on Cornélia beach (Costa da Caparica, Portugal), between the 12th and the 15th of May of 2010 and numerical results obtained with the non-linear 2D COULWAVE model. The ultimate aim of this work is to evaluate the capacity and ability of the model to simulate both the measured wave climate conditions and the horizontal velocity.

The COULWAVE numerical model is based on Boussinesq-type equations, obtained from depth-integration of the continuity and momentum equations, assuming a multi-layer concept, and simulates the propagation of strongly non-linear and dispersive waves, across variable-depth zones. Boundary conditions were constrained based on free-surface elevation time series measured at a 7.6 m depth (Chart datum). Free-surface elevation and cross-shore velocity time series obtained for specific points of the domain were simulated by the model using 30min-long runs, while simulations for the whole domain were only carried on for 300s, due to limited computational capacity.

The numerical results are compared with free-surface elevation time series obtained with pressure sensors and horizontal velocity time series acquired with a current meter positioned near the shoreline. It is also performed a sensibility analysis of the parameter that defines the initial free surface threshold that must be exceeded for a breaking event to initiate: first, it was considered the default value for constant slope beach profiles, 0.65, and then another value, 0.35, advocated by previous authors for bar-through beach profiles.

The primary focuses of the data analysis are time-domain analysis and combined statistics (BIAS, RMSE, IC) of significant wave height and period and maximum, minimum, mean and root-mean-square cross-shore horizontal velocities, aiming the validation of the numerical data. It is further presented, for an example-case, the wave energy spectra using two distinct spectral methods (Fourier and Wavelet).

Overall, the model seems to be fairly capable of simulating the wave characteristics across the shoaling zone as well as the cross-shore velocity along the coast. In general, it has a greater capacity to reproduce the heights of the waves than the periods. It should be noted that there are sometimes large differences between the measured values and the values estimated by the numerical model, especially after the wave breaking.

For the cross-shore velocity, the model simulates quite well the right order of magnitude of the measured values, but it has limitations in describing their behaviour, and, in general, there is an overestimation of this cross-sectional component. In the spectral domain, the model is able to represent quite well the presence of the measured higher-energy frequencies recorded, but presents difficulties representing the spectrum shape and the distribution of energy for periods over time, especially after the break.

This approach aims evaluating the performance of the model on simulating the specific conditions of this particular field place, but also, in a more general way, it intends to enhance the confidence on further applications of COULWAVE to wider and longer spatial and temporal scales, which is fundamental for coastal management purposes.

Keywords: Wave propagation, Wave breaking, Nearshore currents, Numerical modeling, Cornélia beach.

1. INTRODUÇÃO

A zona costeira é uma região de dinâmica complexa, fruto da interacção de diversos agentes naturais, entre os quais o vento, a maré e as ondas gravíticas, particularmente em praias mesotidais.

As ondas geradas pelo vento são consideradas o agente forçador dominante na hidro e morfodinâmica costeira. Com efeito, na sua propagação em zonas costeiras, as ondas podem sofrer os efeitos de diversos fenómenos físicos complexos (como por exemplo, os associados à variação da profundidade, à difracção, à ocorrência de rebentação, à dissipação de energia por atrito de fundo, à sua reflexão total ou parcial em obstáculos) que assumem uma importância fundamental em toda a morfodinâmica da zona costeira, bem como no comportamento de estruturas marítimas aí implantadas. Com efeito, as alterações da fisiografia costeira, as modificações dos balanços sedimentares, problemas como a erosão costeira e conseqüente recuo da linha de costa, o assoreamento de estuários, lagunas ou zonas portuárias e a destruição de estruturas marítimas são conseqüência directa ou indirecta do clima de ondas que se verifica na zona costeira. Como tal, a capacidade de descrever, simular e prever a transformação das ondas, e deste modo, caracterizar o clima de ondas, torna-se essencial para a compreensão dos processos costeiros e para um correcto planeamento e gestão de intervenções costeiras, o que contribui, sem dúvida, para uma gestão da zona costeira de forma integrada e sustentável.

Assim, para um maior conhecimento da agitação marítima, a aquisição de dados de campo para monitorização ambiental in situ e o recurso à modelação numérica têm sido amplamente usados. Com efeito, a monitorização in situ é, sem dúvida, a melhor técnica para a caracterização dos parâmetros de ondas numa dada região costeira, pois os dados obtidos são o resultado dos vários fenómenos que afetam a propagação de ondas que atingem a referida zona costeira.

No entanto, este monitoramento de ondas é feito de forma pontual no espaço e no tempo e requer recursos económicos elevados associados ao investimento inicial dos equipamentos a utilizar e ao custos da sua manutenção, pelo que usualmente não é possível para a maioria das zonas de estudo, com base em medições, definir um regime de agitação marítima nem avaliar os efeitos a médio e longo-prazo da agitação marítima na morfologia e dinâmica sedimentar nessa zona.

Assim, o recurso à modelação numérica para caracterizar os principais processos de propagação de ondas em zonas costeiras é muito vantajoso, pois permite a caracterização espacial da zona a estudar e principalmente uma análise a curto, médio e longo prazo, constituindo, por isso, uma importante ferramenta de gestão costeira.

Neste âmbito, os modelos baseados nas equações estendidas de Boussinesq permitem uma descrição adequada da evolução das ondas marítimas em zonas de profundidade variável, tendo em conta os efeitos da refração, difracção, rebentação e de efeitos não lineares. Um exemplo deste tipo

de modelos é o modelo COULWAVE (Lynett & Liu, 2002), que se baseia nas equações do tipo Boussinesq deduzidas por Wei *et al.* (1995a, b). Lynett e Liu deduziram as equações a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (multi-layer) em que a coluna de água é dividida em várias camadas, admitindo-se um determinado perfil de velocidades para cada uma. A precisão do modelo assim desenvolvido depende do número de camadas que se considera permitindo a sua utilização em águas profundas.

Apesar das inúmeras vantagens do modelo, e tal como qualquer modelo numérico, este tem algumas limitações decorrentes das suas equações-base e da formulação numérica adoptada. Assim, como em cada camada se admite uma determinada aproximação polinomial e com tal se integra as equações na vertical, não é possível obter com o modelo a estrutura vertical correcta da velocidade das partículas. Este aspecto é particularmente importante quando se tem interesse no transporte de sedimentos e, consequentemente, na morfodinâmica e dinâmica costeira. Por outro lado, fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da adição de termos à equação original, que dependem de um conjunto de parâmetros que devem ser calibrados para cada caso de estudo, recorrendo, por exemplo, a dados adquiridos *in situ*. Torna-se assim importante avaliar quais as implicações que tais limitações podem ter no desempenho do modelo COULWAVE, principalmente quando este é aplicado a situações reais.

É então neste âmbito, que se insere o presente trabalho. Assim, a existência de um conjunto muito vasto e variado de medições *in situ* realizadas na Praia da Cornélia (Costa da Caparica, Portugal) de 12 a 14 de Maio de 2010 no âmbito de um projecto de investigação, o projecto BRISA, e a vontade de avaliar o desempenho deste modelo numérico na caracterização da agitação marítima numa situação real, e, assim, reforçar a confiança na sua utilização generalizada em estudos de morfodinâmica e dinâmica costeira a médio e longo prazo, justificaram o presente trabalho, que consistiu na análise comparativa entre as medições de agitação marítima locais e as estimativas produzidas por esse modelo.

Deste modo, identificando as potencialidades e limitações da utilização do modelo COULWAVE, i.e. o seu desempenho em situações reais, este pode constituir uma ferramenta da gestão costeira integrada.

Neste artigo, descreve-se sucintamente a zona de estudo, a Praia da Cornélia e campanha de recolha de dados realizada. Segue-se a aplicação do modelo COULWAVE, incluindo uma breve descrição das suas características e condições de cálculo. Apresentam-se as análises comparativas entre resultados numéricos e as medições efectuadas. O artigo termina com as conclusões.

2. A PRAIA DA CORNÉLIA, COSTA DA CAPARICA

A praia da Cornélia situa-se na Costa da Caparica, na costa Oeste de Portugal, Figura 1. Trata-se de uma praia exposta, arenosa, com comportamento morfodinâmico intermédio a dissipativo, com relativa protecção às ondas dominantes de NW, dada a acção, a Norte, do Cabo da Roca. Esta protecção confere-lhe um regime de agitação, na rebentação, com energia dominante moderada, podendo ser elevada durante tempestades, sobretudo de Oeste e SW.

Esta praia foi seleccionada para o estudo em causa por ser representativa de praias expostas com comportamento morfodinâmico intermédio em regime mesotidal, o que corresponde largamente às praias dominantes em Portugal e a nível mundial. O modelo ficará assim validado para condições de agitação moderada, em regime de maré e comportamento morfodinâmico que abrangem uma vasta gama de praias a nível mundial.

No âmbito do projecto de investigação BRISA (“BReaking waves and Induced SAnd transport”), foi realizada uma campanha de medições entre os dias 12 e 14 de Maio de 2010 que teve como objectivos a aquisição de dados hidrodinâmicos e morfológicos para: i) testar e validar modelos numéricos e ii) melhorar o conhecimento da dinâmica na rebentação e a sua influência no transporte de sedimentos e na morfodinâmica da praia em estudo. Dispunha-se assim de um vasto e variado conjunto de medições adequado a ser utilizado na validação de modelos numéricos.



Figura 1. Localização da campanha de campo do Projecto BRISA (Google Earth).

Figure 1. Location of the field campaign of BRISA Project (Google Earth).

Durante a campanha, foram efectuadas medições da elevação da superfície livre com transdutores de pressão (Pressure Transducers, PT), da velocidade da corrente, com correntómetros (Electromagnetic Current Meters, ECM) e com um medidor acústico de velocidades por efeito de Doppler (Acoustic Doppler Velocimeters, ADV), da turbidez e da concentração de partículas em suspensão, com sensores ópticos (Optical Backscatter Sensors, OBS). Todos os equipamentos foram colocados ao longo de um perfil de praia em estruturas H identificadas de 1 a 5, (Figura 2a e 2b) que foram geo-referenciadas com um sistema RTK-DGPS sincronizado com o Observatório Astronómico de Lisboa.

A cerca de -7.6 m (ZH) de profundidade foi colocada uma poita com um transdutor de pressão, aproximadamente alinhado com o perfil de praia onde foram colocados os equipamentos na face de praia.

No presente trabalho foram apenas analisados os dados de elevação da superfície livre e de velocidades de escoamento

referentes às séries temporais de elevação da superfície livre obtidas pelos transdutores de pressão ao largo (PT00) e nas estruturas H1 e H5 (PT01 e PT02) e da velocidade transversal (cross-shore) à costa, obtida com o sensor ECM (estrutura H1), cujo posicionamento é dado na Tabela 1.

3. APLICAÇÃO DO MODELO COULWAVE

3.1. O modelo COULWAVE

O modelo COULWAVE, Lynett & Liu (2002), é um modelo 2D de diferenças finitas para a simulação da propagação de ondas fortemente não-lineares (em que a razão entre a amplitude da onda e a profundidade pode ser de ordem até 1) e dispersivas, em zonas de profundidade variável. As equações do modelo, do tipo Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (multi-layer). Em cada camada admite-se um dado



Figura 2. a) Localização do perfil da praia onde foram posicionados os equipamentos (Google Earth) e b) Estrutura H1: Círculo azul: Correntómetro electromagnético (ECM); Círculo vermelho: Transdutor de pressão (PT01).

Figure 2. a) Location of the beach profile where the instruments were positioned (Google Earth). b) H1 structure: Blue circle: Electromagnetic current meter (ECM); Red circle: Pressure transducer (PT01).

Tabela 1. Identificação, posição dos instrumentos: PT00, PT01, PT02 e ECM.
Table 1. PT00, PT01, PT02 and ECM instruments identification and positioning.

Estrutura	Identificação	X (Easting)	Y (Northing)	Z (ZH)
-	PT00	-95847.090	-115311.000	-7.600
H1	PT01	-95357.825	-114985.584	1.506
H1	ECM	-95357.492	-114985.802	1.549
H5	PT02	-95279.189	-114931.251	3.031

perfil de velocidades, através do uso de funções quadráticas com valores iguais na interface que divide a coluna de água. Esta aproximação conduz a um sistema de equações sem as derivadas espaciais de ordem elevada resultantes do uso de funções polinomiais de ordem superior, que é normalmente utilizado na dedução das equações de Boussinesq. Com estes perfis de velocidade, que coincidem na fronteira entre camadas, é deduzido um conjunto de equações que permite estender a aplicabilidade do modelo a águas muito profundas e apresentar características lineares até $kh-8$ e um comportamento não-linear de 2ª ordem até $kh-6$ (sendo k o número de onda e h a profundidade). Contudo, como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser correctamente simuladas pelo modelo.

Seguindo o procedimento de Kennedy *et al.* (2000), são introduzidos termos adicionais nas equações, de modo a serem tidos em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas e a geração de ondas no interior do domínio. Além disso, são incluídos termos de profundidade dependentes do tempo para serem consideradas variações do perfil de fundo no tempo, devidas à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por Wei *et al.* (1995) utilizando um esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth. O esquema de diferenças finitas consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3ª ordem no tempo para o passo predictor e implícito de 4ª ordem no tempo para o passo corrector. Para as derivadas espaciais, são utilizadas diferenças finitas centrais com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são calculadas com uma precisão de 2ª ordem. O modelo é formalmente preciso até Δt^4 no tempo e Δx^4 no espaço. A diferença relativamente a Wei & Kirby (1995) refere-se a alguns termos não-lineares dispersivos e à existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade.

Para as fronteiras exteriores, são aplicados dois tipos de condições: reflexão total e radiação. No primeiro caso utiliza-se a metodologia de Wei & Kirby (1995), enquanto para a radiação ou condição de fronteira aberta, usa-se um esquema de fronteira absorvente (sponge layer), de acordo com Kennedy *et al.* (2000).

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se descritos em Lynett & Liu (2002). Os resultados fornecidos pelo modelo consistem em séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador.

3.2. Condições de aplicação do modelo COULWAVE

As condições de onda incidentes introduzidas no modelo COULWAVE corresponderam a ondas regulares com as características dos valores registados no sensor PT00 durante os dias de medição, de 12 a 14 de Maio. Nestes cálculos, a direcção da onda foi considerada perpendicular ao domínio computacional, uma vez que, apesar de esta opção constituir uma considerável simplificação, por impossibilidade do equipamento não foram registadas as direcções de onda na sua posição.

Simularam-se 127 períodos caracterizados por diferentes condições de agitação marítima, cujas características das ondas (H_s e T_s) foram definidas com base na análise temporal dos valores registados pelos instrumentos em cada período de 30 minutos. O nível de maré foi imposto de acordo com a estimativa do nível de maré do Instituto Hidrográfico para o período da campanha.

Em termos de cálculos numéricos, essas características foram simuladas pelo modelo durante 30 minutos para obtenção de resultados numéricos (elevação da superfície livre e velocidade horizontal) em pontos específicos do domínio, nomeadamente na posição dos instrumentos de medição. Em todos os casos, os resultados foram obtidos pelo modelo numérico com um intervalo de tempo de cerca de 0.1 s.

A zona de estudo foi descrita por uma malha regular de espaçamento aproximadamente constante $\Delta x = \Delta y \approx 2.0$ m, com dimensão de 900 m na direcção OX (perpendicular à costa), e 858 m na direcção OY (paralela à costa) (Figura 3). Esta malha é gerada pelo modelo com base num número mínimo de pontos por comprimento de onda, 30 (nestas simulações), definido consoante o período de onda. A batimetria considerada pela malha correspondeu a uma aproximação da batimetria real.

Foi também adicionada ao domínio, para o largo, uma zona de profundidade constante na qual se efectuou a geração da onda através do método da função-fonte, Wei *et al.* (1995). Foram usadas nas extremidades laterais (barlamar e sotamar) do domínio de cálculo, condições fronteira de absorção (camadas de $L/2 = gT^2/4\pi$, sendo L o comprimento de onda e T o período) com o objectivo de absorver a energia das ondas que atingem estas regiões. Nas restantes fronteiras, por simplicidade, foram consideradas condições de reflexão total.

Em todas as simulações foi considerada apenas uma camada e utilizadas equações completamente não-lineares (com termos dispersivos não-lineares) com atrito de fundo (coeficiente de atrito = 1.0×10^{-2}). O número de Courant admitido foi de 0.4 e a função-fonte foi colocada na posição $x=100$ m. As 127 simulações foram realizadas assumindo dois valores diferentes para o parâmetro de início da rebentação, A , ($\zeta_i^{\phi} = A\sqrt{gH}$), tendo sido, primeiramente, adoptado o valor de $A=0.65$, sugerido no manual do modelo, para praias de perfil com inclinação constante, o qual foi posteriormente alterado para $A=0.35$, valor sugerido por Chen *et al.* (2000) para praias de perfil barra-fossa (caso da praia considerada). Para os restantes parâmetros do modelo, consideraram-se os valores sugeridos pelo manual (Lynett & Liu, 2002).

Os resultados numéricos foram obtidos para as posições correspondentes aos instrumentos PT00 ($x=100$ m, $y=400$ m, $z=-7.6$ m), PT01 ($x=790$ m, $y=430$ m, $z=1.706$ m) e PT02 ($x=868$ m, $y=400$ m, $z=3.231$ m). As profundidades encontram-se referidas ao Zero Hidrográfico.

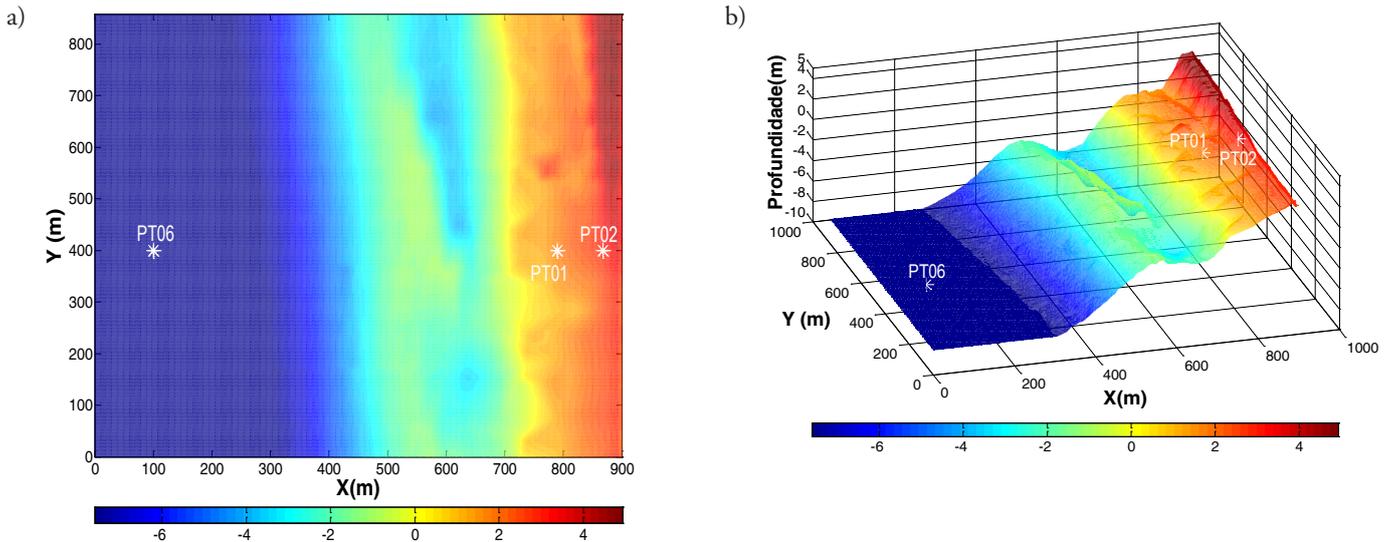


Figura 3. a) Representação em planta do domínio e batimetria reais e b) Representação 3D da batimetria do domínio. Os marcadores brancos assinalam os pontos de cálculo da malha correspondentes aos instrumentos PT00, PT01 e PT02 (respectivamente, do largo para a costa).

Figure 3. a) Representation, from a top-view, of the simulation real domain and bathymetry. b) 3D representation of the domain bathymetry. White markers mark PT00, PT01 and PT02 grid-points location (respectively, from the most offshore location to the beach).

4. RESULTADOS – ANÁLISE DO DESEMPENHO DO MODELO

Nas posições PT01 e PT02 foram comparados: (i) os valores numéricos e medidos de alturas e períodos de onda significativos, para o período compreendido entre os dias 12 a 14 de Maio de 2010; (ii) os parâmetros estatísticos, nomeadamente o desvio (BIAS), erro quadrático médio (RMSE) e índice de concordância (IC), para as alturas e os períodos de onda significativos, para o período em estudo e (iii) os espectros de energia obtidos para um único período de 30 minutos, com início às 3:00h do dia 13-05, utilizando os métodos de análise espectral de Fourier e de Wavelet.

Com base nos valores de velocidade horizontal, foram comparados na posição do ECM, os valores numéricos e medidos de: (i) velocidades máximas, mínimas, médias e médias quadráticas no período de 12 a 14 de Maio de 2010, para a componente transversal e (ii) parâmetros estatísticos, novamente o desvio, erro quadrático médio e índice de concordância, para as velocidades máximas, mínimas, médias e médias quadráticas, para o período em estudo. Apenas a componente transversal da velocidade foi considerada, uma vez que a direcção das ondas impostas no modelo é perpendicular à costa, sendo portanto esta a componente da velocidade mais relevante de se analisar.

Nestes cálculos, os primeiros 200 s de simulação não foram considerados. Além disso, com excepção da análise espectral, em todas as análises são apresentados resultados considerando valores do parâmetro de início da rebentação de A=0.35 e A=0.65.

4.1. Elevação da superfície livre

4.1.1. Análise temporal e estatística de conjunto

A Figura 4 apresenta a comparação entre as variações de Hs e Ts ao longo do período registado pelos transdutores, PT01 (Figura 4c e Figura 4d) e PT02 (Figura 4e e Figura 4f) e os resultados simulados pelo modelo, para valores de A=0.35 e A= 0.65. Apresentam-se também nesta figura os valores observados no sensor PT00 (Figura 4a e Figura 4b) e os valores numéricos aí obtidos (com A=0.35, pois são idênticos a A=0.65) com os quais foi forçado o modelo numérico.

A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam os valores dos parâmetros estatísticos calculados entre os resultados numéricos e medidos nos dois sensores PT01 e PT02. Os parâmetros considerados foram (i) o desvio (BIAS), (ii) o erro médio quadrático (RMSE) e (iii) o índice de concordância (IC):

$$BIAS = Y_i - X_i \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \tag{2}$$

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \tag{3}$$

onde X_i são os valores experimentais (referência), Y_i são os valores obtidos pelo modelo, \bar{X} é a média do valor experimental e n é o número de pontos. O índice de concordância, IC, varia de zero a um, correspondendo o último a uma maior concordância dos valores numéricos com os valores experimentais.

Nesta análise estatística foram excluídos os períodos de 30 minutos que apresentavam valores irrealistas (excessivamente elevados quando comparados com os valores registados em situação de preia-mar) de Hs e Ts nos valores medidos e/ou numéricos, incluindo os valores referentes aos períodos de maré baixa.

Numa análise prévia às medições efectuadas, verifica-se que no início do período analisado as condições de agitação marítima foram pouco energéticas (Figura 4a e 4b), tornando-se um pouco mais severas no dia 14 de Maio de 2010, sendo esta agitação maioritariamente o resultado da actuação do vento local.

Relativamente aos dados numéricos, é possível verificar-se que a escolha do parâmetro A não revela particular influência nos valores de Hs e Ts simulados pontualmente, para cada instrumento, uma vez que os resultados obtidos para A=0.65 e A=0.35 são praticamente coincidentes ao longo do registo. No entanto, houve situações que corresponderam aos períodos compreendidos entre as 12h30 e as 18h00 e entre as 18h30 e as 19h30 do dia 14 de Maio em que considerando A=0.65, o modelo foi incapaz de simular os valores medidos em PT02 e PT01, respectivamente. Também para A=0.35 o modelo apresentou dificuldades em simular a rebentação, devido à reduzida altura significativa, registada no sensor mais ao largo durante o período da campanha, que foi imposta ao modelo.

Numa primeira análise, para os sensores PT01 e PT02, é possível observar-se que o modelo é capaz de simular o andamento e a ordem de grandeza dos valores medidos, além de representar a descontinuidade dos registos concomitante com os períodos de maré mais baixa, presente tanto nos registos de altura de onda como nos de período, o que justifica de certa forma os valores de IC próximos de 1, tanto para Hs como para Ts. No entanto, é necessário cuidado na análise destes parâmetros estatísticos, porque para a construção das amostras se optou por excluir os valores irrealistas de Hs e Ts (numéricos e medidos) e todos os valores registados durante

os períodos de maré mais baixa. Tal reduz o tamanho da amostra, e “melhora” os valores dos parâmetros, facto que adquire uma relevância particular no caso do PT02, que se encontrou emerso durante uma parte significativa do período total.

Uma análise mais detalhada aos valores obtidos para o PT01 mostra que o andamento dos valores numéricos de Hs é muito semelhante ao das medições, sendo no entanto notória uma tendência geral de sobrestimação das medições efectuadas. Em relação aos valores de Ts, as diferenças são mais acentuadas e o modelo não acompanha tão bem o andamento dos valores medidos. Além disso, apresenta uma variação de valores de Ts entre períodos consecutivos, particularmente durante os períodos de preia-mar, que não é tão visível nos resultados numéricos. As conclusões anteriores podem, de certo modo, ser confirmadas na análise dos parâmetros BIAS, RMSE e IC. Em relação ao parâmetro BIAS, com valores quase sempre positivos, confirma-se a tendência perceptível de sobrestimação (mais óbvia, no caso de Ts) dos dados medidos, por parte do modelo. Os valores de RMSE e IC correspondentes a Ts apresentam valores menos próximos dos óptimos que os calculados para Hs, o que denota as maiores dificuldades do modelo numérico em simular esta variável.

Para locais mais acima do perfil da praia, como em PT02, onde as ondas já rebentaram, verifica-se que o modelo revela uma maior dificuldade em simular os dados reais, principalmente para o caso Ts. Note-se que as medições efectuadas com este sensor são caracterizadas por grandes períodos de descontinuidade, correspondentes à emersão do instrumento durante os períodos de maré mais baixa. Assim, existem poucos valores para comparação, sendo a análise condicionada por tal. Em geral, em PT02, a tendência é de os valores de Hs numéricos subestimarem os medidos, e os períodos simulados sobestimam os medidos. É também evidente a maior dificuldade do modelo em simular os valores de Hs para o último ciclo de maré do período em análise.

Tabela 2. Valores de BIAS, RMSE e IC para a Hs nos sensores PT01 e PT02.

Table 2. Significant wave height BIAS, RMSE and IC values obtained for PT01 and PT02 sensors.

Sondas	BIAS (m)		RMSE (m)		IC	
	A=0.65	A=0.35	A=0.65	A=0.35	A=0.65	A=0.35
PT01	-0.049	-0.013	0.132	0.117	0.94	0.95
PT02	0.103	0.126	0.086	0.088	0.89	0.88

Tabela 3. Valores de BIAS, RMSE e IC para Ts nos sensores PT01 e PT02.

Table 3. Significant wave period BIAS, RMSE and IC values obtained for PT01 and PT02 sensors.

Sondas	BIAS (m)		RMSE (m)		IC	
	A=0.65	A=0.35	A=0.65	A=0.35	A=0.65	A=0.35
PT01	0.533	0.580	1.991	1.966	0.93	0.93
PT02	12.543	11.919	3.648	3.029	0.88	0.94

De um modo geral, as diferenças observadas entre valores numéricos e medidos podem estar relacionadas com (i) a direcção das ondas imposta ser normal à batimetria (o que agrava as condições de agitação nos sensores junto à linha de costa), não correspondendo à direcção das ondas que efectivamente chegaram à Praia da Cornélia no período da campanha; (ii) limitações do próprio modelo numérico: é de notar que a aplicação do modelo em inclinações de fundo da ordem de 1/6 se torna muito exigente, pois as equações-base são integradas no pressuposto de que os fundos são de inclinação suave. Além disso, fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da adição de um termo de viscosidade turbulenta à equação original, que depende de um conjunto de parâmetros relacionados com o início, fim e duração da rebentação. Estes parâmetros têm de ser calibrados para cada caso de estudo e condição de agitação, sendo assim uma limitação do modelo numérico. No presente trabalho os parâmetros de rebentação foram considerados constantes para todas as condições de agitação incidente, que na realidade variam ao longo do período total, e para as quais cada parâmetro deveria ser calibrado individualmente.

4.1.2. Análise espectral

A Figura 5 representa a análise espectral efectuada através da aplicação de dois métodos espectrais (Fourier e Wavelet) aos dados medidos e resultados simulados, para o período de 30 min com início às 3:00 do dia 13 de Maio, nas diferentes posições dos instrumentos. Esta figura permite analisar a capacidade do modelo simular as características não-lineares das ondas, mostrando tanto as frequências de maior energia associada (Fourier) como a distribuição dessa energia pelas frequências ao longo do período analisado (Wavelet).

Os espectros de Fourier revelam que as frequências de maior energia observadas nos dados medidos são também representadas pelo modelo, em consistência com o forçamento deste, efectuado com uma onda monocromática. Mais ainda, em consequência das transferências de energia não-lineares entre ondas de diferentes frequências, para os dois sensores mais costeiros, PT01 (Figura 5a) e PT02 (Figura 5d), o modelo simula convenientemente os dois picos principais de energia presentes. Em PT01, mantém-se a presença do pico de maior energia correspondente ao período de 10 s, e aparece um novo pico, de menor energia e período, correspondente à segunda harmónica da componente principal. A forma do espectro numérico é, em geral, bastante semelhante ao do das medições. No caso do PT02, os espectros são completamente diferentes dos observados nos outros sensores. Existe ainda energia associada ao período de 10 s, mas há claramente uma transferência de energia para períodos maiores, que assinala a ocorrência de fenómenos não-lineares mais significativos. Neste caso, é clara a dificuldade do modelo numérico em simular a forma do espectro observado nestas circunstâncias, o que é resultado de se estar na zona após a rebentação onde os efeitos não lineares são importantes e o modelo apresenta claras limitações nestas condições quer devido à sua formulação base (integração na vertical) quer devido à forma parametrizada como foi incluída a rebentação.

Os espectros de Wavelet permitem uma análise mais minuciosa da distribuição da energia pelas principais

frequências, i.e., tornam possível a análise da importância de cada frequência ao longo do período de tempo analisado. Para os sensores PT01 (Figura 5b e Figura 5c) e PT02 (Figura 5e e Figura 5f) o modelo identifica a principal gama de períodos, a rondar os 10 s e representa relativamente bem a presença de uma gama de frequências mais altas (0.2 Hz) em PT01 e mais baixas (0.05 Hz) em PT02, com menor energia associada. No entanto, os espectros de Wavelet evidenciam uma menor banda de frequências para os resultados do modelo que para os dados, o que é o resultado de ter-se forçado o modelo com ondas regulares (para além das limitações inerentes ao modelo atrás referidas). Este comportamento é ainda mais notório no caso do PT02.

4.2. Componente transversal da velocidade da corrente

A Figura 6 apresenta uma comparação entre os valores medidos de velocidade máxima, mínima, média e média quadrática, no ponto PT01, pelo correntómetro ECM e os valores simulados pelo modelo para esse mesmo ponto, para a componente transversal da velocidade. Note-se que não faz sentido analisar a componente longitudinal da velocidade horizontal porque é normalmente resultado da obliquidade da onda, e esta obliquidade não foi modelada neste trabalho. Além disso, as fronteiras reflectivas admitidas no modelo vão induzir circulações médias fechadas o que não é realista.

Tal como para as alturas e períodos, também para a velocidade se calcularam os valores de BIAS, RMSE e IC, presentes na Tabela 4.

A partir da observação da Figura 6 e da Tabela 4 e, em termos de comportamento geral, verifica-se uma grande semelhança entre valores numéricos e medidos da componente transversal medida pelo ECM. Para ambos, a componente transversal atinge valores, em módulo, superiores no sentido da propagação das ondas (positivo), sendo tal representativo de uma onda não linear, de forma tipo cnoidal ou de Stokes de 2ª ordem, com cristas mais elevadas e curtas e cavas mais achatadas e longas. A velocidade média é maioritariamente da ordem de 2 a 3 cm/s, negativa, correspondendo a uma fraca corrente de fundo (undertow). Nos períodos imediatamente antes ou após àqueles excluídos dos gráficos (em que os sensores estavam emersos), a velocidade média é próximo do zero ou positivo, isto é, com resultante na direcção da onda, em virtude de durante essa medição o sensor se encontrar relativamente próximo da superfície livre, devido à baixa profundidade da água, e portanto medir não a corrente de fundo, mas sim uma corrente próxima da correspondente à deriva de Stokes.

Embora os resultados numéricos sejam capazes de representar bastante bem a ordem de magnitude dos valores medidos, demonstram uma maior dificuldade em descrever o seu andamento, exibindo os resultados numéricos maiores e mais frequentes oscilações entre intervalos de 30 minutos consecutivos. Verifica-se que para os valores de velocidade, o modelo consegue fornecer melhores estimativas dos valores médios (Um e Urms) do que dos valores extremos. Tal é confirmado pelos valores estatísticos: obtêm-se valores pequenos de BIAS e RMSE e índices de concordância superiores a 0.7, associados aos valores médios de velocidade média e de velocidade média quadrática, e valores bastante

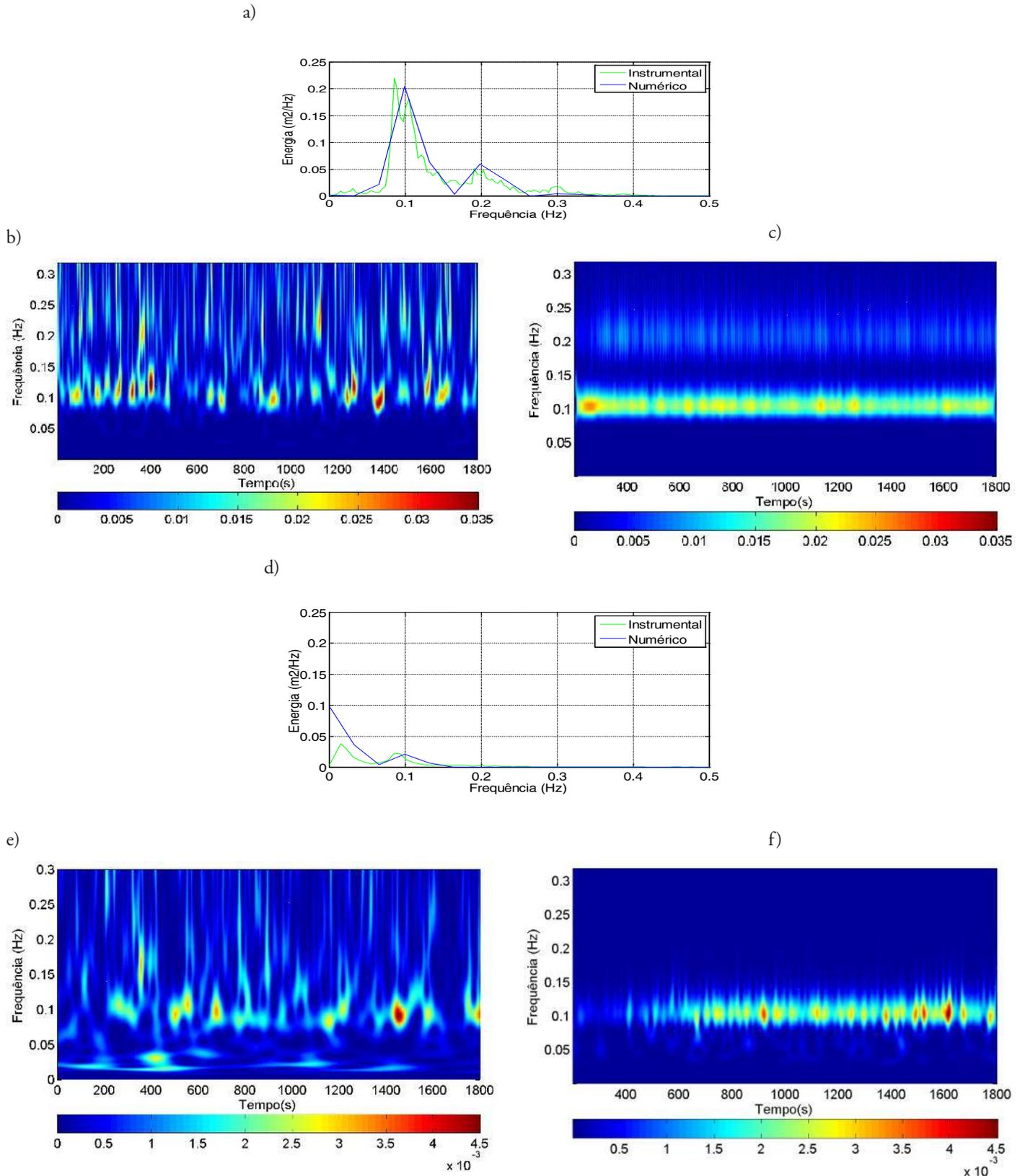


Figura 5. Análise espectral de Fourier (em a e d) dos dados medidos (verde) e resultados simulados (azul), análise espectral de Wavelet (b, c, e, f) dos dados medidos (coluna da esquerda) e resultados simulados (coluna da direita), para o período de 30 min com início às 3:00 do dia 13-05, respectivamente para nos sensores a), b) e c) PT01, d), e) e f) PT02.

Figure 5. Measured and simulated data spectral analysis (Fourier, in a, d) and g) and Wavelet, in the remaining figures), for the 30 minutes period that starts at 3:00, on the 13th of May, respectively for the positions a), b) and c) PT00, d), e) and f) PT01 and g), h) and i) PT02.

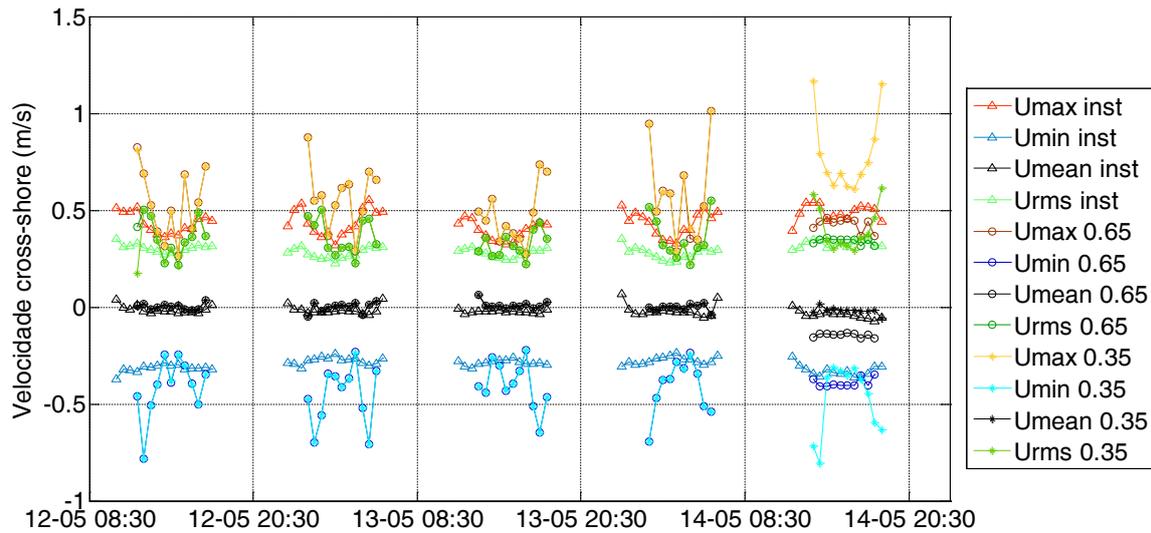


Figura 6. Comparação entre os valores de velocidade máxima, mínima, média e média quadrática, da componente transversal (cross-shore), obtidos com o ECM (marcador: triângulo) e os simulados pelo modelo, para $A=0.65$ (marcado: círculo) e $A=0.35$ (marcador: asterisco).

Figure 6. Comparison between measured cross-shore (U) maximum, minimum, mean and root-mean-square velocities, acquired by the ECM (marker: triangle) and the values simulated by the model, considering $A=0.65$ (marker: circle) and $A=0.35$ (marker: star).

Tabela 4. Valores de BIAS, RMSE e IC de U_{max} , U_{min} , U_{mean} e U_{rms} , no sensor PT01.

Table 4. BIAS, RMSE and IC of U_{max} , U_{min} , U_{mean} and U_{rms} velocities, for PT01 sensor.

Sondas	BIAS (m/s)		RMSE (m/s)		IC (m/s)	
	A=0.65	A=0.35	A=0.65	A=0.35	A=0.65	A=0.35
U_{max}	0.062	0.156	0.159	0.227	0.93	0.61
U_{min}	-0.121	-0.135	0.175	0.195	0.46	0.32
U_{mean}	0.003	0.028	0.054	0.033	0.43	0.77
U_{rms}	0.062	0.080	0.100	0.151	0.93	0.86

elevados de BIAS e RMSE e índices de concordância baixos para os valores extremos dessas variáveis (U_{max} e U_{min}).

Verifica-se também, em geral, a sobrestimação dos valores medidos de U , que está provavelmente relacionada com a direcção de propagação das ondas: o modelo foi forçado com ondas perpendiculares à costa, o que resulta em maiores valores de U , contrariamente à direcção real de propagação das ondas na praia, onde a sua obliquidade tenderá a resultar numa componente U mais fraca.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, descreveu-se e analisou-se a aplicação do modelo COULWAVE às condições de agitação registadas num sensor de pressão posicionado à profundidade de 7.6 m (ZH) durante o período de 12 a 14 de Maio de 2010,

na praia da Cornélia (Costa da Caparica). Foram efectuadas comparações entre resultados numéricos e medições efectuadas por sensores de pressão e de velocidade, localizados ao longo do perfil de praia na zona de rebentação.

De um modo geral, concluiu-se que o modelo simula bem a evolução da onda, desde a posição mais ao largo até à praia, antes da ocorrência de rebentação e a velocidade transversal, junto à costa. Após a rebentação, é de notar a existência de diferenças por vezes significativas entre os valores medidos e os valores estimados pelo modelo numérico que estão relacionadas principalmente com as condições de agitação impostas (agitação regular, direcção normal às batimétricas, parâmetros de rebentação constantes ao longo do período de tempo analisado) e com as limitações do próprio modelo (modelo integrado em profundidade).

Ao nível espectral, o modelo é capaz de representar bastante bem a presença das frequências de maior energia registadas, mas é clara a sua dificuldade em simular a forma do espectro e a distribuição de energia ao longo do período de análise, principalmente após a ocorrência da rebentação onde os efeitos não-lineares são muito importantes.

De um modo geral, a escolha dos dois valores para o parâmetro de início da rebentação, $A=0.65$ e $A=0.35$, não levou a diferenças significativas entre resultados do modelo numérico. No entanto, principalmente para $A=0.65$, houve situações em que o modelo foi incapaz de simular a rebentação e teve dificuldades em simular convenientemente os valores de altura e período significativos da onda e velocidade horizontal correspondentes ao último ciclo de maré do período analisado.

O trabalho aqui apresentado permitiu obter um modelo de agitação validado e com aplicabilidade elevada, numa vasta gama de praias como as do tipo da praia da Cornélia (praias expostas com comportamento morfodinâmico intermédio em regime mesotidal) que permitirá o seu uso corrente na caracterização da agitação na rebentação, o que se traduz numa mais valia importante para a adequada aplicação de modelos de agitação marítima em gestão costeira.

A imposição de condições de agitação mais próximas da realidade, bem como uma análise mais extensa de sensibilidade aos parâmetros de rebentação intrínsecos do modelo, serão tópicos de trabalho futuro, o que permitirá certamente melhorar os resultados numéricos. Além disso, será também importante a realização de testes de sensibilidade à direcção de incidência das ondas impostas, para melhor avaliar a capacidade do modelo em simular as características de agitação e velocidade horizontal resultantes da obliquidade da propagação das ondas para costa. Por outro lado, será também importante avaliar o desempenho do modelo, particularmente a nível espectral, para condições de agitação impostas correspondentes a um espectro irregular de frequências, e não a ondas monocromáticas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto de investigação “BRISA - Interacção entre a rebentação das ondas e o transporte de areias”, PTDC/ECM/67411/2006, e dos projectos PTDC/AMB/67450/2006 e PTDC/ECM/73145/2006, financiados pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

BIBLIOGRAFIA

- Chen, Q., Kirby, J. T., Dalrymple, R. A., Kennedy, B. A. & Chawla, A. (2000) - Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. II: 2D. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 126(1):48-56. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:1(48).
- Kennedy, B. A., Chen, Q., Kirby, J. T. & Dalrymple, R. A. (2000) - Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking and Runup I: 1D. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 126(1):39-47. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:1(39).
- Lynett, P. & Liu P-L.F. (2002) - *Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations. COULWAVE Code Manual*. 176p., Long Intermediate Wave Modelling Package, Cornell University, Ithaca, NY, U.S.A.. Não publicado.
- Wei, G. & Kirby, J. T. (1995) - A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 121(5):251-261. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1995)121:5(251).
- Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., Subramanya, R., (1995b). A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 121(5):251-261. doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1995)121:5(251).
- Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., & Subramanya, R. (1995a) - A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 294:71-92. DOI: 10.1017/S0022112095002813.

Determinação de forças actuantes em quebra-mares verticais e mistos *

Forces on vertical and composite breakwaters

Maria da Graça Neves ^{@, 1}, Montse Vílchez ², Maria Clavero ², Miguel A. Losada ²

RESUMO

Uma parte importante do dimensionamento de uma obra marítima é a determinação das resultantes das forças actuantes e, relacionadas com estas, as deformações, as tensões e as condições de estabilidade da estrutura.

No caso de quebra-mares verticais e mistos e não se considerando assentamentos ou outro aspecto mais relacionado com ruína geotécnica, os modos de ruína da estrutura reduzem-se aos possíveis movimentos de deslizamento e derrubamento. Para analisar a estabilidade ao deslizamento e ao derrubamento, pode-se considerar o equilíbrio estático do sistema, supondo que a acção é constante, e calcular as resultantes das forças horizontais e verticais a que a estrutura está sujeita. Uma vez calculadas as resultantes das forças horizontais e de subpressão, estabelecem-se coeficientes de segurança ao deslizamento e derrubamento que relacionam as acções favoráveis e desfavoráveis à estabilidade da estrutura.

Para a determinação das forças em quebra-mares verticais e mistos utilizam-se fórmulas empíricas (baseadas em ensaios em modelo físico) e semi-empíricas (baseadas em considerações teóricas e ensaios em modelo físico) e a modelação física.

As fórmulas empíricas ou semi-empíricas são o método mais utilizado no projecto para o cálculo das forças. Estas fórmulas têm como grande vantagem a facilidade de utilização, o que as torna no elemento mais utilizado na fase de estudo prévio. A sua principal desvantagem deve-se a que a aplicação directa destas formulações está limitada a estruturas de geometrias simples e a condições específicas de agitação e níveis de maré para que foram desenvolvidas. Além disso, algumas destas fórmulas baseiam-se em hipóteses simplificativas que podem não ser válidas para casos concretos. Neste artigo apresentam-se as principais fórmulas disponíveis para o cálculo do diagrama de pressões e, com base, neste, das resultantes das forças actuantes em quebra-mares verticais e mistos, as suas características e os domínios de aplicação.

Os modelos físicos são um método bastante fiável para o cálculo de forças em estruturas monolíticas e permitem reproduzir os fenómenos físicos sem as simplificações inerentes aos modelos numéricos ou aos métodos analíticos. No entanto são caros e morosos e podem estar afectados por efeitos de escala. Descrevem-se neste artigo os principais métodos de medição de pressões ou forças em modelo físico e descrevem-se os principais erros no que se refere à determinação das forças actuantes em quebra-mares verticais e mistos.

Os dados de protótipo são raros mas extremamente importantes já que permitem verificar a qualidade das previsões obtidas pela aplicação das fórmulas. Com base em dados de campo medidos no quebra-mar vertical do Porto de Gijón entre Janeiro e Março de 2010, foi possível fazer uma apreciação das fórmulas para a determinação da resultante das forças actuantes em quebra-mares verticais e verificar as principais deficiências destas fórmulas.

Com base nesses resultados, apresentam-se algumas considerações gerais e recomendações para melhor estimar a resultante das forças actuantes em quebra-mares verticais com base na aplicação de fórmulas.

Palavras-chave: Forças, Pressão dinâmica, Quebra-mares verticais, Quebra-mares mistos, fórmulas semi-empíricas, modelos físicos, medições de campo

@ - Corresponding author

1 - LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, +351.21.8443426. e-mail: gneves@lnec.pt

2 - Grupo de Dinámica de Flujos Ambientais. Centro Andaluz de Medio Ambiente. Avda. del Mediterráneo, s/n, 18006 Granada (Espanha). e-mails: mvilchezsolis@ugr.es, mclavero@ugr.es, mlosada@ugr.es

ABSTRACT

An important issue for a maritime structure design is the determination of the resultant of the wave forces acting at the structure and the stability conditions in each part of the structure.

Verification of failure modes that can affect vertical and composite breakwaters is essentially related with sliding and overturning and failure related with geotechnical causes are usually not taken into account. In order to analyse the safety against sliding and overturning and calculate the loads at the structure, the static equilibrium of the system is considered, assuming that the loads are constant. Types of total horizontal wave loadings on the vertical-front structures are a function of structure geometry and wave characteristics. Once the horizontal and vertical resultant of the forces are calculated, safety factors against sliding and overturning are established, relating the resistance force to the applied force in the horizontal and vertical direction and the stability is verified.

Empirical and semi-empirical formula and physical modeling are the most frequent used tools to calculate loads in vertical and composite breakwaters.

At present, empirical or semi-empirical formulas are the most widely used tools for predicting loads, which have the great advantage of being very easy to apply. Direct application of these formulas is limited to particular structural configurations, water levels and wave conditions. Besides that, the formulas have assumptions that might not be correct in specific cases. This paper presents the most used formulas to calculate the pressure diagrams, and based on that, the loads acting at vertical and composite breakwaters, together with their main characteristics and application domain.

A more accurate method for determining loads is based on physical model tests since they allow the reproduction of the physical phenomena involved in wave-structure interaction without the simplified assumptions that are presented in the formulas and at analytical and numerical modelling. However, they are more expensive and more time consuming than the use of formulas and could be affected by scale effects. The paper presents a summary of the different methods to measure the pressures and forces in physical models and the main errors that could affect the measurements of loads at vertical structures.

Prototype data are rather rare but extremely important since it allows the verification of the formulae accuracy in calculating the loads. The field measurements made between January and March 2010 at the North Breakwater of the Port of Gijón (Spain), allowed the analysis of the accuracy of the loads calculation made by the formulas and define some main incorrections on the formulas assumptions. Based on these measurements, some recommendations are presented to increase the accuracy of the loads predicted by the formulas at vertical and composite breakwaters.

Keywords: *Wave forces, dynamic pressure, vertical breakwaters, composite breakwaters, semi-empirical formulae, physical models, prototype measurements.*

1. INTRODUÇÃO

A importância económica dos portos e o custo total das estruturas marítimas levam a que o projecto das mesmas seja exigente, devendo apoiar-se em ferramentas adequadas que permitam garantir, com segurança e economia, um comportamento adequado aos fins em vista.

Uma parte importante do dimensionamento de uma obra marítima é a determinação da resultante das forças actuantes e, relacionadas com estas, as deformações, as tensões e as condições de estabilidade das diferentes partes da estrutura. O estudo da estabilidade das estruturas pode ser dividido em dois grandes grupos:

- estudo da estabilidade dos elementos monolíticos (quebra-mares verticais, mistos e superestruturas de quebra-mares de talude), cuja estabilidade depende essencialmente da desaceleração da massa de água contra a estrutura;
- estudo da estabilidade de estruturas com mantos (ou banquetas, taludes, etc.) compostos por blocos e cuja estabilidade depende essencialmente das velocidades de refluxo da massa de água depois do impacto contra a estrutura. Neste caso, o estudo da estabilidade dos mantos não se faz através do estudo de cada elemento individualmente, mas sim do manto como um todo, estabelecendo-se níveis aceitáveis de dano que normalmente são função do número de blocos do manto que se movem ou caem.

Este artigo centra-se na resposta estrutural de quebra-mares verticais e mistos aos esforços gerados pela agitação que os solicita.

A interacção da agitação, alterada pela presença da própria estrutura, com a estrutura gera esforços a que esta deve resistir, pelo menos durante a sua vida útil. A informação que existe na literatura sobre resultantes de forças actuantes em quebra-mares verticais e mistos não é extensa. São também poucos os estudos que analisam de forma aprofundada as limitações das fórmulas existentes para o cálculo de forças em estruturas monolíticas, embora estas fórmulas sejam a ferramenta mais utilizada pelos projectistas na fase de estudo prévio. A modelação física é outra ferramenta disponível para apoio ao projecto deste tipo de estruturas, muito utilizada na fase de projecto de execução, para verificação do pré-dimensionamento, já que permite reproduzir a maioria dos fenómenos físicos.

Neste artigo, após uma breve descrição do regime de forças a que a estrutura pode estar sujeita, apresentam-se de forma resumida os métodos mais utilizados para o cálculo das forças em quebra-mares verticais e mistos: as fórmulas empíricas e semi-empíricas e a modelação física. Para o caso de quebra-mares verticais, apresenta-se uma apreciação das fórmulas para o cálculo de forças com base em dados medidos em protótipo. O artigo termina com algumas considerações gerais e recomendações para melhorar a estimação de forças em quebra-mares verticais com base na aplicação de fórmulas.

2. REGIMES DE FORÇAS

As forças que actuam sobre uma estrutura marítima podem ser classificadas em dois grupos:

- Hidrostáticas, resultantes da pressão que o fluido em repouso exerce sobre a estrutura, já que a estrutura se encontra total ou parcialmente submersa;
- Hidrodinâmicas, resultantes das variações de velocidade da massa de água associada à agitação.

Existem outros tipos de forças que também solicitam a estrutura, mas que saem fora do âmbito deste trabalho, que são as forças devidas à acção do vento, de impactos de navios, sismos, tsunamis, etc.

A força hidrostática horizontal, Fh , resultante das pressões hidrostáticas, que actua sobre uma estrutura que se encontra parcialmente submersa a uma profundidade h é constante e dada por:

$$Fh = 0.5 \rho g h^2 \quad (1)$$

em que ρ é a massa volúmica do fluido, g a aceleração da gravidade e resulta da distribuição de pressões, $P(z)$, que um fluido em repouso exerce sobre os contornos de uma estrutura, dada por:

$$P(z) = -\rho g z \quad (2)$$

onde z é a coordenada vertical, sendo zero no nível da água em repouso e positiva no sentido ascendente.

As forças hidrodinâmicas dependem das características:

- do meio fluido, neste caso, da água (massa volúmica, ρ , viscosidade dinâmica, μ e temperatura, T),
- da agitação marítima (altura de onda, H , período, T , ou o respectivo comprimento de onda, L , à profundidade da água, h) e
- da obra (de uma dimensão característica, D , por exemplo, a dimensão horizontal frontal da estrutura, e da frequência própria de oscilação da obra).

As formulações a utilizar para o cálculo de forças dependem do regime de forças a que a estrutura está sujeita. Na R.O.M.1.1, definem-se quatro regimes de forças em função do perfil da onda quando esta alcança a estrutura com incidência normal:

- 1. Regime estacionário:** a obra está submetida à acção de uma onda estacionária resultante da interacção da onda incidente com a reflectida. O coeficiente de reflexão é aproximadamente igual à unidade e não ocorre rebentação nem galgamento, portanto a dissipação e a transmissão são desprezáveis. Neste caso a onda apresenta um ventre na parede (reflexão total) e a distribuição de pressões varia em fase com o aumento da cota da superfície livre na estrutura e que pode ser calculada a partir da teoria de ondas que seja representativa da declividade, H/L , e da profundidade relativa, h/L em causa.

- 2. Regime parcialmente estacionário:** a onda está quase a rebentar e apresenta uma frente plana e ligeiramente inclinada sobre a estrutura. A onda sobe sobre a estrutura rapidamente, transformando o seu campo de velocidades, exactamente antes de alcançar a estrutura, de uma direcção horizontal para uma direcção vertical. É precisamente após o impacto que se geram os picos de pressão de muito curta duração. A resultante das forças actuantes sobre as estruturas que se encontram neste regime pode ser calculada mediante a aplicação de teorias ou modelos que tenham em conta tanto o efeito da rebentação sem impacto como o da reflexão. Há algumas aproximações semi-empíricas que dão bons resultados para estas condições (por exemplo, Goda, 1974 ou Nagai, 1973); no entanto, é recomendável verificar a distribuição de pressões por via experimental.

- 3. Regime com ocorrência de rebentação e impacto:** a rebentação da onda sobre a estrutura é a principal contribuição para a resultante das forças que actua sobre ela. A onda alcança a estrutura durante o processo de rebentação e o impacto dá-se com ar aprisionado entre a coluna de água e a estrutura. Neste caso ocorre um primeiro pico de pressão de duração muito curta seguido de uma forte oscilação com uma frequência muito elevada (Peregrine, 2003). Existem modelos analíticos e numéricos que dão uma boa aproximação da distribuição de pressões neste regime.

- 4. Regime de onda após a rebentação.** As ondas alcançam a estrutura já rebentadas, quer por efeito do fundo quer pela interacção da onda incidente com a onda reflectida na obra, comportando-se como uma massa de água turbulenta. Algumas aproximações semi-empíricas dão bons resultados para estas condições; no entanto, é recomendável verificar a distribuição de pressões por via experimental.

Entre estes regimes de forças encontram-se outros que incluem os modos de onda em rebentação sem impacto e os modos de onda parcialmente estacionária. Kortenhuis & Oumeraci (1998), com base em ensaios bidimensionais com agitação irregular, propuseram o esquema que se apresenta na Figura 1 para identificar as diferentes distribuições da resultante adimensional das forças horizontais em função do tempo ao longo de um período de onda em estruturas monolíticas. Como se pode observar, os regimes propostos por estes autores são semelhantes aos descritos anteriormente, embora não incluam o regime estacionário e incluam um regime com rebentação incipiente da onda ("slightly breaking wave").

Em 1970, Nagai apresentou um gráfico (Losada *et al.*, 1995), onde define as regiões correspondentes a diferentes domínios dos perfis de pressões em função da declividade da onda (H/L) e da profundidade relativa (h/L), Figura 2, e a respectiva variação de pressões no tempo. As ondas na região sob a linha \underline{E} correspondem ao comportamento linear da distribuição de pressões, o que corresponde ao regime estacionário.

Entre as linhas \underline{E} e \hat{E} começa a aparecer uma segunda harmónica que se faz sentir inicialmente no fundo, Figura 2a) e que, na linha \hat{E} , já se faz sentir em toda a coluna de água, Figura 2b), correspondente ao regime quase estacionário.

Entre \bar{E} e a linha que define a rebentação, os dois picos de pressão tornam-se assimétricos, ficando o primeiro pico mais curto e mais alto, Figura 2c). Quando a onda rebenta na estrutura, dá-se um forte aumento do primeiro pico de pressão, correspondendo ao regime em rebentação com impacto, Figura 2d).

No caso de as ondas atingirem a estrutura após a rebentação, regime de onda rebentada, ainda se observa o duplo pico de pressão, Figura 2e), com uma duração e intensidade que é função da distância entre o ponto de rebentação e a estrutura.

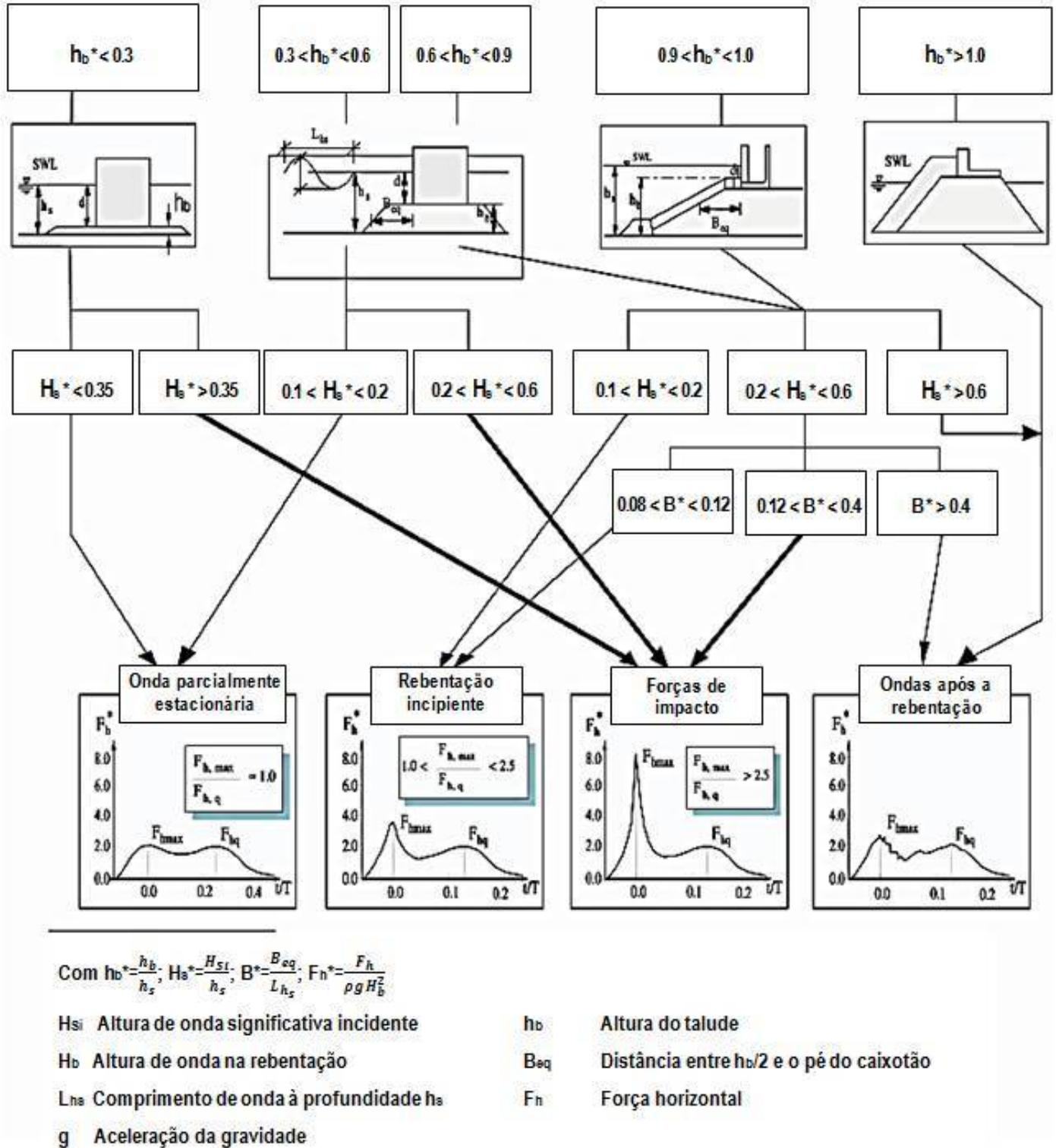


Figura 1. Identificação da variação das resultantes adimensionais das forças horizontais em função do tempo, em estruturas verticais expostas à agitação irregular (adaptado de Kortenhau & Oumeraci, 1998).

Figure 1. Identification of types of total horizontal wave loadings on vertical wall structure exposed to head-on long-crested irregular (adapted from Kortenhau & Oumeraci, 1998).

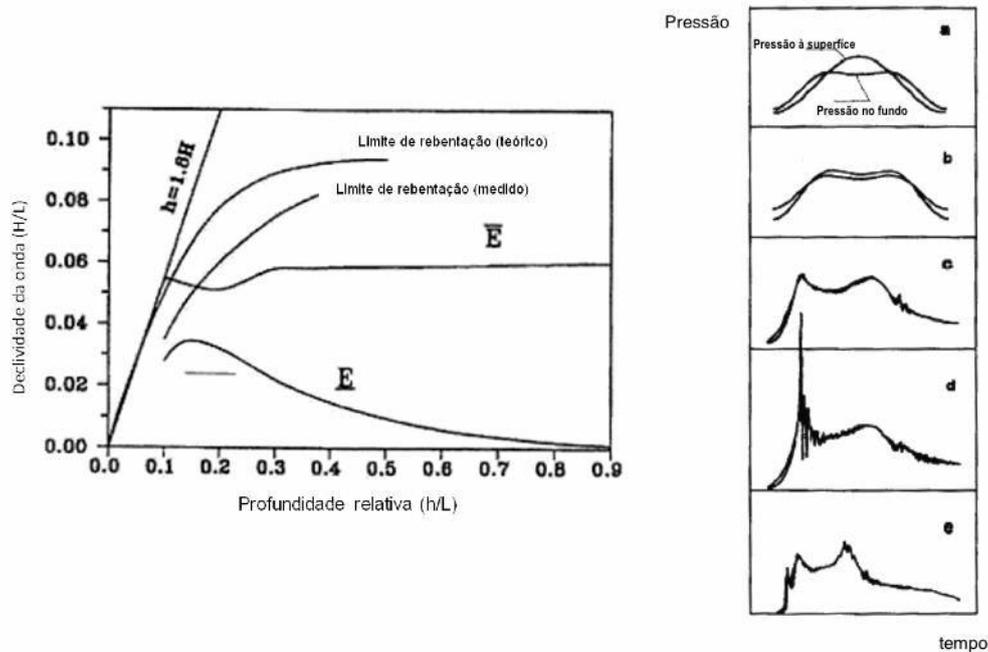


Figura 2. Domínios dos perfis de pressões definidos por Nagai e respectiva variação de pressões no tempo (adaptado de Losada *et al.*, 1995).

Figure 2. Time evolution of wave pressure distribution defined by Nagai (adapted from Losada *et al.*, 1995).

Estes quatro regimes têm elementos comuns: em todos eles ocorrem dois picos de pressão e a pressão máxima ocorre na proximidade do nível médio, onde o produto da massa pela velocidade atinge o máximo e se transmite uma maior quantidade de energia da agitação para a estrutura. O primeiro pico deve-se à desaceleração da massa de água quando esta atinge a estrutura e passa de um movimento essencialmente horizontal para um vertical, com a subida da massa de água na face vertical da estrutura até atingir uma cota máxima. Quando esta massa de água começa a descer, inicia-se uma acumulação de água em frente à estrutura que dá lugar ao segundo pico de pressão. A relação entre os valores dos dois picos de pressão difere consoante o regime de impacto, podendo ir desde valores da ordem da unidade para o regime estático até valores muito superiores a este para o regime em rebentação com impacto.

3. MODOS DE RUÍNA E CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE

Considerando que a fundação (ou o manto onde a estrutura assenta) é estável e não se altera devido à transmissão de esforços da estrutura quando sujeita à acção da agitação, ou seja, não se considerando a ruína devida a assentamentos ou outros aspectos relacionados com aspectos geotécnicos, os modos de ruína de uma estrutura monolítica reduzem-se aos possíveis movimentos de deslizamento e derrubamento.

Para analisar a estabilidade ao deslizamento e ao derrubamento, pode-se considerar o equilíbrio estático do sistema, supondo que a acção é constante. Assim, consideram-se diversas hipóteses simplificativas:

- As forças máximas instantâneas que actuam na estrutura são constantes no tempo;
- O sistema estrutura-fundação é considerado rígido até ao momento anterior em que se produz a ruína por deslizamento ou derrubamento, ou seja, não há acumulação de dano mas somente ruína instantânea.

Normalmente, este método aplica-se considerando como caso mais gravoso aquele em que a estrutura é infinita (isto é, considerando-se desprezável o efeito dos contornos da estrutura), e a incidência é normal à estrutura. No âmbito do projecto PROVERBS, admite-se que se pode utilizar este critério no caso de todos os regimes de forças excepto naquele em que ocorre a rebentação directa da onda (Oumeraci *et al.*, 2001).

Considera-se aqui que as forças sobre uma estrutura vertical ou mista tem uma componente hidrostática que actua dos dois lados da estrutura e na sua base, e uma componente hidrodinâmica, resultante da acção da onda, ver Figura 3, que actua apenas na base e a barlar da estrutura, ou seja, considera-se que a sotamar a componente hidrodinâmica é desprezável, se não ocorrer galgamento.

Uma vez calculadas as forças horizontais e de subpressão, estabelecem-se coeficientes de segurança ao deslizamento, C_{SD} , e derrubamento, C_{SV} , que relacionam os esforços favoráveis e desfavoráveis à estabilidade da estrutura. Para que o sistema se considere estável, os coeficientes devem ser sempre superiores a 1, embora usualmente se considerem valores entre 1,2 e 1,4.

$$C_{SD} = \frac{\mu(\text{Peso} - \text{subpressões})}{\sum \text{Forças horizontais}} \quad (3)$$

$$C_{SV} = \frac{M_{Peso}}{\sum M_{Forças\ horizontais} + M_{subpressões}} \quad (4)$$

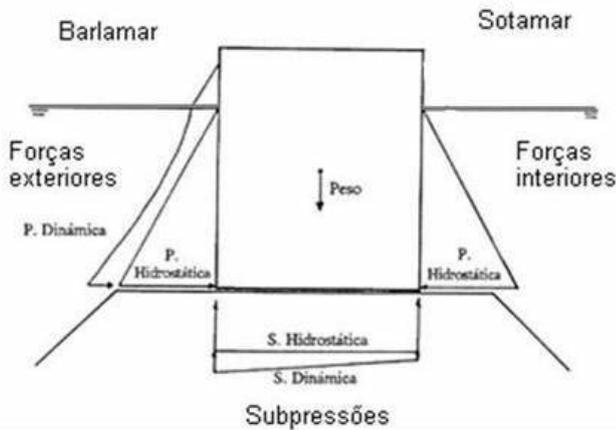


Figura 3. Forças actuantes sobre uma estrutura monolítica.

Figure 3. Forces acting on a vertical structure.

O coeficiente μ é o coeficiente de atrito entre a estrutura e a base. Nagai (1973), baseado em resultados de modelo físico e na experiência adquirida em protótipo para quebra-mares mistos, sugere valores de μ entre 0,65 e 0,70 no caso de haver deslocamento de blocos do manto em tempestades durante os primeiros anos da obra, aumentando para valores entre 0,7 e 0,9 se o deslocamento ocorrer passados mais de dois anos do final da construção da obra e entre 0,80 e 0,90 no caso de não haver deslocamento de blocos do manto nos primeiros anos da obra. Este autor sugere ainda o valor de 0,60 como valor a utilizar em projecto e que está do lado da segurança. No cálculo de C_{SV} , M representa o momento associado a cada uma das forças e o peso representa o peso total emerso.

O equilíbrio de forças que se apresentou é válido para agitação com incidência normal à estrutura, onde as forças estão em fase ao longo de toda a estrutura. Para o caso de agitação com incidência oblíqua, como é o caso da cabeça dos molhes, o estudo deve ser feito considerando os efeitos tridimensionais, que aí são especialmente relevantes.

Também se considerou, no equilíbrio estático, que as forças são constantes no tempo. No caso de forças de impacto, isto é, grandes forças de curta duração, este equilíbrio é demasiado rigoroso, já que o efeito destas forças é pequeno.

O equilíbrio dinâmico tem em conta a sucessão de respostas às acções que a estrutura sofre. Esta resposta pode ser do tipo elástica, que corresponde a movimentos oscilatórios de balanceamento, ou do tipo plástica, que corresponde a movimentos permanentes de deslizamento e derrubamento. A sucessão de respostas leva à degradação do sistema estrutura-fundação e propicia a ruína progressiva da estrutura que, a longo prazo, pode levar à sua ruína total.

Para tratar o equilíbrio dinâmico do sistema não existe um único método, mas diferentes aproximações, cada uma

com as suas simplificações: considerar a força estática mas a resposta da fundação elástica, ou a força dinâmica com resposta elástica ou elasto-plástica da fundação. O método desenvolvido por Korthenhaus e Oumeraci e compilado no projecto PROVERBS (Oumeraci *et al.*, 2001) considera uma aproximação estática para o projecto, ou seja, uma força estática cuja resposta é equivalente à da força dinâmica que esta sofre e cujo valor está relacionado com o da força dinâmica através de um parâmetro denominado “factor de força dinâmica”, que depende da duração da aplicação da força.

4. DETERMINAÇÃO DE FORÇAS ACTUANTES

4.1. Fórmulas empíricas e semi-empíricas

Para o cálculo das forças em quebra-mares verticais e mistos, o método mais utilizado em projecto são as fórmulas empíricas ou semi-empíricas. Estas fórmulas têm como grande vantagem a facilidade de utilização e são o elemento mais utilizado na fase de estudo prévio de uma obra marítima. A sua principal desvantagem deve-se a que a aplicação directa destas fórmulas está limitada a estruturas de geometrias simples e a condições específicas de agitação e níveis para que foram desenvolvidas. Outra limitação é o facto de todos os métodos considerarem a estrutura como infinita e impermeável, não contemplando possíveis efeitos que possam modificar as características da agitação que incide sobre a estrutura, tais como a difracção na cabeça do molhe. Por serem baseadas em ensaios em modelo reduzido, podem ainda estar afectadas por erros devidos a efeitos de escala tais como os que resultam da não correcta consideração da porosidade do manto (Pérez-Romero *et al.*, 2009).

Estas fórmulas apresentam algumas características comuns no cálculo das pressões dinâmicas (ou das respectivas forças). Para quebra-mares verticais e mistos (regimes estacionário, quasi-estacionário ou impulsivo), as forças horizontais hidrodinâmicas (Figura 4), são calculadas considerando-se que:

- A pressão máxima, p_1 ,
 - ocorre no nível de água em repouso (NMM) ou na sua proximidade;
 - é proporcional a $\rho g H_D$, em que H_D é a altura de onda no pé da estrutura, ou seja, considerando o efeito da reflexão;
- A pressão diminui entre $p_1(z=0)$ e
 - $p_3(z=-h)$ seguindo uma função de co-seno hiperbólico ou linear, no caso da estrutura se encontrar em águas pouco profundas;
 - $p_4(z=\eta_{max})=0$, assumindo uma distribuição hidrostática de pressões.

Quanto às subpressões hidrodinâmicas, considera-se nas formulações que:

- a barlamar a pressão é igual à pressão horizontal obtida na base da estrutura ($P_u=p_3$);
- a sotamar (onde se considera que a água está em repouso), a pressão hidrodinâmica é nula;
- a distribuição de pressões entre barlamar e sotamar é triangular.

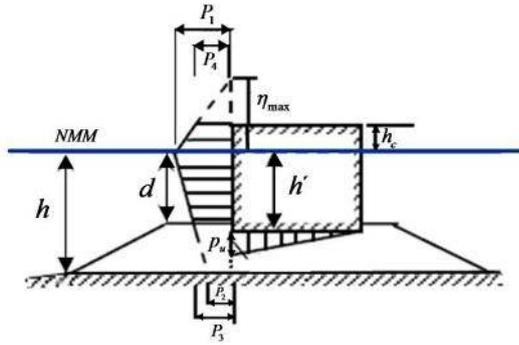


Figura 4. Perfil de pressões hidrodinâmicas, Goda (1985).
Figure 4. Hydrodynamic pressure profile, Goda (1985).

Quanto aos fenômenos que podem alterar as forças na estrutura:

- a reflexão é considerada indirectamente quer no valor de H_D quer no de η_{max} ;
- o galgamento, embora reduza as forças na estrutura, só é considerado através da redução do nível máximo η_{max} ;
- a rebentação é considerada através de um aumento da pressão apenas na proximidade do nível médio;
- a dissipação através de meios porosos que possam existir na base ou a barlar da estrutura não é considerada;
- a obliquidade da agitação é considerada em algumas formulações através da alteração da altura de onda, considerando que as forças são apenas função da componente da altura de onda perpendicular à estrutura.

Assim, a resultante das forças hidrodinâmicas horizontais, F_h , e verticais, F_v , é dada por:

$$F_h = \frac{1}{2}(p_1 + p_4)R_c^* + \int_{-h}^0 p(z)dz$$

$$F_v = \frac{1}{2} p_u B$$
(5)

onde $R_c^* = \min(\eta_{max}, h_c)$ e B é a largura da estrutura. No caso de se considerar que a distribuição de pressões é linear entre $z=0$ e $z=-h$, F_h é dada por:

$$F_h = \frac{1}{2}(p_1 + p_4)R_c^* + \frac{1}{2}(p_1 + p_3)d$$
(6)

Os correspondentes momentos vêm dados por:

$$M_h = \int_{-h}^{\eta_{max}} P(z).z dz$$

$$M_v = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} p_u B \right) B$$
(7)

Da mesma forma, no caso de se considerar que a distribuição de pressões é linear entre a superfície ($z=0$) e o fundo ($z=-h$), M_h é dada por:

$$M_h = \frac{1}{6}(p_1 + 2p_4)R_c^{*2} + \frac{1}{2}(p_1 + p_4)d R_c^* + \frac{1}{6}(2p_1 + p_3)d^2$$
(8)

O domínio de aplicação de cada fórmula está relacionado com o regime de forças e com os seus limites de aplicabilidade. No Quadro 1 apresenta-se um resumo de algumas das fórmulas ou formulações mais importantes ou mais utilizadas para quebra-mares verticais e mistos.

Um dos aspectos importantes a definir aquando da aplicação das fórmulas é quais os parâmetros de agitação a utilizar como representativos de um estado de mar, já que muitas das formulações foram desenvolvidas para agitação regular. No Quadro 2 resumem-se os parâmetros a utilizar e os autores que os sugerem. O ângulo θ representa o ângulo que a direcção de propagação da onda faz com a perpendicular à estrutura, sendo por isso 0° no caso de agitação normal à estrutura. H e T representam a altura de onda e o respectivo período, η_{max} a cota máxima de água alcançada pela onda e L o comprimento de onda. H_{max} e H_s representam as alturas de onda máxima e significativa, respectivamente, e $H_{1/10}$ e $H_{1/3}$ a média das alturas do décimo e do terço das ondas mais elevadas de um registo, respectivamente e $T_{1/3}$ e $T_{1/10}$ a média do décimo e do terço dos períodos das ondas mais elevadas de um registo, respectivamente.

O cálculo da resultante das forças impulsivas devidas à rebentação, assim como a duração do impulso, são dos valores mais difíceis de quantificar e o próprio processo em si ainda não é totalmente conhecido em profundidade. Não existe actualmente uma metodologia fiável para o projecto de obras sujeitas a forças impulsivas e os manuais sugerem que se evitem estruturas que estejam sujeitas a este tipo de forças. Assim, para o seu cálculo utiliza-se frequentemente o método de Goda modificado por Takahashi para ter em conta as forças impulsivas, pese embora as suas limitações e a importância que este tipo de forças impulsivas pode ter quer na estabilidade da estrutura quer, quando existe banquetta de fundação, na estabilidade do manto de enrocamento da banquetta (Cooker & Peregrine, 1992). Estas fórmulas, à semelhança da fórmula de Minikin, multiplicam a pressão máxima por uma constante para ter em conta o aumento de pressão devida à rebentação, ou seja, a rebentação é considerada apenas através de uma alteração do perfil (aumento da pressão) na proximidade do nível médio da água.

No âmbito do projecto PROVERBS, com base em dados de ensaios e de campo, foi proposta uma metodologia para o cálculo de forças em estruturas verticais sujeitas a forças impulsivas que determina um valor para essa constante. No entanto, as resultantes das forças, mesmo para condições de agitação semelhantes, dão valores com uma grande variabilidade. Recentemente, Cuomo *et al.* (2011) propuseram uma fórmula para o cálculo de forças impulsivas baseados em dados de ensaios em modelo físico, mas o seu domínio de validade é bastante restrito.

Tabela 1. Formulações, teorias de base e condições de aplicação.
Table 1. Formula, based theory and limits of application.

Fórmulas		Regime de forças	Teoria de ondas de base	h/L	Condições de aplicação
Sainflou (1928)		Estacionário	Trocoidal	<0.25 Stokes	Agitação regular Fundo de pequeno declive (<1/50) H/L <0.06 Reflexão total, sem rebentação ou galgamento
Goda (1974)		Estacionário	Stokes de 4ª Ordem	Todos	Agitação regular Sem obliquidade
Goda modificado	Tanimoto et al. (1976)	Estacionário	-		Considera o efeito da obliquidade
	Takahashi et al. (1994)	Impulsivas	-		Considera o efeito da rebentação
Nagai (1973)		Estacionário	Stokes	Stokes Bousinesq (quebra-mar misto com banqueteta alta)	Agitação regular Incidência normal Reflexão perfeita, sem rebentação
Fenton (1985)		Estacionário	Stokes de 3ª Ordem	Stokes	Incidência oblíqua Reflexão total Sem rebentação <i>short-crested waves</i>
Hiroi (1919)		Impulsivas	Analogia com a pressão hidrodinâmica	<0.1	Ocorrência de rebentação h < 2H
Peregrine et al. (1994)		Impulsivas	Onda solitária com teoria de impulso		Eventos de impacto

Tabela 2. Parâmetros de projecto de cada fórmula.
Table 2. Design wave parameters of each formula.

Fórmulas	Parâmetros de projecto			
	H	η_{max}	T	θ (°)
Sainflou (1928)	H_{max}^*	$H + (\pi H^2/L) \coth(2\pi h/L)$	T	$0 < \theta < 20$
Goda (1972) Tanimoto et al. (1976) Takahashi et al. (1994)	$H_{max} = 1.8H_s$	$0.75(1 + \cos\theta)\lambda_1 H_{max}$	$T_{1/3}$	$0 < \theta < 90$
Nagai (1973)	Quebra-mar misto – $H_{1/10}$	H	$T_{1/10}$	0
	Quebra-mar vertical – $H_{1/3}$	$1.3H$ (h/L < 0.135 e H/L < 0.04)		
Fenton (1985)	H_{max}^*	**	T	$0 < \theta < 90$
Hiroi (1919)	$H_{1/3}$	1.25 H	-	0

*Recomendação de Takahashi (1996)

** Ver Fenton (1985)

No que se refere a forças impulsivas, é de destacar o trabalho de Peregrine *et al.* (1994) que, dado que as teorias de onda não conseguem explicar estes picos impulsivos de pressão, propôs uma teoria de impulso que aclara melhor o fenómeno e as suas características (Peregrine, 2003). Peregrine verificou que, embora a pressão máxima se alterasse cada vez que se repetiam as condições que provocavam um impulso de pressão, o impulso ou a força eram bastante mais consistentes. Assim, uma vez conhecido o ponto de pressão máxima, o campo de pressões apresentava um padrão simples, que decaía do máximo até uma pressão próxima da hidrostática a uma distância igual a duas vezes a profundidade, no pé da estrutura. Com base nesta teoria, avalia a pressão máxima devida ao impulso ao redor do nível médio, dado pelo integral da pressão no tempo durante o impacto. Considerando desprezáveis os termos convectivos na equação da quantidade de movimento, o campo de pressões impulsivas satisfaz a equação de Laplace e, com condições de fronteira adequadas, pode-se obter a solução em termos de uma série de Fourier. Aqui, o impacto é considerado apenas como o pico violento. Peregrine (2003) refere que o factor mais importante para a força impulsiva é a forma da onda quando atinge a estrutura e que as maiores pressões (e respectivas forças) ocorrem quando a onda atinge a estrutura, isto é, quando, na rebentação, se inicia a formação da voluta (*overturning*). Nestes casos, o pico de pressão é muito elevado e de duração muito curta, sendo seguido de oscilações, relacionadas ou com a forma irregular da crista da onda incidente ou com os efeitos do ar aprisionado (*trapped*) e do ar misturado com a água (*entrained*). Finalmente aparece um segundo pico, de muito menor intensidade, muito semelhante ao que surge no caso de interação não violenta, tal como se mostra na Figura 5.

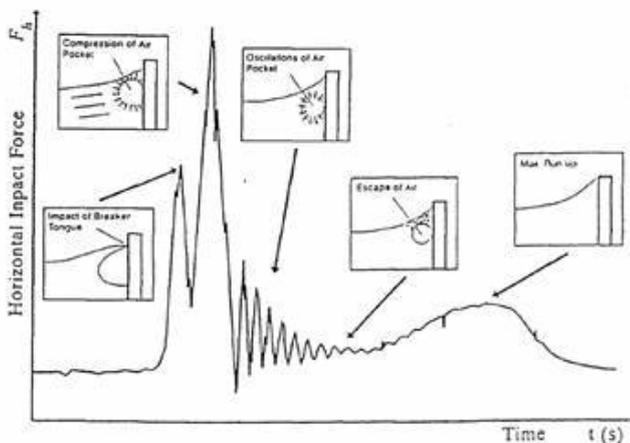


Figura 5. Características da força impulsiva e suas origens (Schmidt *et al.*, 1992).

Figure 5. Impulsive force characteristics (Schmidt *et al.*, 1992).

No caso da onda atingir a estrutura após a rebentação, as forças hidrodinâmicas acima do nível médio da água do mar, P_{so} , são proporcionais ao quadrado da velocidade com que a frente da onda rebentada atinge a estrutura, C , que no caso de pequenas profundidades toma o valor $C=(gh_b)^{1/2}$, e a correspondente força é proporcional à altura de onda que atinge a estrutura, H_b . Assim, a força depende da velocidade de impacto e da altura de onda no impacto, que por sua vez depende do tipo de rebentação. Além da pressão de choque, P_{so} , devida ao impacto da onda, a pressão tem também uma componente pseudohidrostática, P_p , devida ao nível alcançado pela lâmina líquida durante o espraiamento.

Todas as formulações referidas até agora, com excepção da de Sainflou, permitem calcular as forças a barlamar da estrutura ou as forças de subpressão. No entanto, as forças a sotamar da estrutura podem ser importantes para a estabilidade de um quebra-mar vertical. No âmbito do projecto PROVERBS foi proposto majorar o valor obtido por Sainflou, multiplicando-o por uma constante igual a 1,27, válido apenas no caso de fundos de aproximação com declive até 1:50. No caso de forças impulsivas, um mecanismo importante de geração de fortes forças a sotamar de uma estrutura é devido às “ondas” que galgam a estrutura e atingem a área abrigada mergulhando sobre esta (Walkden *et al.*, 2001). Estas forças podem ser superiores às de barlamar e aumentar o risco de ruína por derrubamento na direcção de barlamar. No entanto, não existem formulações para o seu cálculo. Walkden *et al.* (2001) utilizaram a teoria de impulso proposta por Peregrine para estudar este tipo de forças com resultados satisfatórios.

4.2. Modelação física

Na fase de projecto de execução de estruturas marítimas de maior envergadura recorre-se frequentemente à modelação física, como forma de obter resultados fiáveis e proceder à verificação do pré-dimensionamento da obra, criando simultaneamente uma estrutura funcional, estável e económica. Os modelos físicos permitem verificar se a solução proposta cumpre as imposições previstas e permitem ainda obter informação de base para o possível desenvolvimento de fórmulas semi-empíricas.

Em 2007, no âmbito do projecto europeu Hydralab III, foi publicado um relatório onde se apresentam recomendações para a modelação física de quebra-mares de talude, de forma a uniformizar os ensaios realizados nos diferentes laboratórios e simplificar a troca de dados e a sua análise (Wolters, 2007). Este trabalho baseia-se em trabalhos anteriores de diferentes instituições, tal como o Rock Manual (CIRIA, 2006). Também foram analisados, em diferentes projectos europeus e de forma detalhada, os principais erros cometidos nos ensaios em modelo físico para alguns tipos específicos de estudos, como é o caso do Projecto CLASH, em que foram analisados os galgamentos de estruturas marítimas, do Projecto DELOS, que analisou ensaios de estruturas com cota de coroamento baixa (*low-crested*) ou do projecto PROVERBS, em que foram analisados os quebra-mares verticais.

No que se refere a quebra-mares verticais e mistos, o sistema mais utilizado em ensaios em modelo físico para obtenção de forças é a utilização de sensores de pressão instalados na estrutura. A força resultante é obtida integrando os valores de pressão medidos numa determinada área. No caso de se pretender obter informação acerca de picos impulsivos de força, esta só pode ser obtida por medições detalhadas de pressão na face frontal da estrutura, com uma frequência de aquisição muito elevada, superior a 1000Hz.

Wolters (2007) resume os vários métodos utilizados em modelos físicos para avaliar a estabilidade da superestrutura de um quebra-mar, considerando os modos de ruína por deslizamento e derrubamento:

1. Por medição da força global numa secção da estrutura utilizando uma mesa de força ou um grupo de elementos de medição de força.

Este procedimento é utilizado frequentemente para medir a resultante das forças horizontais, já que a qualidade das medições das forças de subpressão pode ser baixa, por esta medição requerer que este elemento de estrutura esteja suspenso e que não toque no enrocamento que está imediatamente abaixo dele. A introdução de qualquer pequeno espaço pode alterar as subpressões que actuam na base da estrutura, quer no seu valor, quer na sua distribuição. O uso de uma espuma permeável para reduzir o escoamento neste espaço pode ser suficiente se o escoamento/pressão não alterar as características da transmissão, mas este processo introduz também incertezas na medição.

2. Por medição das pressões dinâmicas na face frontal e na base da estrutura, que podem ser integradas de forma a determinar as forças totais e calcular posteriormente os respectivos momentos.

Este procedimento tem a vantagem de poder medir também as forças de impulso na posição de cada sensor de pressão, caso se meça com uma frequência de aquisição convenientemente escolhida. A desvantagem deste método é que se obtêm apenas medições locais de pressão num número reduzido de pontos, que são posteriormente integradas para obter as forças e os respectivos momentos, podendo não incluir o ponto de pressão máxima. Ao contrário do método anterior, as forças de subpressão são bem representadas.

3. A secção da estrutura pode ser reproduzida com um peso reduzido de forma a que haja semelhança das forças de fricção entre o manto e a estrutura, entre o modelo e o protótipo.

Este procedimento é muito simples e pode ser muito útil para uma rápida avaliação da segurança ao derrubamento e ao deslizamento, mas não identifica as forças *per se*, apenas as forças de deslizamento.

O cálculo de forças em modelos físicos pode ser afectado por erros, que se podem agrupar em:

- erros de construção do modelo;
- erros de medição e de medida e/ou análise de dados;
- erros devidos a efeitos de escala.

Os erros de modelo têm origem na reprodução

incorrecta de algumas características do protótipo, tais como a geometria, a resistência mecânica dos blocos e das características das ondas e das correntes, devido, por exemplo, às condições de fronteira no modelo. Os erros de medição resultam da influência das diferentes técnicas de medição ou dos diferentes sistemas de medição nos resultados obtidos. Os erros de medida têm origem, por exemplo, na utilização de equipamentos pouco precisos ou pouco apropriados às medições a efectuar e os de análise de dados na incorrecta análise das medições obtidas. Os efeitos de escala resultam da incorrecta reprodução no modelo à escala dos fenómenos de interacção onda-estrutura do protótipo.

De entre estes, os mais gravosos e difíceis de evitar são os erros devidos aos efeitos de escala. Para que todos os fenómenos envolvidos fossem bem reproduzidos à escala, os números de Froude, Weber, Reynolds e Cauchy deveriam ser os mesmos no modelo e no protótipo. No entanto, estes critérios não podem ser satisfeitos simultaneamente.

Usualmente, em estudos que envolvam propagação e rebentação de ondas, o número de Froude é o utilizado já que os efeitos de pressão, gravidade e inércia são os mais relevantes. Consequentemente, as forças devidas à fricção (Semelhança de Reynolds), os efeitos de elasticidade (Semelhança de Cauchy) e as forças de tensão superficial (Semelhança de Webber) são desprezados na maioria dos modelos físicos. Os erros resultantes do facto de se ignorar estes efeitos são os chamados efeitos de escala. Na Figura 6 apresenta-se um resumo das leis de semelhança que deveriam ser satisfeitas para cada um dos diferentes fenómenos que ocorrem na interacção da onda com uma estrutura de protecção marginal (Korthenhaus *et al.*, 2005).

A propagação das ondas é bem modelada recorrendo à semelhança de Froude, já que, como foi referido, os principais fenómenos que ocorrem na propagação estão relacionados com as forças de pressão, de inércia e de gravidade.

No caso de escoamento em meios porosos, como é o caso dos quebra-mares de talude ou de quebra-mares mistos, o efeito de escala mais gravoso é devido à falta de semelhança do escoamento no meio poroso. Isto afecta outros processos tais como as forças de subpressão, o espraiamento, o galgamento, a transmissão e a reflexão e, possivelmente, também as forças nos blocos do manto.

No caso de quebra-mares verticais sujeitos à acção da rebentação de ondas, o efeito de escala mais gravoso está relacionado com a incorrecta reprodução das forças de impacto, principalmente devido à falta de semelhança do ar aprisionado (*trapped*) e da mistura ar/água (*entrained*), ligada à rebentação. Embora haja métodos que sugiram correcções desse efeito (por exemplo Kortenhaus & Oumeraci, 1999), os modelos a grandes escalas, o mais próximas possíveis do protótipo, são a melhor alternativa. Trabalhos recentes (Bullock *et al.*, 2007, Cuomo *et al.*, 2010) mostram que escalas como a de Froude e a de Cauchy não levam a uma reprodução correcta dos picos de pressão ou da sua duração.

Como a estabilidade de estruturas monolíticas não costuma ser afectada por picos de pressão de curta duração, a escala de Froude pode ser utilizada, obtendo-se valores do lado da segurança. No entanto, localmente, a estrutura pode ser afectada por uma sucessão de picos de pressão levando a que o dano possa progredir e levar à ruína da estrutura e daí a importância da correcta modelação deste tipo de forças.

No caso das forças de arrastamento, existe uma gama de valores do número de Reynolds para a qual o coeficiente de arrastamento é constante. Se se utilizar a lei de semelhança de Froude, considerando que o campo de ondas é dominado pelas forças de gravidade e inércia, é suficiente garantir que o nº de Reynolds do modelo e do protótipo representam o mesmo regime de escoamento. O mesmo se pode dizer com respeito ao número de Weber.

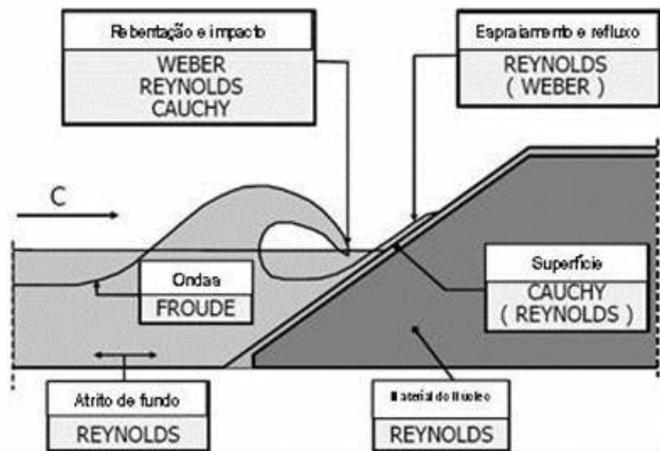


Figura 6. Efeitos de escala e semelhança a considerar para uma estrutura de protecção marginal, segundo Furböter, 1986 (Korthenhaus et al., 2005).

Figure 6. Scale effects and similitude laws in modelling wave loads and response of sea dikes in Führeböter (Korthenhaus et al., 2005).

5. AVALIAÇÃO DAS FÓRMULAS PARA A DETERMINAÇÃO DE FORÇAS ACTUANTES EM QUEBRA-MARES VERTICAIS

Os dados de protótipo são raros mas extremamente importantes, já que permitem verificar a qualidade das previsões obtidas pela aplicação das fórmulas. Como foi referido, as fórmulas existentes para o cálculo de forças em quebra-mares verticais e mistos foram deduzidas com base em dados obtidos em ensaios realizados em modelo físico reduzido, podendo por isso estar afectados por erros devidos a efeitos de escala.

Nos últimos anos, algumas obras foram dotadas de sensores que permitiram obter dados de pressões e, através destes, permitiram calcular forças nas estruturas. Embora os dados obtidos em protótipo possam estar sujeitos a erros, são certamente o método disponível mais fiável de obter forças em quebra-mares verticais e mistos.

Um dos quebra-mares que foram monitorizados é o do porto de Gijón, situado no Norte de Espanha, na zona central da costa Cantábrica. A ampliação deste porto consistiu na construção de um novo quebra-mar de abrigo formado por três troços principais, dos quais um é de tipologia vertical: o molhe Norte.

O molhe Norte tem 1565 m de comprimento e profundidades variáveis entre os 25 e os 30 m. É composto por 33 caixotões de 32 m de altura por 32 m de largura e 51,8 m de comprimento. Os caixotões, de betão armado,

estão apoiados sobre uma banqueta de fundação enraizada à cota -24,75 m, constituída por enrocamento de 150-250 kg. Para evitar a erosão da banqueta, foi construída uma berma composta por blocos artificiais de betão de 90 ton. O galgamento é controlado por uma superestrutura com coroamento à cota +24 m. Na Figura 7 apresentam-se as principais características e dimensões do molhe. Neste molhe, foram seleccionadas duas secções separadas de 260 m entre si (caixotões 20 e 25), para a instalação de uma série de sensores de pressão (Vílchez et al., 2011b):

- 8 no paramento vertical do caixotão (P1-P8);
- 5 na superestrutura (E1-E5), para medir pressões frontais;
- 4 na base do caixotão (S1-S4), para medir subpressões.

Os sensores hidrodinâmicos instalados foram ligados à superfície para eliminar a pressão atmosférica.

Com base nos dados medidos nestes sensores entre Janeiro e Março de 2010, Vílchez et al. (2011b) analisou 126 estados de mar de uma hora de duração cada, dos quais 7 corresponderam a temporais, considerando-se como temporal a sequência contínua de estados de mar para os quais a altura de onda significativa (H_s) ultrapassa os 3 m (Figura 8).

Para cada estado de mar, foram calculadas as características da agitação: a altura de onda significativa, H_s , o período de pico do espectro, T_p e o ângulo entre a direcção principal da agitação incidente e a perpendicular ao molhe, β . No Quadro 3 apresentam-se as características dos sete temporais ocorridos no período de estudo. Em nenhum dos casos analisados se observou rebentação das ondas nem galgamento da superestrutura.

Para obter as pressões exercidas pela agitação marítima no molhe, efectuou-se uma filtragem do sinal registado em cada um dos sensores de pressão, de forma a eliminar a pressão hidrostática e extrair apenas as pressões hidrodinâmicas. Na Figura 9 apresenta-se um exemplo de diagrama de pressões hidrodinâmicas horizontais, P_h , e verticais, P_v , obtido num dos estados de mar medidos.

Da análise da variação das pressões hidrodinâmicas (Vílchez et al., 2011b), obtiveram-se os seguintes resultados:

- A pressão máxima no nível médio do mar (NMM) de cada estado de mar (P_{max}) é proporcional ao valor máximo alcançado pela superfície livre na parede do molhe (η), e é dada pela seguinte expressão: $P_{max} = \rho g \eta$, sendo ρ a massa volúmica da água e g a aceleração da gravidade.
- A subpressão hidrodinâmica medida no sensor de pressão localizado no extremo de sotamar da base da estrutura, P_{SB} , não é nula e aumenta com a altura de onda máxima, H_{max} , e com o período, T (ver Figura 10), ou seja, não se verifica a hipótese de que a lei de subpressões dinâmica é triangular, como admite a maioria das formulações de cálculo existentes.

A resultante das forças horizontais, F_h , foi obtida a partir da integração na vertical dos valores instantâneos de pressão e a resultante das forças verticais, F_v , por ajustamento linear das pressões medidas em cada instante e em cada sensor da base, integrando a distribuição de pressões obtida ao longo da base do caixotão (Figura 11).

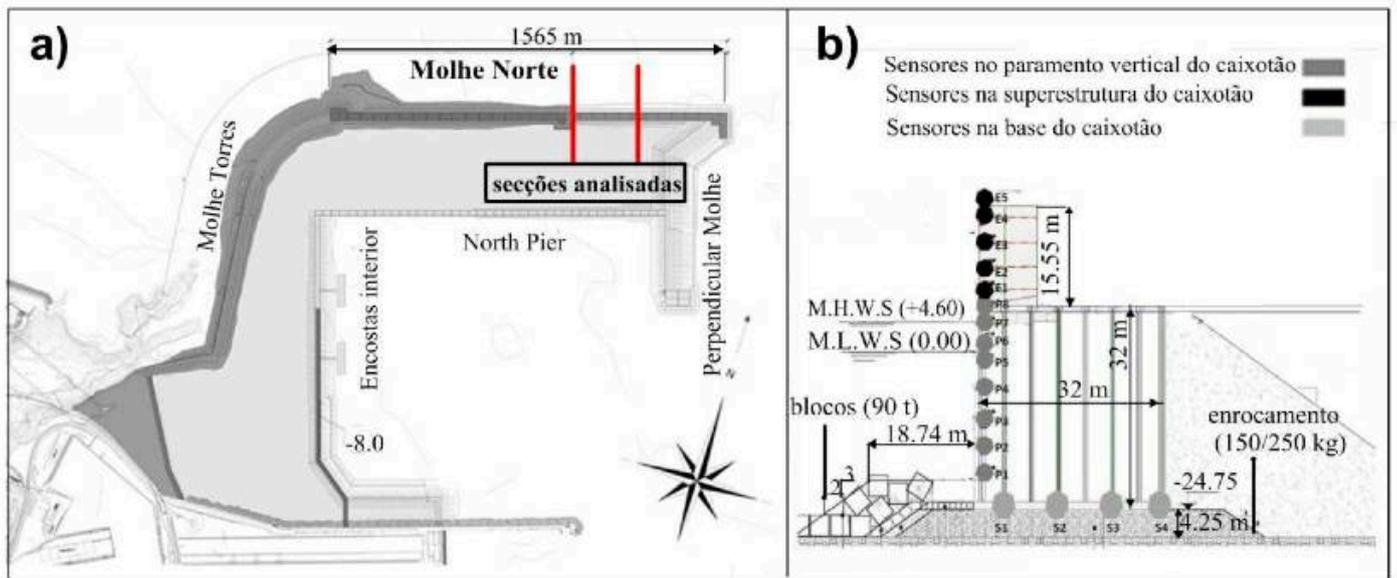


Figura 7. Planta do molhe Norte de Gijón, secções analisadas e localização dos sensores, Vilchez et al. (2011b).
Figure 7. Geometric characteristics of the North Breakwater and location of the pressure sensors, Vilchez et al. (2011b).

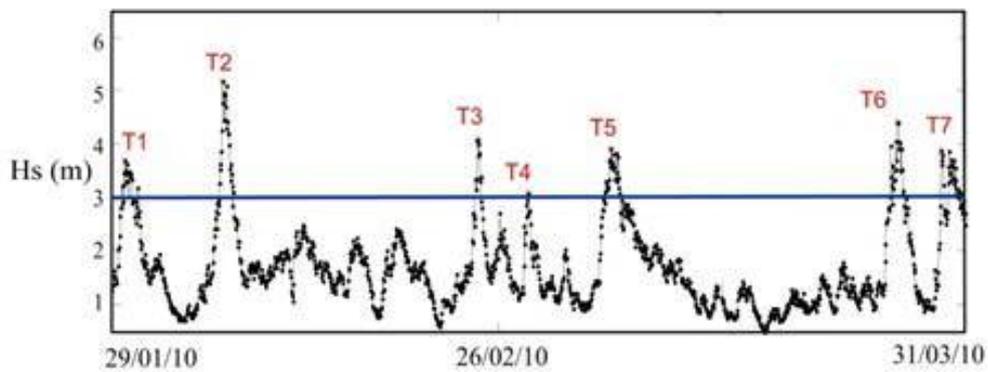


Figura 8. Variação da altura de onda significativa, H_s , dos estados de mar no período de estudo, Vilchez et al. (2011b).
Figure 8. Significant wave height, H_s , obtained for the sea states in the study period, Vilchez et al. (2011b).

Tabela 3. Características dos temporais no período de estudo, Vilchez et al. (2011b).

Table 3. Characteristics of the storms occurred in the study period, Vilchez et al. (2011b).

Temporal	H_s (m)	T_p (s)	β (°)
T1	3.69	10.3	3.3
T2	5.18	16.5	6.2
T3	4.08	15.2	18.8
T4	3.08	9.5	82.9
T5	3.83	8.8	84.5
T6	4.41	13.6	18.8
T7	3.88	11.9	32.1

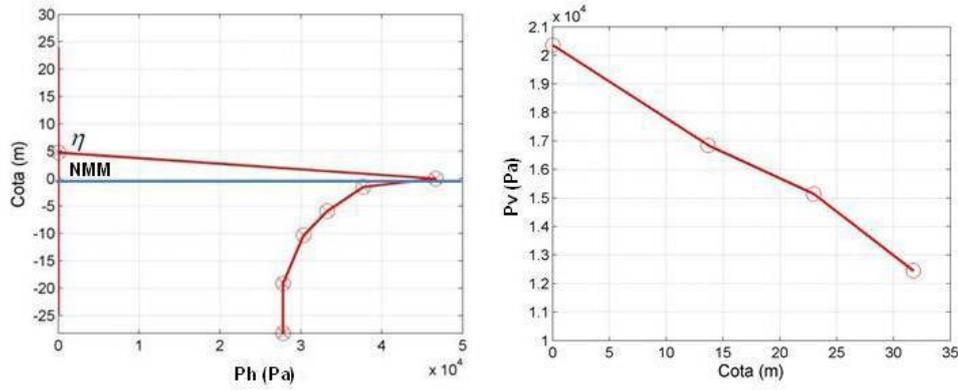


Figura 9. Diagramas de pressões horizontais, P_h , e verticais, P_v , obtidos num estado de mar.
Figure 9. Horizontal, P_h , and vertical, P_v , pressure laws measured.

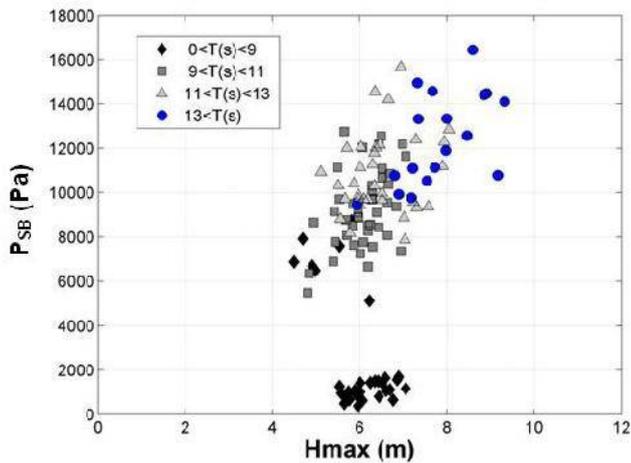


Figura 10. Valor da pressão no extremo de sotamar da base da estrutura, P_{SB} , para cada estado de mar, em função de H_{max} (Vílchez et al., 2011b).

Figure 10. Wave pressure at the toe of the structure, P_{SB} , as function of H_{max} (Vílchez et al., 2011b), for each sea state.

Por último, em cada estado de mar seleccionaram-se as resultantes das forças máximas horizontais e as correspondentes verticais e a distribuição de pressões e subpressões que produzia a força máxima horizontal e a que produzia a força máxima vertical (Vílchez et al., 2011b).

Os resultados mais importantes obtidos para este caso de estudo mostram que:

- Não há simultaneidade entre o valor máximo das resultantes das forças horizontais e verticais, como sugere a maioria das fórmulas;
- Existe uma envolvente de pares de valores ou combinações de forças cujo efeito sobre a estrutura pode ser tanto ou mais desfavorável que a combinação das duas forças máximas.

Com base nestes dados foi possível analisar as fórmulas para o cálculo de forças num quebra-mar vertical apresentadas no ponto 4.1. Assim, Vílchez et al. (2011a) compararam as pressões e forças calculadas com base nos dados medidos em Gijón e com base nas fórmulas de Fenton, Goda, Nagai e Sainflou para quatro estados de mar, cujas características se apresentam no Quadro 4.

Tabela 4. Características dos estados de mar analisados, Vílchez et al. (2011b).

Table 4. Characteristics of the sea state's analyzed, Vílchez et al. (2011b).

Caso	H_s (m)	H_{max} (m)	T_p (s)	Nível de maré (m)	β (°)
1	3.46	6.86	9.4	1.49	7.0
2	3.26	4.35	15.8	4.34	13.1
3	4.19	6.98	15.4	3.86	9.5
4	3.92	6.09	9.0	3.90	82.9

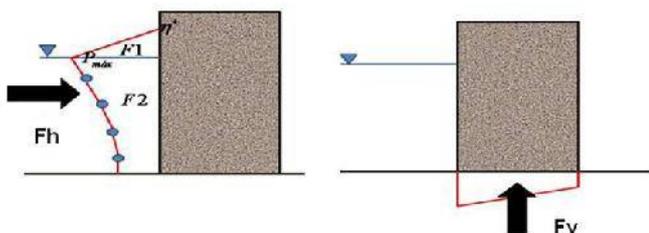


Figura 11. Metodologia de cálculo das forças horizontais, F_h , e verticais, F_v .

Figure 11. Methodology applied to calculate horizontal, F_h , and vertical forces, F_v .

Nas Figuras 12, 13 e 14 apresentam-se as resultantes das forças horizontais, F_h , e verticais (subpressões), F_v , a cota máxima de água alcançada pela onda de projecto, η_{max} , e a pressão no nível de referência (NMM), p_1 , respectivamente, obtidas com a aplicação das fórmulas e com base nos dados medidos em Gijón para os quatro estados de mar.

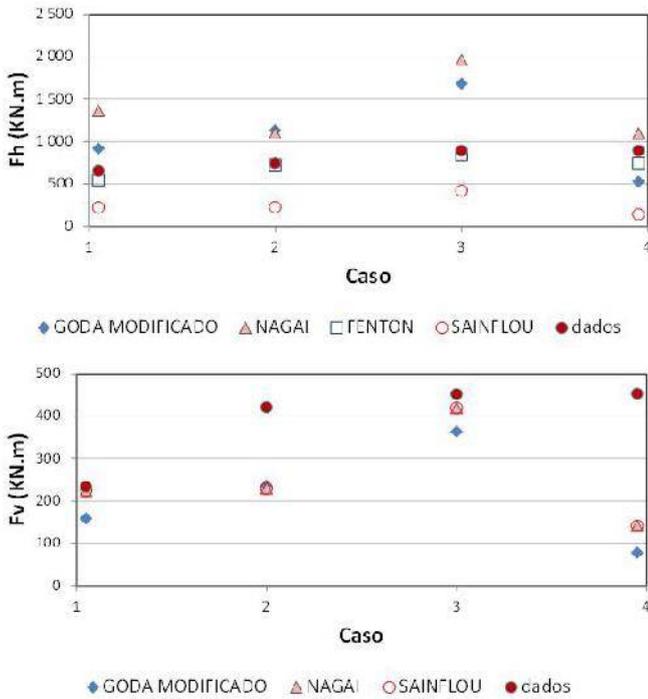


Figura 12. Resultantes das forças horizontais e verticais calculadas com as fórmulas e obtidas com base nos dados medidos no molhe Norte de Gijón (Vílchez et al., 2011a).

Figure 12. Comparison between the horizontal and vertical forces obtained with the theoretical formula and measured at the North Breakwater (Vílchez et al., 2011a).

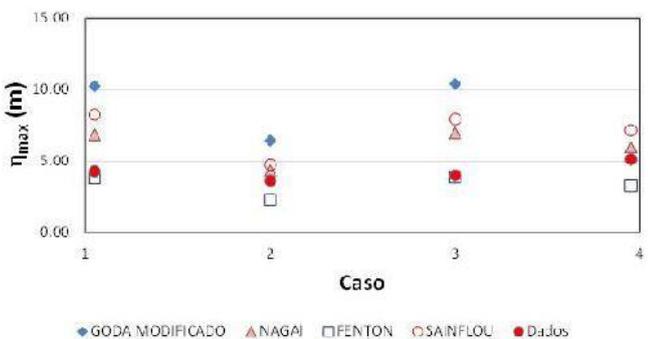


Figura 13. Cota máxima de água alcançada pela onda calculada com as fórmulas e obtida com base nos dados medidos no molhe Norte de Gijón (Vílchez et al., 2011a).

Figure 13. Comparison between maximum free surface elevation calculated with theoretical formula and measured at the North breakwater of Gijón (Vílchez et al., 2011a).

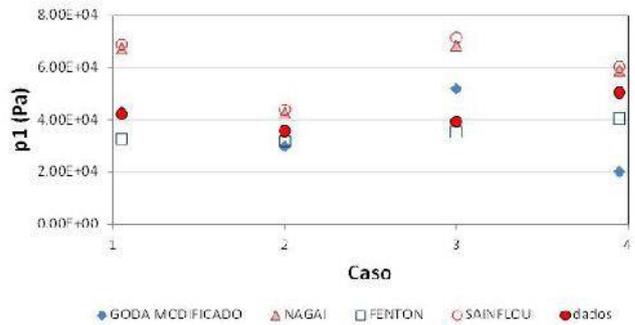


Figura 14. Valores de pressão no nível de referência (NMM), calculados pelas fórmulas e obtidos com base nos dados medidos no molhe Norte de Gijón (Vílchez et al., 2011a).

Figure 14. Comparison between pressures calculated for the reference water level, calculated with theoretical formula and measured in the North breakwater of Gijón (Vílchez et al., 2011a).

Da análise dos resultados destes estudos pode-se concluir que as principais deficiências das formulações normalmente utilizadas na determinação das forças actuantes em quebra-mares verticais são:

- O valor da cota máxima de água alcançada pela onda de projecto, η_{max} , é obtido unicamente a partir das características da agitação incidente, sem ter em conta a influência de factores tão importantes como a geometria e a disposição em planta do molhe. Este valor é fortemente sobrestimado por todas as fórmulas, excepto a de Fenton, que é a que, em geral, se aproxima mais aos valores medidos (ver Figura 13).
- Muitas destas formulações (Sainflou ou Nagai, por exemplo) não contemplam a influência da obliquidade da incidência da agitação marítima, do comprimento do molhe ou das dimensões e características do material granular onde ele assenta, e estas podem alterar substancialmente as leis de pressões e subpressões. Além disso, a incidência normal da agitação nem sempre é a mais desfavorável em todas as secções da estrutura (Vílchez et al., 2011b), tal como considera Goda na sua formulação.
- Considera-se uma lei de subpressões hidrodinâmicas triangular, com um valor nulo de subpressão no extremo de sotamar da base do molhe, o que nem sempre ocorre.
- As resultantes das forças máximas horizontais e verticais calculadas com as fórmulas apresentam grande dispersão de resultados quando comparadas com os dados medidos.
- Os valores de F_h , para estes casos, são subestimados pelas formulações de Sainflou e Fenton, e sobrestimados pela de Nagai, enquanto os valores de F_v são subestimados por todas as formulações (ver Figura 12). A formulação de Goda é a que apresenta maior variabilidade de resultados.
- Para analisar a estabilidade considera-se a resultante das forças horizontais máximas e assume-se que a resultante das forças verticais associadas também é a máxima associada aquele estado de mar, o que nem sempre ocorre.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresenta um resumo dos métodos mais utilizados para a determinação das resultantes das forças actuantes em quebra-mares verticais e mistos: as fórmulas empíricas e semi-empíricas e a modelação física.

As fórmulas empíricas ou semi-empíricas são o método mais utilizado no projecto, que têm como grande vantagem a facilidade de utilização. A sua principal desvantagem deve-se a que a aplicação directa destas formulações está limitada a estruturas de geometrias simples e a condições específicas de agitação e níveis de maré para que foram desenvolvidas. Além disso, algumas destas fórmulas baseiam-se em hipóteses simplificativas que nem sempre são válidas.

Os modelos físicos são um método bastante fiável para o cálculo de forças em estruturas monolíticas e permitem reproduzir os fenómenos físicos sem as simplificações inerentes aos modelos numéricos ou aos métodos analíticos. No entanto são caros e morosos e podem estar afectados por efeitos de escala.

Os dados de protótipo são raros mas extremamente importantes já que permitem verificar a qualidade das previsões obtidas pela aplicação das fórmulas. Com base em dados de campo medidos no quebra-mar vertical do Porto de Gijón entre Janeiro e Março de 2010, foi possível fazer uma apreciação das fórmulas para a determinação das resultantes das forças actuantes em quebra-mares verticais e verificar as principais deficiências destas fórmulas.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, foi possível definir os seguintes critérios a ter em conta no dimensionamento de quebra-mares verticais, de forma a otimizar o projecto e a garantir que a estrutura cumpre, com segurança e economia, os requisitos de projecto:

- O valor da cota máxima alcançada pela onda de projecto (η_{\max}) é a principal variável a ter em conta no dimensionamento já que a partir dela é possível calcular a pressão máxima para o nível médio do mar de referência. Assim, o seu valor deve ser obtido através da aplicação de modelos numéricos que permitam conhecer correctamente a repartição de energia em frente à estrutura, tendo em conta quer as características da agitação, quer as da geometria da estrutura e as do escoamento nos mantos porosos da fundação.
- A pressão hidrodinâmica horizontal máxima, P_{\max} , pode ser calculada com base na cota máxima alcançada pela onda de projecto (η_{\max}), através da expressão: $P_{\max} = \rho g \eta_{\max}$;
- A subpressão hidrodinâmica a sotamar da estrutura não é sempre nula, depende da energia transmitida através dos mantos porosos. Quando o cálculo de subpressões é feito com base em ensaios de laboratório, deve-se verificar se o resultado está afectado por efeitos de escala, devido à reprodução incorrecta das características do manto da fundação, nomeadamente da sua porosidade. A correcção do tamanho do material dos mantos de forma a evitar efeitos de escala pode permitir evitar os erros no cálculo das subpressões.
- Os modos de ruína devem ser verificados para as combinações de forças horizontais e verticais cujo efeito seja o mais desfavorável.

BIBLIOGRAFIA

- Bullock, G.N.; Obhrai, C.; Peregrine, D.H.; Bredmose, H. (2007) – Violent breaking wave impacts. Part 1: Results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls. *Coastal Engineering*, 54(8):602–617. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2006.12.002
- CIRIA, CUR, CETMEF (2006) – *The Rock manual. The use of rock in hydraulic engineering*. 2nd edition, 1304p., C683, CIRIA (Construction Industry Research & Information Association), Londres, Reino Unido. ISBN: 978-0860176831
- Cooker, M.J.; Peregrine, D.H. (1990) - A model for breaking wave impact pressures. *Proceedings 22nd International Conference on Coastal Engineering*, pp.1473-1486, ASCE (American Society of Civil Engineers), Delft, Holanda.
- Cuomo, G.; Allsop, W.; Takahashi, S. (2010) – Scaling wave impact pressure on vertical walls. *Coastal Engineering*, 57(6):604–609. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2010.01.004
- Cuomo, G.; Piscopia, R.; Allsop, W. (2011) - Evaluation of wave impact loads on caisson breakwaters based on joint probability of impact maxima and rise times. *Coastal Engineering*, 58(1):9–27. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2010.08.003
- Fenton, J.D. (1985) - Wave forces on vertical walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, ASCE (American Society of Civil Engineers), 111(4):693-717. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:4(693).
- Goda, Y. (1974) - New wave pressure formulae for composite breakwaters. *Proceedings of the 14th International Coastal Engineering Conference*, 3:1702-1720, ASCE (American Society of Civil Engineers), Copenhagen, Dinamarca.
- Goda, Y. (1985) – Design of Vertical Breakwaters. In: Y. Goda, *Random seas and design of maritime structures.*, pp.107-162, University of Tokio Press, Tóquio, Japão. ISBN: 978-0860083696
- Hiroi, I. (1919) - A formula for evaluating breaking wave pressure intensity in the case of breaking waves. *Journal of the College of Engineering*, 11-21, Tokio Imperial University. Tóquio, Japão.
- Kortenhaus, A.; Oumeraci, H. (1998) - Classification of Wave loading on monolithic coastal structures. *Proceedings of the 26st International Coastal Engineering Conference*, 1:867-880, ASCE (American Society of Civil Engineers), Copenhagen, Denmark.
- Kortenhaus, A.; Oumeraci, H. (1999) - Scale effects in modeling wave impact loading of coastal structures. *Proceedings of the Hydralab workshop on Experimental Research and Synergy Effects with Matematical Models*, 285-294, Hannover, Alemanha.
- Korthenhaus, A.; Van der Meer, J.; Burchart, H.F.; Geeraerts, J.; Pullen, T.; Ingram, D.; Troch, P. (2005) - *CLASH: D40 Report on Conclusions of Scale Effects: Workpackage 7: Quantification of Measurement Errors, Model and Scale Effects related to Wave Overtopping*. 565p., Universitetsforlag, Alborg, Dinamarca.
- Losada, M.A.; Martin, F.L.; Medina, R. (1995) - Wave kinematics and Dynamics in Front of Reflective Structures. In: *Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures.*, pp.282-310, ASCE (American Society of Civil Engineers), Reston, Virginia, U.S.A. ISBN: 0784400807

- Nagai, S. (1973) - Wave forces on structures. *Advances in Hydrosience* (ISSN: 0065-2768), 9:253-324, Academic Press, New York, NY, U.S.A.
- Oumeraci, H.; Kortenhaus, A.; Allsop, N.W.H.; de Groot M.B.; Crouch R.S.; Vrijling J.K.; Voortman H.G. (2001) - *Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters*, 392p., A. A. Balkema, Rotterdam, Holanda. ISBN: 90 580 248 8.
- Peregrine, D.H. (2003) - Water-wave impact on walls. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35:23-43. DOI: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161153
- Peregrine, D.H.; Topliss, M.E. (1994) - The pressure field due to step water waves incident on a vertical wall. *Proceedings of the 24th International Conference Coastal Engineering*, pp.1496-1510, ASCE (American Society of Civil Engineers), Kobe, Japão.
- Pérez-Romero, D.M.; Ortega-Sánchez, M.; Moñino, A.; Losada, M.A. (2009) - Characteristics friction coefficients and scale effects in oscillatory porous flow. *Coastal Engineering*, 56(9):931-939. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.05.002
- Sainflou, M. (1928) - Essai sur les digues maritimes verticales. *Annals des Ponts et Chaussées, 1^{re} Partie*, (98):4, 5-48, Paris, França.
- Schmidt, R.; Oumeraci, H.; Partenscky, H.W. (1992) - Impact loadas induced by plunging breakers on vertical structures. *Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering*, pp.1545-1558, ASCE (American Society of Civil Engineers), Veneza, Itália.
- Takahashi, S. (1996) - *Design of vertical breakwaters*. 105p., Port and Harbour Research Institute, Yokosuka, Japão
- Takahashi, S.; Tanimoto, K.; Shimosako, K. (1994) - A proposal of impulsive pressure coefficient for design of composite breakwaters. *Proceedings of the International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction*, 489-504, Port and Harbour Institute, Yokosuka, Japão.
- Tanimoto, K.; Moto, K.; Ishizuka, S.; Goda, Y. (1976) - An investigation on design wave force formulae of composite-type breakwaters. *Proceedings of the 23rd Japanese Conference on Coastal Engineering*, pp. 11-16. *Em japonês*.
- Vílchez, M.; Clavero, M.; Neves, M.G.; Losada, M. A. (2011a) - Pressões e subpressões em quebra-mares verticais não galgáveis. *7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Delegação Portuguesa da PIANC, Porto, Portugal. Versão electrónica.
- Vílchez, M.; Moyano, J.; Clavero, M.; Losada, M: A. (2011b) - Forces and subpressures on non-overtoppable vertical breakwaters. *Proceedings of the 6th International Conference on Coastal Structures*, COPRI/ASCE (American Society of Civil Engineers), ASCE, Japão. *Em publicação*.
- Walkden, M.J.; Wood, D.J.; Bruce, T.; Peregrine, D.H. (2001) - Impulsive seaward loads induced by wave overtopping on caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 42(3):257-276. DOI: 10.1016/S0378-3839(00)00063-6
- Wolters, G. (2007) - *Guidelines for physical model testing of breakwaters. Rubble mound breakwaters*. Hydralab III Report, 39p., Delft, Holanda. Não publicado.

Dinâmica da paisagem e proposição de cenários ambientais: um estudo da planície costeira de Estância, Sergipe, Brasil *

Landscape dynamics and environmental scenarios: a study of Estancia coastal plain, Sergipe, Brazil

Anízia Conceição Cabral de A. Oliveira ^{@,1}, Rosemeri Melo e Souza ¹

RESUMO

Este trabalho objetivou desenvolver cenários ambientais para a Planície Costeira do município de Estância localizado na porção sul do Estado de Sergipe como subsídio ao ordenamento territorial. O estudo consistiu na compreensão de como se dá o funcionamento da paisagem a partir da análise dos seus sistemas componentes, da sua estrutura espacial e de suas modificações no tempo como alicerce para o desenvolvimento de uma proposta de uso recomendado, aqui designada como cenário de uso recomendado e, com base nele, o uso pretendido, considerado como cenário exploratório, cuja análise envolve as perspectivas de ocupação para o futuro a partir das consequências das opções sugeridas.

No intuito de propiciar as bases para o planejamento da ocupação da área estudada, desenvolveu-se, primeiramente, a delimitação e classificação de unidades e subunidades de paisagens com base em parâmetros relacionados à morfologia, às litoestruturas aliados aos aspectos da cobertura vegetal e do uso e ocupação do solo. Num segundo momento, foi realizada a identificação dos níveis de ocupação de cada compartimento por meio da análise das diversas formas de uso e ocupação do solo e dos agentes e processos físicoambientais mais atuantes.

Nesse contexto, identificados os distintos níveis de ocupação, estes relacionados a processos em sua maior parte de natureza degradante definidores das mudanças ambientais verificadas, puderam ser alcançadas a proposta de uso recomendado e, a partir da proposição, a análise das consequências para o funcionamento da paisagem litorânea em estudo.

Palavras-chave: Cenários Ambientais; Planejamento Ambiental; Planície Costeira.

ABSTRACT

This work aims to build environmental scenarios for the coastal plain of the Estância/Sergipe. The purpose of this study is in understanding how is the functioning of the landscape from the analysis its component systems, their spatial structure and its changes over time as the foundation for the development of two scenarios: recommended scenario and, on the based thereon, the intended use, called of exploratory scenario, which involves the prospects for the future from of the consequences of the suggested options.

@ - Autor correspondente: aniziacaoliveira@gmail.com

1 - Universidade Federal de Sergipe, Grupo de Pesquisa em Geoecologia e Planejamento Territorial GEOPLAN/UFS/CNPq, Av. Marechal Rondon, S/N, Pólo de Gestão/Pós-Graduação, sala 01. São Cristóvão, SE, Brasil.

In order to provide the basis for the planning of the occupation of the area studied, initially, we developed the definition and classification of units and subunits of landscapes based on morphological parameters allied to aspects of the vegetation and of the use and occupation the soil. Secondly, the analysis of the various levels of the occupation of each compartment was made by analysis of the various forms of land use and agents and environmental processes most active in the study area.

In this context, after identifying the different levels of occupation, the proposition of the scenarios through different descriptions of possible future events and their consequences for the functioning of the coastal landscape could be achieved.

Keywords: Environmental Scenarios; Environmental Planning; Coastal Plain

1. INTRODUÇÃO

Cenários são instrumentos de análise que permitem o conhecimento da evolução da paisagem a partir da interpretação dos rumos e das velocidades das transformações no espaço. Por possibilitarem a reflexão sobre as consequências das opções de usos e formas de ocupação do território, ajudam a orientar as ações atuais e futuras do homem.

A relação entre a proposição de cenários e o conhecimento das mudanças na paisagem é intrínseca. Em estudos ambientais, a investigação das alterações numa determinada paisagem, movidas tanto por processos naturais quanto por processos de influência antrópica, ou simultaneamente por ambos, automaticamente reporta-se à perspectiva dinâmica.

Considerando que o estudo da dinâmica da paisagem permite o conhecimento de sua evolução, de maneira geral, pode-se dizer que investigar a evolução da paisagem é tratar da análise de cenários.

Destacando o viés do planejamento, Santos (2004: p.50) enfoca que cenários nada mais são do que “*interpretações de momentos em uma paisagem dentro de uma escala temporal, visando auxiliar agentes de planejamento a compreender a dinâmica da área e os problemas ambientais consequentes*”.

Santos (2004: p.51) trata dos cenários numa ótica que considera os anseios dos agentes envolvidos e vislumbra as dimensões passado, presente e futuro, cada uma permitindo interpretações particulares de fatos: **do passado** - o que foi (cenário passado); **do presente** - o que é (cenário real) e **do futuro** - o que será se medidas não forem tomadas (cenário futuro tendencial), como deveria ser (cenário futuro ideal, frente às potencialidades e restrições biofísicas), como gostaria que fosse (cenário futuro desejado) e o que pode realmente ser (cenário futuro possível, alternativo, frente às restrições biofísicas, às aspirações e às limitações socioeconômicas e administrativas).

No tocante à perspectiva do futuro, Santos (2004: p.53) ressalta que os cenários futuros representam “*simulações de diferentes situações, prognóstico das condições ambientais em um tempo mais ou menos próximo*”.

Conforme Freitas Filho (2001: p.9) quanto à tipologia de cenários futuros, são comuns três classificações:

- **Cenário Tendencial** que abarca a dimensão extrapolativa (onde chegaremos?), ou seja, o futuro é a extrapolação do passado com caráter determinista; refere-se ao que tende a acontecer, apresenta a evolução futura com base em projeções de tendências históricas, dando noção de continuidade;
- **Cenário Exploratório** - cuja dimensão envolve a

noção de complexidade, acaso e rupturas, refere-se ao que pode acontecer, o futuro tem possibilidades alternativas de evolução dada pela conjugação de forças do presente e do passado, (onde poderemos chegar?); e

- **Cenário Normativo** - em que a dimensão se baseia no futuro que pode ser construído, diz respeito ao que deve acontecer segundo os valores dos envolvidos com a construção do cenário, apresenta aspectos desejáveis e pode se confundir com a visão de futuro desejada, (onde queremos chegar?).

O Ministério do Meio Ambiente em seu documento Projeto Orla: manual de gestão (Zamboni & Vilanova, 2006), reconhecendo a existência de vários cenários, destaca o tendencial e o desejado. Já Oliveira & Rodrigues (2009) dão ênfase ao cenário tendencial considerado pelos autores como as possibilidades de transformações que a região de estudo estará propensa, sejam elas de origem natural ou antrópica e o cenário exploratório, o qual procura analisar as consequências das opções escolhidas.

Sobre metodologias para cada proposta de cenários Costa e Nascimento (2007: p.50) afirmam que o cenário tendencial faz uso de projeções matemáticas e econométricas literalmente baseadas no passado, o cenário exploratório, por sua vez, precisa extrapolar as tendências e lidar com mudanças do ambiente, já um cenário normativo, conta mais com os valores dos participantes do que com indicações históricas ou fatos portadores de futuro.

Bolós (1992) expõe que para a construção de cenários devem ser conhecidos da paisagem objeto de estudo: a direção e velocidade do desenvolvimento natural dos elementos bióticos e abióticos do geossistema; as mudanças dos elementos do subsistema geocológico (elementos abióticos e bióticos) sob a influência das atividades econômicas da sociedade; o desenvolvimento dos elementos antrópicos dentro do sistema socioeconômico.

Em se tratando de uma abordagem direcionada à avaliação ambiental, os estudos baseados em cenários prospectivos devem oferecer um quadro fundamental da inter-relação entre fatores e processos dinâmicos atuantes na paisagem proporcionando, a partir da análise dos componentes estruturais e fatores condicionantes das mudanças, o estabelecimento de premissas e um caminho concreto de decisões voltadas ao melhor planejamento e gestão dos ambientes estudados.

A Zona Costeira é marcada pela convergência de diversos usos e rápido dinamismo de ocupação. Historicamente, a Zona Costeira vem-se caracterizando por uma diversidade

de atividades vinculadas a vários tipos de usos como o portuário, o agrícola, o de cunho industrial, usos relacionados ao transporte, à exploração petrolífera, ao valor paisagístico como o turístico, o comercial, o recreacional que fazem reunir uma densa infraestrutura e predominar fortes zonas de concentração populacional.

Assim como são múltiplas as atividades, derivadas da alta densidade populacional, da expansão urbana e industrial descontrolada, da especulação imobiliária e da intensificação do turismo são também significativos as pressões e os conflitos delas decorrentes.

Em se tratando da elevada conflitualidade presente nestas áreas, Dias *et al* (2009: p.4) ressaltam que “(...) *interesses portuários competem com as atividades tradicionais (pesca artesanal, agricultura, etc.), interesses econômicos competem com a conservação ambiental, turismo de massas compete com a manutenção dos valores culturais das populações indígenas, obras fixas de proteção costeira competem com os valores paisagísticos naturais, esportes radicais competem com as práticas balneares, atividades industriais competem com o turismo de Natureza*”.

Usos indevidos e formas de ocupação desordenadas quando afetam o equilíbrio de um dos ambientes pertencentes à Zona Costeira acabam comprometendo o sistema costeiro como um todo. Tais usos e ocupações impróprios vêm provocando a descaracterização de muitos sistemas biofísicos, transformando ambientes, antes em condições de certa estabilidade em paisagens degradadas, cujos impactos gerados interferem diretamente na qualidade ambiental da Zona Costeira.

Na Zona Costeira de Sergipe elementos naturais e humanos condicionam a existência de unidades de paisagem que se particularizam conforme as suas características de composição e funcionamento. No Litoral Sul do estado, sobretudo no município de Estância, ambientes naturais marcantes vêm sendo degradados por conta de atividades humanas diferenciadas cujo padrão dispare de ocupação determina a rapidez e a intensidade das transformações.

Do ponto de vista da apropriação do solo, o Litoral Sul apresenta uma estrutura não consolidada, mas que vem se definindo pelo crescente processo de especulação imobiliária. As atividades de veraneio, marcadas por uma certa sazonalidade, aos poucos vêm sendo substituídas pelo adensamento de equipamentos humanos. Tais atividades conjugadas ao desenvolvimento da atividade turística vêm induzindo, ao longo do tempo, empreendimentos imobiliários em quase toda a porção sul provocando a transformação rápida do espaço.

Nesse contexto, considerando a problemática que envolve os ambientes biofísicos sob a atuação de processos de ocupação desordenada e tendo em vista que cresce cada vez mais a preocupação com o planejamento da ocupação territorial, a regulação dos usos no Litoral com base no nível de fragilidade ambiental dos sistemas e preservação da integridade dos ambientes naturais destaca-se como orientação para estudos que focalizem a proposição de cenários como instrumentos favoráveis ao direcionamento de ações visando o ordenamento territorial.

Como ferramenta de planejamento e numa ótica voltada ao ordenamento dos usos, o desenvolvimento de cenários oferece subsídios efetivos para o processo de determinação

de pontos de maiores e menores restrições ao uso, dos limites de resiliência dos ambientes afetados por determinado tipo e intensidade de degradação visando à indicação de alternativas de manejo.

É nesse sentido que o presente trabalho objetivou construir cenários representativos das mudanças verificadas na paisagem costeira do município de Estância (Figura 01) pertencente ao Litoral Sul de Sergipe a partir da identificação e caracterização dos elementos e processos físicoambientais mais atuantes e da análise das formas de uso e ocupação e dos diversos níveis de ocupação delas derivados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram desenvolvidos dois tipos de cenários: o cenário recomendado, proposta de uso recomendado mediante a análise da configuração atual do espaço pelo padrão vigente de uso e ocupação e cenário exploratório, baseado em Oliveira & Rodriguez (2009), designado para se referir ao uso pretendido, com a finalidade de indicar o uso sustentável frente às perspectivas de ocupação para o futuro.

O desenvolvimento dos cenários (cenário recomendado e cenário pretendido) foi nesta pesquisa possibilitada primeiramente pela delimitação e classificação de unidades e subunidades de paisagens com base em parâmetros relacionados à morfologia (caracterização da forma), às litoestruturas e à fisiologia (caracterização dos atributos físicos) aliados aos aspectos da cobertura vegetal e do uso do solo, o que permitiu, num segundo momento, a identificação dos níveis de ocupação de cada compartimento.

A compartimentação das unidades de paisagem da área de estudo utilizou como critério-chave a base de dados de geomorfologia do Atlas Digital sobre Recursos Hídricos de Sergipe (SEPLAN/SRH, 2004). As informações sobre geologia, solos, altimetria, importantes por subsidiarem as análises, também foram extraídas do referido Atlas.

A partir desta classificação oficial é que puderam ser compartimentadas as subunidades de paisagem a partir da associação das características geomorfológicas, com as geológicas, pedológicas, de declividade do terreno, bem como do uso e cobertura vegetal resultando, mediante a integração das informações relacionadas a estes fatores, diferentes categorias de ambientes.

Assim, para a elaboração do mapa de unidades e subunidades da área de estudo, cada polígono foi gerado por meio da combinação dos referidos temas, sendo desenvolvido, para isso, um inventário das características físicas, biológicas e de uso do solo através da identificação e caracterização dos agentes e processos físicoambientais mais atuantes na paisagem, sendo que, para a divisão em subunidades foi adotado como critério-chave a identificação dos níveis de ocupação do solo mediante a análise dos tipos e processos de uso em cada unidade da Planície Costeira.

Destaque se faz ao fato de que as diferentes unidades geomorfológicas têm níveis de ocupação diferentes e essa diferenciação origina-se da relação entre uso do solo e as características morfológicas dos atributos físicos que comumente são determinantes para a existência dos tipos de uso e ocupação encontrados.

PLANÍCIE COSTEIRA DE ESTÂNCIA/SE

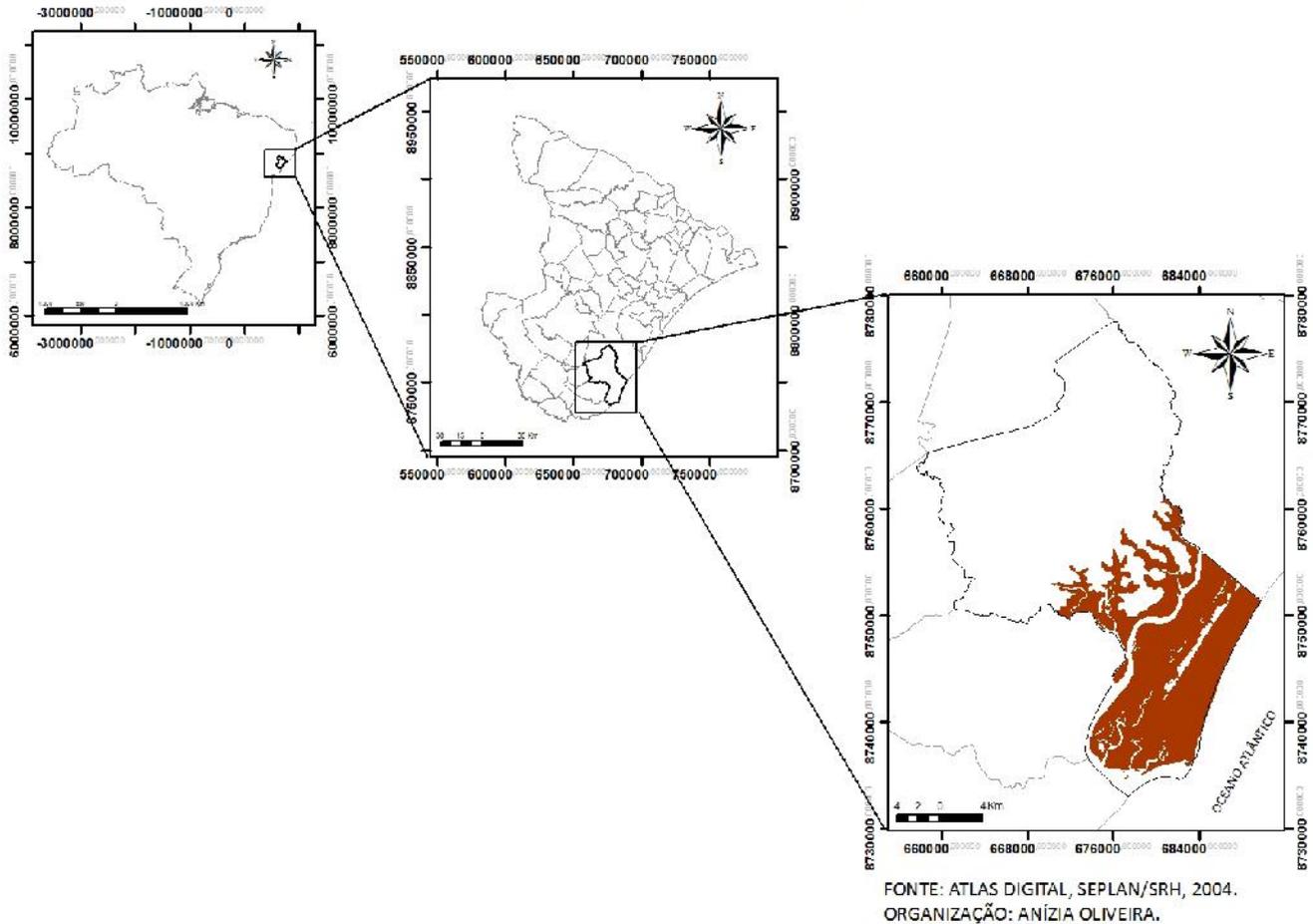


Figura 01. Localização da área de estudo.

Figure 01. Location of the study area.

Com base na identificação e análise do padrão de uso e ocupação em que se consolida a organização do espaço foram analisados os processos geocológicos degradantes da Planície Costeira do município de Estância por meio do enfoque funcional proposto por Rodriguez, Silva e Cavalcante (2004) que contempla a análise da dinâmica funcional da paisagem. Segundo estes autores (p. 124), o enfoque funcional objetiva explicar “como a paisagem é estruturada, quais são as relações funcionais de seus elementos, por que está estruturada de determinada maneira (relações genéticas ou causais) e para que está estruturada de certa forma (quais as funções naturais e sociais)”.

O enfoque funcional proposto pelos autores é fundamentado nos principais marcos teórico-conceituais:

- O entendimento de que na paisagem, todos os seus elementos cumprem funções determinadas e participam de forma peculiar no seu processo de gênese.
- A busca de uma análise integrada dos componentes antrópicos e naturais a partir de uma caracterização socioeconômica e geocológica.
- A sustentação da necessidade de esclarecer os elementos substanciais dos subsistemas, que refletem o sistema das inter-relações externas das paisagens, que dominam sua essência e sua vida. Difícil

Este enfoque fornece procedimentos analíticos que permite descobrir quais as mudanças espaço-temporais ocorrem e quais poderão ocorrer na paisagem, traduzindo-se numa abordagem adequada ao estudo da dinâmica paisagística, alicerce para a constituição de cenários ambientais.

Oliveira & Rodrigues (2009: p.306) afirmam que a proposição de cenários ambientais baseia-se na análise e representação de situações de evolução de um ambiente, levando-se em conta o tempo, espaço, interação entre variáveis e a lógica intuitiva e que essa metodologia é de grande importância para o planejamento ambiental, já que analisa em uma perspectiva futura a eficácia das diretrizes propostas.

Nesse contexto, baseado nas definições destes autores, dois tipos de cenários foram desenvolvidos:

- cenário recomendado que, com base nas alterações detectadas na paisagem, no estado de degradação atual e de acordo com a análise da conformidade do uso com a legislação ambiental vigente, retratou as mudanças na paisagem e estabeleceu para cada tipo de problema, quais devem ser as medidas de ordenamento.

- cenário exploratório que, de acordo com os autores, é criado a partir da proposta de uso recomendado no cenário anterior. Configura-se como um cenário pretendido, pois procurará analisar as consequências das opções sugeridas, tendo em vista a consideração das propostas de uso recomendado, referindo-se a possibilidade de futuro numa perspectiva que vislumbra o uso sustentável. Para o desenvolvimento deste cenário foi considerado como horizonte temporal o intervalo de 10 anos.

O mapa de uso e ocupação do solo e os mapas de unidades e subunidades de paisagem foram resultantes da análise da interpretação de ortofotos em escala de 1:10.000, cedidas pela Secretaria de Planejamento (SEPLAN/SE) obtidas em cobertura aerofotogramétrica ocorrida em 2003.

O mapa de uso e ocupação do solo foi desenvolvido a partir de uma chave de interpretação baseada nas definições de Meirelles *et al.* (1999) que considera as variações de cores, textura, forma, padrões de drenagem e relevo.

Tal mapa serviu de base para a confecção do mapa de unidade e subunidades de paisagem, o qual apresenta os níveis de ocupação para cada compartimento da Planície Costeira.

Com base na proposta metodológica de Rodriguez, Silva e Cavalcante (2004), foi desenvolvida a análise da interação entre a dinâmica natural e os processos degradantes

relacionados aos usos de cada unidade e subunidade de paisagem e assim propostas classes genéricas sobre o nível de modificação dos sistemas naturais.

O Quadro 01 mostra a associação entre as classes referentes à intensidade de modificação dos sistemas naturais, aos níveis de ocupação, bem como, entre os níveis de degradação baseados em Rodriguez *et al.* (2004).

A proposta de cenário recomendado foi desenvolvida mediante a análise do estado de degradação e da concordância do uso com a base legal vigente.

Em âmbito federal, as seguintes regulamentações jurídicas foram consultadas: a Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986 que dispõe sobre a Avaliação de Impacto Ambiental; a Resolução CONAMA Nº 303, de 20 de março de 2002 que estabelece parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente; o Código Florestal (Lei Nº 4.771/65) e o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (Lei Nº 7.661/88).

Na esfera estadual foi examinada a Lei Nº 5.858 de 22 de março de 2006 que dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente e institui o Sistema Estadual do Meio Ambiente.

Em se tratando da legislação municipal, orientaram a análise o Plano Diretor do Município de Estância/SE (Lei Nº 31/2010); o Código Municipal de Meio Ambiente (Lei Nº 18/2008) e a Lei Nº 28/2010 que institui diretrizes para o Parcelamento do Uso do Solo.

Quadro 01. Associação entre as classes referentes à intensidade de modificação dos sistemas ambientais, aos níveis de ocupação e aos níveis de degradação. Níveis de degradação adaptados de Rodriguez *et al.* (2004).

Table 02. Association between the intensity modification of environmental systems, levels of occupation and levels of degradation. Levels of degradation adapted from Rodriguez *et al.* (2004).

Intensidade de modificação dos sistemas naturais	Nível de ocupação	Nível de degradação
Não modificados ou levemente modificados	Sem ocupação ou ocupação muito baixa 0-20%	Sem ou muito pouca
Parcialmente modificados	Com baixa ocupação 20-40%	Pouco degradada, de leve a moderada
Medianamente modificada a modificada	Com média ocupação 40-60%	Pouco degradada a degradada. Há perda parcial da estrutura espacial e funcional mas ainda conservam a capacidade de recuperação
Fortemente modificada	Com alta ocupação 60-80%	Degradada. Há desestruturação dos elementos, perderam a capacidade de recuperação do estado original
Muito fortemente modificada	Com ocupação muito alta 80-100%	Muito degradada Paisagem esgotada

A identificação dos níveis de ocupação de cada unidade e subunidade de paisagem da Planície Costeira de Estância e dos níveis de degradação de cada compartimento permitiu a classificação em categorias de ações compatíveis com a situação ambiental de cada classe de uso recomendado (Quadro 02).

Quadro 02. Relação entre as classes de uso recomendado e as ações prioritárias

Table 03. Relation between use classes and recommended priority actions

Classes	Ações
Preservação	de Proibição
Conservação	de Restrição
Recuperação	de Recuperação
Passível de ocupação	de Controle

Assim, conforme a indicação destas ações, o cenário de usos recomendados para a paisagem da Planície Costeira de Estância contemplou quatro classes:

- **De Preservação:** classe onde o objetivo principal é a preservação. A prioridade é a manutenção da integridade funcional dos ambientes naturais devido à importância biológica/ecológica. Abrange estratégias de ações preventivas em conformidade com o disposto na legislação ambiental. Incluem-se nesta zona as APPs (cursos d'água, mangues, dunas, praias, restingas). Também fazem parte desta classe os ambientes com alto grau de instabilidade geomorfológica, apresentando risco à ocupação, como exemplo as áreas com relevo fortemente ondulado, propensas a processos erosivos. Envolve a delimitação das áreas *non aedificandi* atendendo ao disposto na legislação.
- **De Conservação:** classe onde o objetivo maior é a conservação. Contudo, as áreas pertencentes a esta classe podem ser utilizadas para outros fins. Recomenda-se restringir a ocupação como forma de garantir, dentre outros fatores, a permanência da cobertura vegetal natural. A característica fundante desta classe é a conciliação do desenvolvimento com as vocações das unidades paisagísticas respeitando-se a capacidade de suporte.
- **De Recuperação:** classe em que se recomenda, conforme Oliveira e Rodrigues (2009: p.311), a recuperação das principais funções dos ambientes naturais, nesta classe constam "áreas que foram afetadas por processos antrópicos, que necessitam de recuperação para posteriormente se enquadrarem em alguma categoria de proteção ou conservação acima propostas". Dá-se ênfase a recuperação das áreas

dotadas de proteção legal. Os problemas ambientais existentes requerem ações para manutenção e melhora da qualidade ambiental.

- **Passível de ocupação (ocupação orientada):** classe criada para abranger as áreas que podem ser ocupadas tendo como referência os níveis básicos de sustentação da qualidade ambiental. Os usos devem ser orientados. Abrange áreas geomorfológicamente estáveis não apresentando risco à ocupação.

Já o cenário exploratório é um subproduto da proposta de uso do cenário recomendado. Evidencia as consequências dos acontecimentos desencadeados a partir das classes e ações indicadas no cenário anterior. Como horizonte temporal, foi considerado o intervalo de 10 anos para o seu desenvolvimento.

As classes estipuladas foram as seguintes:

- **Área de Preservação Permanente:** É constituída por todas as áreas antes pertencentes à classe Preservação do cenário recomendado. Adota as determinações definidas em lei sobre as categorias de proteção da vegetação.
- **Paisagem com dinâmica ambiental preservada:** Diz respeito à classe Conservação. A principal característica é quanto à conservação de todas as áreas pertencentes a esta categoria do cenário recomendado que no cenário exploratório (uso pretendido) possibilitou a manutenção das características e funções naturais dos ambientes biofísicos.
- **Paisagem melhorada:** Diz respeito à classe Recuperação proposta para o cenário recomendado. No horizonte temporal adotado, as áreas pertencentes a esta classe estarão em conformidade com a legislação ambiental.
- **Ocupação rarefeita:** Classe criada para enquadrar a faixa de terra ao longo da Rodovia Estadual SE-10 que deverá conter baixo adensamento, pois se trata de uma classe que integra a categoria Paisagem com dinâmica ambiental preservada, antes Zona de Conservação.
- **Ocupação consolidada:** Classe antes representada pelas áreas pertencentes a classe Passível de ocupação. Envolve a consolidação da ocupação por localidades, pastagens e cultivos, mas como indicado no cenário recomendado abrangerá o controle da qualidade ambiental.

Mapas temáticos foram produzidos a partir do software ArcGIS. Para dar suporte ao inventário dos elementos da paisagem e ao trabalho de vetorização das categorias de uso da terra, dos níveis de ocupação, das classes de estado ambiental e dos cenários propostos, levantamentos bibliográficos e cartográficos foram feitos, bem como, realizados trabalhos de campo para checagem das informações e verificações "in loco" das classes mapeadas.

Para uma melhor explanação do que se propõe para o presente artigo, o fluxograma a seguir apresenta o caminho analítico adotado neste estudo.



Fluxograma 01. Caminho analítico sobre a proposição de cenários para a Planície Costeira de Estância-SE.

Flowchart 01. Analytical perspective on the proposal of scenarios for the Coastal Plain of the Estância-SE

3. RESULTADOS

3.1. Níveis de Degradação das Unidades de Paisagem da Planície Costeira de Estância-SE

A Planície Costeira do município de Estância possui uma área de 20.403,22 hectares e de acordo com SEPLAN/SRN (2004) encontra-se subdividida em quatro compartimentos geomorfológicos aqui considerados como unidades de paisagem, são elas: Planície Fluviomarinha, Terraço Fluviomarinho, Terraço Fluvial e Terraço Marinho (ver mapa de compartimentos geomorfológicos, Figura 2).

A partir desta classificação é que puderam ser compartimentadas as subunidades de paisagem mediante a associação das características geomorfológicas, com as geológicas, pedológicas, de declividade do terreno, bem como do uso e cobertura vegetal adotando-se como critério-chave a identificação das formas de uso e ocupação do solo

(Figura 3) e análise dos processos de uso e níveis de ocupação do solo em cada unidade da Planície Costeira.

Nas unidades e subunidades da Planície Costeira de Estância possuidoras de diferenciadas caracterizações biofísicas são encontrados diferentes tipos de uso que definem distintos níveis de ocupação relacionados a processos em sua maior parte de natureza degradante, os quais, ao interagirem com os processos da dinâmica natural dos ambientes biofísicos determinam variados níveis de degradação.

Nesse contexto, a caracterização biofísica e antrópica de setores homogêneos, a qual considera cada setor como uma unidade que apresenta um padrão semelhante de formas de relevo, solo, vegetação, alteração antrópica, discernível na paisagem e distinto em relação às unidades vizinhas, permite identificar a partir dos níveis de ocupação encontrados quatro unidades de paisagem e sete subunidades (Figura 04 e Quadro 03).

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DA PLANÍCIE COSTEIRA DE ESTÂNCIA-SE

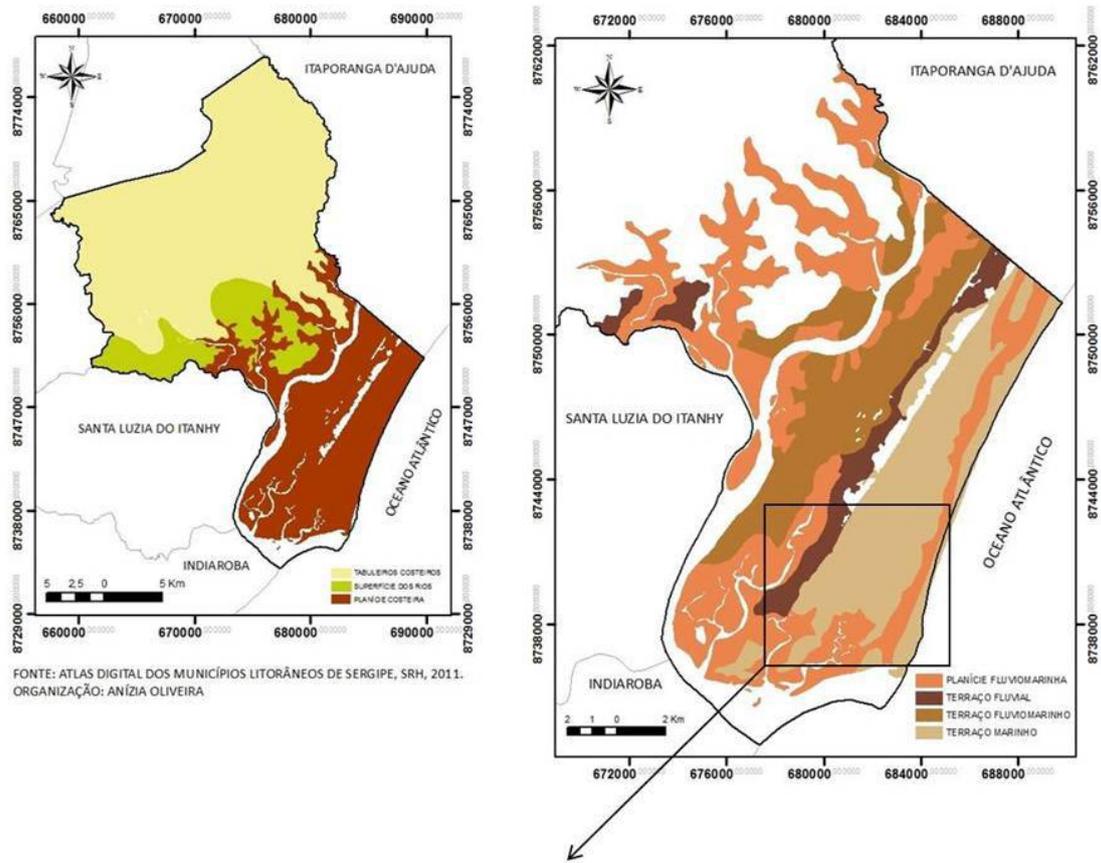


Figura 2. Unidades geomorfológicas da Planície Costeira de Estância-SE.
Figure 2. Geomorphologic units of the Coastal Plain of the Estância-SE

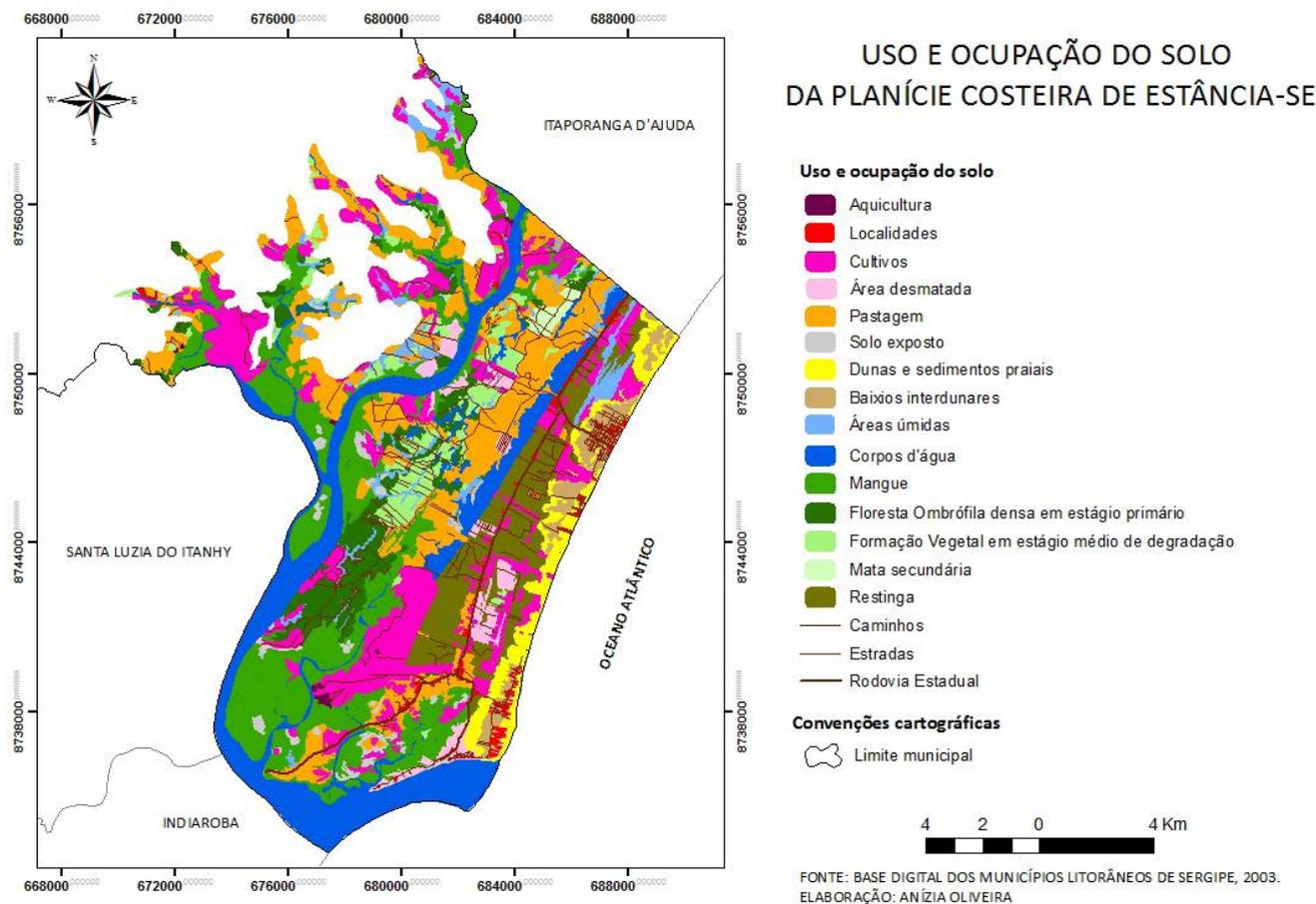


Figura 3. Uso e ocupação do solo da Planície Costeira de Estância-SE
Figure 3. Use and occupation of the coastal plain of the Estância-SE

3.2. Planície Fluviomarinha

A unidade de paisagem **Planície Fluviomarinha** abrange uma área de 8654,3 ha o que equivale a 42,41% da área total da Planície Costeira e subdivide-se em três compartimentos:

1. Planície Fluviomarinha com nível de ocupação baixo onde ocorrem superfícies aplainadas abaixo dos 10 metros compostas em sua maior parte por áreas de mangue;
2. Planície Fluviomarinha situada em faixa contínua paralela à linha de costa transitando em área de Terraço Marinho com dominância de relevo plano abaixo dos 10 metros e nível de ocupação muito baixo;
3. Planície Fluviomarinha com nível de ocupação alto em área de transição com zonas de Tabuleiros Costeiros a noroeste da Planície Costeira onde ocorrem relevos ondulados, dissecados em colunas e interflúvios tabulares e áreas com altitudes superiores até 40 metros.

O **primeiro compartimento** possui 3.738 hectares que representam 43,19% da área total da Planície Fluviomarinha

onde predominam superfícies aplainadas com altitudes abaixo dos 10 metros resultantes da acumulação fluvial e sujeitas a inundações periódicas. A confluência do Rio Piauí e do Rio Fundo e o complexo estuarino Piauí/Fundo/Real definem a presença de muitos cursos d'água concentrados mais ao sul da planície.

No tocante à geologia há a dominância de depósitos marinhos e continentais costeiros datados do Quaternário. Em Sergipe são verificadas formações de idade holocênica e pleistocênica. São encontrados depósitos datados do Holoceno recobrimdo conjuntos mais antigos principalmente localizados em porções mais internas da Planície Costeira.

A alternância de períodos glaciais e interglaciais acompanhada de importantes flutuações do nível do mar no Quaternário ocasionaram regressões e transgressões da linha de costa que, ao contribuírem com os processos de deposição e erosão, geraram feições e ambientes dotados de grande dinamicidade no que se refere à constante capacidade de transformação existente.

Como componente da Planície Costeira, a Planície Fluviomarinha é marcada por estuários e manguezais que são ambientes costeiros com vida efêmera em constante transformação correspondendo a terrenos de sedimentos

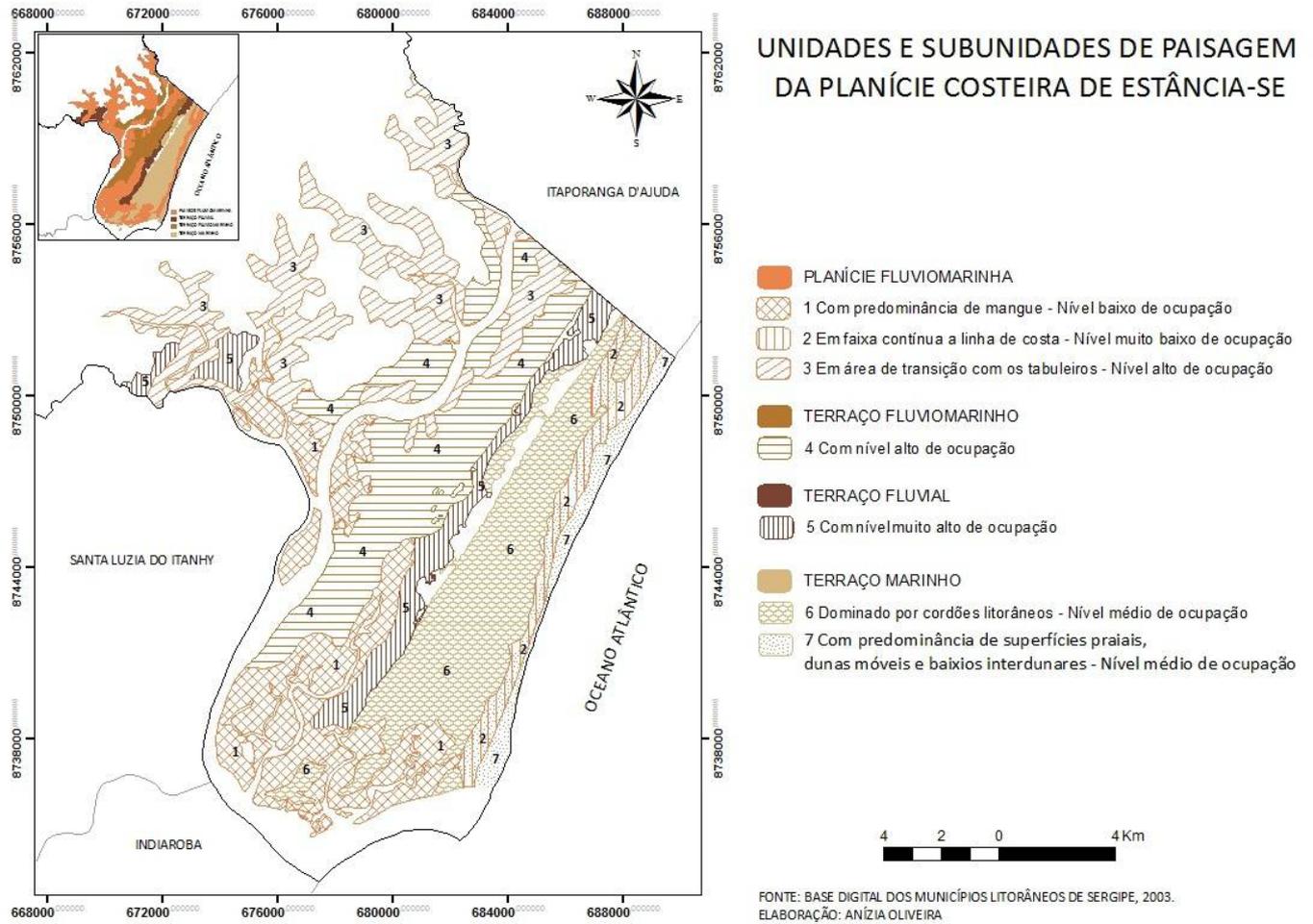


Figura 4. Unidades e Subunidades da Planície Costeira de Estância-SE

Figure 4. Units and Subunits of the Coastal Plain of the Estância-SE

Quadro 3. Unidades e Subunidades de Paisagem da Planície Costeira de Estância-SE.

Table 3. Units and subunits and Environmental Status of the Coastal Plain of the Estância-SE

Unidades de paisagem	Subunidades de paisagem (definidas a partir dos níveis de ocupação)	
Planície Fluviomarinha	1 Planície Fluviomarinha com predomínio de mangue em superfícies aplainadas abaixo dos 10 m	Nível baixo de ocupação 20,13%
	2 Planície Fluviomarinha em faixa contínua a linha de costa	Nível de ocupação muito baixo 15,75%
	3 Planície Fluviomarinha em área de transição com os tabuleiros costeiros	Nível alto de ocupação 60,45%
Terraço Fluviomarinho	4 Terraço Fluviomarinho	Nível alto de ocupação 60,30%
Terraço Fluvial	5 Terraço Fluvial	Nível muito alto de ocupação 88,87%
Terraço Marinho	6 Terraço Marinho dominado por cordões litorâneos	Nível médio de ocupação 45,59%
	7 Terraço marinho com predominância de superfícies praias, dunas móveis e baixios interdunares	Nível médio de ocupação 42,83%

quaternários de aspecto transicional, influenciados, por um lado, pelos agentes continentais e, por outro, pelos agentes marinhos.

Prevalecem neste compartimento solos indiscriminados de mangue, ricos em matéria orgânica, mal drenados e de coloração escura, que apresentam altas concentrações de sais solúveis e textura argilo-siltosa. Há presença em menor quantidade de espodossolo no limite com o Terraço Flúvio Marinho, apresentando-se excessivamente drenado com baixo poder de armazenamento de água e de nutrientes devido à textura arenosa.

Predomina nesta subunidade, com 75,30% da área total, a vegetação de mangue caracterizada por grande homogeneidade fisionômica ocupando as bordas dos rios em espaços bem delimitados do estuário com maior expressividade na desembocadura onde aparecem manchas mais preservadas. De acordo com Carvalho e Fontes (2006) as três principais espécies encontradas em associação na área são *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinas*.

No que se refere aos tipos de uso e ocupação do solo há existência de aquicultura pontual ao sul da Planície Fluvio-marinha em área de transição com o Terraço Fluvial. Já no limite com o Terraço Marinho aparecem manchas de áreas desmatadas com solo exposto e cultivos mais concentrados nas margens da Rodovia Estadual.

Isso faz configurar um baixo nível de ocupação com 20,13% da área total. Todavia, com o avanço de infraestruturas exemplificadas pela construção de estradas e pontes e de empreendimentos imobiliários visando atender ao incremento do turismo na região há uma crescente tendência de ocupação nesta subunidade.

Esta subunidade da Planície Fluvio-marinha apresenta uma dinâmica natural marcada por um regime de inundação controlado pela influência do ciclo das marés ao longo dos canais fluviais. Como marca desses ambientes, atuam processos de sedimentação e acumulação de matéria orgânica.

São encontrados solos halomórficos nas áreas mais baixas. Relevos planos não costumam favorecer processos de dissecação. Porém, apesar do predomínio de baixas altitudes, nesta subunidade ocorrem solos com característica instável, sujeitos a inundações periódicas, fazendo com que a suscetibilidade à erosão passe a ser fator decisivo para a qualificação da dinâmica natural deste compartimento.

Apesar disso, mesmo havendo a presença de aquicultura pontual, manchas de solo exposto, cultivos concentrados nas margens da Rodovia Estadual SE-100, todos referindo-se a pontos de desmatamento que denotam a erradicação da vegetação nativa, há o predomínio da cobertura vegetal original. Os manguezais associados à presença de canais aparecem nesta subunidade em grandes manchas.

Sendo assim, esta subunidade de paisagem apresenta sistemas naturais parcialmente modificados, cujos processos degradantes que causam mudanças na estruturação da paisagem são identificados como de intensidade leve a moderada caracterizando um nível pouco degradado, ver Quadro 01 que mostra a associação entre as classes referentes à intensidade de modificação dos sistemas ambientais, aos níveis de ocupação e aos níveis de degradação, estes adaptados de Rodriguez *et al* (2004).

A **segunda subunidade** de paisagem Planície Fluvio-marinha abrange uma faixa contínua paralela à linha de costa com 1036,3 hectares, cerca de 12% da área total, transitando em área de Terraço Marinho apresentando dominância de relevo suave, situado abaixo dos 10 metros.

Possui a mesma característica geológica do compartimento anterior com predomínio de depósitos marinhos e continentais costeiros. É comum neste compartimento a ocorrência de campos de dunas móveis e fixas intercaladas por baixios interdunares e áreas úmidas ocorrendo neossolos quartzarênicos em toda a sua extensão e formação vegetal de restinga com perfil arbóreo – arbustivo.

As dunas, os baixios e as áreas úmidas associadas à cobertura vegetal de restinga que se distribui em toda a extensão deste compartimento compõem o sistema biofísico da paisagem e totalizam 84,25% de área.

Em contrapartida, no tocante ao uso, um nível de ocupação muito baixo com percentual de 15,75% é encontrado em virtude da presença de cultivos pontuais e de algumas ocupações de veraneio localizadas em zonas interdunares ao sul da Praia do Saco (Povoado Saco do Rio Real). São identificadas casas nas proximidades da faixa de praia que vem sendo atingidas pelo avanço do mar.

Nesta segunda subunidade da Planície Fluvio-marinha ocorre uma dinâmica de inundação dominada pelas depressões interdunares em que as áreas úmidas são periodicamente alagadas favorecendo condições para o habitat de algumas espécies de animais.

Essa dinâmica natural é interrompida em muitos trechos a partir da existência pontual de ocupação por cultivos e habitações principalmente em faixa próxima da linha de costa, quando ocorrem ambientes de dunas.

O nível de ocupação muito baixo marca um ambiente não modificado ou com modificação leve. Assim, seguindo as associações presente no Quadro 01 que as classes referentes à intensidade de modificação dos sistemas ambientais, aos níveis de ocupação e aos níveis de degradação, estes adaptados de Rodriguez *et al* (2004), o nível de degradação identificado é sem ou muito pouco degradado.

A **terceira subunidade**, com 3880 ha e percentual de 44,83% da área total da Planície Fluvio-marinha, refere-se às áreas próximas à transição com a zona de Tabuleiros Costeiros. Os Tabuleiros Costeiros são superfícies planas situadas na transição das Terras Altas com a Frente Marinha resultantes da erosão dos terrenos da Formação Barreiras sendo, muitas vezes, interrompidos pelos estuários dos rios que atingem o litoral e frequentemente utilizadas por plantações de coco - da - baía e pastagem.

Nesta subunidade, ocorrem relevos ondulados, dissecados em colunas e interflúvios tabulares com altitudes entre 10 e 40 metros. Há a presença de muitos canais de primeira ordem e rios como o Rio Biriba e o Rio Fundo. São incluídas neste compartimento as áreas inundáveis que passam grande parte do ano alagadas por sofrerem influência fluvial.

As características geológicas favorece o predomínio de sedimentos marinhos e continentais costeiros, composto por material sedimentar formado por arenito, arenito conglomerático, argilito arenoso apresentando associação a noroeste com sedimentos do Grupo Barreiras em que afloram solos calcários pertencentes à Formação Cotinguiba (Cretáceo Superior) no fundo de vales dos tabuleiros dissecados.

O tipo de solo com maior ocorrência é o argissolo vermelho – amarelo localizado na região de contato entre os Tabuleiros Costeiros (Grupo Barreiras) com a Planície Costeira. Também são encontrados solos halomórficos nas áreas mais baixas onde domina a influência dos cursos dos rios.

Os manguezais associados à presença de canais aparecem nesta subunidade em pequenas manchas. São raras também as áreas com formações pioneiras de Floresta Ombrófila dotadas de espécies arbóreas de grande porte.

Pode-se dizer que esta situação decorre das formas de uso do solo marcadas pela intensa utilização agrícola, pela presença de construções, loteamentos e habitações populares e de áreas desmatadas, no geral, destinadas às pastagens.

Os cultivos são, em sua maioria, de caráter permanente e estão relacionados à cocoicultura ocorrendo em vastas áreas da planície e em superfícies de inundação sazonal, principalmente nas margens dos corpos d'água e áreas úmidas adjacentes.

As áreas desmatadas são áreas onde a vegetação, seja ela de mangue, de restinga ou de floresta, encontra-se suprimida apresentando pastagens extensivas e trechos com cultivos em seu entorno sendo comumente tomadas por estradas e caminhos.

As moradias não são atendidas por serviço de infraestrutura básica. Há necessidade de melhorias nas condições habitacionais pela implantação de serviços de água, energia e esgotamento sanitário, bem como de equipamentos e áreas de lazer de uma forma que prioritariamente seja compatível com a qualidade ambiental da área.

Todos estes fatores possibilitam a identificação de um nível alto de ocupação com usos antrópicos que abrangem 60,45% deste compartimento da Planície Fluvio-marinha.

Assim como acontece no primeiro compartimento da Planície Fluvio-marinha, uma dinâmica de inundação gera processos de sedimentação e acumulação de matéria orgânica ao longo dos cursos fluviais. Esta subunidade é constituída por áreas com altitudes que chegam a 40 metros na região de contato entre os Tabuleiros Costeiros (Grupo Barreiras) com a Planície Costeira, sendo o argissolo vermelho – amarelo o tipo de solo com maior ocorrência.

Sabe-se que relevos ondulados, a depender da influência da porosidade e permeabilidade do solo, apresentam uma maior suscetibilidade à erosão. A utilização agrícola nas superfícies de inundação sazonal, a presença de vastas áreas desmatadas destinadas a pastagens principalmente em margens dos corpos d'água e a ocupação por casas construídas nas proximidades de rios, provenientes de formas de desmatamento indiscriminado da vegetação natural de mangue, acabam acarretando problemas como erosão do solo e das margens dos canais, alteração da drenagem, perda de nutrientes do solo e poluição do solo e da água.

Esta situação promove declínio parcial da estrutura espacial e funcional dos sistemas e eliminação paulatina das funções ecológicas fazendo predominar ambientes fortemente modificados.

3.3. Terraço Fluvio-marinho

A unidade **Terraço Fluvio-marinho** representa uma área de 4304,8 ha, 21,09% da Planície Costeira, e situa-

se entre a Planície Fluvio-marinha e o Terraço Fluvial. Tal compartimento também apresenta nível alto de antropização com 60,30% da área tomada por ocupação humana.

Nesta unidade há o predomínio de relevo suave com altitudes menores que 10 metros apenas havendo valores superiores, mas não ultrapassando os 30 metros, na área de transição com o Terraço Fluvial. Esta unidade apresenta sedimentos marinhos e continentais costeiros, não consolidados, de natureza e granulometria variadas com dominância de areia, argila e sedimentos eólicos.

Predomina um tipo de solo, o halomórfico (indiscriminado de mangue) nas áreas de transição com a Planície Fluvio-marinha, apesar de grande ocorrência de espodosolo.

Esta unidade é recortada pelo Rio Fundo e canais distributários. Por fazer limite com a Planície Fluvio-marinha e por abranger longo trecho marginando os cursos fluviais, apresenta porções de vegetação de mangue e algumas manchas mais ao sul de Floresta Ombrófila densa que, ora permanecem em seu estado mais primário, ora indicam níveis baixos de antropização. São pequenas porções de cobertura vegetal original que resistem aos processos de uso e ocupação do solo.

Quanto às formas de uso e ocupação, neste compartimento existem muitos terrenos preenchidos por cultivos, áreas desmatadas com solo em exposição, além de pastagens, na sua maioria de caráter extensivo. Devido à ocorrência de extensas áreas destinadas à pecuária (cerca de 25%) e cultivos principalmente de *Cocos nucifera* são comuns manchas de vegetação em estado médio e avançado de degradação.

Esta unidade da Planície Costeira é marcada pelo Rio Fundo e por canais distributários cujas presenças dão destaque a paisagem deste compartimento. No que se refere à dinâmica natural, o relevo plano e o regime de oscilação das marés promovem a acumulação de sedimentos areno-argilosos finos. Inundações periódicas favorecem condições adequadas para a geração de habitats para animais, influenciando diretamente na reprodução de espécies da avifauna.

Entretanto, a dinâmica natural vem sendo afetada por processos degradantes. A ocorrência de áreas com pastagens e cultivos em quase toda extensão alteram a paisagem natural, sobretudo, pelo desmatamento das margens do Rio Fundo.

A vegetação original de mangue vem sendo substituída por uma cobertura vegetal esparsa o que acarreta um processo erosivo e poluição do solo e da água e a degradação da qualidade dos mananciais.

Diante disso, o Terraço Fluvio-marinho é identificado como um nível alto de ocupação e enquadra-se como unidade de paisagem degradada em que a perda parcial da estrutura espacial e funcional deste compartimento dá lugar à desestruturação da integridade biofísica dos ambientes naturais.

3.4. Terraço Fluvial

A outra unidade componente da Planície Costeira é a unidade **Terraço Fluvial**. Com 1520,72 ha e um percentual de 7,45% configura-se como a menor unidade da Planície Costeira, contudo, nela aparecem as maiores altitudes predominando relevo entre 20 e 30 metros em quase toda

margem das lagoas Grande e Funda chegando a 50 metros a oeste já em porção mais interna, no limite com a Planície Fluviomarinha e as superfícies dissecadas dos rios.

Esta unidade forma uma faixa contínua situada entre o Terraço Fluviomarinho e o Terraço Marinho onde são encontrados depósitos marinhos e continentais costeiros e sedimentos não consolidados compostos por areia, argila, sedimento eólico. Constitui-se por depósitos aluvionares mais antigos e em nível mais alto do que o atual conformando-se como relevo-testemunho de um período de evolução da Planície Costeira relacionado a antigas planícies de inundação.

Quanto aos tipos de solos destacam-se os neossolos quartzarênicos e o espodossolo, sendo que ao sul, nas proximidades da desembocadura, e a oeste há pequena presença de solos halomórficos, havendo também pequena mancha de argissolo vermelho-amarelo.

A cobertura vegetal original praticamente inexistente nesta unidade da Planície Costeira, apenas algumas poucas manchas de formação arbóreo-arbustiva de restinga compondo setores de paleodunas fixas em relevo suave ondulado, ondulado a forte ondulado.

Tomada por áreas compostas em sua maior parte por pastagens e cultivos (86,55% da área total), esta unidade é preenchida por estradas e caminhos em toda a sua extensão. Destaque para grande área com cultivo de coco ao sul. No limite inferior, em setor de transição com a Planície Fluviomarinha, aparecem viveiros, sobretudo, relacionados à produção de camarão.

Assim, a ocupação por cultivos, pelas fazendas de camarão e pela presença de atividade pecuária de natureza extensiva perfazem uma área de 88,87% caracterizando o Terraço Fluvial como unidade com nível muito alto de ocupação.

Nesta unidade de paisagem os fatores relacionados ao uso e ocupação do solo são os que interferem na dinâmica natural dos agentes continentais responsáveis pela estrutura e funcionamento desta unidade.

Tais fatores estão representados pelas pastagens e cultivos presentes em toda a extensão. O alto grau de antropização decorre de impactos ambientais associados à ocupação de cultivos e pastagens e de extração de areia irregular em áreas de paleodunas, caracterizando comumente a perda irreversível de ambientes com importante potencial biológico e paisagístico.

O preenchimento de grandes áreas por plantações de coco (*Cocos nucifera*) através do desmatamento altera as propriedades do solo aumentando a exposição do terreno ao poder da erosão. Também a presença de atividade pecuária de natureza extensiva favorece o aparecimento de processos erosivos, já que a substituição da cobertura nativa por cultivos anuais torna os solos mais susceptíveis à erosão laminar.

Em se tratando do nível de degradação, encontra-se um nível muito degradado.

3.5. Terraço Marinho

A paisagem costeira de Sergipe é marcada por terraços marinhos que, de acordo com Fontes (2007), são, em geral, antigos depósitos de origem marinha, com formas tabulares e topos planos, geralmente com cotas altimétricas inferiores

a cinco metros, que foram soldados à Planície Costeira.

A unidade de paisagem **Terraço Marinho** que com 5.923,4 ha representa 29,03% da área total da Planície Costeira foi subdividida em dois compartimentos:

1. Terraço Marinho com nível de ocupação médio formado por superfícies planas dominadas por baixios alagados e cordões litorâneos regressivos dispostos de forma paralela à linha de costa;
2. Terraço Marinho com nível médio de ocupação tendo o predomínio de superfícies praias, de antedunas, de dunas móveis e baixios interdunares.

A **primeira subunidade** é a do Terraço Marinho marcado por superfícies aplainadas dominadas por áreas de restinga, baixios inundáveis e cordões litorâneos regressivos paralelos à linha de costa.

Este compartimento apresenta 4174 ha e abrange 70,46% da unidade Terraço Marinho. Possui grande trecho que faz limite com as Lagoas Funda e Grande. São encontradas, além das lagoas permanentes, muitas zonas úmidas que sofrem influência dos períodos de maior pluviosidade.

Quase metade da área, mais precisamente 49,70%, é composta por vegetação de restinga que se caracteriza como associação perenifólia, pouco densa, com variadas espécies arbóreo-arbustivas com destaque para o cajueiro (*Anacardium occidentale*), murici (*Byrsonima sp.*), mangabeira (*Hancornia speciosa*) e se distribui de forma esparsa em muitos trechos, sendo entremeada por cordões litorâneos em forma de faixas de solo arenoso esbranquiçado que se expõe quando da ausência de cobertura vegetal, intercalados por baixios que alagam no período mais chuvoso.

De acordo com Neto *et al.* (2004), cordões litorâneos são barreiras arenosas com feições alongadas paralelas à linha de costa, totalmente isolados do continente (ilhas barreiras) ou soldados a ele por uma das extremidades (pontais arenosos) a linha de costa. Essas feições podem isolar lagunas costeiras, sedimentadas ou não por canais que permitem a circulação da água no ciclo das marés entre a laguna e o mar aberto.

Em Sergipe, tais depósitos arenosos são considerados como areias litorâneas regressivas e apresentam-se descontínuos em muitos setores pela migração dos campos de dunas ou por algum mecanismo de ocupação antrópica.

Nesta subunidade ocorrem sedimentos inconsolidados, com variação granulométrica e material sedimentar areno-argiloso e de sedimento eólico. Predominam espodossolos tendo também a presença de neossolos quartzarênicos ocupando margens das referidas lagoas.

Quanto ao uso e ocupação do solo, há cultivos permanentes de coco-da-baía presentes de forma bem distribuída e associados muitas vezes às pastagens e a prática de agricultura familiar de subsistência em sítios e chácaras compostas, em sua maior parte, por cultivos temporários de frutíferas somando no total 33,48% da área. Presença também de casas e estabelecimentos comerciais em toda a extensão da Rodovia Estadual e margens da Lagoa Grande.

Destaques para os povoados Riboleirinha, Porto do Mato e Saco do Rio Real, localidades do município de Estância onde aparecem as áreas de maior adensamento, sendo encontradas nas suas imediações áreas desmatadas com solo exposto, caminhos e estradas completando a paisagem.

Os povoados Riboleirinha e Porto do Mato, localizados em porções mais interiores do Terraço Marinho são formados por habitações populares. Na Praia do Saco o processo de ocupação é antigo e remete ao núcleo inicial de povoamento. Compõe terrenos nas proximidades da linha de costa e é onde se localizam as construções de alto padrão com proprietários detentores das rendas mais altas. As casas de veraneio, em sua maioria, ocupam de forma irregular áreas próximas ou sobre os campos de dunas móveis.

Em praticamente todas as localidades, é notória a deficiência na oferta de saneamento básico. Problemas com o esgotamento sanitário, abastecimento de água, coleta dos resíduos sólidos são frequentes. A coleta de lixo não é eficiente, os destinos mais comuns dados aos resíduos são a queima e o lançamento em terrenos baldios ou em vias públicas.

Muitos residentes captam água de poços semiartesianos, uma vez que, o abastecimento por rede geral ainda não abrange toda a população dos povoados. A água proveniente da perfuração de poços não recebe nenhum tratamento e apresenta alta concentração de ferro possuindo cor e odor característicos.

Os usos e as formas de ocupação encontrados neste compartimento do Terraço Marinho totalizam 45,59% da área enquadrando-o no nível médio de ocupação.

Esta subunidade de paisagem dominada por cordões litorâneos com nível de ocupação médio apresenta cultivos com predomínio de coqueirais de forma bem distribuída evidenciando o processo agrícola na região. A população dos povoados, principalmente do Porto do Mato e Saco, em sua maioria, sofre com a ausência de oferta de rede de esgoto, água e pavimentação evidenciando problemas ambientais como a contaminação do solo e dos lençóis freáticos por fossas rudimentares e resíduos sólidos e contaminação das águas superficiais pela emissão de efluentes nos canais.

Quanto ao nível de degradação, as formas de uso e ocupação existentes, cujas interferências provocam uma desestruturação da paisagem, fazem caracterizar sistemas naturais medianamente modificados a modificados identificados pela perda parcial da estrutura espacial e funcional, apesar de ainda conservarem a capacidade de recuperação ao estado original. Ocorre um nível médio de degradação com predomínio de processos pouco degradantes a degradantes.

A **segunda subunidade** do Terraço Marinho possui 1749,4 ha e 29,53% em relação à área total sendo caracterizada pela presença de dunas móveis e em processo de fixação e por superfícies com formações praias e de antedunas distribuídas ao longo da linha de costa.

Em Sergipe, sobre os terraços marinhos holocênicos da Planície Costeira encontram-se as gerações de dunas recentes divididas em conjuntos mais internos, já fixas e do tipo parabólico e, bordejando o litoral, do tipo barcanas (Bittencourt *et al.* 1982). São constituídas de sedimentos arenosos, bem selecionados. As dunas parabólicas estão fixadas pela vegetação e ocorrem na parte mais interna dos terraços marinhos holocênicos.

Nesta subunidade da Planície Costeira de Estância encontram-se tipos de relevo suave ondulado, ondulado e forte ondulado. Há relevo plano com cotas altimétricas menores

que 10 metros, marcado por praias que acompanham a orla marítima. Valores acima de 10 metros aparecem em porções de dunas semifixas com altitude não superior aos 20 metros. No caso das dunas estabilizadas, estas ocorrem intercaladas com as dunas móveis nas proximidades da praia ou mais recuadas em direção ao continente.

Em toda a extensão desta subunidade há presença de zonas interdunares, baixios periodicamente alagados dependentes das condições de pluviosidade.

Depósitos marinhos e continentais costeiros, compostos por sedimentos inconsolidados e bem selecionados são características geológicas desta subunidade. Há presença de neossolos quartzarênicos ocupando de forma contínua a zona praial. Este tipo de solo apresenta cor clara e esbranquiçada, constituído basicamente de quartzo, muito profundo, excessivamente drenados e de baixa fertilidade natural.

Nos ambientes de praia e de dunas embrionárias a cobertura vegetal inclui espécies psamófilas como a salsa-da-praia (*Ipomoea pescaprae*) em áreas de associação entre praias e antedunas. Em setores de dunas móveis, há o predomínio de vegetação perenifolia de restinga com perfil arbustivo, em setores de dunas fixas ou em fase de estabilização encontra-se vegetação de restinga arbóreo-arbustiva, estas sofrem processos pedogenéticos que favorecem a fixação de recobrimento vegetal em sua superfície.

No tocante ao uso há uma densidade média de habitação principalmente nas porções nordeste (Abaís) e sul (Povoado Saco do Rio Real). Na Praia do Abaís cresce o número de imóveis destinados à segunda residência. São comuns dunas e zonas interdunares alteradas (32,11% da área), pois são alvos da especulação imobiliária pelo avanço da ocupação de veraneio, crescente expansão de arruamentos e loteamentos.

Na Praia do Saco muitos lotes chamam atenção pelo tamanho da propriedade e por se localizarem em áreas de dunas. A inexistência de um campo dunar pleno acontece também pela barreira de casas, tráfego motorizado sobre praia e dunas, e turismo desordenado.

Destacam-se como grande ameaça aos sistemas dunares instalações comerciais situadas à beira-mar. Na área mais visitada por banhistas presenciam-se bares voltados para o lazer, porém com precárias instalações.

Práticas de recreação, lazer, turismo pontual e esporádico nas áreas de dunas móveis são comuns. Aliado a isso, uma dinâmica imobiliária impulsionada pelo avanço da segunda residência e infraestrutura de médio porte (iluminação pública, torres de telefonia, ruas asfaltadas) vem se manifestando de forma crescente. Toda esta situação aliada à presença de alguns cultivos expõe para esta subunidade um nível médio de 42,83% de ocupação.

Atuam, atrelados à dinâmica natural, processos de acreção e acumulação de sedimentos, colonização de espécies psamófilas nos setores de antedunas, progradação dos sedimentos favorecendo, com isso, o desenvolvimento e evolução da morfologia dunar. Os baixios interdunares, ambientes integrados aos sistemas dunares, interrompem a continuidade das feições e são dependentes do regime pluviométrico alagando-se periodicamente quando ocorre a subida do lençol freático.

Contudo, o ritmo e a densidade de ocupação nas Praias do Saco e Abaís impõem limitações à dinâmica natural dos sistemas biofísicos presentes neste compartimento da Planície Costeira.

Fatores de ameaças ao sistema dunar e às áreas de baixios interdunares estão representados pela ocupação por construções e infraestrutura humana principalmente nas áreas de antedunas; pelo turismo pontual e esporádico nas áreas de dunas móveis; por uma dinâmica imobiliária impulsionada pelo avanço da ocupação de veraneio e por manchas de cultivos e áreas desmatadas.

Esta subunidade é alvo da especulação imobiliária, do avanço da ocupação de veraneio, e da crescente expansão de loteamentos. A infra-estrutura turística é considerada como um indicador que vem impondo limitações à dinâmica natural dos ambientes dunares do Litoral Sul de Sergipe, uma vez que, a intensificação das atividades turísticas vem promovendo desmonte de dunas móveis para loteamentos, residências secundárias e hotéis. O interesse pelo desenvolvimento do turismo no Litoral de Sergipe parte principalmente de empresas hoteleiras que visam o estabelecimento de grandes complexos de hotéis (resorts).

Tais fatores geram graves problemas ambientais, a saber: acúmulo de resíduos sólidos a sotavento das dunas, remobilização de material nos campos de dunas decorrentes do desmatamento, deposição de esgotos "in natura" em corpos d'água, bloqueio da alimentação no sentido praia-duna e conseqüente erosão na zona de praia em virtude do déficit de sedimentos por conta das barreiras antrópicas, comprometimento dos processos de recomposição dunar e perda significativa de sua capacidade evolutiva, etc.

São pressões que indicam fortes mudanças na estruturação dos sistemas naturais. A paisagem medianamente modificada a modificada ainda conserva a capacidade de recuperação, porém apresenta um nível de degradação de pouco degradado a degradado. A estabilidade natural modifica-se progressivamente, como conseqüência, ocorre uma perda parcial da estrutura espacial e funcional com eliminação paulatina das funções ecológicas.

A compartimentação da Planície Costeira do município de Estância em unidades e subunidades de paisagem, por considerar a associação entre as características geomorfológicas, geológicas, pedológicas, bem como da vegetação, seus componentes geoecológicos e as descontinuidades espaciais resultantes das interferências de ordem antrópica possibilita um melhor entendimento da configuração da paisagem em termos de elementos e fatores envolvidos na sua estruturação.

4. CENÁRIO RECOMENDADO

A identificação dos níveis de ocupação de cada unidade e subunidade de paisagem da Planície Costeira de Estância e a análise dos processos degradantes em cada compartimento permitiu o desenvolvimento de cenários como alternativa de uso para os diversos problemas socioambientais identificados na área de estudo.

Com subsídio ao ordenamento territorial que visa à compatibilização das necessidades do homem, relativas à ocupação e ao uso do solo, com a capacidade de suporte dos ambientes naturais este trabalho objetiva a proposição de um conjunto de ações, aqui enquadradas como classes componentes da proposta de cenário recomendado (Figura 05).

Tais classes estão elencadas a seguir:

Classe de Preservação

Abrange a manutenção da dinâmica e funções naturais com atividades compatíveis com estratégias de ações preventivas em conformidade com o determinado na legislação ambiental.

As áreas propostas para esta classe envolvem na unidade Planície Fluviomarina todas as áreas de mangue localizadas nas margens dos cursos fluviais. Esta classe também engloba assim como as áreas de dunas, nascentes, áreas de mata ciliares ainda não afetadas pela ocupação humana.

Dentro da unidade Terraço Fluviomarinho estão incluídas nesta classe a preservação das margens do Rio Fundo e áreas de manguezal a fim de evitar a degradação e assoreamento do sistema fluvial.

No Terraço Fluvial inserem-se as áreas compostas pelas margens das lagoas Funda e Grande buscando, dentre os fatores relevantes, a proteção da diversidade das espécies de animais e vegetais.

No Terraço Marinho enquadra-se a vegetação original de restinga quando localizada, de acordo com o disposto na legislação federal (Resolução CONAMA 303, de 20/03/02), em faixa mínima de trezentos metros, medidos a partir da linha de preamar máxima ou em qualquer localização ou extensão, quando recoberta por vegetação com função fixadora de dunas ou estabilizadora de mangues. Também constituem essa classe as lagoas permanentes e de regime estacional, além dos sistemas de dunas embrionárias, móveis e em processo de fixação.

Destaque para a necessidade urgente de ações que visem conter o problema da ocupação indevida por casas de veraneio nas proximidades da faixa de praia em áreas de antedunas, tendo em vista que, tais tipos de intervenções na dinâmica natural destes ambientes alimentam os efeitos da erosão marinha.

Classe de Conservação

Classe onde o objetivo maior é a conservação, podendo haver formas restritas de ocupação desde que por meio de controle rigoroso e de maneira a respeitar a capacidade de suporte dos ambientes naturais. As formas de uso e ocupação devem ser compatíveis com a conservação da qualidade ambiental.

As porções pertencentes a esta classe compreendem na unidade Planície Fluviomarina as áreas úmidas sujeitas à inundação periódica e os baixios interdunares. São áreas compostas em sua maioria por terrenos inundáveis localizados principalmente nas proximidades dos canais fluviais. São áreas importantes para a manutenção das áreas de preservação permanente. Estas áreas também estão presentes na unidade Terraço Fluviomarinho sendo importantes para a conservação do equilíbrio dos ecossistemas componentes da paisagem.

No Terraço Fluvial recomenda-se o controle do uso agrícola em áreas mais acidentadas a fim de conservar o solo contra os efeitos da erosão. Em áreas planas as restrições quanto à ocupação são menores, porém nas áreas mais elevadas, por conta da instabilidade do solo, deve-se coibir instalações humanas a fim de evitar riscos à ocupação. Deve-

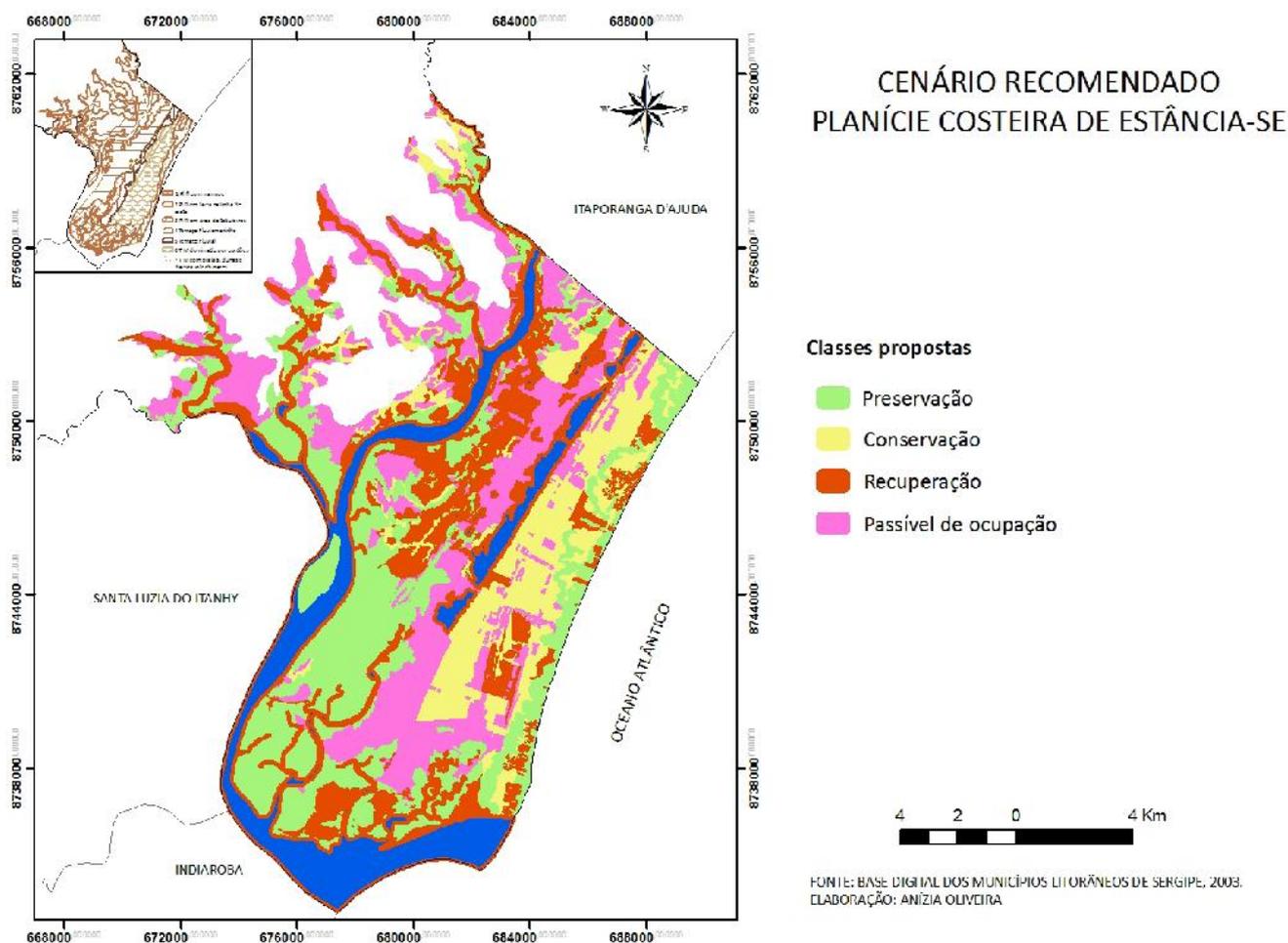


Figura 5. Cenário recomendado para a Planície Costeira de Estância-SE.

Figure 5. Recommended scenario for the Coastal Plain of the Estância-SE

se assim buscar a compatibilização da atividade agrícola, considerando critérios adequados de uso e conservação com base nas reais vocações do território.

No Terraço Marinho as áreas úmidas aparecem em forma de baixios interdunares. Há existência de corpos d'água e superfícies inundáveis localizadas entre cordões em área de restinga onde deve haver controle da qualidade da água para conservar as condições de vida da fauna e flora locais. Recomenda-se não apenas a restrição, mas sim a proibição de construção de habitações nos terrenos naturalmente encharcados, bem como a novas ocupações e parcelamentos em áreas de alto valor ecológico para a conservação destes ambientes.

Classe de Recuperação

Classe em que se recomenda a recuperação das áreas onde ocorrem manchas de áreas desmatadas, de solo exposto e cultivos, devendo por isso haver recuperação da vegetação original, sobretudo nas margens dos rios da Planície Fluvio-marinha.

Principalmente na unidade Terraço Fluvial que abrange áreas atualmente ocupadas por pastagens, por localidades, cultivos recomenda-se a recuperação da vegetação nativa

das áreas desmatadas. Também a proibição de extração irregular de areias e construção de moradias nas margens dos cursos d'água visando à recuperação das porções de terreno degradadas.

Recomenda-se a recuperação da mata ciliar dos canais distributários, das áreas compostas por vegetação em estágio médio e avançado de degradação encontradas no Terraço Fluvio-marinho e da vegetação original de restinga pertencente ao Terraço Marinho.

Nas áreas formadas por superfícies inundáveis deve-se investir na implantação de infraestrutura viária e de drenagem capazes de suportar determinado grau de adensamento, sendo que os terrenos, ou parte deles, mais encharcados não poderão ser ocupados com área construída.

Visando a recuperação das condições de equilíbrios dos sistemas biofísicos é indicada a proibição de instalações humanas nas margens das lagoas Grande e Funda, de forma a coibir a implantação de loteamentos e o consequente aterro.

A recuperação da vegetação em torno das lagoas é de fundamental importância, bem como a proibição de abertura de ruas e ampliação de loteamentos principalmente nas áreas de preservação permanente, pois podem afetar processos naturais como os de acreção e formação de dunas e de escoamento superficial entre as zonas de cordões.

Classe passível de ocupação (ocupação orientada)

Abrange as áreas que podem ser ocupadas. Entretanto, deve-se abarcar o uso controlado, com ênfase na qualidade ambiental. Envolve as áreas tomadas por localidades, pastagens e cultivos com ocupação já estabelecida que não se encontram nas zonas de preservação, conservação e recuperação estando relacionadas à expansão agropecuária e de consolidação urbana.

A deficiência na oferta de saneamento básico é notória em praticamente todas as localidades. Assim, em se tratando da implantação de infraestrutura urbana deve-se priorizar o saneamento ambiental com implantação de fossas sépticas adequadas às condições locais e oferta eficiente de abastecimento de água, coleta de lixo, bem como melhorias habitacionais.

5. CENÁRIO EXPLORATÓRIO

Baseado nas definições de Oliveira e Rodrigues (2009) é apresentado o cenário exploratório (Figura 06) como subproduto da proposta de uso do cenário recomendado. Como recorte temporal, foi considerado o intervalo de 10 anos para o desenvolvimento deste cenário. As classes estipuladas são as seguintes:

Área de Preservação Permanente

É constituída por todas as áreas antes pertencentes à classe Preservação que segue as determinações sobre as categorias de proteção da vegetação definidas em lei.

Em 2021 estarão preservadas as áreas de mangue localizadas nas margens dos cursos fluviais, as nascentes, as matas ciliares, bem como as margens das lagoas, as áreas cobertas por vegetação original de restinga, as lagoas permanentes e de regime estacional que servem de refúgio para espécies migratórias da ave-fauna, além das dunas embrionárias, móveis e em processo de fixação.

A proteção destas áreas mediante a proibição da ocupação evitará processos de degradação como assoreamento do sistema fluvial e problemas como o da erosão marinha relacionados à localização indevida de casas de veraneio e estabelecimentos comerciais nas áreas ambientalmente frágeis como de praias e de antedunas.

Em se tratando da preservação dos sistemas dunares, tem-se a garantia de que os processos naturais de fornecimento sedimentar, de acreção, de desenvolvimento das feições estarão mantidos para promoverem a consequente evolução do campo.

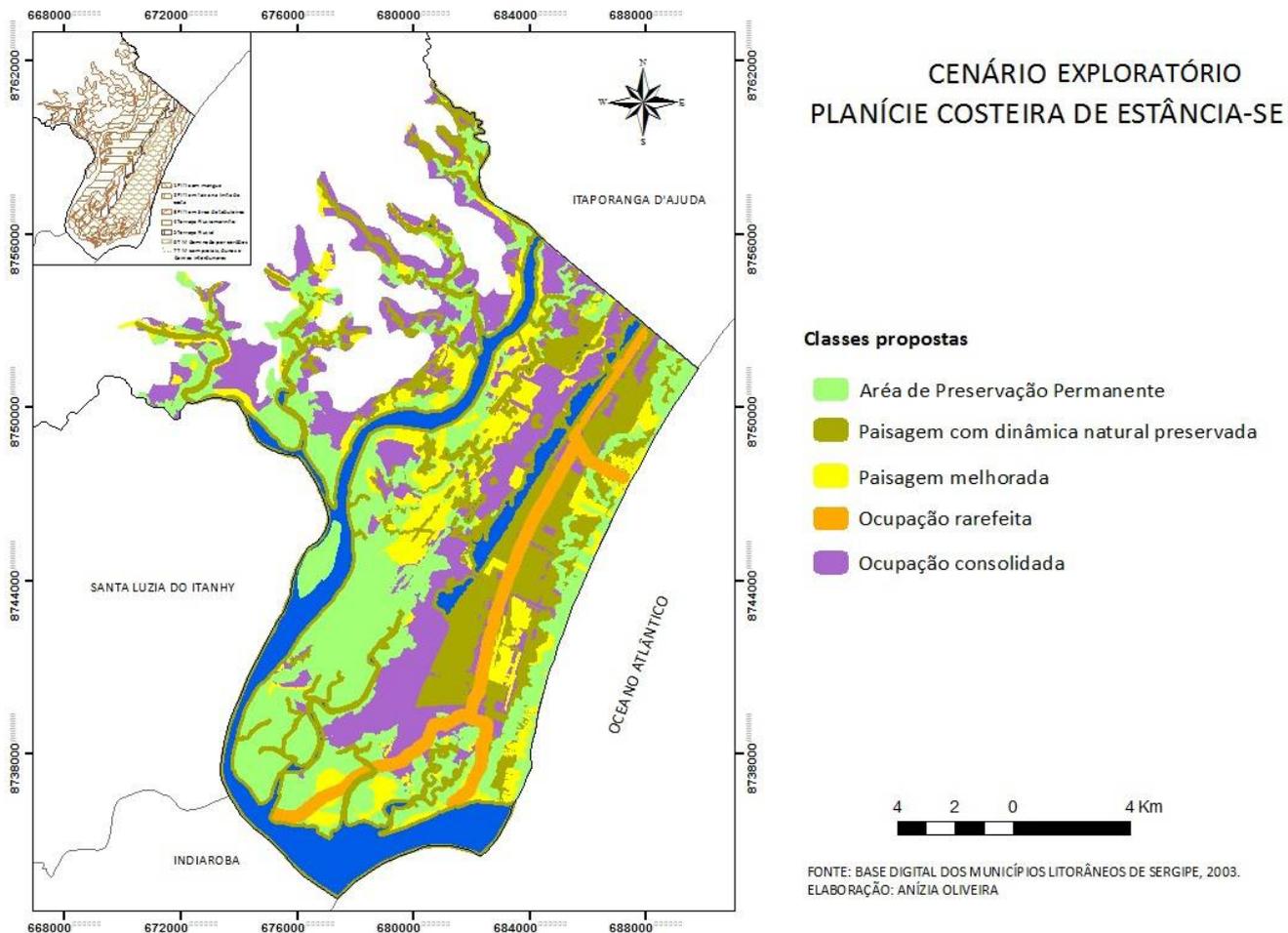


Figura 6. Cenário pretendido da Planície Costeira de Estância-SE.

Figure 6. Future scenario of the Coastal Plain of the Estância-SE

Paisagem com dinâmica ambiental preservada

Refere-se à classe Conservação. Mantidas as áreas pertencentes a esta categoria do cenário recomendado puderam ser conservadas as características e funções naturais dos ambientes biofísicos.

Com a conservação dos terrenos e baixios inundáveis, o controle da ocupação do solo a partir de parcelamentos ambientalmente planejados e do uso agrícola principalmente em áreas de relevo mais acidentado, haverá a conservação do solo contra os efeitos da erosão, conservação das condições de vida da fauna e flora locais, manutenção das áreas de preservação permanente e do equilíbrio dos ecossistemas componentes da paisagem.

Em 2021 as atividades vinculadas ao uso residencial, comercial e turístico desenvolvidas de forma restrita e planejada não interferirão na qualidade ambiental e causarão uma baixa interferência na dinâmica natural dos ambientes com alto grau de conservação pela alta capacidade de resiliência.

Paisagem melhorada

Diz respeito à classe Recuperação proposta para o cenário recomendado. No horizonte temporal adotado, as áreas pertencentes a esta classe estarão em conformidade com a legislação ambiental.

As ações para evitar a degradação das áreas com cobertura vegetal original, somadas à recuperação da vegetação nativa das áreas desmatadas por cultivos e pastagens dentro do que rege a legislação, sobretudo da mata ciliar dos rios da Planície Fluviomarina e da vegetação original de restinga encontrada no Terraço Marinho, permitirá, ao longo dos 10 anos, a recomposição da vegetação, antes em estágio médio e avançado de degradação, e o seu enquadramento no estado em que predominam as condições de estabilidade.

A proibição de instalações humanas impactantes nas margens das lagoas Grande e Funda e a recuperação da vegetação do entorno possibilitará a regeneração natural da cobertura vegetal e conservação dos ecossistemas.

O controle da ocupação dos terrenos naturalmente inundáveis de forma a garantir a permeabilidade permitirá escoamento natural intracordões evitando com isso riscos à ocupação.

Ocupação rarefeita

Classe que abrange toda a margem da Rodovia Estadual SE-10. Criada para enquadrar a faixa de terra ao longo da rodovia que deverá conter baixa adensamento de construções e população residente, pois se trata de uma classe que integra a categoria Paisagem com dinâmica ambiental preservada.

Os terrenos que fazem parte desta classe devem apresentar uma ocupação rarefeita com paisagens levemente modificadas pela atividade humana com baixo potencial de impacto.

O estímulo à ocupação de baixa densidade dá-se de forma a garantir a permanência da vegetação original e a conservação de áreas com alto valor ecológico como brejos, restingas, dunas e lagoas.

Ocupação consolidada

Classe que apresenta áreas consolidadas compostas por localidades, pastagens e cultivos. Seguindo as indicações

propostas na Classe Passível de ocupação definida para o cenário recomendado, haverá a consolidação das áreas predominantemente residenciais com ampliação ou implantação de infraestrutura, oferta de áreas de lazer, equipamentos e serviços urbanos.

Apesar da menor exigência quanto ao nível de modificação pela atividade humana em comparação com as outras classes, a estratégia de ação corretiva e de controle da qualidade ambiental estará presente nas formas de uso e ocupação.

CONCLUSÕES

A compartimentação da Planície Costeira do município de Estância em unidades e subunidades de paisagem possibilitou um melhor entendimento da configuração da paisagem em termos de elementos e processos envolvidos por meio da identificação dos níveis de ocupação e dos problemas característicos mais importantes do espaço costeiro permitindo, com isso, a compreensão de certas especificidades frente aos limites e potencialidades de cada unidade.

Assim, a compartimentação em unidades de paisagem possibilitou a compreensão dos fatores que caracterizam a dinâmica de funcionamento da Planície Costeira da área de estudo, no que se refere à associação entre os componentes naturais e antrópicos envolvidos na configuração de sua estrutura possibilitando, com isso, a proposição de alternativas de uso para os diversos níveis de fragilidades ambientais.

Considerando fatores como as práticas de uso da terra, os níveis de degradação decorrentes, o desrespeito à legislação e a conseqüente mudança da paisagem foi desenvolvida uma proposta de uso recomendado (cenário recomendado) mediante a análise da configuração atual do espaço pelo padrão vigente de uso e ocupação. Baseado nesta proposta desenvolveu-se, a partir de Oliveira e Rodriguez (2009), o cenário exploratório (designado para se referir ao uso pretendido, com a finalidade de indicar o uso sustentável frente às perspectivas de ocupação para o futuro), o qual compreende o horizonte temporal de 10 anos.

Estas proposições, apresentadas como procedimentos para o planejamento do meio físico, norteiam o reconhecimento das prioridades de ação permitindo contribuir com a orientação dos usos em função do controle das pressões antrópicas e de proposições que não comprometam a integridade biofísica.

Assim, a compreensão de como se dá o funcionamento da paisagem a partir da análise dos seus sistemas componentes, da sua estrutura espacial e de suas modificações no tempo foi necessária para o desenvolvimento do cenário de uso recomendado e, com base nele, o cenário pretendido.

Tendo em vista que os critérios utilizados no ordenamento dos usos e na gestão costeira comumente desconsideram as capacidades de reações e evoluções dos ambientais naturais urgem propostas de estudos deste tipo.

BIBLIOGRAFIA

- Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Martin, L.; Ferreira, Y.A. (1982) - Dados preliminares sobre a evolução paleogeográfica do Rio São Francisco.-SE/AL, durante o quaternário: influências da variação do nível do mar. *IV Simpósio do Quaternário do Brasil*, p. 49-68., ABEQUA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- Bolos, M. (org) (1992) - *Manual de ciência del paisaje. Teoría, métodos y aplicaciones*. 273p., Ed. Masson, Barcelona, Espanha. ISBN: 9788431105952.
- Carvalho, M.E.S.; Fontes, A.L. (2006) - Estudo ambiental da zona costeira sergipana como subsídios ao ordenamento territorial. *Revista Geonordeste* (ISSN 1518-6059), ano XV (2):10-39, Núcleo de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. Disponível em <http://200.17.141.110/pos/geografia/geonordeste/index.php/GeoNordeste/articulo/view/69/5>
- Costa, H.A.; Nascimento, E. (2007) - Cenários para o turismo no Brasil 2007-2010: análise da consistência metodológica e plausibilidade dos cenários. *Caderno Virtual de Turismo* (ISSN: 1677-6976), 7(3):46-65. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em <http://www.ivt.coppe.ufrj.br/caderno/index.php?journal=caderno&page=issue&op=view&path%5B%5D=25>
- Dias J.A.; Carmo, J.A.; Polette, M. (2009) - As Zonas Costeiras no contexto dos Recursos Marinhos. *Revista de Gestão Costeira Integrada / Journal of Integrated Coastal Zone Management* 9(1):3-5. Disponível em http://www.aprh.pt/rgci/pdf/RGCI-168_Prefacio.pdf
- Fontes, A.L. (2007) - Relevosolos. In: V.L.A. França & M.T.S. Cruz (coord.), *Atlas Escolar Sergipe: espaço geo-histórico e cultural*, pp.69-82, Editora Grafset. João Pessoa, PB, Brasil. ISBN: 8587872451.
- Freitas Filho, A. (2001) - A metodologia de construção de cenários: conceitos básicos. *Workshop para prospecção em C&T*, pp.1-25, Brasília, DF, Brasil.
- Meirelles, M.S.P.; Becker, B.; Egler, C.; Miranda, M.; Bragança, P.C.O.; Santos, U.P.; Campos, M.L. (1999) - Metodologia para elaboração do Zoneamento Ecológico-Econômico em áreas com grande influência antrópica. Embrapa Solos, Circular Técnica nº 4, ISSN 1517-5146, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/circular_tecnica_4_1999_metod_zee.pdf
- Neto, J.A.B.; Ponzi, V.R.A.; Sichel, S.E. (org.) (2004) - *Introdução à Geologia Marinha*. 279p., Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. ISBN: 8571930988.
- Oliveira, P.C.E; Rodrigues, S.C. (2009) - Utilização de cenários ambientais como alternativa para o zoneamento de bacias hidrográficas: estudo da bacia hidrográfica do Córrego Guaribas, Uberlândia – MG. *Sociedade & Natureza* (ISSN:1982-4513), 21(3):305-314, Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil. Disponível em <http://www.seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/issue/view/547>
- Rodriguez, J.M.M.; Silva, E.D.; Cavalcante, A.P.B. (2004) - *Geoecologia das Paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental*. 222p., Editora UFC, Fortaleza, CE, Brasil. ISBN: 9788572821481
- Santos, R.F. dos (2004) - *Planejamento Ambiental: teoria e prática*. 184p., Editora Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil. ISBN: 9788586238628.
- SEPLAN/SRH (2004) - *Atlas Digital sobre Recursos Hídricos de Sergipe*. CD-ROM, SEPLAN – Secretaria de Estado de Planejamento e Desenvolvimento Econômico / SRH - Superintendência de Recursos Hídricos, Aracaju, SE, Brasil.
- Zamboni, A.; Vilanova, R.R. (coord.) (2006) - *Projeto orla: manual de gestão*. 88p., Ministério do Meio Ambiente, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Brasília, DF, Brasil. ISBN: 8577380505. Disponível em <http://www.conpam.ce.gov.br/categoria1/orla/documentos/manual-do-orka/manualgestao-new.pdf>

LEGISLAÇÃO CONSULTADA:

- Lei n. 7.661/88 de 16 de maio de 1988. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7661.htm. Acesso em 20 de janeiro de 2011.
- Lei Nº 4.771 de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4771.htm. Acesso em 20 de janeiro de 2011.
- Resolução CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986 que dispõe sobre a Avaliação de Impacto Ambiental. Disponível em <http://www.antt.gov.br/legislacao/Regulacao/suerg/Res001-86.pdf>. Acesso em 20 de janeiro de 2011.
- Resolução CONAMA Nº 303, de 20 de março de 2002 que estabelece parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Disponível em http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/estadual/resolucoes/2002_Res_CONAMA_303.pdf. Acesso em 20 de janeiro de 2011.
- Estância. Lei Nº 18 de 14 de março de 2008. Institui o Código Municipal de Meio Ambiente e dá outras providências.
- Estância. Lei Nº 28 de 02 de fevereiro de 2010. Institui diretrizes para o Parcelamento do Uso do Solo e dá outras providências.
- Estância. Lei Nº 31 de 02 de fevereiro de 2010. Institui o Plano Diretor do Município de Estância/SE e dá outras providências.
- Lei Nº 5.858 do Estado do Sergipe de 22 de março de 2006 que dispõe sobre a Política Estadual do Meio Ambiente e institui o Sistema Estadual do Meio Ambiente. Disponível em www.semarh.se.gov.br/modules/wfdownloads/visit.php?cid=1. Acesso em 20 de janeiro de 2011.

Erosão de dunas com os modelos XBeach e Litprof *

Dune Erosion with the XBeach and Litprof Models

Filipa S. B. F. Oliveira ¹

RESUMO

Este estudo visa melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas dunares à acção das ondas em condições de tempestade marítima. O objectivo foi avaliar o desempenho dos modelos XBeach e Litprof na erosão de dunas. Testaram-se os modelos para um caso de verificação de erosão de duna realizado em canal de grande escala de laboratório. A avaliação do desempenho dos modelos baseou-se na análise da evolução morfológica, em indicadores de impacto (volume de erosão, recuo da duna e recuo do topo da duna) e num indicador de erro (*Brier Skill Score*). Apresentam-se e testam-se os parâmetros por defeito (*standard set of parameter settings*) para ambos os modelos. Da avaliação de desempenho dos dois modelos com os parâmetros por defeito concluiu-se que o desempenho do modelo XBeach é bom e do modelo Litprof é fraco. Recomenda-se que numa aplicação de engenharia para previsão da erosão de dunas, em que importa não só a precisão como também estar do lado da segurança, o modelo XBeach com os parâmetros por defeito deve ser usado com precaução, uma vez que o volume de erosão foi subestimado. Apresentam-se, discutem-se e testam-se os parâmetros de calibração para ambos os modelos. Concluiu-se que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica foram: *beta*, *break*, *facua*, *gammax*, *hswitch*, *lws* e *wetslp* para o modelo XBeach, e *Maximum Angle of Bed Slope* para o modelo Litprof. Os parâmetros *lws* e *wetslp* do modelo XBeach foram aqueles que conferiram ao perfil final uma geometria mais próxima da configuração observada. Os resultados obtidos para o indicador de erro BSS evidenciam que o melhor desempenho foi obtido com alteração do parâmetro *lws* e que o segundo melhor desempenho foi obtido com a alteração do parâmetro *wetslp*, sendo a ambos atribuída a classificação de excelente. Uma vez que a modificação do parâmetro *lws* permitiu melhorar a previsão de duas características fundamentais sob o ponto de vista da engenharia que são o recuo do topo da duna e o limite da extensão da zona activa (onde se observou a formação da barra submersa durante a experiência), considera-se que ele é de grande relevância na simulação da evolução da erosão de dunas com o modelo XBeach. No seu melhor desempenho, o modelo Litprof calibrado reproduziu correctamente o recuo do topo da duna, simulou a formação de uma barra submersa na posição observada experimentalmente, simulou incorrectamente o volume de erosão (cerca de metade do observado) e o declive da duna, e consequentemente gerou um avanço da duna ao nível da água em vez de recuo. Por este motivo, recomenda-se precaução na aplicação do modelo Litprof para previsão da erosão de dunas. Da comparação dos modelos morfodinâmicos XBeach e Litprof nas duas fases, i.e., na fase de teste com os parâmetros por defeito e na fase de calibração, concluiu-se que foi o modelo Xbeach que apresentou o melhor desempenho neste caso de estudo. A execução deste estudo permitiu testar e ficar a conhecer a elevada capacidade do modelo XBeach e a razoável capacidade do modelo Litprof na previsão da erosão de dunas.

Palavras-chave: Erosão Costeira, Duna, Modelação Morfodinâmica, XBeach, Litprof.

¹ - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. e-mail: foliveira@lnec.pt

ABSTRACT

The present study aims to improve the evaluation and prediction of the vulnerability/resilience of dune systems to the wave action under maritime storm conditions. The objective was to evaluate the performance of the XBeach and Litprof deterministic numerical models for dune erosion. The models were tested for a case of dune erosion performed in a large scale channel laboratory test. The evaluation of the models performance was based on the analysis of the morphological evolution, on impact indicators (erosion volume, dune retreat and retreat of the top of the dune) and on an error indicator (Brier Skill Score). The default parameters (standard set of parameter settings) are presented and tested for both models. The conclusion on the models performance with the default parameters was that the XBeach model is good and the Litprof model is poor. It is recommended that for an engineering application of dune erosion prediction, where accuracy and safety are both important, the XBeach model with the default parameters should be applied with precaution since the erosion volume was underestimated. The calibration parameters are presented, discussed and tested. It was concluded that the most influent parameters on the morphological evolution were: beta, break, facua, gamma_{max}, hswitch, lws and wetslp for the XBeach model, and Maximum Angle of Bed Slope for the Litprof model. The parameters lws and wetslp of the XBeach model were those which provided to the final profile the most similar geometry to the one observed in the laboratory experiment. The results obtained for the error indicator BSS revealed that the best performance was obtained by changing the calibration parameter lws and that the second best performance was obtained by changing the calibration parameter wetslp, having both been classified as excellent. Since the morphological change reached by changing the lws parameter improved the prediction of the two characteristics, which are crucial under an engineering point of view, retreat of the top of the dune and sea side limit of the extension of the active zone (where was observed the formation of the submerged bar during the experiment), it was concluded that this parameter is of great relevance in the simulation of dune erosion for the XBeach model. The Litprof model after calibration simulated correctly the retreat of the top of the dune, simulated the development of the submerged bar in the location observed in the experiment, simulated incorrectly the erosion volume (approximately half of the observed volume) and the dune face slope, and consequently caused an advance of the dune at the water level instead of a retreat. For this reason, it is recommended precaution in the application of the Litprof model for dune erosion. From the comparison of the XBeach and Litprof models in both stages, i.e., in the stage of testing the default parameters and in the stage of calibration, it was concluded that it was the XBeach model that had the best performance in this case study. This study allowed testing and acknowledging the high capacity of the XBeach model and the reasonable capacity of the Litprof model in the prediction of dune erosion.

Keywords: Coastal Erosion, Dune, Morphodynamic Modelling, XBeach, Litprof.

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo enquadra-se na área da dinâmica costeira e visa melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas dunares à acção das ondas em condições de tempestade marítima caracterizadas por fortes ventos, baixas pressões atmosféricas e curta duração (horas a dias). A motivação do estudo é o facto destes sistemas constituírem a mais importante defesa natural costeira na interface terra-mar e a sua erosão, galgamento, rotura e inundação durante estes eventos extremos constituir um elevado risco no que respeita a perda de território, degradação ambiental, destruição de património e até perda de vidas humanas.

Dada a complexidade dos processos costeiros que governam a dinâmica sedimentar na interface mar-terra, desde o limite da zona de rebentação das ondas até ao topo de praia ou duna que fica ao alcance da acção das ondas em condições extremas de agitação marítima e nível do mar, a simulação com modelos matemáticos, precisos e robustos para problemas de engenharia, da morfodinâmica de todas as subzonas (zona de rebentação, zona de espraiamento, topo de praia e sistema dunar) deste domínio espacial de forma contínua é bastante exigente, quer em termos de conhecimento dos processos físicos envolvidos quer em termos de recursos computacionais. O modelo XBeach (*eXtreme Beach behaviour*) (Roelvink *et al.*, 2009), actualmente em fase de desenvolvimento e disponível à comunidade científica (em <https://publicwiki.deltares.nl/display/XBEACH/Home>), é um dos modelos mais promissores porque se trata de um modelo determinístico, com formulação matemática

bastante robusta e inclusiva dos principais processos, e está aberto a futuro desenvolvimento. O modelo Litprof (DHI, 2008) do sistema de modelação Litpack (vastamente aplicado a nível mundial em projectos de investigação e consultoria) é um dos modelos mais eficazes nesta área, que, tendo a vantagem de ser um modelo determinístico, tal como o modelo XBeach, tem o inconveniente de não estar aberto a desenvolvimentos por parte da comunidade científica. O objectivo deste estudo foi avaliar o desempenho de cada um dos modelos, XBeach e Litprof, na simulação numérica da erosão de dunas, e compará-los entre si. A aplicação de um modelo mais eficaz na análise e previsão da vulnerabilidade de sistemas dunares à erosão permitirá quantificar com maior rigor os riscos associados.

Os modelos numéricos de erosão de dunas são geralmente verificados numa primeira fase com experiências laboratoriais, em canais de grande escala, uma vez que estas permitem um maior controlo dos processos envolvidos, quer nas condições iniciais e de forçamento quer na monitorização da evolução, e consequentemente garantem maior confiança nos resultados. As condições em canal equivalem a uma praia uniforme ao longo da componente longitudinal. Só posteriormente, após uma satisfatória simulação numérica da componente transversal, faz sentido desenvolver estes modelos na dimensão longitudinal e, nesta fase, aplicá-los em casos de campo. O modelo XBeach já se encontra desenvolvido na componente longitudinal, no entanto, a complexidade dos processos na faixa costeira onde se aplica é particularmente tão elevada, que continua a ser necessário melhorar a sua abordagem transversal. A importância do investimento

científico no desenvolvimento da componente transversal deste tipo de modelos é tão grande, que na Holanda, onde os modelos de verificação da segurança dos sistemas dunares são de extrema importância para a gestão costeira, aplica-se o modelo empírico DUROS (Brandenburg, 2010), um modelo transversal desenvolvido para zonas costeiras uniformes com base em resultados de testes laboratoriais (Vellinga, 1986). O estudo aqui apresentado enquadra-se na primeira fase, em que o modelo é testado com experiências laboratoriais, em canais de grande escala. Pretendeu-se simular um caso de erosão de uma duna experimental (escala 1:6) previamente realizado em laboratório no âmbito de um projecto de investigação.

A aplicação de ambos os modelos, mas principalmente do modelo XBeach, requer a introdução de um elevado número de parâmetros relativos aos processos físicos costeiros. Em projectos de engenharia, onde é de grande utilidade a aplicação deste tipo de modelos, acontece muitas vezes ser inviável a medição de alguns destes parâmetros. Para ultrapassar esta dificuldade, os autores de ambos os modelos recomendam a utilização de alguns valores por defeito (*standard set of parameter settings*). Neste artigo, apresentam-se os resultados dos modelos para o conjunto dos parâmetros por defeito recomendados e sugerem-se, no caso do modelo XBeach, e testam-se parâmetros de calibração. É com base na comparação dos dois conjuntos de resultados numéricos (que resultam da aplicação dos modelos com os parâmetros por defeito e dos modelos calibrados) com os resultados observados que se faz a avaliação do desempenho dos modelos XBeach e Litprof.

2. ABORDAGEM METODOLÓGICA

A erosão da zona costeira praia-duna resulta de uma acção de duas forças, a resistência da praia-duna decorrente

das propriedades da mecânica de solos e a acção hidráulica decorrente da capacidade de transporte das ondas e correntes. A simulação matemática do fenómeno é bastante complexa pois exige a resolução precisa dos processos de hidrodinâmica, transporte sedimentar e morfodinâmica, em simultâneo ao longo das zonas de rebentação, espraçamento, topo de praia e duna (Figura 1).

À semelhança do que acontece com outros processos físicos, a modelação numérica da erosão praia-duna pode caracterizar-se em três tipos de modelos conceptuais: empíricos, semi-empíricos e determinísticos ou baseados em processos. Do primeiro tipo, modelos empíricos, são os modelos onde existe uma relação explícita entre a erosão da praia-duna e importantes parâmetros físicos, que não são quantificados de forma individual mas sim através das consequências, ou seja, volume erodido e recuo da duna. O modelo DUROS (Brandenburg, 2010; Vellinga, 1986) aplicado na Holanda para verificação da segurança dos sistemas dunares é um exemplo deste tipo. Do segundo tipo, modelos semi-empíricos, são os modelos em que os principais processos físicos são individualmente descritos através de formulações matemáticas. O modelo SBeach (Larson & Kraus, 1989) é um exemplo deste tipo. Finalmente os modelos determinísticos, também vulgarmente designados por modelos baseados em processos, são os modelos em que os processos físicos são modelados individualmente. Os modelos numéricos aplicados neste estudo, o modelo XBeach e o modelo Litprof, são ambos deste tipo.

O modelo XBeach trata-se de um modelo bi-dimensional-horizonta constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros de propagação de ondas infragravíticas e grupos de ondas gravíticas, espraçamento, erosão e galgamento de dunas, avalanche, transporte sedimentar e evolução do fundo (Roelvink *et al.*, 2010). O objectivo do XBeach é modelar estes processos nos quatro regimes de impacto de

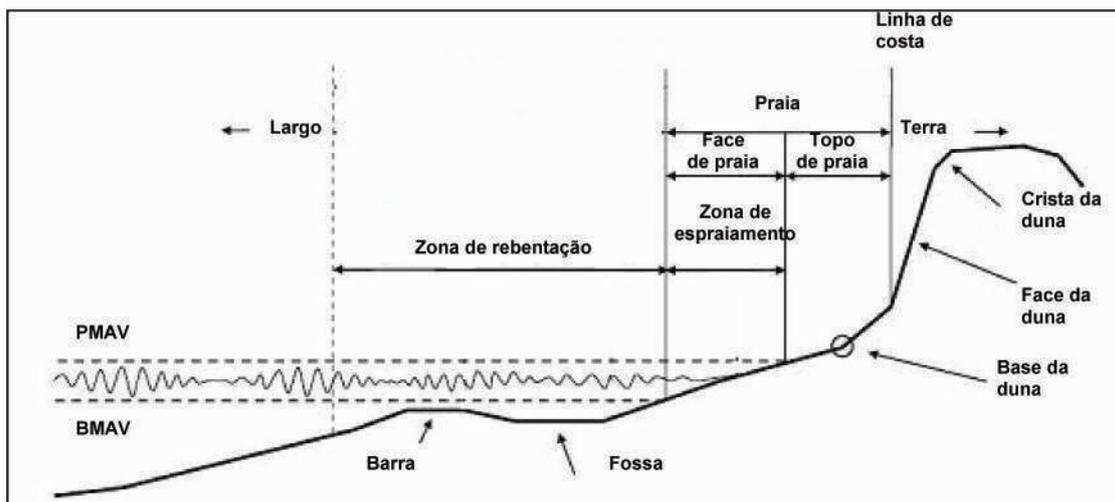


Figura 1. Definição da zona de estudo na interface mar-terra (adaptado de U. S. Army Corps of Engineers, 1984).

Figure 1. Definition of the study zone in the sea-land interface (adapted from U. S. Army Corps of Engineers, 1984).

tempestade marítima definidos por Sallanger (2000): regime de espraiamento, regime de colisão, regime de galgamento e regime de inundação. Neste estudo em particular, apenas ocorrem os regimes de espraiamento e colisão, cuja abordagem metodológica se descreve abaixo.

Para além da contribuição das ondas curtas ou gravíticas, o escoamento da zona de espraiamento é em grande parte devido a ondas infragravíticas (que resultam de interacções harmónicas não lineares de grupos de ondas curtas) (Tucker, 1954). Guza e Thornton (1982) mostraram que a altura de onda da banda espectral correspondente às ondas infragravíticas aumenta linearmente com a altura significativa de onda ao largo, enquanto a energia correspondente às ondas curtas da banda espectral atinge um limite devido à dissipação ao longo da zona de rebentação. Com base nesta constatação, Raubenheimer e Guza (1996) mostraram que em condições de tempestade a componente devida às ondas infragravíticas é dominante no espraiamento. No modelo XBeach a dinâmica da zona de espraiamento é resolvida com base na acção bi-dimensional-horizontal de ondas de grupo e resultantes ondas infragravíticas sobre a batimetria. O forçamento das ondas de grupo resulta da variação no tempo da acção da onda (Phillips, 1977) combinada com um modelo de dissipação para grupos de onda (Roelvink, 1993). É usado um modelo de turbulência (Svendsen, 1984; Nairn *et al.*, 1990; Stive & Vriend, 1994) para representar o momento associado à turbulência superficial gerada pela rebentação que se desloca em direcção à costa.

As interacções harmónicas não lineares de grupos de ondas gravíticas geram ondas infragravíticas e correntes longitudinais e transversais à costa. A interacção onda-corrente na camada limite gera um aumento das tensões de atrito que afectam as ondas infragravíticas e correntes (Soulsby *et al.*, 1993). A aleatoriedade das ondas incidentes é considerada com base na descrição de Feddersen *et al.* (2000), cuja aplicação (Ruessink *et al.*, 2001) evidenciou uma boa estimativa das correntes longitudinais para um coeficiente de inércia constante.

Durante o regime de espraiamento e colisão o fluxo de massa transportado pelas ondas e pela turbulência superficial gerada pela rebentação retorna em direcção ao mar como escoamento de retorno. Este escoamento é responsável pelo processo de erosão, uma vez que é sob a sua acção que a areia é removida da face da duna em desmoronamento. Apesar de existirem várias propostas para o perfil vertical da corrente neste escoamento (Reniers *et al.*, 2004b) a variação vertical da corrente em condições de tempestade não é muito grande, e por esse motivo ainda não foi introduzida no modelo XBeach.

Os processos de transporte de areia nas zonas de rebentação e espraiamento são bastante complexos pois resultam da combinação do movimento orbital de ondas curtas e longas, de correntes e da turbulência superficial gerada pela rebentação. O transporte sedimentar induzido pela assimetria vertical e horizontal das ondas, que se estima inferior à contribuição dada pelas ondas longas e corrente média (de Vries *et al.*, 2008), é considerado através da formulação proposta por Soulsby (1997) num modelo que resolve os processos na zona de rebentação para ondas curtas propagadas em grupo. Esta formulação foi aplicada

com sucesso na geração de correntes de retorno (Damgard *et al.*, 2002; Reniers *et al.*, 2004a) e rotura de ilhas barreira (Roelvink *et al.*, 2003).

O modelo Litprof trata-se de um modelo bi-dimensional-vertical constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros: um modelo de hidrodinâmica, um modelo quasi-tri-dimensional de transporte de sedimentos e um modelo morfológico (de evolução do fundo). A abordagem metodológica utilizada é descrita em Oliveira (2001) e DHI (2008). Este modelo não inclui os processos costeiros da zona de espraiamento. Neste estudo o modelo foi testado considerando duas teorias de onda, uma clássica e outra semi-empírica. A teoria de onda clássica considerada foi a teoria de 5ª ordem de Stokes (Fenton, 1985) e a teoria semi-empírica considerada foi a teoria de Doering & Bowen (1995), na qual são consideradas parametrizações da onda para incluir as assimetrias horizontal e vertical.

Neste estudo utilizaram-se dois tipos de indicadores para avaliar o desempenho dos modelos: indicadores de impacto e de erro. Os indicadores de impacto foram o volume de erosão (por metro de comprimento longitudinal de praia) e o recuo (da duna e do topo da duna), definidos por

$$\text{Volume de erosão} = \int_{z_1}^{z_2} (\text{perfil inicial} - \text{perfil pós-tempestade}) dz \quad (1)$$

e

$$\text{Recuo} = |x_0 - x_1| \quad (2)$$

sendo z_1 e z_2 a profundidade do ponto inicial do perfil e a cota do topo da duna, respectivamente; e x_0 e x_1 as coordenadas horizontais, a um determinado nível de referência (nível da água ou topo da duna) da duna frontal, no perfil inicial e no perfil pós-tempestade, respectivamente.

A medição de erro para avaliar o desempenho dos modelos foi feita com base em três critérios, o erro sistemático ou tendenciosidade (*bias*), a precisão e a capacidade (*skill*) do modelo. O método aplicado foi o *Brier Skill Score* (BSS) de van Rijn *et al.* (2003), que compara previsões ($z_{b,c}$) e medições de perfil ($z_{b,m}$) com o perfil inicial ($z_{b,0}$) e tem em conta o erro de medição ∂ (que aqui se assumiu nulo). Define-se por

$$\text{BSS} = 1 - \frac{\langle (z_{b,c} - z_{b,m} - \partial)^2 \rangle}{\langle (z_{b,0} - z_{b,m})^2 \rangle} \quad (3)$$

onde os parêntesis angulares denotam a média.

Apresenta-se na Tabela 1 a classificação do desempenho de modelos morfodinâmicos proposta por van Rijn *et al.* (2003).

Tabela 1. Classificação de desempenho com base no *Brier Skill Score* (BSS) proposto por van Rijn *et al.* (2003).

Table 1. Performance classification based on the *Brier Skill Score* (BSS) proposed by van Rijn *et al.* (2003).

BSS (van Rijn <i>et al.</i> , 2003)	
Excelente	1,0 – 0,8
Bom	0,8 – 0,6
Razoável	0,6 – 0,3
Fraco	0,3 – 0,0
Mau	< 0,0

Na secção seguinte descreve-se apenas a formulação do modelo XBeach uma vez que a formulação do modelo Litprof se pode encontrar, descrita pela autora, em Oliveira (2001).

3. FORMULAÇÃO DO MODELO XBEACH

O modelo resolve de forma acoplada as equações bi-dimensionais-horizontais de propagação de ondas, de escoamento, de transporte de sedimentos e de actualização do fundo (da continuidade), para condições de fronteira de espectro de ondas e escoamento não estacionárias. É utilizada uma malha estruturada alternada (*staggered grid*), rectilínea e não equidistante, implementada num sistema de coordenadas no qual o eixo-x está orientado em direcção à costa, i.e., perpendicular à linha de costa, e o eixo-y está orientado ao longo da costa.

Uma vez que as escalas de comprimento são pequenas, frequentemente ocorre escoamento super-crítico ($Fr > 1$, sendo Fr o número de Froude) e se dá prioridade à estabilidade numérica, os esquemas de discretização numérica predominantes são de primeira ordem a montante (*first order upwind*), por forma a resolver os elevados gradientes da hidrodinâmica e morfodinâmica na zona de rebentação e espraiamento minimizando oscilações numéricas. São utilizados esquemas explícitos com passo de cálculo automático baseado no critério de Courant. Estes esquemas implementados numa malha estruturada alternada (*staggered grid*) garantem a robustez do modelo. Seguidamente descrevem-se de as principais equações governantes do modelo XBeach.

A equação da acção da onda é dada por

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma} \tag{4}$$

onde

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \tag{5}$$

$$c_x(x, y, t, \theta) = c_g \cos(\theta) + u^L \tag{6}$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c_g \sin(\theta) + v^L \tag{7}$$

$$c_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) + \cos \theta \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \sin \theta \left(\sin \theta \frac{\partial v}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial v}{\partial y} \right) \tag{8}$$

sendo θ o ângulo de incidência relativamente ao eixo-x, $A(x, y, t, \theta)$ a acção da onda, S_w a densidade de energia da onda em cada componente direccional, σ a frequência intrínseca da onda obtida pela relação de dispersão linear, $c_x(x, y, t, \theta)$ e $c_y(x, y, t, \theta)$ as velocidades de propagação da acção da onda nas direcções x e y, respectivamente, c_g a velocidade de grupo obtida pela teoria linear da onda, u^L e v^L as velocidades Lagrangianas médias em profundidade nas direcções transversal e longitudinal, respectivamente, $c_\theta(x, y, t, \theta)$ a velocidade de propagação no espaço- θ , k o número de onda obtido pelas equações eikonel, ω a frequência absoluta da onda, e D_w a energia dissipada devido à rebentação, que se descreve abaixo.

A equação de dissipação da energia total, integrada no espectro direccional, devida à rebentação, é dada por

$$\overline{D_w} = \frac{\alpha}{\pi} Q_b \sigma E_w \tag{9}$$

onde

$$Q_b = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^n\right)$$

$$E_w(x, y, t) = \int_0^{2\pi} S_w(x, y, t, \theta) d\theta \tag{10}$$

sendo $\alpha = O(1)$, $H = \sqrt{\frac{8E_w}{\rho g}}$, H_{rms} a altura de onda quadrática média, $H_{max} = \frac{\gamma \tanh kh}{k}$, ρ a densidade da água, γ o índice de rebentação (parâmetro empírico) e $E_w(x, y, t)$ a energia total. No modelo assume-se que a energia total dissipada, $\overline{D_w}$, é distribuída proporcionalmente pelas componentes direccionais, sendo por isso

$$D_w(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{E_w(x, y, t)} \overline{D_w}(x, y, t) \tag{11}$$

Estimada a distribuição espacial da acção da onda e energia da onda, são calculadas as tensões de radiação, com base na teoria linear, da seguinte forma:

$$S_{xx,w}(x, y, t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \cos^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta \tag{12}$$

$$S_{xy,w}(x, y, t) = S_{yx,w}(x, y, t) = \int \text{sen}\theta \cos\theta \left(\frac{c_g}{c} S_w \right) d\theta \quad (13)$$

$$S_{yy,w}(x, y, t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \text{sen}^2\theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta \quad (14)$$

A equação da energia de turbulência superficial gerada pela rebentação é acoplada à equação da acção/energia da onda na qual o termo de dissipação de energia da onda na rebentação é usado como fonte para turbulência superficial. Tal como para a acção da onda, é considerada a distribuição direccional da turbulência superficial mas o espectro de frequência é representado por uma única frequência média. A equação da turbulência superficial é dada por

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} + \frac{\partial c_x S_r}{\partial x} + \frac{\partial c_y S_r}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta S_r}{\partial \theta} = -D_r + D_w \quad (15)$$

onde

$$c_x(x, y, t, \theta) = c \cos(\theta) + u^L \quad (16)$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c \text{sen}(\theta) + v^L \quad (17)$$

sendo $S_r(x, y, t, \theta)$ a componente direccional da energia de turbulência superficial, $c_x(x, y, t, \theta)$ e $c_y(x, y, t, \theta)$ as velocidades de propagação da energia de turbulência superficial nas direcções x e y, respectivamente, e a velocidade de propagação no espaço- θ , $c_\theta(x, y, t, \theta)$, semelhante à expressão (8), assumindo assim que as ondas e a turbulência superficial se propagam na mesma direcção. A velocidade de fase, $c = \sigma/k$, é obtida através da teoria linear da onda. A dissipação da turbulência superficial por componente direccional da onda, $D_r(x, y, t, \theta)$, resulta da distribuição da dissipação total da turbulência superficial proporcionalmente pelas componentes direccionais da onda, sendo por isso

$$D_r(x, y, t, \theta) = \frac{S_r(x, y, t, \theta)}{E_r(x, y, t)} \overline{D_r}(x, y, t) \quad (18)$$

onde

$$\overline{D_r} = \frac{2g\beta_r E_r}{c} \quad (19)$$

A contribuição da turbulência superficial para as tensões de radiação é dada por

$$S_{xx,r}(x, y, t) = \int \text{cos}^2\theta S_r d\theta \quad (20)$$

$$S_{xy,r}(x, y, t) = S_{yx,r}(x, y, t) = \int \text{sen}\theta \cos\theta S_r d\theta \quad (21)$$

$$S_{yy,r}(x, y, t) = \int \text{sen}^2\theta S_r d\theta \quad (22)$$

Esta contribuição é adicionada às tensões calculadas em (12), (13) e (14). O resultante tensor das tensões de radiação é

$$F_x(x, y, t) = - \left(\frac{\partial S_{xx,w}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xx,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy,w}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy,r}}{\partial y} \right) \quad (23)$$

$$F_y(x, y, t) = - \left(\frac{\partial S_{xy,w}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy,w}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yy,r}}{\partial y} \right) \quad (24)$$

O sistema de equações para o escoamento para águas pouco profundas é dado por

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - fv^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \\ = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + fu^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \\ = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu^L}{\partial x} + \frac{\partial hv^L}{\partial y} = 0 \quad (27)$$

onde as equações do momento e continuidade são formuladas em termos de velocidade Lagrangiana (definida como a distância a que uma partícula de água se desloca num período de onda, dividida por esse período). Esta velocidade relaciona-se com a velocidade Euleriana (a velocidade média da onda curta num ponto fixo) da seguinte forma

$$u^L = u^E + u^S \quad \text{e} \quad v^L = v^E + v^S \quad (28)$$

sendo u^S e v^S as velocidades de Stokes nas direcções x e y, respectivamente, dadas por

$$u^S = \frac{E_w \cos\theta}{\rho hc} \quad \text{e} \quad v^S = \frac{E_w \text{sen}\theta}{\rho hc} \quad (29)$$

Os parâmetros τ_{sx} e τ_{sy} são as tensões devidas ao vento, τ_{bx}^E e τ_{by}^E são as tensões de atrito no fundo (calculadas com velocidades Eulerianas), η é o nível da água, h é a

profundidade, ν_h é a viscosidade horizontal, f é o coeficiente de Coriolis e F_x e F_y são as tensões induzidas pelas ondas.

A equação de advecção difusão para transporte de sedimentos é dada por

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad (30)$$

onde

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h} \left(\left(|u^E|^2 + 0.018 \frac{u_{rms}^2}{C_d} \right)^{0.5} - u_{cr} \right)^{2.4} \quad (31)$$

sendo C a concentração de sedimentos média em profundidade, que varia na escala temporal do grupo de onda, D_h o coeficiente de difusão de sedimentos, T_s o tempo de mobilização dos sedimentos definido como

$$T_s = \max \left(0,05 \frac{h}{w_s}; 0,2 \right) s, \quad w_s \text{ a velocidade de queda, } C_{eq} \text{ a}$$

concentração de equilíbrio de sedimentos, u_{cr} a velocidade crítica, C_d o coeficiente de inércia apenas devido ao escoamento (sem considerar o efeito das ondas curtas), α_b o parâmetro de calibração e A_{sb} e A_{ss} os coeficientes de transporte de fundo e em suspensão, respectivamente, que são dependentes do tamanho e densidade do sedimento e da profundidade.

A equação de avalanche utilizada é dada pela expressão

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \quad (32)$$

onde m_{cr} é o declive crítico. O processo de avalanche é accionado quando o declive entre as duas últimas células molhadas por uma elevada altura de onda infragravítica é superior ao declive crítico. Nessa altura, dá-se a passagem de um volume de sedimentos de uma célula para a outra de forma a satisfazer a condição de declive crítico entre essas duas células.

A equação da actualização do fundo (da continuidade) é dada por

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (33)$$

onde

$$q_x(x, y, t) = \left(\frac{\partial hCu^E}{\partial x} \right) + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] \quad (34)$$

$$q_y(x, y, t) = \left(\frac{\partial hCv^E}{\partial y} \right) + \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \quad (35)$$

Sendo p a porosidade, f_{mor} um factor de aceleração morfológica de $O(1-10)$, e q_x e q_y as taxas de transporte sedimentar nas direcções x e y , respectivamente.

4. RESULTADOS

4.1. Caso de verificação

Este caso de teste do modelo, descrito em WL | Delft Hydraulics (2006) como teste T01, diz respeito a um perfil de referência com uma duna bastante robusta. A escolha deste caso de verificação deve-se ao facto dele ser ideal para testar o desempenho dos modelos XBeach e Litprof na erosão de dunas, pois para além de incluir uma duna bastante robusta na sua configuração geométrica, conforme salientado, foi realizado em canal de grande escala (factor de escala de profundidade n_d igual a 6). Trata-se de um perfil com declive 1:20 desde o fundo, ao nível -4,5 m, até aproximadamente ao nível -2,7 m, seguido de um declive 1:70 até aproximadamente ao nível -0,8 m, por sua vez seguido de um declive 1:20 até aproximadamente ao nível -0,3 m, e finalmente de um declive de 1:3 até ao topo da duna (Figura 2). O sedimento utilizado caracteriza-se por ter $D50=0,2$ mm, $D90=0,3$ mm e densidade 2,65. O teste foi realizado à temperatura aproximada de 9°C em modelo reduzido à escala 1:6. As condições de onda incidente foram um espectro de Pierson-Moskowitz com altura significativa $H_s=1,5$ m, período de pico $T_p=4,9$ s e duração 6 horas. O teste foi temporariamente interrompido para realizar medições do fundo a 0,1, 0,3, 1, 2,04 e 6 horas a contar a partir do início da experiência laboratorial. Os intervalos no início do teste foram mais curtos porque no início de um teste as taxas de erosão são mais elevadas. Da acção das ondas resultou um perfil de erosão caracterizado por um forte recuo da duna: aproximadamente 9 m³.m⁻¹ foram extraídos da duna frontal, correspondendo este volume a um recuo de aproximadamente 2 m ao nível da água e de aproximadamente 4,8 m ao nível do topo da duna (conforme eq. (2) de definição de recuo). A erosão da duna não se deu gradualmente mas sim por etapas, i.e., em determinados instantes ocorreu o deslizamento de blocos de duna com volume razoável. Este processo de avalanche ocorreu quando o declive da duna era quase vertical ou mesmo ligeiramente negativo (quando o topo de duna estava já pendurado). Observou-se ainda que o instante de avalanche (de deslizamento dos blocos de duna) nem sempre coincidiu com o instante de impacto da onda. Relativamente à morfologia do perfil de erosão, observou-se que nos primeiros instantes, em que a taxa de erosão é mais elevada, o volume de areia erodido da duna foi depositado na zona do perfil submerso imediatamente adjacente formando um declive de praia mais suave. Posteriormente, com o decorrer do processo erosivo, formou-se uma barra submersa não muito pronunciada na zona de deposição de areia mais afastada da face de praia e duna (Figura 2).

A avaliação do desempenho dos dois modelos, XBeach e Litprof, para este caso de verificação foi realizada em duas

fases. Numa primeira fase testaram-se os modelos com os parâmetros por defeito. Numa segunda fase calibraram-se os modelos, ajustando os parâmetros de forma a melhorar o seu desempenho, i.e., a similaridade com os resultados observados. Em cada uma das fases compararam-se os resultados de ambos, sempre com base nos resultados observados durante a evolução do perfil experimental.

4.2. Avaliação com parâmetros por defeito

A aplicação de modelos de morfodinâmica requer a introdução de um elevado número de parâmetros relativos

aos processos físicos costeiros. Em projectos de engenharia, onde é de grande utilidade a aplicação deste tipo de modelos, acontece muitas vezes ser inviável a medição de alguns destes parâmetros. Para ultrapassar esta dificuldade, os autores dos modelos recomendam a utilização de alguns valores por defeito, encontrados com base na execução de um elevado número de testes submetidos à mais vasta gama de condições possível. Contudo, no modelo XBeach existe um elevado número de possíveis parâmetros de calibração, o que faz com que o modelo tenha um elevado potencial para reproduzir correctamente os processos envolvidos mas também seja

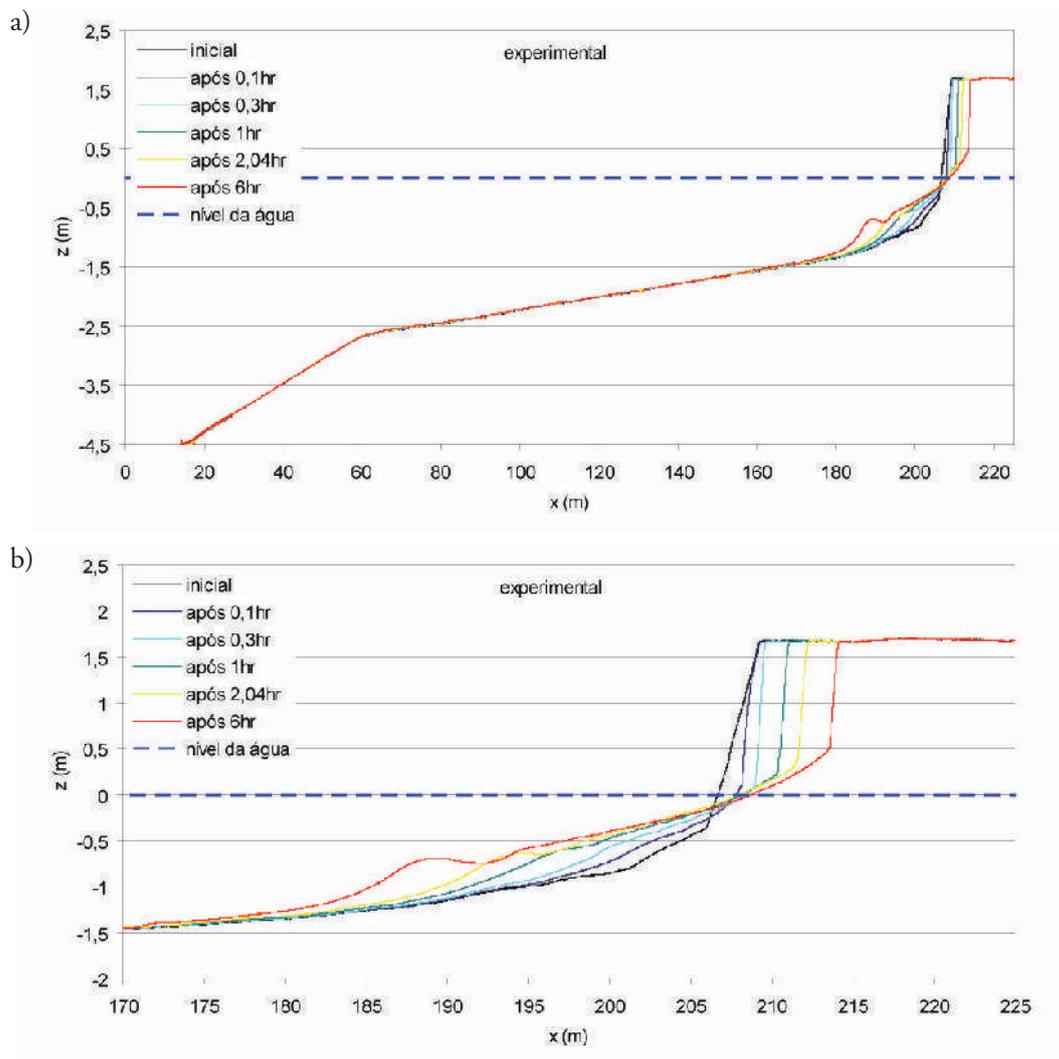


Figura 2. Evolução do perfil para o caso de verificação: a) perfil completo e b) pormenor.
Figure 2. Profile evolution for the verification case: a) complete profile and b) detail.

bastante exaustivo o procedimento de teste que conduz à sua correcta aplicação. Seguidamente descrevem-se as aplicações dos modelos XBeach e Litprof com os parâmetros por defeito e faz-se a sua comparação.

4.2.1. Modelo XBeach

Após análise dos dois conjuntos de valores dos parâmetros por defeito sugeridos pelos autores em Roelvink *et al.* (2009) e Roelvink *et al.* (2010), optou-se para este caso de estudo por atribuir um novo conjunto de valores aos parâmetros por defeito, o mesmo conjunto utilizado pela autora para o teste do modelo XBeach no caso do desenvolvimento de uma barra submersa sem erosão do topo de praia (Oliveira, 2011). Fez-se constituir esse conjunto por: para os parâmetros com valor igual em ambos os conjuntos, por esse valor; e para os restantes parâmetros, pelo valor atribuído para os casos teste Lip11d-2E, Deltaflume_2005_T04, Zelt, Delilah e Zwin (Roelvink *et al.*, 2009), sendo os dois primeiros testes laboratoriais e os restantes três testes de campo (Zelt e Delilah nos USA, Zwin na Europa). Apresentam-se na Tabela 2 os valores de alguns dos parâmetros por defeito atribuídos neste estudo onde se usou uma malha de espaçamento horizontal de 1 m.

Os resultados da evolução morfológica (Figura 3) mostram que o modelo XBeach com os parâmetros por defeito simula de forma razoável a acção erosiva das ondas na quase totalidade do perfil. As maiores diferenças relativamente aos resultados experimentais encontram-se no declive da duna, que se observou quase vertical durante a experiência laboratorial e o modelo reproduz mais suave, e na barra submersa formada na extremidade da zona activa do perfil (para valores de x entre 185 e 192 m), que o modelo não reproduz.

4.2.2. Modelo Litprof

Aplicou-se o modelo Litprof com os parâmetros por defeito recomendados pelos autores. Descrevem-se na Tabela 3 os parâmetros por defeito atribuídos. Testaram-se duas teorias de onda, a teoria de Doering e Bowen (1995) (B&D) e a teoria de 5ª ordem de Stokes (Fenton, 1985) (Stokes5).

Comparando os resultados de evolução morfológica do modelo Litprof com os parâmetros por defeito para ambas as teorias de onda consideradas com os resultados experimentais, constata-se que o modelo Litprof não simula o perfil de erosão caracterizado por um forte recuo da duna observado experimentalmente (Figura 4a-b).

4.2.3. Comparação

Compararam-se os modelos XBeach e Litprof, ambos com os parâmetros por defeito, com base nos resultados laboratoriais. As Figuras 5a-e, 6a-c e 7 mostram, respectivamente, os perfis após 0,1, 0,3, 1, 2,04 e 6 horas de simulação (à escala laboratorial), os indicadores de impacto para avaliação do desempenho dos modelos, volume de erosão, recuo da duna (ao nível da água) e recuo do topo da duna, e o indicador de erro para avaliação do desempenho dos modelos, BSS.

Os resultados de evolução do perfil (Figuras 5a-e) indicam que o modelo XBeach sobrestima o recuo do topo da duna

numa fase inicial do processo erosivo, até aproximadamente ao final do quarto intervalo de medição do perfil experimental (após 2,04 horas), e posteriormente passa a subestimar este parâmetro até à conclusão da experiência (após 6 horas). O modelo XBeach simula o declive da face da duna significativamente mais suave do que o declive observado, que é praticamente vertical durante a experiência. Durante o processo erosivo a base da duna não só recua como sobe na vertical. No entanto, o modelo XBeach não reproduz com exactidão o deslocamento vertical da base da duna. Observa-se que o modelo não reproduz subida da base da duna a partir do nível da água (z igual a zero), o que evidencia falta de realismo na formulação matemática do processo de avalanche. Relativamente à evolução da parte submersa do perfil observa-se que o modelo XBeach tende a aproximar o declive do perfil submerso do declive observado durante a experiência. Contudo, observa-se que o modelo não reproduz a barra submersa que se observa para valores de x entre 185 e 192 m. Observa-se ainda que o modelo subestima a extensão da zona de acumulação da areia transportada da face da duna, no entanto, tal dever-se-á ao facto do volume de erosão ser ligeiramente subestimado pelo modelo.

Ao primeiro intervalo de medição do perfil experimental (após 0,1 hora) o indicador de impacto volume de erosão simulado com o modelo XBeach e observado é praticamente igual. Com o decorrer da experiência, o modelo passa a subestimar o volume de erosão e a diferença entre o valor observado e numérico cresce (Figura 6a). No final da experiência o volume de erosão simulado é aproximadamente 75% do volume observado. Os indicadores de impacto recuo da duna (ao nível da água) e recuo do topo da duna evidenciam que a taxa de recuo (da base) da duna é semelhante à taxa de recuo do topo da duna e que tal não se verifica nos resultados numéricos (Figuras 6b-c). A falta de concordância entre os resultados numéricos e experimentais do indicador recuo da duna, que é significativamente maior do que a falta de concordância entre os resultados numéricos e experimentais do indicador recuo do topo da duna, deve-se ao facto do modelo não reproduzir correctamente o processo de avalanche, conforme já referido. A evolução do indicador de erro BSS mostra que o desempenho do modelo XBeach é mau no início da experiência mas torna-se bom no segundo intervalo do teste e assim permanece ao longo da experiência (Figura 7).

A comparação da evolução do perfil experimental com a evolução dos perfis numéricos obtidos com o modelo Litprof para ambas as teorias de onda demonstra que o modelo com os parâmetros por defeito não simula o processo de erosão da duna. Considera-se por isso que dos modelos Xbeach e Litprof aquele com melhor desempenho com os parâmetros por defeito é o modelo XBeach.

4.3. Calibração

Testaram-se os parâmetros de calibração para cada um dos modelos, tendo como base os parâmetros por defeito. Neste processo, fez-se variar um parâmetro de cada vez mantendo os outros constantes. Apresentam-se os resultados dos testes efectuados. Posteriormente faz-se a avaliação do desempenho dos modelos XBeach e Litprof com base na comparação dos dois modelos para os melhores resultados obtidos após calibração.

Tabela 2. Parâmetros por defeito no modelo XBeach.**Table 2.** Default parameters in the XBeach model.

	<i>Parâmetro¹</i>	<i>Descrição [unidades]</i>	<i>Valor por defeito</i>
Condições de onda	break	Opção formulação rebentação (3="Roelvink2") [-]	3
	wci	Opção interacção onda corrente [-]	0
	roller	Opção modelo de turbulência superficial [-]	1
	beta	Coefficiente do declive do rolo no modelo de turbulência superficial (>0,05 e < 0,3) [-]	0,1
	gamma	Parâmetro de rebentação na formulação de Baldock ou Roelvink [-]	0,55
	gammax	Razão máxima altura onda/profundidade (Hrms/hmax) [-]	2
	alpha	Coefficiente de dissipação da onda [-]	1
	delta	Fracção da altura de onda a adicionar à profundidade [-]	0
	n	Potencia no modelo de dissipação de Roelvink [-]	10
	scheme	Opção esquema numérico para equação acção da onda (1=Upwind; 2=Lax Wendroff) [-]	2
	lws	Opção ondas infragravíticas (0=não;1=sim) [-]	0
	instat	Grupos de onda gerados com parâmetros espectrais [-]	4
Condições de escoamento	C	Coefficiente de Chezy [$m^{1/2}/s$]	65
	nuh	Viscosidade horizontal [m^2/s]	0,1
	nuhfac	Coefficiente de calibração da viscosidade horizontal do modelo de Battjes [-]	1
	eps	Profundidade mínima para inundação [m]	0,001
	hmin	Profundidade mínima para cálculo da velocidade da corrente de retorno [m]	0,05
Condições de transporte e morfodinâmica	hswitch	Profundidade mínima (na interface de wetssl para dryslp) [m]	0,1
	wetssl	Declive crítico de avalanche submersa [-]	0,3
	dryslp	Declive crítico de avalanche emersa [-]	1
	morfac	Factor morfológico [-]	1
	dico	Coefficiente de dispersão horizontal [m^2/s]	1
	facsl	Factor declive na formulação do transporte de sedimentos [-]	1,6
	turb	Opção cálculo concentração sedimentar de equilíbrio [-]	2
	facua	Opção de assimetria de ondas curtas [-]	0
Condições numéricas	CFL	Máximo número de Courant para estimar o passo de cálculo automaticamente [-]	0,9
Condições fronteira	order	Geração de ondas (1=1ª ordem; 2=2ª ordem) [-]	1
	front	Condição fronteira lado mar (0=condição geração-absorção, em 1D) [-]	0
	back	Condição fronteira lado terra (2=condição geração-absorção, em 2D) [-]	2
	left	Condição fronteira lateral esquerda (0=Newmann) [-]	0
	right	Condição fronteira lateral direita (0=Newmann) [-]	0

¹ designação de acordo com as variáveis introduzidas no modelo

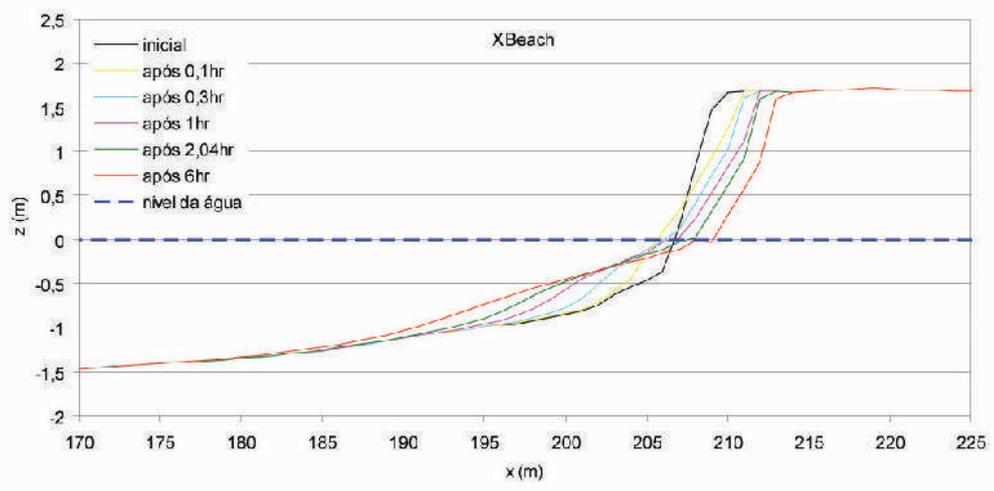


Figura 3. Resultados numéricos do modelo XBeach com parâmetros por defeito à escala laboratorial.
Figure 3. Numerical results of the Xbeach model with the default parameters at laboratory scale.

Tabela 3. Parâmetros por defeito no modelo Litprof.

Table 3. Default parameters in the Litprof model.

	Parâmetro ¹	Descrição [unidades]	Valor por defeito
Condições de transporte (Módulo PRFTABL)	C1	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	0,1
	C2	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	2
	C3	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	16
	C4	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	3
	θ_c	Parâmetro crítico de Shields [-]	0,045
	Convective terms	Opção inclusão da corrente de fundo (<i>streaming</i>) [-]	included
	C_b	Opção de cálculo da concentração de fundo (modelo determinístico de Engelund and Fredsøe (1976) ou empírico de Zyserman e Fredsøe (1994)) [-]	deterministic
Condições de onda	γ_1	Máxima razão entre a altura e o comprimento de onda (H/L) [-]	0,88
	γ_2	Máxima razão entre a altura de onda e a profundidade (H/h) [-]	0,6
	β	Parâmetro empírico do modelo de turbulência superficial de Dally e Brown (1995) (>0,1 e <0,2) [-]	0,15
Condições de morfodinâmica	Maximum Morphological Timestep	Limite máximo do intervalo de tempo entre actualizações da batimetria, sendo o passo de cálculo do estimado automaticamente [s]	1800
	Maximum Angle of Bed Slope	Máximo declive de fundo antes de avalanche submersa [°]	30
	α_{scale} or scale parameter	Factor de transferência de momento transversal (afecta a forma da barra submersa) [-]	1
	Clay layer	Opção de inclusão de um fundo rígido abaixo de determinado nível (ao qual pode ocorrer acumulação mas não erosão) [-]	exclude
	Energy loss due to bed friction	Opção de inclusão de dissipação de energia por atrito de fundo segundo o modelo de Fredsøe e Deigaard (1992) [-]	include

¹ designação de acordo com a nomenclatura das variáveis na interface do modelo

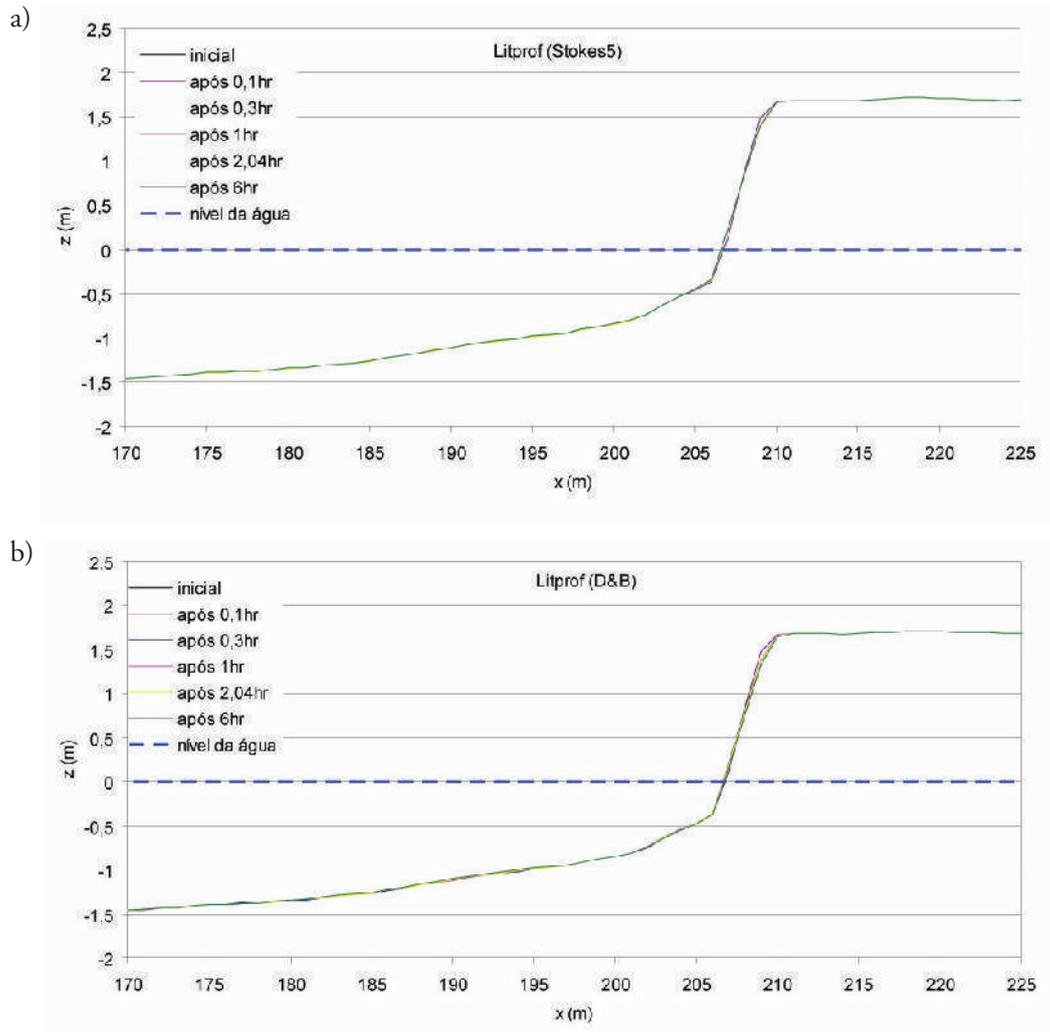


Figura 4. Resultados numéricos do modelo Litprof para as teorias de onda a) Stokes5 e b) D&B, com parâmetros por defeito, à escala laboratorial.

Figure 4. Numerical results of the Litprof model for the wave theories a) Stokes5 and b) D&B, with the default parameters, at laboratory scale.

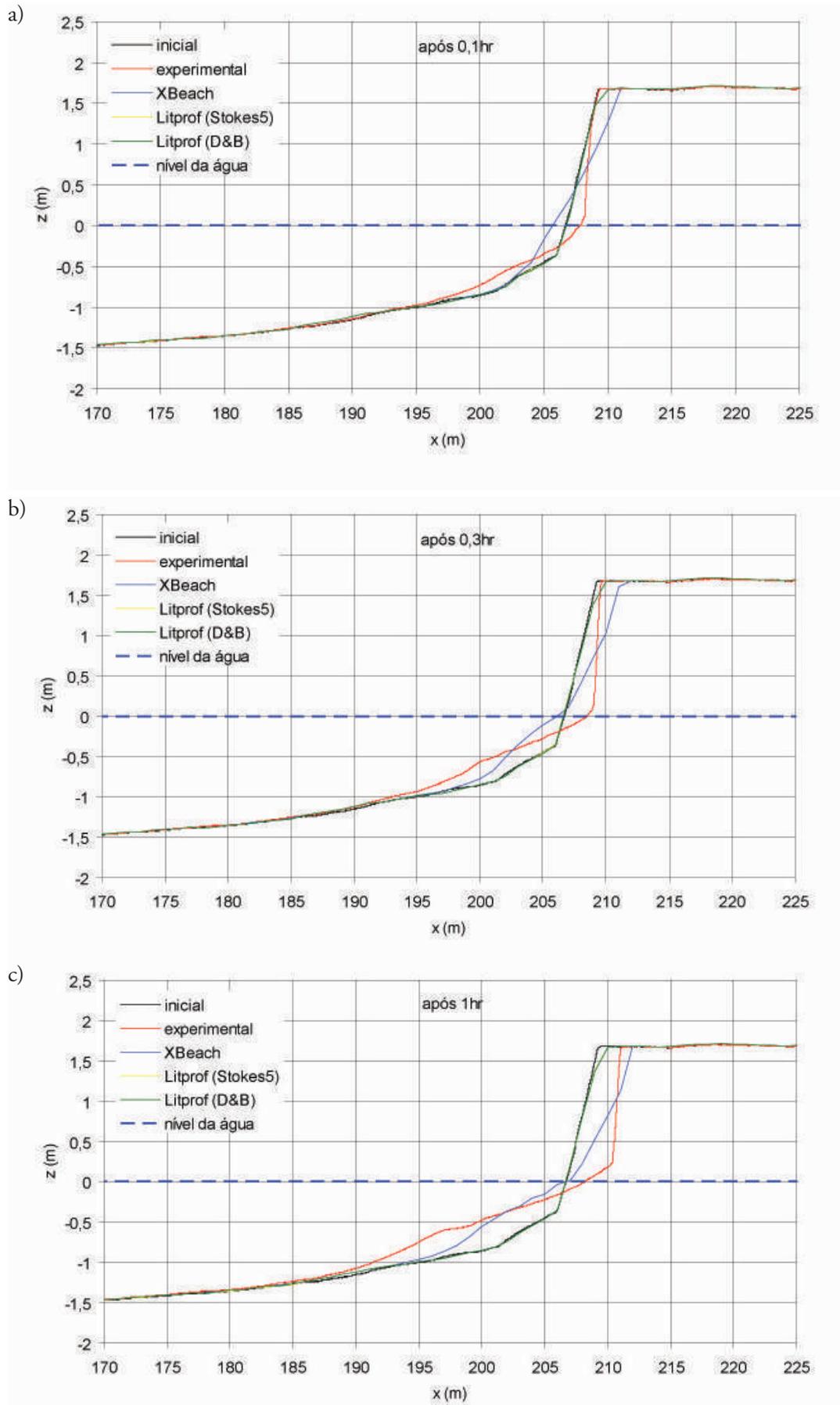


Figura 5. Continua na próxima página

Figure 5. Continues in the next page.

Continuação da Figura 5.

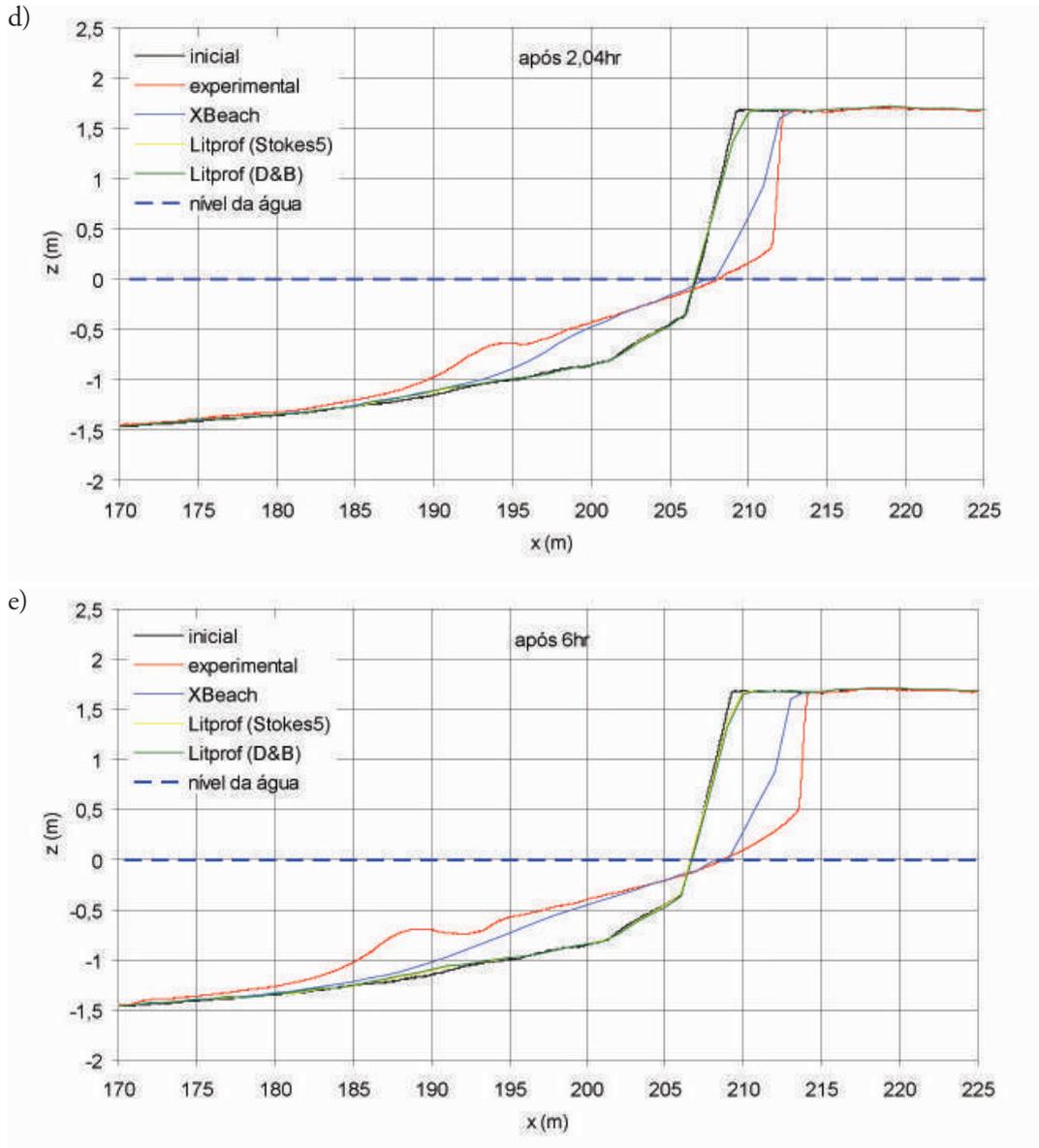


Figura 5. Resultados numéricos dos modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda Stokes5 e D&B) com parâmetros por defeitos, à escala laboratorial, ao final de 0.1, 0.3, 2.04 e 6 horas.

Figure 5. Numerical results of the XBeach and Litprof models (for the wave theories Stokes5 and D&B) with the default parameters, at laboratory scale, after 0.1, 0.3, 2.04 and 6 hours.

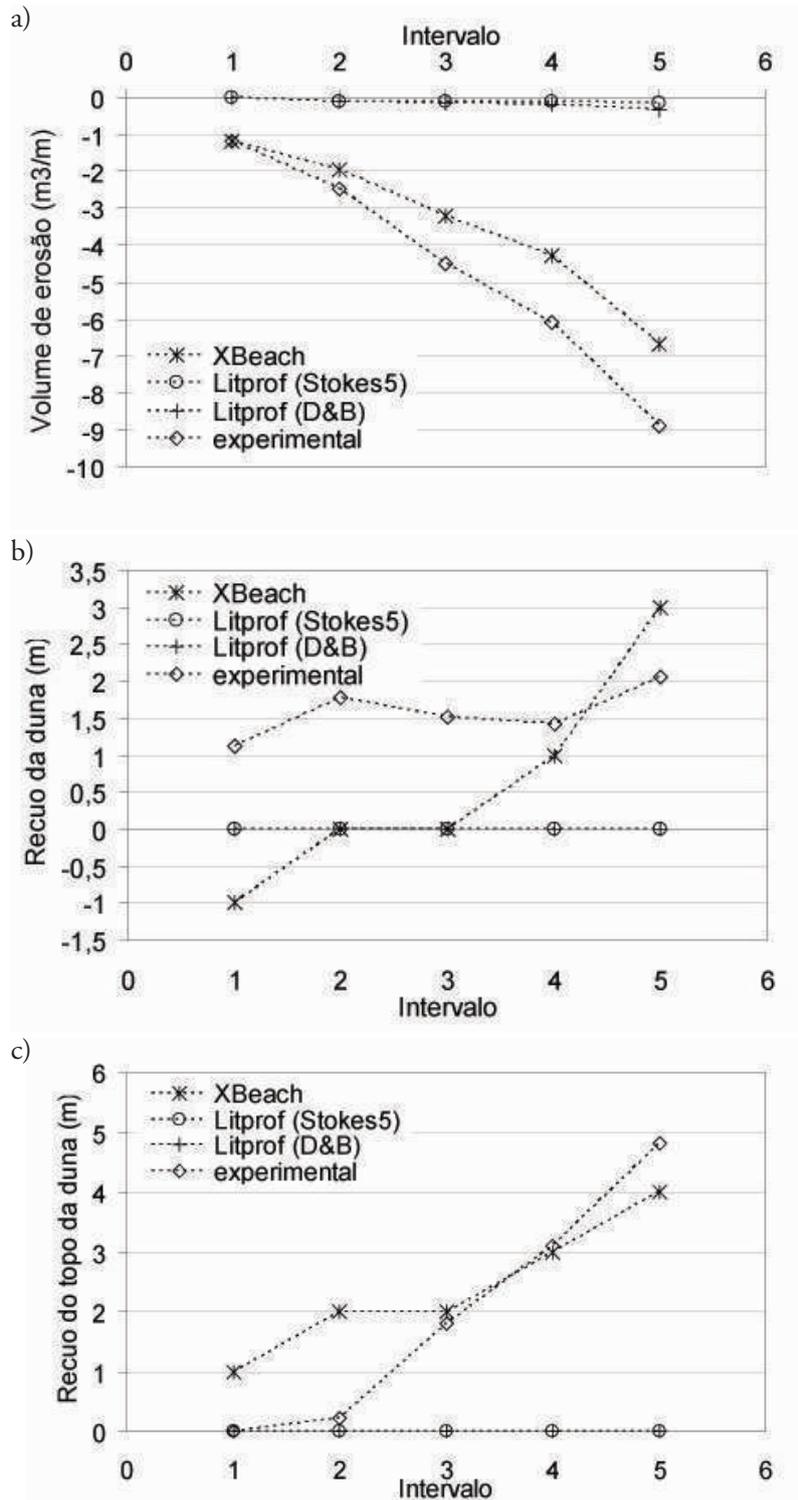


Figura 6. Indicadores de impacto para os modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda Stokes5 e D&B) com parâmetros por defeito: a) Volume de erosão, b) Recuo da duna e c) Recuo do topo da duna.

Figure 6. Impact indicators for the XBeach and Litprof models (for the wave theories Stokes5 and D&B) with the default parameters: a) Erosion volume, b) Dune retreat and c) Retreat of the top of the dune.

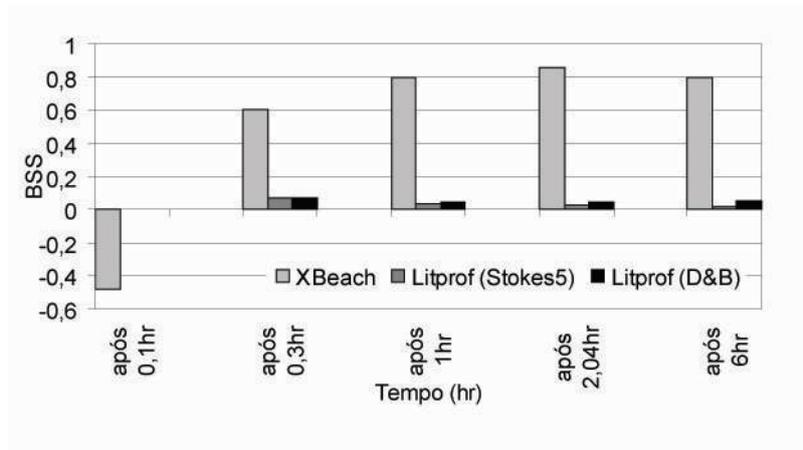


Figura 7. Indicador de erro BSS para os modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda Stokes5 e D&B) com parâmetros por defeito.

Figure 7. BSS error indicator for the XBeach and Litprof models (for the wave theories Stokes5 and D&B) with default parameters.

4.3.1. Modelo XBeach

A identificação dos parâmetros de calibração no modelo XBeach é um tema bastante importante, do qual depende o desempenho do modelo. No entanto, verifica-se que ainda não existe suficiente experiência sobre a aplicação do modelo de forma a apontar com clareza quais os parâmetros, de entre um grande número, a testar. Também por isso, a realização deste estudo é de grande importância.

Para identificar os parâmetros de calibração procurou-se numa primeira fase seleccionar os parâmetros considerados em casos anteriores de aplicação do modelo. Roelvink *et al.* (2009) relatam o maior número de casos de aplicação do modelo conhecidos, no entanto, não esclarecem sobre o processo de calibração. Das aplicações do modelo publicadas, a que descreve uma análise sobre alguns dos parâmetros de calibração utilizados é a de Voudoukas *et al.* (2011), para um caso real de praia reflectiva. Os autores salientam que os parâmetros com maior resposta morfológica foram *lws*, *facua* e *wetslp*. Numa outra aplicação, Branderburg (2010), sem detalhar sobre o processo de calibração, recomenda parâmetros de calibração do modelo XBeach quando aplicado em modelos experimentais de pequena escala. O autor recomenda o teste aos parâmetros *hmin*, *eps*, *turb*, *morfac*, *wetslp*, *hswitch*, *dzmax* e *Tsmin*. Num outro caso de erosão dunar (testado pela autora, mas não publicado), o modelo mostrou-se sensível aos parâmetros *dryslp*, *lws* e *hswitch*.

Neste estudo, tendo em conta os trabalhos acima mencionados e após analisada pormenorizadamente a formulação do modelo e respectivos parâmetros (recomenda-se a análise de Roelvink *et al.*, 2010), testaram-se os parâmetros: *beta*, *break*, *facsl*, *facua*, *gammax*, *hmin*, *hswitch*,

lws, *turb*, *wetsl*, *dryslp* e *order*. Testou-se o modelo para os valores: 0,2 de *beta*, 1, 2 e 4 de *break*, 0,8 de *facsl*, 1 de *facua*, 0,5 de *gammax*, 0,001 de *hmin*, 0,01 e 1 de *hswitch*, 1 de *lws*, 0 e 1 de *turb*, 0,15 e 0,6 de *wetslp*, 2 de *dryslp* e 2 de *order*. Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito).

Os resultados numéricos ao final de 6 horas (Figuras 8a-l) mostram que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica para este caso de estudo são *beta*, *break*, *facua*, *gammax*, *hswitch*, *lws* e *wetslp*. Os parâmetros *facsl*, *hmin*, *turb*, *dryslp* e *order* influenciaram muito pouco os resultados obtidos com os parâmetros por defeito. Dos parâmetros mais influentes na evolução da geometria do perfil, os parâmetros *lws* e *wetslp* foram aqueles que conferiram ao perfil final uma geometria mais próxima da configuração observada (Figuras 8h e 8j, respectivamente). Os resultados obtidos para o indicador de erro BSS (Figura 9) evidenciam que o melhor desempenho, classificado como excelente (de acordo com a Tabela 1), foi obtido com alteração do parâmetro *lws* de 0 (por defeito) para 1 e que o segundo melhor desempenho foi obtido com a alteração do parâmetro *wetslp* de 0,3 (por defeito) para 0,15. Uma vez que a alteração morfológica alcançada com a modificação do parâmetro *lws* permitiu melhorar a previsão de duas características fundamentais sob o ponto de vista da engenharia que são o recuo do topo da duna e o limite da extensão da zona activa (onde se observou a formação da barra submersa durante a experiência), considera-se que este parâmetro é de grande relevância na simulação da evolução da erosão de dunas com o modelo XBeach.

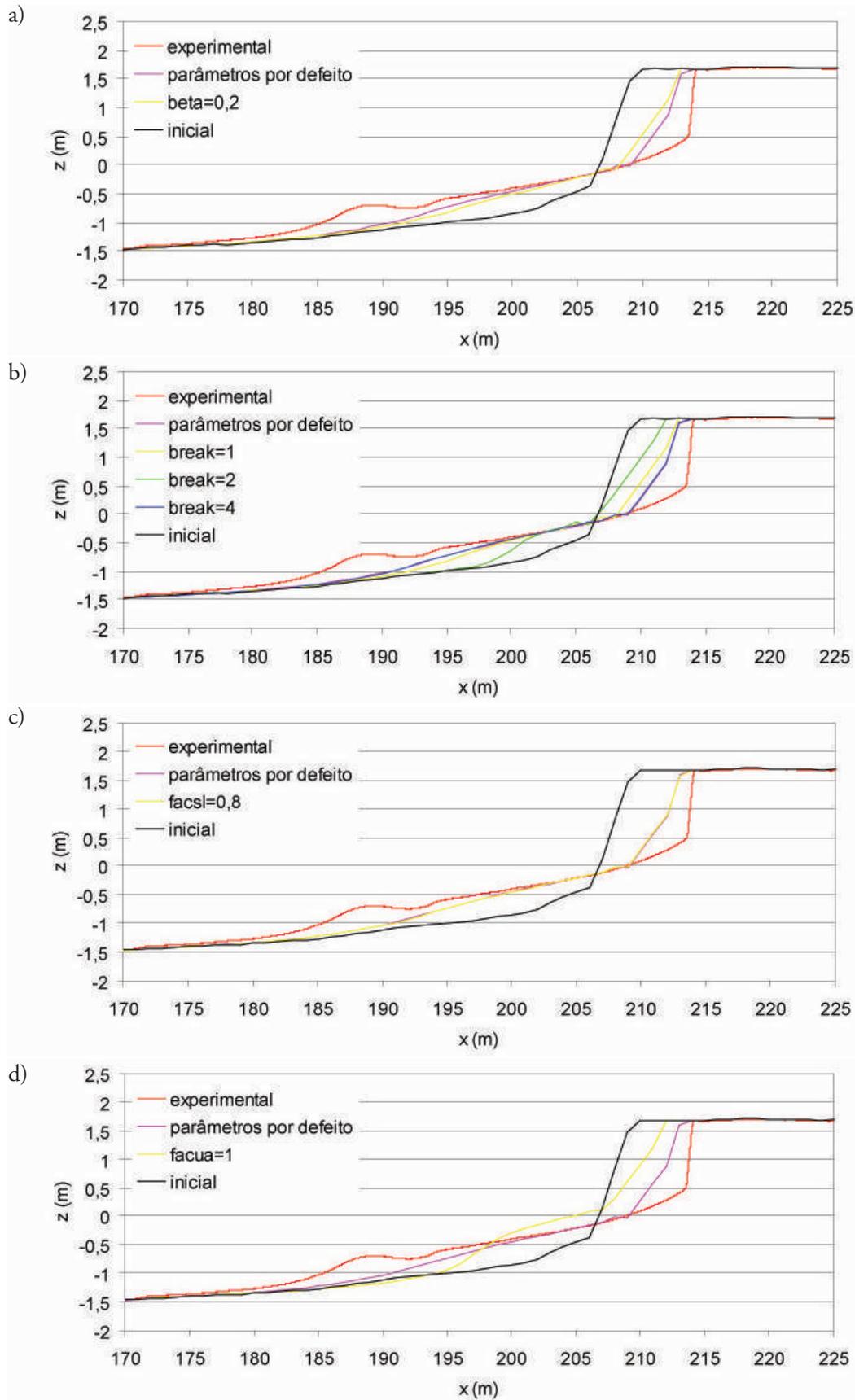


Figura 8. Continua na próxima página
Figure 8. Continues in the next page.

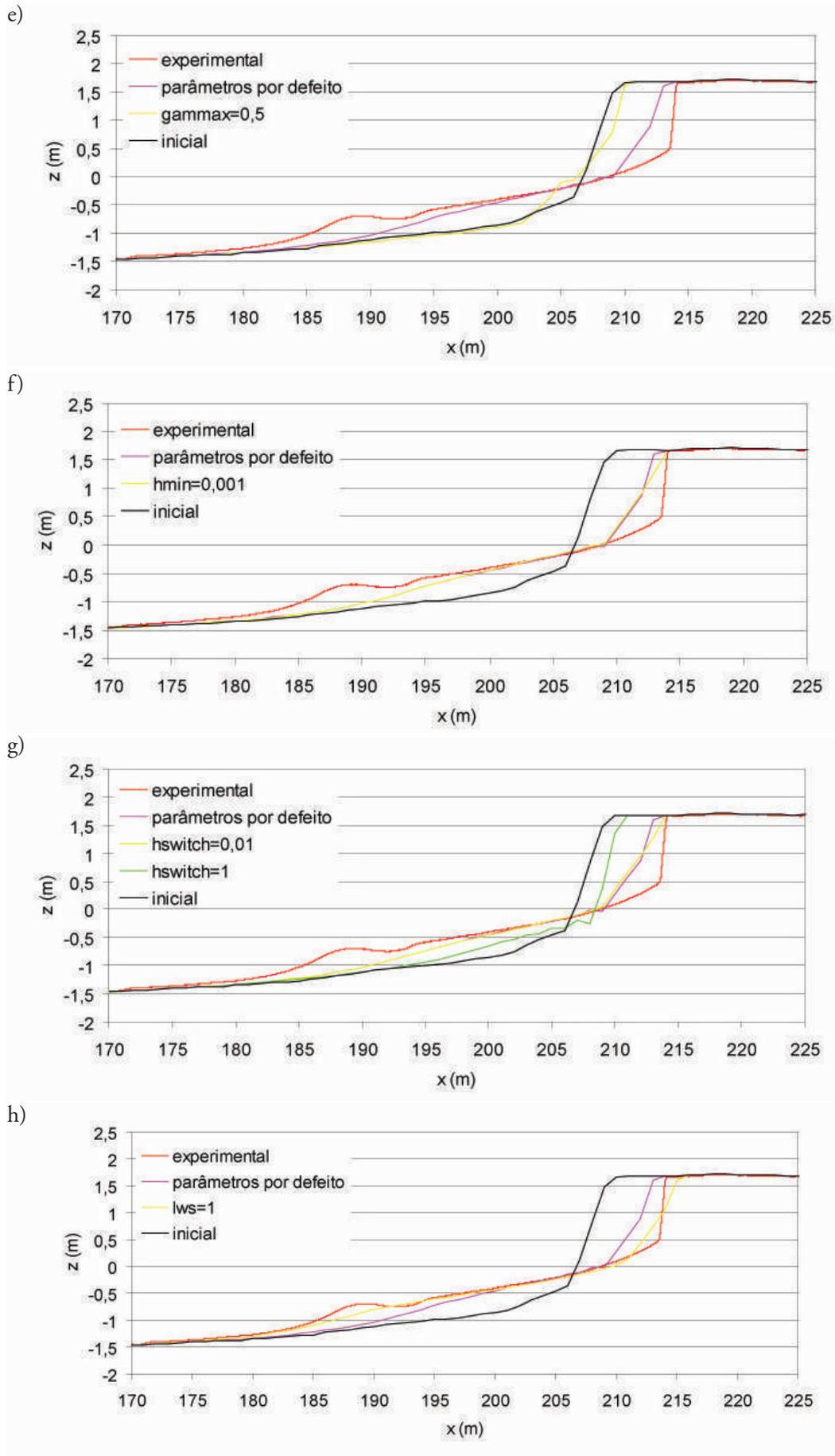


Figura 8. Continua na próxima página
Figure 8. Continues in the next page.

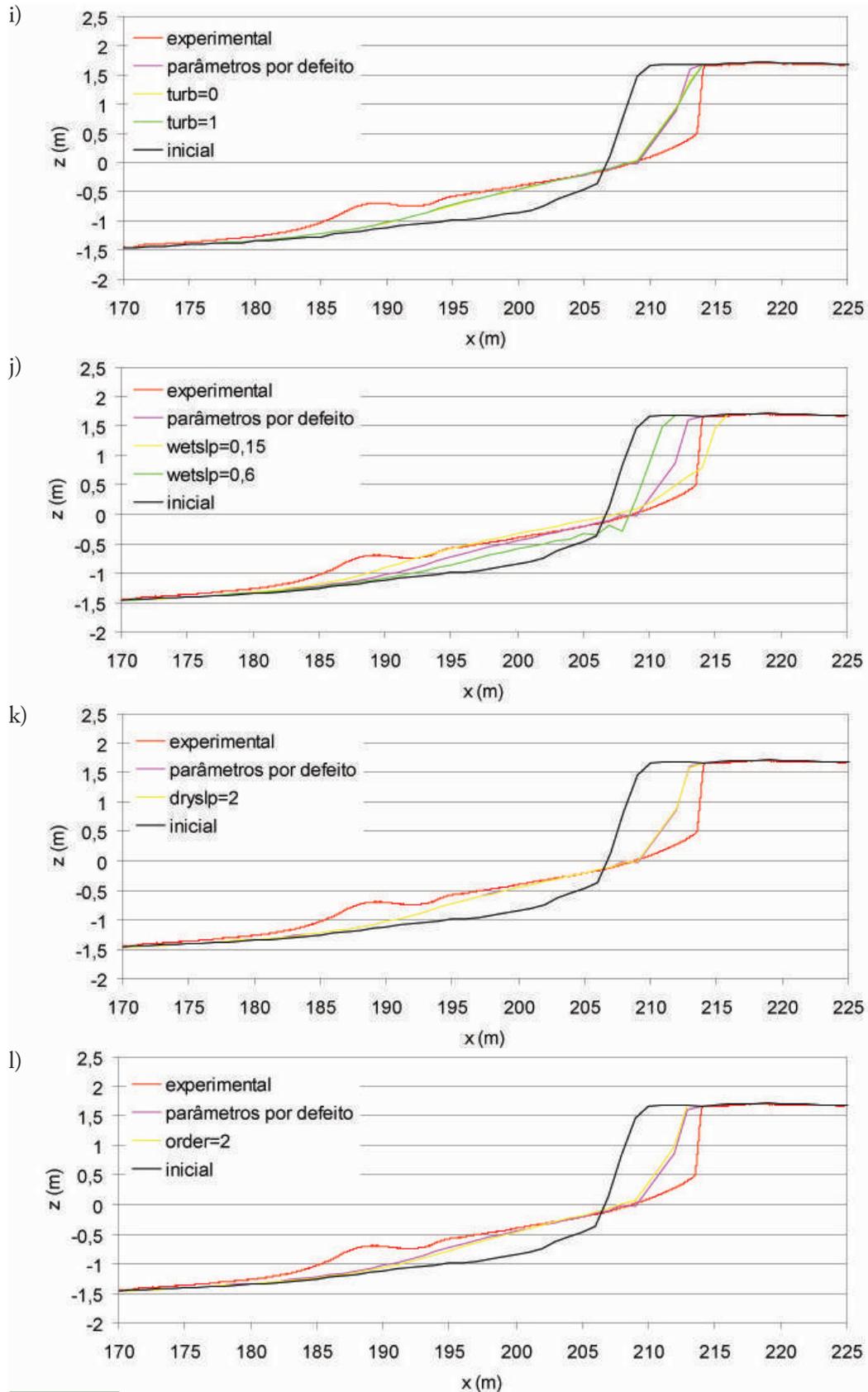


Figura 8. Figura 8 - Resultados do modelo XBeach, à escala laboratorial, ao final de 6 horas. Teste aos parâmetros de calibração a) *beta*, b) *break*, c) *facsl*, d) *facua*, e) *gammax*, f) *hmin*, g) *hswitch*, h) *lws*, i) *turb*, j) *wetslp*, k) *dryslp* e l) *order*.

Figure 8. Results of the XBeach model, at laboratory scale, after 6 hours. Test of the calibration parameters a) *beta*, b) *break*, c) *facsl*, d) *facua*, e) *gammax*, f) *hmin*, g) *hswitch*, h) *lws*, i) *turb*, j) *wetslp*, k) *dryslp* and l) *order*.

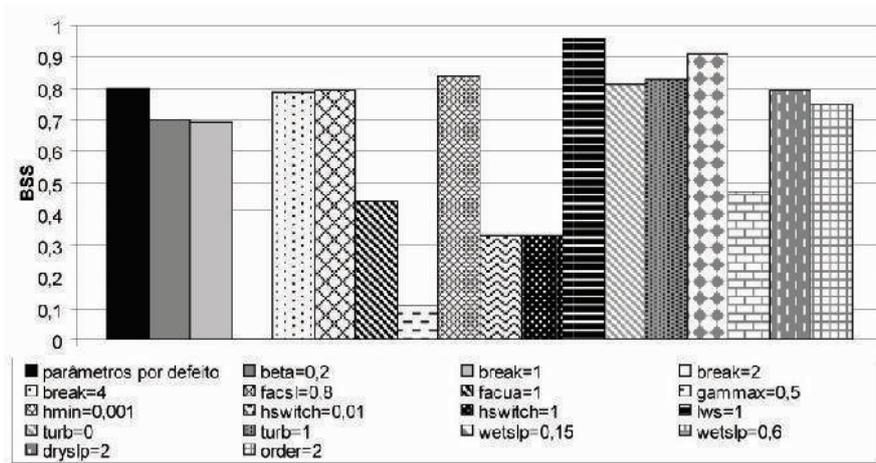


Figura 9. Indicador de erro BSS para os testes de calibração do modelo XBeach.

Figure 9. BSS error indicator for the calibration tests of the XBeach model.

4.3.2. Modelo Litprof

Neste modelo, os principais parâmetros de calibração são os parâmetros de rebentação da onda e o parâmetro de escala. Da comparação dos parâmetros por defeito comuns aos dois modelos, verificou-se que o modelo XBeach é menos tolerante no que respeita ao máximo declive de fundo para cálculo da avalanche submersa. XBeach considera o declive crítico de avalanche submersa (*wetslp*) igual 0,3 (Tabela 2) e o modelo Litprof considera o máximo ângulo de fundo submerso igual a 30° (Tabela 3), que corresponde ao valor 0,6 do parâmetro *wetslp* do modelo XBeach. Assim, testaram-se: os parâmetro de rebentação γ_1 e γ_2 , o parâmetro de escala α_{scale} e o máximo ângulo de fundo submerso estável (*Maximum Angle of Bed Slope*). Os parâmetros γ_1 e γ_2 são considerados na estimativa da máxima altura de onda, H_{max} , que por sua vez é necessária para estimar a energia dissipada segundo Battjes e Janssen (1978). Eles são considerados na formulação seguinte

$$H_{max} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tanh\left(\frac{\gamma_2 kh}{\gamma_1}\right) \quad (36)$$

onde k é o número de onda e h a profundidade. O parâmetro de rebentação γ_1 descreve a máxima declividade da onda, H/L . O parâmetro de rebentação γ_2 é, segundo Battjes e Stive (1984), calculado da seguinte forma

$$\gamma_2 = 0.5 + 0.4 \tanh(33s_0) \quad (37)$$

onde s_0 é o declive de onda ao largo, H/L_0 , e L_0 é o

comprimento de onda ao largo. O parâmetro α_{scale} é um coeficiente de difusão horizontal que afecta a forma de desenvolvimento das barras (DHI, 2008). Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito). Testou-se o modelo para os valores: 0,75 e 0,95 de γ_1 , 0,8, 0,9 e 1,5 de γ_2 , 0,8 e 1,2 de α_{scale} , e 10 e 20 de *Maximum Angle of Bed Slope*.

Os resultados numéricos ao final de 6 horas mostram que a variação dos parâmetros γ_1 , γ_2 e α_{scale} não causa qualquer alteração relevante na evolução morfológica do perfil, à semelhança dos resultados obtidos com os parâmetros por defeito, para ambas as teorias de onda aplicadas (Figura 10a-c). O indicador de erro BSS para os testes de calibração do modelo Litprof para as duas teorias de onda pode ser visto na Figura 12a-c. A diminuição do máximo ângulo de fundo antes de avalanche submersa (*Maximum Angle of Bed Slope*) causa erosão da face da duna (Figura 10d), pois limitando o máximo declive de fundo é acelerado o processo de instabilidade e consequente erosão na zona da base da duna. Contudo, a geometria da duna não é correctamente reproduzida. Apesar do recuo do topo da duna estimado ser muito próximo do observado, o declive da face é bastante mais suave do que o declive observado o que faz com que o modelo Litprof reproduza avanço da duna ao nível da água (para z igual a zero) enquanto no perfil experimental se observa recuo. O indicador de erro BSS para os testes de calibração do modelo Litprof com este parâmetro, para as duas teorias de onda, pode ser visto na Figura 12d. Concluiu-se que a falta de similaridade entre os resultados numéricos obtidos com o modelo Litprof e os resultados experimentais deve-se ao facto do modelo não abordar correctamente o processo de avalanche em zona seca nem considerar a acção de ondas longas.

Dados os resultados obtidos nos testes de calibração, testou-se ainda o modelo à variação dos parâmetros γ_2 e *Maximum Angle of Bed Slope* combinados, na expectativa de que a alteração do perfil alcançada através da deposição da areia erodida da face da duna (à custa da redução do *Maximum Angle of Bed Slope* para 10°) causasse um aumento do transporte para maiores profundidades no caso de se fazer variar o parâmetro γ_2 (máxima razão entre a altura de onda e a profundidade, H/h). Por isso, realizaram-se mais dois testes do modelo Litprof, considerando o valor de *Maximum Angle of Bed Slope* igual a 10° e os valores de γ_2 iguais a 0,9 e 1,5. Para γ_2 igual a 0,9 não se verifica melhoria do resultado (Figura 11), provavelmente porque a extensão da zona de acumulação do volume extraído da face da duna é insuficiente para causar alteração da posição de rebentação das ondas e

aumentar o transporte para maiores profundidades por acção da corrente de retorno. No entanto, para γ_2 igual a 1,5 verifica-se que aumenta ligeiramente o volume de areia extraído da face da duna e que a acumulação deste na parte submersa do perfil estende-se até maiores profundidades com tendência para formação de uma barra pouco pronunciada. O indicador de erro BSS para estes testes é apresentado na Figura 13.

Concluiu-se que o parâmetro *Maximum Angle of Bed Slope* foi o mais eficaz na calibração do modelo Litprof e que a teoria de onda não é relevante na evolução do perfil para este caso de estudo. O melhor desempenho do modelo Litprof foi alcançado para a alteração dos parâmetros por defeito resultante da combinação do parâmetro *Maximum Angle of Bed Slope* igual a 10° com o parâmetro γ_2 igual a 1,5.

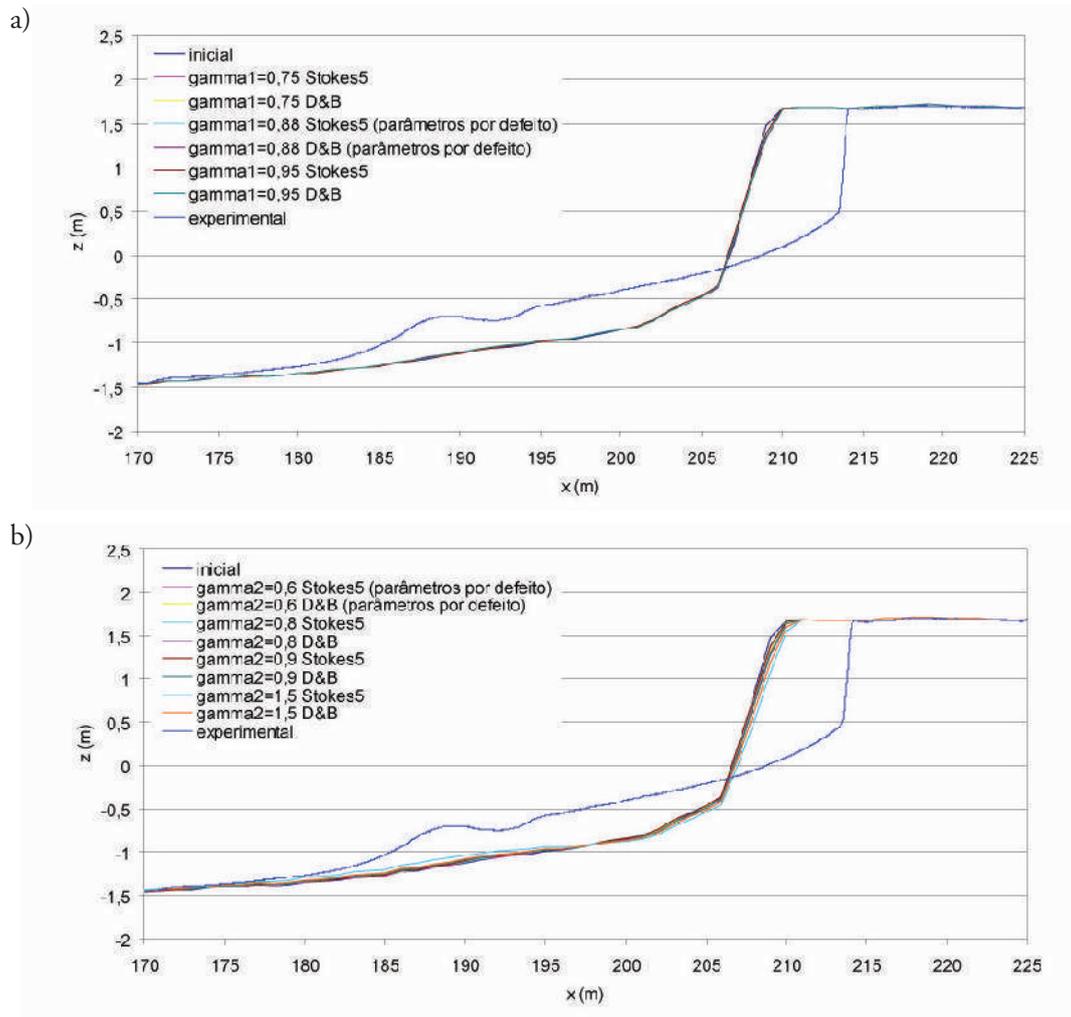


Figura 10. Continua na próxima página
Figure 10 Continues in the next page.

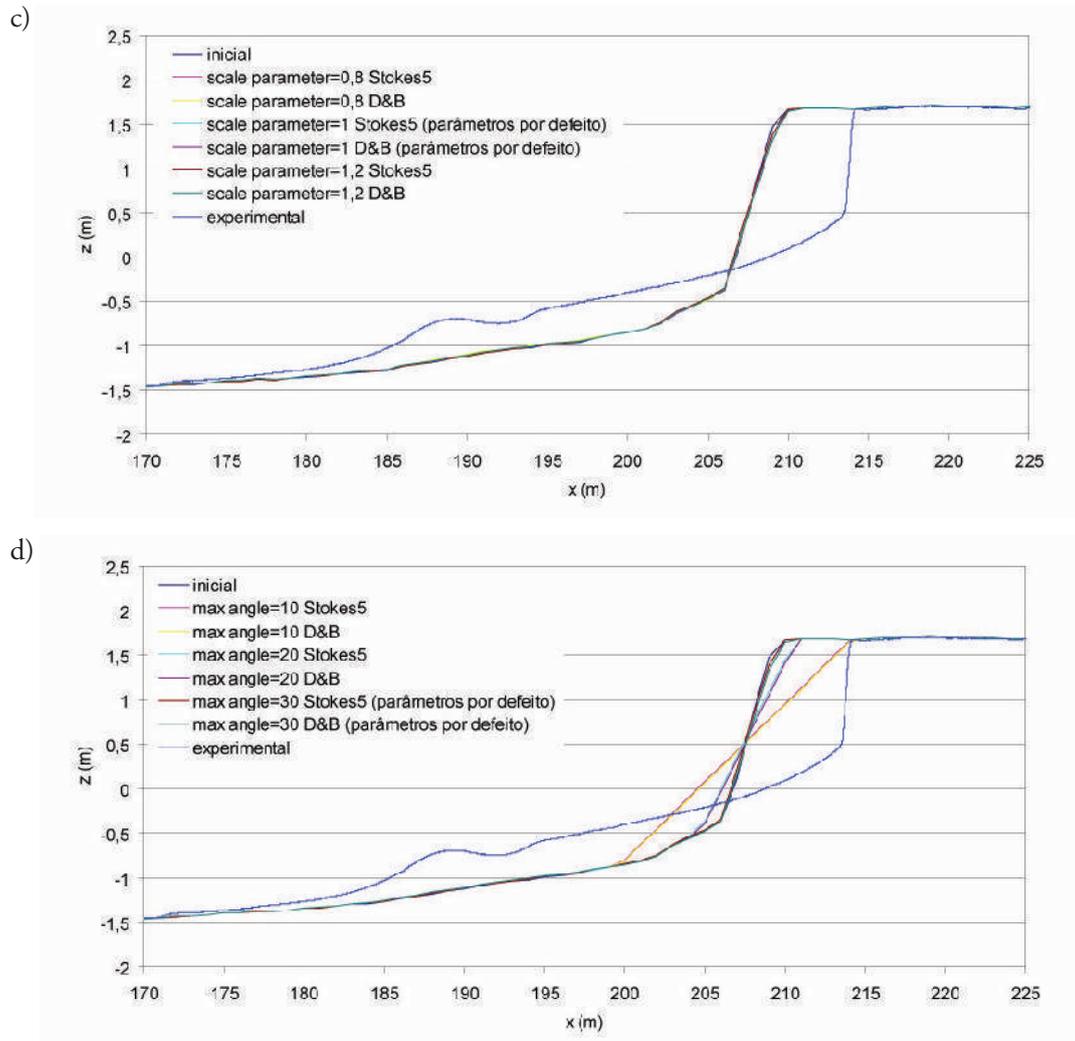


Figura 10. Resultados do modelo Litprof (para as teorias de onda Stokes5 e D&B), à escala laboratorial, ao final de 6 horas. Teste aos parâmetros de calibração a) γ_1 , b) γ_2 , c) α_{scale} e d) *Maximum Angle of Bed Slope*.
Figure 10. Results of the Litprof model (for the wave theories Stokes5 and D&B), at laboratory scale, after 6 hours. Test of the calibration parameters a) γ_1 , b) γ_2 , c) α_{scale} and d) *Maximum Angle of Bed Slope*.

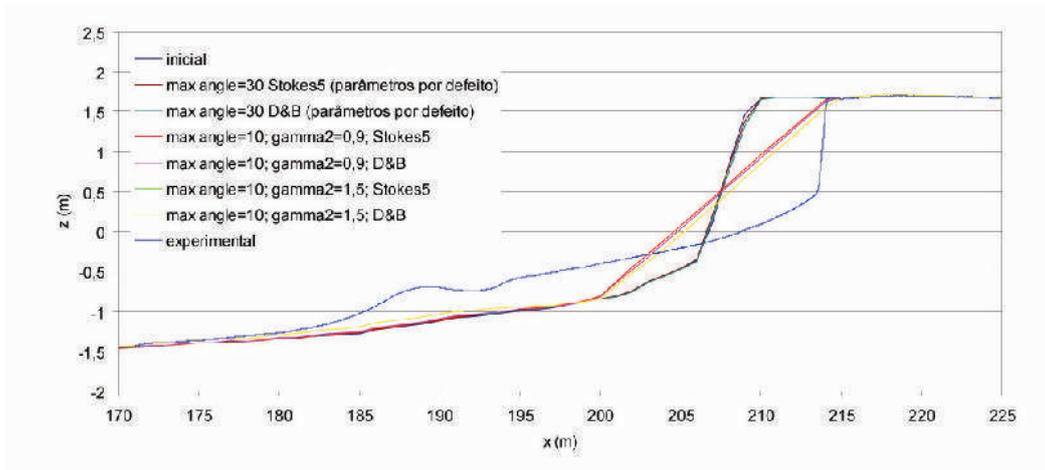


Figura 11. Resultados do modelo Litprof (para as teorias de onda Stokes5 e D&B), à escala laboratorial, ao final de 6 horas. Teste aos parâmetros de calibração γ_2 e *Maximum Angle of Bed Slope* combinados.
Figure 11. Results of the Litprof model (for the wave theories Stokes5 and D&B), at laboratory scale, after 6 hours. Test of the calibration parameters γ_2 and *Maximum Angle of Bed Slope* combined.

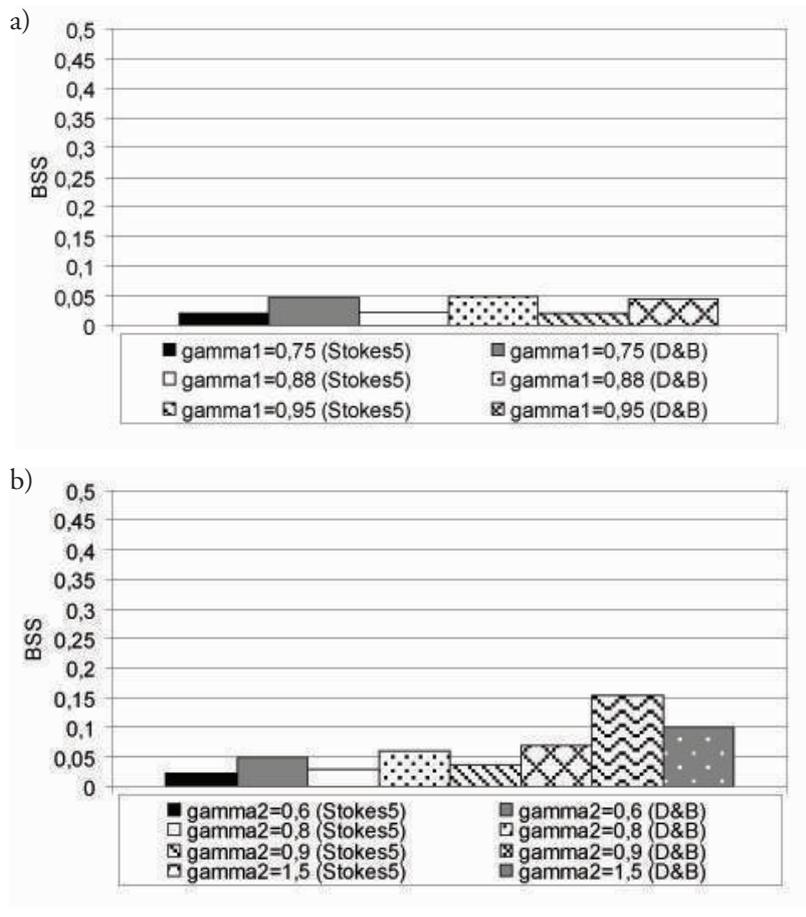


Figura 12. Continua na próxima página
Figure 12 Continues in the next page.

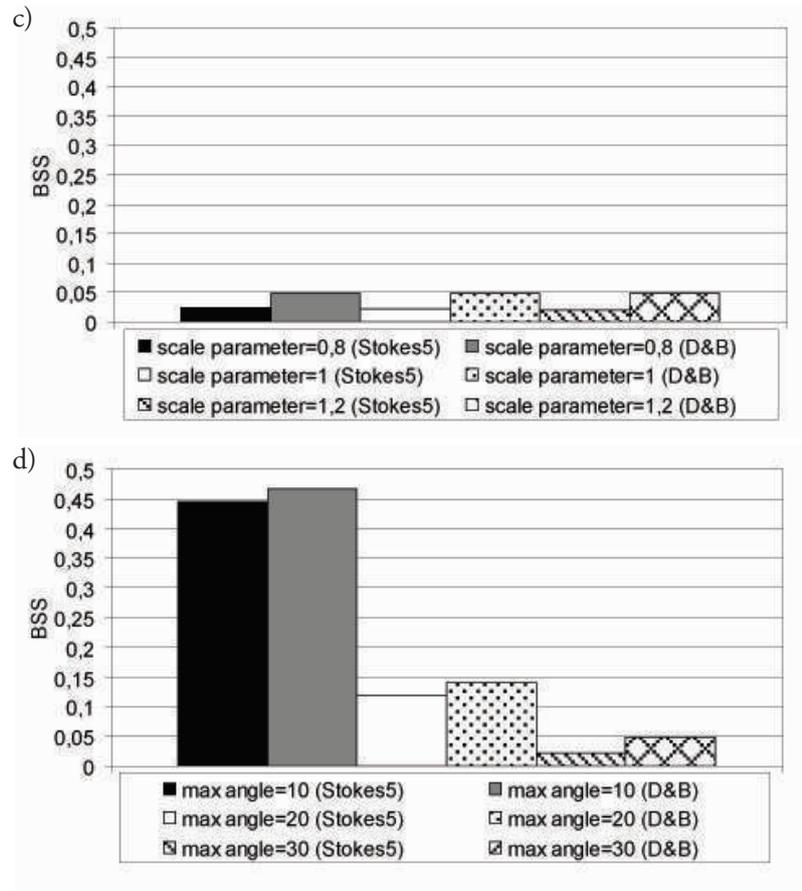


Figura 12. Indicador de erro BSS para os testes de calibração do modelo Litprof (para as teorias de onda Stokes5 e D&B). Parâmetros de calibração: a) γ_1 , b) γ_2 , c) α_{scale} e d) *Maximum Angle of Bed Slope*.

Figure 12. BSS indicator error for the calibration tests of the Litprof model (for the wave theories Stokes5 and D&B). Calibration parameters: a) γ_1 , b) γ_2 , c) α_{scale} and d) *Maximum Angle of Bed Slope*.

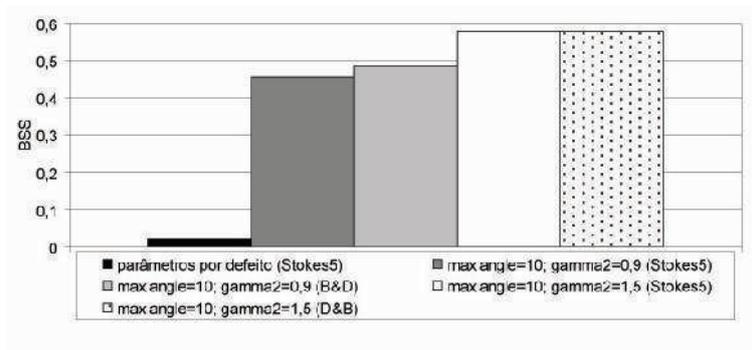


Figura 13. Indicador de erro BSS para o teste de calibração do modelo Litprof (para as teorias de onda Stokes5 e D&B) com os parâmetros γ_2 e *Maximum Angle of Bed Slope* combinados.

Figure 13. BSS indicator error for the calibration test of the Litprof model (for the wave theories Stokes5 and D&B) with the parameters γ_2 and *Maximum Angle of Bed Slope* combined.

4.3.3. Comparação

Compararam-se as simulações do modelo XBeach e Litprof (para a teoria de onda Stokes5, uma vez que a teoria de onda não se mostrou influente nos resultados) após calibração (e também de ambos os modelos com os parâmetros por defeito). Para cada um dos modelos considerou-se a aplicação com a qual se obteve o melhor desempenho do modelo, i.e., o modelo XBeach com o parâmetro lws igual a 1 e o modelo Litprof com os parâmetros *Maximum Angle of Bed Slope* igual a 10° e γ_2 igual a 1,5.

Os resultados numéricos obtidos ao final de 6 horas (à escala laboratorial) mostram que ambos os modelos calibrados foram capazes de reproduzir erosão da duna, sendo o modelo XBeach que melhor reproduziu a configuração do perfil experimental (Figura 14). O modelo Litprof, apesar de ter reproduzido o recuo do topo da duna correctamente (Figuras 14 e 15c) e ter simulado a formação de uma barra submersa na posição observada experimentalmente (Figura 14), simulou incorrectamente o volume de erosão (cerca de metade do observado) e o declive da duna. Consequentemente, o modelo gerou um avanço da duna ao nível do mar em vez de recuo (Figura 15b). Assim, em problemas de engenharia, em que para além de se pretender estimar com precisão o volume de areia extraído da face da duna também se pretende estar do lado da segurança, recomenda-se a aplicação do modelo XBeach calibrado.

O desempenho do modelo XBeach melhorou consideravelmente após calibração: não só a configuração do perfil é mais concordante com a configuração experimental, quer na face da duna quer na parte submersa do perfil (Figura 14), como também os indicadores de impacto e de erro assim o demonstram (Figuras 15a-c e 16). Salienta-se o resultado

do indicador de erro BSS para o modelo XBeach calibrado que classifica o desempenho do modelo como excelente, conforme classificação da Tabela 1.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Testaram-se os modelos morfodinâmicos XBeach e Litprof na erosão de dunas durante tempestades marítimas. O caso de verificação tratou-se de um perfil de praia arenoso com uma duna bastante robusta testado em canal de grande escala (1:6) de laboratório. Numa primeira fase testaram-se os modelos com os parâmetros por defeito (*standard set of parameter settings*). Numa segunda fase calibraram-se os modelos, ajustando os parâmetros de forma a melhorar o seu desempenho, i.e., a similaridade com os resultados observados. Em cada uma das fases compararam-se os resultados de ambos, sempre com base nos resultados observados durante a evolução do perfil experimental. Avaliou-se o desempenho dos modelos na previsão da evolução do perfil com base em indicadores de impacto (volume de erosão, recuo da duna e recuo do topo da duna) e no indicador de erro, BSS.

A aplicação do modelo XBeach com os parâmetros por defeito mostrou que o modelo simulou de forma razoável a acção erosiva das ondas na quase totalidade do perfil, sendo as maiores diferenças relativamente aos resultados experimentais verificadas no declive da duna, que se observou quase vertical durante a experiência laboratorial e o modelo reproduziu mais suave, e na barra submersa formada na extremidade da zona activa do perfil, que o modelo não reproduziu. O modelo reproduziu correctamente o recuo do topo da duna mas não o recuo observado ao nível da água. Consequentemente, o volume de erosão simulado foi de 75% do valor observado. Tal facto evidencia falta de realismo na formulação matemática

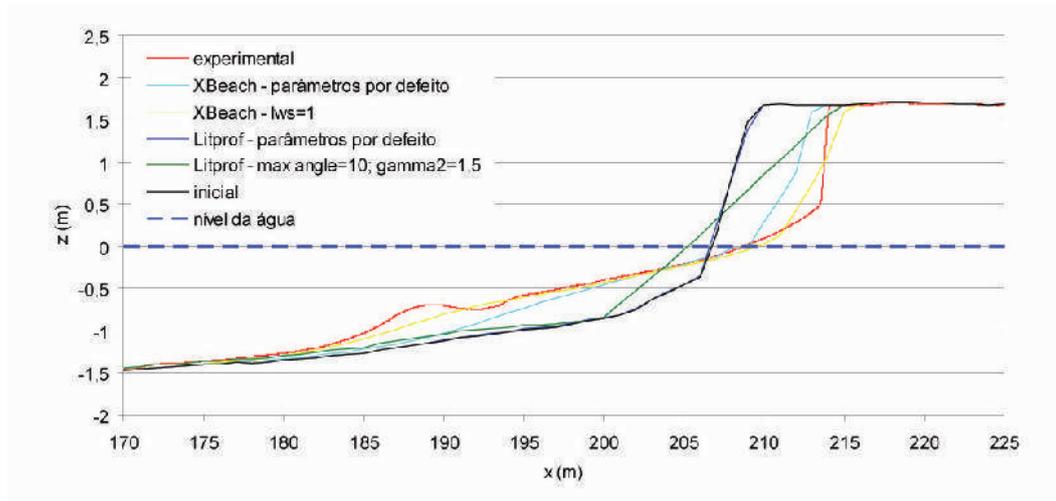


Figura 14. Resultados dos modelos XBeach e Litprof (Stokes5) com parâmetros por defeitos e após calibração, à escala laboratorial.

Figure 14. Results of the XBeach and Litprof (Stokes5) models with the default parameters and after calibration, at laboratory scale.

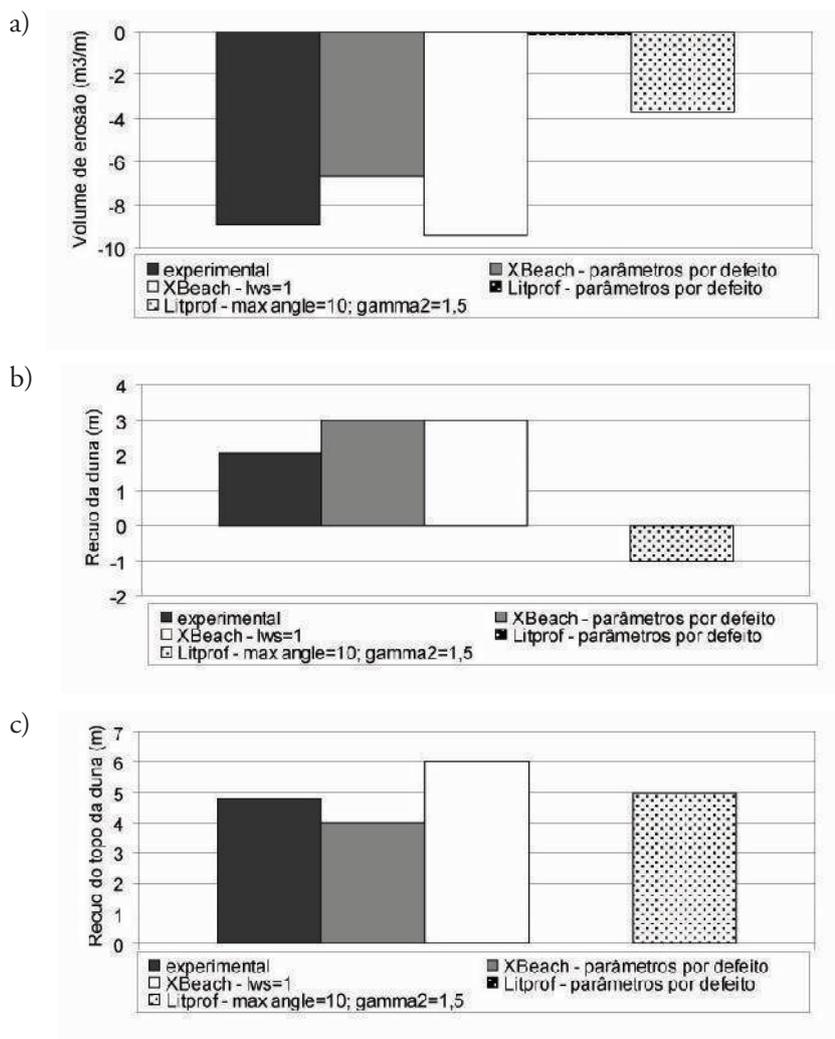


Figura 15. Indicadores de impacto para os modelos XBeach e Litprof (Stokes5) com parâmetros por defeito e após calibração: a) Volume de erosão, b) Recuo da duna e c) Recuo do topo da duna.

Figure 15. Impact indicators for the XBeach and Litprof (Stokes5) models with the defaults parameters and after calibration: a) Erosion volume, b) Dune retreat and c) Top of the dune retreat.

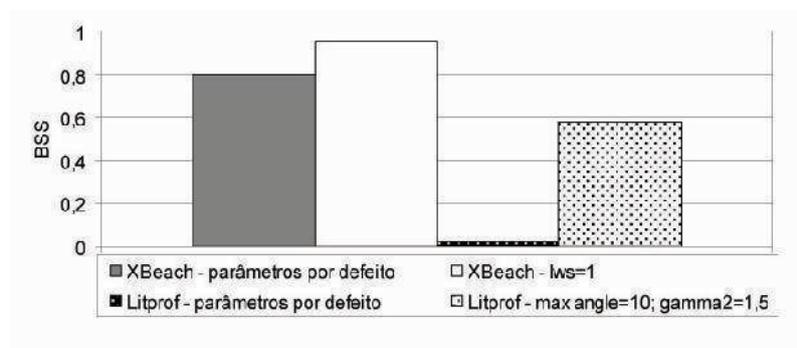


Figura 16. Indicador de erro BSS para os modelos XBeach e Litprof (Stokes5) com parâmetros por defeito e após calibração.

Figure 16. BSS error indicator for the XBeach and Litprof (Stokes5) models with the default parameters and after calibration.

do processo de avalanche. Relativamente à parte submersa do perfil, admite-se que o facto do modelo subestimar a extensão da zona de acumulação da areia transportada da face da duna se deve em grande parte ao facto do volume de erosão ser subestimado pelo modelo e não necessariamente a falta de realismo da formulação de transporte. Assim, numa aplicação de engenharia, em que importa não só a precisão como também estar do lado da segurança, recomenda-se precaução na aplicação do modelo XBeach com os parâmetros por defeito para previsão da erosão de dunas.

A aplicação do modelo Litprof com os parâmetros por defeito mostrou que o modelo não reproduz o processo de erosão da duna. Considera-se por isso que dos modelos Xbeach e Litprof aquele com melhor desempenho com os parâmetros por defeito é o modelo XBeach.

Discutiram-se, sugeriram-se e testaram-se doze parâmetros de calibração do modelo XBeach, que foram: *beta*, *break*, *facsl*, *facua*, *gammax*, *hmin*, *hswitch*, *lws*, *turb*, *wetslp*, *dryslp* e *order*. Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito) e concluiu-se que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica para este caso de estudo foram *beta*, *break*, *facua*, *gammax*, *hswitch*, *lws* e *wetslp*. Destes, os parâmetros *lws* e *wetslp* foram aqueles que conferiram ao perfil final uma geometria mais próxima da configuração observada. Os resultados obtidos para o indicador de erro BSS evidenciam que o melhor desempenho foi obtido com alteração do parâmetro *lws* de 0 (por defeito) para 1 e que o segundo melhor desempenho foi obtido com a alteração do parâmetro *wetslp* de 0,3 (por defeito) para 0,15, sendo a ambos atribuída a classificação de excelente. Uma vez que a alteração morfológica alcançada com a modificação do parâmetro *lws* permitiu melhorar a previsão das duas características fundamentais sob o ponto de vista da engenharia que são o recuo do topo da duna e o limite da extensão da zona activa (onde se observou a formação da barra submersa durante a experiência), considera-se que este parâmetro é de grande relevância na simulação da evolução da erosão de dunas com o modelo XBeach.

Testaram-se quatro parâmetros de calibração do modelo Litprof para cada teoria de onda. Eles foram: os parâmetro de rebentação γ_1 e γ_2 , o parâmetro de escala α_{scale} e o máximo ângulo de fundo submerso (*Maximum Angle of Bed Slope*). Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito) e concluiu-se que os três primeiros parâmetros não afectam a evolução do perfil mas apenas o parâmetro *Maximum Angle of Bed Slope* é eficaz na calibração do modelo, pois causa erosão da duna. Concluiu-se que a falta de similaridade entre os resultados numéricos obtidos com o modelo Litprof e os resultados experimentais deve-se ao facto do modelo não abordar correctamente o processo de avalanche em zona seca nem considerar a acção de ondas longas. Concluiu-se que apenas limitando o máximo declive de fundo, e desta forma acelerando o processo de instabilidade do fundo, é possível causar erosão na base da duna com o modelo Litprof. Com base nesta conclusão, testou-se o modelo à variação dos parâmetros γ_2 e *Maximum Angle of Bed Slope* combinados, na expectativa de que a alteração do perfil alcançada através da deposição da areia

erodida da face da duna (à custa da redução do *Maximum Angle of Bed Slope*) causasse um aumento do transporte para maiores profundidades no caso de se fazer variar o parâmetro γ_2 (máxima razão entre a altura de onda e a profundidade, H/h). Foi com esta combinação de parâmetros de calibração que se obteve o melhor desempenho do modelo Litprof. No seu melhor desempenho, classificado como razoável através do indicador de erro BSS, o modelo Litprof reproduziu o recuo do topo da duna correctamente, simulou a formação de uma barra submersa na posição observada experimentalmente, simulou incorrectamente o volume de erosão (cerca de metade do observado) e o declive da duna, e consequentemente gerou um avanço da duna ao nível do mar em vez de recuo. Por este motivo, recomenda-se muita precaução na aplicação do modelo Litprof para previsão da erosão de dunas. Verificou-se também que a teoria de onda não foi relevante na evolução do perfil neste caso de estudo.

Da comparação dos modelos morfodinâmicos XBeach e Litprof nas duas fases, i.e., na fase de teste com os parâmetros por defeito e na fase de calibração, concluiu-se que foi o modelo Xbeach que apresentou o melhor desempenho neste caso de estudo. A execução deste estudo permitiu testar e ficar a conhecer a elevada capacidade do modelo XBeach e a razoável capacidade do modelo Litprof na previsão da erosão de dunas. Concluiu-se que o modelo XBeach tem um elevado potencial na avaliação e previsão da vulnerabilidade de dunas pois não só apresentou um excelente desempenho neste caso de estudo, como também, sendo um modelo aberto a futuro desenvolvimento por parte da comunidade científica, possibilita a alteração (introdução e/ou melhoria) do tratamento matemático dos processos físicos envolvidos na morfodinâmica costeira. Relativamente a este último potencial, acrescenta-se que este estudo permitiu deste já identificar o processo de avalanche como um processo cujo tratamento matemático deve ser melhorado para tornar as simulações do modelo mais realistas.

BIBLIOGRAFIA

- Battjes, J.A.; Janssen, J.P.F.M. (1978) - Energy Loss and Set-Up due to Breaking of Random Waves. *Proceedings. 16th International Conference on Coastal Engineering*, pp.569-587, Hamburg, Germany.
- Battjes, J.A.; Stive, M.J.F. (1984) - Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Proceedings 19th International Conference on Coastal Engineering*, pp.649-660, Houston, Texas, U.S.A..
- Brandenburg, P.G.F. (2010) - *Scale dependency of dune erosion models. Performance assessment of the DUROS and XBeach models for various experiment scales*. M.Sc. Thesis, 121 pp., University of Twente, The Netherlands. *Não publicado*.
- Damgaard, J.; Dodd, N.; Hall, L.; Chesher, T. (2002) - Morphodynamic modelling of rip channel growth. *Coastal Engineering*, 45(3-4):199-221. DOI: 10.1016/S0378-3839(02)00034-0.
- de Vries, J.S.M.v.T.; van Gent, M.R.A.; Walstra, D.J.R.; Reniers, A.J.H.M. (2008) - Analysis of dune erosion processes in large-scale flume experiments. *Coastal Engineering*, 55(12):1028-1040. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2008.04.004.

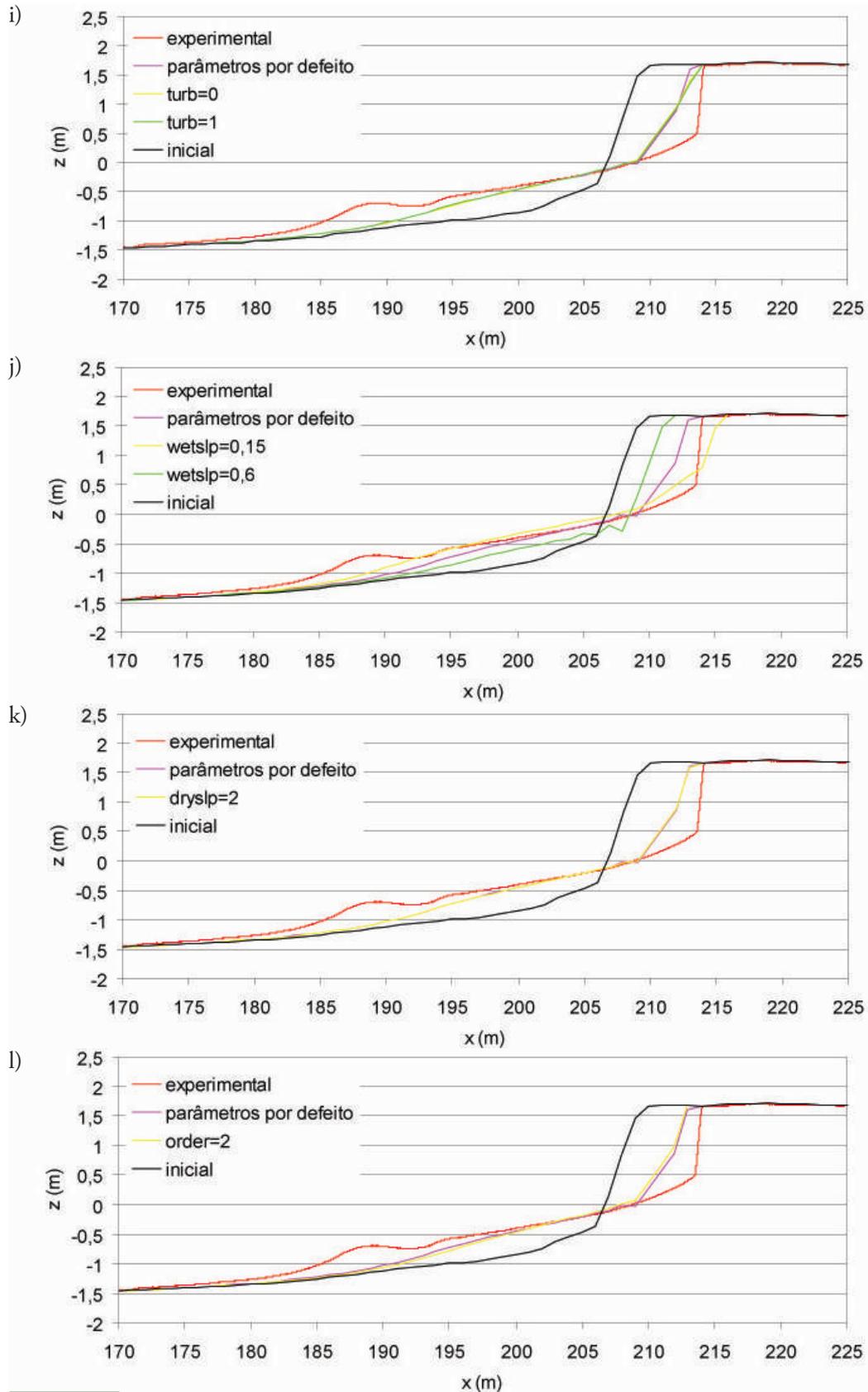


Figura 8. Figura 8 - Resultados do modelo XBeach, à escala laboratorial, ao final de 6 horas. Teste aos parâmetros de calibração a) β , b) $break$, c) $facsl$, d) $facua$, e) γ_{max} , f) h_{min} , g) $hswitch$, h) lws , i) $turb$, j) $wetslp$, k) $dryslp$ e l) $order$.

Figure 8. Results of the XBeach model, at laboratory scale, after 6 hours. Test of the calibration parameters a) β , b) $break$, c) $facsl$, d) $facua$, e) γ_{max} , f) h_{min} , g) $hswitch$, h) lws , i) $turb$, j) $wetslp$, k) $dryslp$ and l) $order$.

Zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru, litoral norte do estado da Bahia, Brasil: classificação e controles ambientais *

Wetlands on Itapicuru River coastal plain, Northern littoral of the state of Bahia, Brazil: classification and environmental controls

Geana Sousa Soares^{@,1}, José Maria Landim Dominguez²

RESUMO

As zonas úmidas presentes na planície costeira do rio Itapicuru são as mais expressivas do litoral Norte do estado da Bahia. A origem e evolução das zonas úmidas do litoral Norte da Bahia estão intimamente associadas às variações do nível do mar durante o Quaternário. Na costa do Brasil, o nível relativo do mar desceu cerca de 3-4m durante os últimos 5.600 anos AP. As lagoas e estuários formados durante o máximo Transgressivo (120.000 anos AP), evoluíram para pântanos de água doce, em decorrência do abaixamento do nível do mar durante os últimos milhares de anos. As zonas úmidas ocorrem principalmente nas terras baixas separando os terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos e nos vales de rios e riachos que não foram completamente preenchidos por sedimentos fluviais.

Este trabalho tem como objetivo estabelecer a classificação das úmidas presentes na planície costeira do rio Itapicuru com o recurso a critérios hidrogeomorfológicos. Os termos tais como depressional com alimentação por água subterrânea, franja mareal e outros que designam classes ou tipos hidrogeomorfológicos de zonas úmidas, conferindo informações úteis sobre a estrutura e funcionamento do ecossistema, e também sobre a significância no desempenho dos serviços do ecossistema e risco potencial de perda desses serviços para a integridade da paisagem. A racionalização da abordagem hidrogeomorfológica é facilitadora porque os principais tipos de zonas úmidas são fundamentalmente diferenciados por parâmetros relacionados ao desenvolvimento da topografia e a manutenção da água, embora não deixem de ser considerados os fatores bióticos destes ecossistemas naturais.

Palavras-chaves: zonas úmidas, serviços de zonas úmidas, classificação hidrogeomorfológica.

ABSTRACT

The wetlands of the Itapicuru river coastal plain are the most important of all the Northern littoral of the state of Bahia. The origin and evolution of these wetlands are intrinsically related to the Quaternary sea level changes. Along the coastline of Brazil sea level has dropped 3 to 4m during the last 5.600 years BP. Estuaries and lagoons formed during the maximum of the Holocene transgression progressively evolved to freshwater wetland as a result of this drop in sea level. Nowadays the wetlands occupy the low lying areas separating Pleistocene and Holocene sandy terraces, and the bottom of valleys not completely infilled with fluvial sediments. This study used an existing GIS database, complemented by fieldwork, to classify the Itapicuru coastal plain wetlands, to establish its environmental controls and to evaluate the environmental services provided by these wetlands. The wetlands were classified using their hydrogeomorphic attributes. Terms such as depressional fed groundwater, tidal fringe among others incorporate useful information concerning the structure and functioning of the wetland ecosystem including their

@ - Autor correspondente: geana@ufba.br

1 - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, BA, Brasil

2 - Universidade Federal da Bahia, Departamento de Geologia, Salvador, BA, Brasil

significance in providing environmental services. The rationale behind the hydrogeomorphic approach is that the major types of wetlands can be fundamentally differentiated by parameters related to topography and water retention capacity. The classification presented herein has two immediate repercussions. Firstly it provides a framework for data collection, not only to organize existing data but also in the planning of future investigations. Secondly, and may be most important, this classification allows governmental organizations to establish goals for the creation of specific legislation for biological conservation on these areas, since the classification used is based upon the hydrogeomorphic attributes to differentiate wetland classes.

Keywords: wetlands, wetland's services, hydrogeomorphic classification.

1. INTRODUÇÃO

Apesar de o Brasil ser signatário da Convenção de *Ramsar*, ainda não existem esquemas de classificação de zonas úmidas amplamente utilizados no país. Um dos poucos trabalhos neste sentido é o de Diegues (1990), que desenvolveu o primeiro inventário de zonas úmidas no Brasil. Seu estudo de caráter interdisciplinar reconheceu a importância destes ecossistemas e descreveu alguns tipos de ecossistemas aquáticos brasileiros.

No Brasil, existe uma multiplicidade de terminologias utilizadas localmente ou regionalmente para descrever as zonas úmidas. Este aspecto talvez tenha constituído um dos principais obstáculos para o estabelecimento de critérios coerentes de classificação destes sistemas. O conceito de Maltby (2004) utilizado neste trabalho, enfatiza a ecologia das zonas úmidas: "zonas úmidas são ecossistemas heterogêneos, mas distintos nos quais funções ecológicas, biogeoquímicas e hidrológicas especiais surgem a partir de características da água, como fontes dominantes e particulares, da química e da periodicidade da inundação ou saturação. Elas ocorrem em variadas paisagens e podem suportar água lenta rasa (< 2m) permanente ou temporária. Elas têm solos, substratos e biota, adaptados a inundação e/ou saturação e associados a condições de restrita aeração".

As zonas úmidas presentes na zona costeira têm seu desenvolvimento condicionado por fatores que, segundo Dalton (1999), incluem, nas regiões tropicais: (1) os climas úmidos e super-úmidos; (2) os setores costeiros abrigados (baías, enseadas, deltas e complexos lagunares); (3) os baixos cursos fluviais principalmente meandantes, caracterizados por sedimentos argilosos coesos e baixas declividades; e (4) as regiões com expressiva drenagem continental devido a elevados teores de nutrientes e de sedimentos.

O principal aspecto para o desenvolvimento de qualquer esquema de classificação é o conhecimento das características estruturais e funcionais do ecossistema que podem ser utilizadas para agrupar e/ou segregar, assim como sistematizar as diferentes feições naturais. Cowardin *et al.* (1979) agruparam as zonas úmidas e ambientes aquáticos associados, em cinco sistemas: palustres, ripários, estuarinos, marinhos e lacustres. Estes sistemas constituem diferentes unidades fisiográficas da paisagem, que apesar da fisionomia aparentemente uniforme, exibem elementos vegetativos de ocorrência exclusiva, como também aqueles presentes em mais de um sistema. Para Ehrenfeld (2000), uma determinada classe de zona úmida é usualmente definida, pela composição da comunidade vegetal em associação com a hidrogeomorfologia, por exemplo, o domínio de uma zona úmida pode ser definido como uma área representada por

uma depressão, com sedimentos minerais, com um dossel de árvores de grande porte ou com vegetação arbustiva densa.

Outras classificações de zonas úmidas se baseiam em características relacionadas à qualidade da água (Clausen *et al.*, 2006).

A classificação de *Ramsar* reconhece três grupos de zonas úmidas: marinhas e costeiras, continentais e artificiais (Peck, 1999). São ainda consideradas as unidades fisiográficas (e.g., fluvial ou palustre), a permanência da água (e.g., permanente, sazonal ou intermitente), os solos, os substratos e a vegetação. Deste modo podem ser distinguidos 35 tipos de zonas úmidas, 11 dos quais pertencentes ao grupo de zonas úmidas 'marinhas e costeiras'. Entretanto a classificação de *Ramsar* não utiliza termos que denotem ou indiquem características hidrogeomorfológicas para cada tipo de zona úmida.

As zonas úmidas têm sido investigadas também sob o ponto de vista geomorfológico por diversos autores (Whittecar & Daniels, 1999; Pasternack *et al.* 2000; Merkey, 2006; Whigham *et al.* 2007). Classificações hidrogeomorfológicas são consideradas como aquelas que oferecem uma boa linha de base, para distinguir os variados tipos de zonas úmidas, sua distribuição, vulnerabilidade e serviços do ecossistema, pois utilizam parâmetros fáceis de serem reconhecidos, o que evitam confusões durante a sistematização dos atributos.

A classificação de Brinson (1993) utiliza a hidrogeomorfologia. Termos tais como fluviais, depressionais, franjas mareais e outros que designam classes ou tipos hidrogeomorfológicos de zonas úmidas, acrescentam informações úteis sobre a estrutura e o funcionamento do ecossistema, inclusive sobre a significância de serviços associados a cada classe. O princípio básico da abordagem hidrogeomorfológica, reside no fato que os principais tipos de zonas úmidas são fundamentalmente diferenciados por parâmetros relacionados ao desenvolvimento da topografia e à retenção da água. A geomorfologia determina o tamanho, a forma e a profundidade de uma zona úmida. A hidrologia é a principal característica, que distingue o *habitat* de zona úmida de um *habitat* terrestre. Respostas biológicas distintas estão associadas a diferentes profundidades de lâminas d'água, suas características hidrodinâmicas e salinidades.

Mais de 50% das zonas úmidas do mundo foram destruídas durante o século passado, ignorando sua importância em oferecerem uma gama de serviços que contribuem para o bem-estar humano, como fornecimento de peixes e fibras, suprimento e purificação de água, regulação climática, regulação de inundações, proteção da zona costeira, oportunidade de recreação, e também de turismo (MEA, 2005). Sobre as causas destas perdas, Gilvear & McInnes (1994) consideraram que muitas das ameaças

às zonas úmidas são de natureza hidrológica: abstração de água subterrânea, regulação nos fluxos dos rios, drenagens de terrenos e poluição da água.

As zonas úmidas associadas às águas doces e salobras da zona costeira brasileira têm sofrido uma grande pressão por atividades humanas, que causam interferências e modificam sua estrutura, a exemplo das “perenizações” e das modificações no seu entorno. A maior parte destas pressões está associada à incorporação imobiliária e à construção de grandes ‘resorts’ voltados para o turismo em larga escala. Isto ocorre num momento em que a importância das zonas úmidas, tem sido demonstrada, principalmente em decorrência da perspectiva de aquecimento global, que tende a aumentar a perda e degradação destas zonas e espécies associadas e a aumentar a incidência de doenças transmitidas por vetores (como a dengue) e as transmitidas pela água (como a cólera) em muitas regiões. Em países pobres, em particular, onde soluções tecnológicas não estão prontamente disponíveis a demanda pelos serviços desempenhados pelas zonas úmidas (e.g., desnitrificação e proteção contra inundações e tempestades), certamente aumentará nas próximas décadas (MEA, 2005). Isso tende a reduzir a capacidade dessas áreas em mitigar impactos, o que resulta na redução dos benefícios que as zonas úmidas trazem ao homem.

Inserir-se, neste contexto, o Litoral Norte do Estado da Bahia, uma região onde existem grandes incentivos governamentais para ocupação por parte de empreendimentos turísticos de larga escala, com as zonas úmidas sendo perenizadas para a criação de espelhos de água para fins paisagísticos ou de recreação, quando não são simplesmente seccionadas pela construção de estradas, acarretando em alterações na estrutura física, na hidrologia e conseqüentemente na composição biótica. Esta é uma região bem cartografada, onde já foram realizadas diversas investigações do ponto de vista geológico-geomorfológico, que oferecem uma gama de informações, que facilita a aplicação de esquemas de classificação hidrogeomorfológica para as zonas úmidas.

A origem e evolução das zonas úmidas do litoral Norte da Bahia estão intimamente associadas às variações do nível do mar durante o Quaternário (Martin *et al.*, 1980; Suguio *et al.*, 1985; Dominguez *et al.*, 1990; Leão & Dominguez, 2000). Na costa do Brasil, o nível relativo do mar desceu cerca de 3-4m durante os últimos 5.600 anos AP. As lagoas e estuários formados durante o máximo Transgressivo (120.000 anos AP), evoluíram para pântanos de água doce, em decorrência do abaixamento do nível do mar durante os últimos milhares de anos (Dominguez *et al.*, 1990). As zonas úmidas ocorrem principalmente nas terras baixas separando os terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos e nos vales de rios e riachos, que não foram completamente preenchidos por sedimentos fluviais (Dominguez *et al.*, 1990).

No litoral Norte do estado da Bahia, as mais expressivas zonas úmidas estão localizadas na planície costeira do rio Itapicuru, aspecto este que definiu a sua escolha para a presente investigação. Nesta região, são encontrados tipos de zonas úmidas representativos de parte o litoral Norte do estado da Bahia.

Neste artigo, é apresentada uma tentativa de aplicação da classificação hidrogeomorfológica para as zonas úmidas

presentes na planície costeira do rio Itapicuru. A ênfase dada neste trabalho para os fatores abióticos, de modo algum tem a intenção de ignorar ou trivializar a importância que os organismos desempenham na estrutura e função dos ecossistemas de zonas úmidas. Alguns estudos têm demonstrado a validade desta classificação também, em áreas da Ásia (Finlayson *et al.*, 2002), da Europa (Maltby, 2004), e especificamente na África do Sul (Ewart-Smith *et al.*, 2006) e na Escócia (Martin *et al.*, 2007). Exemplos de sua construção e aplicação também são documentados por Wardrop *et al.*, 2007, Whigham *et al.*, 2007, Shaffer *et al.*, 2007 e Franklin *et al.*, 2008.

Este estudo utilizou uma base de dados existente, a qual quando integrada aos dados coletados durante os trabalhos de campo, permitiu não só classificar as zonas úmidas, como avaliar os controles ambientais responsáveis por sua distribuição e estrutura.

A delimitação das classes de zonas úmidas permitiu a avaliação da significância ecológica das características hidrogeomorfológicas, no desempenho de serviços e o risco de perda da zona úmida (Sutter *et al.*, 1999). Serviços do ecossistema são os resultados de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem independentemente de qualquer benefício, real ou suposto, para a sociedade humana (UNESCO, 1998). Para começar a entender a significância dos serviços desempenhados por zonas úmidas, a premissa inicial desta abordagem é que estes serviços não são produtos de um lugar particular da zona úmida, mas das relações entre um lugar particular e seus arredores (Sutter *et al.*, 1999). A ocorrência e manutenção de zonas úmidas e dos processos que nelas ocorrem, são resultados da larga escala e das características de longo prazo da zona costeira e regimes climáticos da região, além de outros processos locais (Dominguez *et al.*, 1996). Estes serviços são observados mais corretamente como serviços do complexo, mais do que serviços de zonas úmidas individuais (Sutter *et al.*, 1999).

A classificação das zonas úmidas aqui realizada tem duas repercussões imediatas. Primeiramente estabelece uma estrutura de coleção de dados, tanto para organizar estes dados quanto para apontar onde dados adicionais deverão ser coletados em futuras investigações. A segunda repercussão e certamente a mais importante, é que esta classificação permitirá aos órgãos ambientais estabelecer metas para criação de diretrizes e legislação específica, para a conservação da biodiversidade nestas áreas.

Esta pesquisa teve assim como objetivo classificar as zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru, no norte da Bahia, permitindo a diferenciação dos principais controles ambientais inerentes a cada classe. Objetivos específicos incluíram: (i) classificar hidrogeomorfológicamente as zonas úmidas da área de estudo; (ii) através das características hidrogeomorfológicas de cada classe, avaliar a significância dos serviços desempenhados por zonas úmidas e o risco potencial de perda destes serviços para a paisagem onde elas estão inseridas.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área estudada está situada no litoral Norte do estado da Bahia, no município de Conde (Fig. 1). A planície costeira

Tabela 1. Identificação das classes hidrogeomorfológicas de zonas úmidas.**Table 1.** Identification key of hydrogeomorphic classes of wetlands.

NO. CHAVE	HIDROGEOMORFOLOGIA CARACTERÍSTICA	CLASSE HIDROGEOMORFOLÓGICA
1.	Zona úmida é influenciada pela maré	2
1.	Zona úmida não é influenciada pela maré	4
2.	Salinidade > 30 ppt	Franja mareal (euhalina)
2.	Salinidade < 30 ppt	3
3.	Salinidade 5-30 ppt	Franja mareal (mixohalina)
3.	Salinidade < 5 ppt	Fluvial (mareal)
4.	Zona úmida é topograficamente plana e tem a precipitação como fonte de água dominante	5
4.	Zona úmida não é topograficamente plana e não tem a precipitação como fonte de água dominante	6
5.	Zona úmida tem o solo mineral	Planície de solo mineral
5.	Zona úmida tem o solo orgânico	Planície de solo orgânico
6.	Zona úmida é associada com canais, planície de inundação ou terraço	7
6.	Zona úmida é associada com uma depressão topográfica ou num declive topográfico ou planície	9
7.	Canal é intermitente ou efêmero	Fluvial não-perene
7.	Canal é perene	8
8.	Canal é de 1ª ou 2ª ordem	Fluvial (de alto gradiente)
8.	Canal é de 3ª ordem ou maior	Fluvial (de baixo gradiente)
9.	Zona úmida é localizada numa depressão topográfica natural ou artificial	10
9.	Zona úmida é localizada num declive topográfico	13
10.	Depressão topográfica tem a profundidade de água permanente >2m e zona úmida é restrita à margem da depressão	Franja lacustre
10.	Depressão topográfica não tem profundidade de água permanente >2m	11
11.	Depressão topográfica fechada sem superfície discernível de entradas e saídas de águas ou outras conexões	Depressional (fechada)
11.	Depressão topográfica aberta com superfície discernível de entradas e saídas de águas ou outras conexões	12
12.	Fonte primária de água é a água subterrânea	Depressional (aberta, água subterrânea)
12.	Fonte primária de água é a precipitação ou escoamento superficial	Depressional (aberta, água de superfície)
13.	Fonte primária de água é a água subterrânea	Em declive
13.	Fonte primária de água é a precipitação	Planície de solo orgânico

Sutter *et al.* (1999) que se baseia em parâmetros como: proximidades de corpos d'água, hidroperíodo, tipo de vegetação, largura, tamanho e uso do solo nas classes de zonas úmidas, para avaliar a significância delas no desempenho de serviços associados à qualidade da água, à hidrologia e à qualidade do *habitat*. A significância destes

três serviços foi classificada em alta, moderada ou baixa (A, M ou B, respectivamente) para cada classe, assim como o risco potencial de perda destes serviços para a paisagem. Isto é importante porque utiliza um esquema funcional para avaliar a significância de serviços do ecossistema, fortemente baseados em medidas estruturais (Cole, 2006).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Classificação hidrogeomorfológica das zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru

Quatro classes/subclasses principais de zonas úmidas foram reconhecidas, sendo uma destas subdividida em dois subtipos (Tabela 2). As geometrias em seção das classes de zona úmida estão esquematizadas nas figuras 3 a 6. A distribuição espacial das diferentes classes de zonas úmidas é mostrada na Figura 7. Exemplos das classes são mostrados nas figuras 8 a 13.

As características das quatro classes e subclasses hidrogeomorfológicas reconhecidas na área de estudo estão descritas abaixo.

1) *Zonas úmidas em declives por exudação de água subterrânea*: ocorrem onde quebras de declividade resultam em exudação da água subterrânea, ou seja, onde o fluxo de água intercepta a superfície do terreno (Fig. 2). A saturação por exudação da água subterrânea, com fluxo unidirecional declive abaixo e a perda de água pela evapotranspiração, são as principais influências hidrológicas nas zonas úmidas em declive identificadas. A precipitação frequentemente é uma contribuição secundária na fonte de água.

Na área de estudo, zonas úmidas em declive por exudação da água subterrânea, são encontradas principalmente nas bordas dos terraços arenosos internos, de idade pleistocênica, quando uma quebra de declive pronunciada está presente

(Fig. 7; Fig. 11). Nestes trechos, o terreno pode apresentar-se saturado de água e pode localmente apresentar nascentes. A presença deste tipo de zona úmida resulta provavelmente do fato destes depósitos arenosos apresentarem barreiras de permeabilidade, associadas a horizontes espódicos coesos, característicos dos espodossolos que se desenvolvem nesta unidade, às quais forçam a água subterrânea à exudar na quebra de declive.

A cobertura vegetal nas zonas úmidas em declive por exudação da água subterrânea, incluem espécies de macrofitas aquáticas emersas de baixo porte, com dominância de *Eleocharis* sp.

2) *Zonas úmidas depressionais com alimentação por água subterrânea*: ocorrem na planície costeira do rio Itapicuru, possuindo tanto atributos de zonas úmidas fluviais de baixo gradiente não aluviais, quanto de zonas úmidas depressionais, por causa dos fluxos laterais muito fracos e pelo fato de que, quando existem canais associados, os níveis de sedimento em suspensão nos cursos d'água são muito baixos. O fluxo de água ocorre em canais rasos, que funcionam como conduto para drenagem das zonas úmidas vizinhas (Fig. 3). Zonas úmidas depressionais ocorrem em bacias planas, onde o lençol freático aflora (*i.e.*, contornos da elevação fechados). Estas depressões podem ter uma combinação de entrada e saída de água ou nenhuma destas, e são alagadas permanentemente de acordo com o volume de exudação das águas subterrâneas dos aquíferos do Quaternário. As

Tabela 2. Classificação das zonas úmidas costeiras associadas com rio Itapicuru.

Table 2. Classification of coastal wetlands associated with the river Itapicuru.

Classe (baseada na condição geomorfológica)/Subclasse (baseada no mecanismo de transferência da água) Hidrogeomorfológicas de Zonas Úmidas		Fitofisionomia
Zona úmida em declive por exudação da água subterrânea (<i>Groundwater slope wetland</i>)		Herbácea de baixo porte
Zona úmida depressional alimentada por água subterrânea (<i>Groundwater depression wetland</i>)	Zona úmida depressional alimentada por água subterrânea aberta (<i>Open groundwater depression wetland</i>)	Aquática com folhas flutuantes, com folhas submersas livres ou enraizadas e com raízes flutuantes
		Herbácea de alto porte
	Zona úmida depressional alimentada por água subterrânea fechada (<i>Closed groundwater depression wetland</i>)	Herbácea de baixo porte
		Floresta paludosa
Zona úmida fluvial (<i>Riverine lower perennial wetland</i>)		Aquática com folhas flutuantes, com folhas submersas livres ou enraizadas e com raízes flutuantes
		Herbácea de baixo porte
Zona úmida franja mareal (<i>Tidal fringe wetland</i>)		Gramínea exótica
		Manguezal

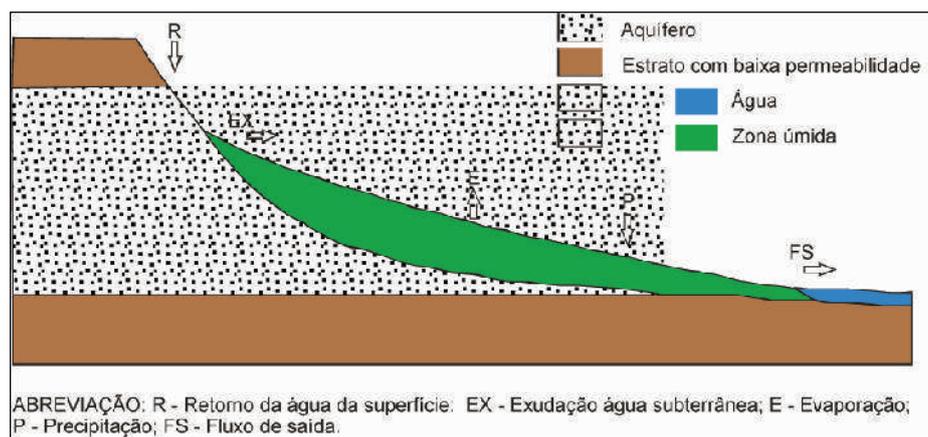


Figura 2. Seção da zona úmida em declive por exudação da água subterrânea.

Figure 2. Section view: slope wetlands groundwater-fed

flutuações do nível da água predominantes são verticais e variam sobretudo sazonalmente. Zonas úmidas depressionais podem perder água por evapotranspiração, saídas de água intermitentes ou permanentes, ou recarga do lençol-freático. As águas destas depressões apresentam coloração cor-de-chá e são ácidas, como resultado da matéria orgânica dissolvida da primeira camada do solo e não excedem a profundidade de 2m na estação seca. Depósitos turfosos são formados em áreas onde o nível da água é alto. A água é normalmente pobre em minerais dissolvidos principalmente quando a taxa de acumulação da matéria orgânica é maior do que a taxa de decomposição. Zonas úmidas depressionais ocorrem em bacias com “solos orgânicos” (profundidade contínua de matéria orgânica >0,4m, como definido por NWWG, 1997). Normalmente estes solos apresentam depósitos constituídos por sedimentos finos, compostos por argilas e material vegetal de origem autóctone e alóctone (CPRM, 1982).

A área ocupada por esta unidade é bastante expressiva, abrangendo um total de 59,41km², o que representa 36,2% do total das zonas úmidas na planície do rio Itapicuru (Fig.7).

Na área de estudo duas subclasses podem ser encontradas:

2.1 Subtipo 1 - zonas úmidas depressionais abertas, com presença de entradas e saídas de água e uma grande área de captação, que dá suporte a feições fluviais de caráter secundário. O balanço hídrico é dominado por fluxos laterais superficiais e descarga. Na área de estudo, ocorre no fundo dos vales entalhados na Formação Barreiras (Fig. 3), nas zonas baixas entre os terraços arenosos internos e externos (figuras 7, 8 e 9) e nas zonas baixas que bordejam os pequenos cursos d’água, como os rios Crumai e Pontes.

2.2 Subtipo 2 - zonas úmidas depressionais fechadassem entradas e saídas de água. Este tipo de zona úmida foi construída pelo vento, ocupa depressões fechadas presentes na superfície das bacias de deflação do tipo “blow-out” associadas às dunas (Fig.4). É o tipo menos expressivo de zona úmida na planície costeira do rio Itapicuru (Fig. 7).

A vegetação dominante em áreas não florestais incluem as macrófitas aquáticas emersas *Eleocharis* sp., *Cyperus* spp. (tírrica e papirus) e *Typha* sp., principalmente. Uma

expressiva área de floresta no subtipo 1 (Fig. 10) está presente na porção norte da planície costeira, apresentando uma vegetação extremamente variável, com ocorrências de espécies típicas de floresta paludosa, também conhecida como florestas de brejo (Ivanauskas *et al.*, 1997) tais como *Annona* sp., landirana, *Cecropia* sp. e *Calophyllum brasilienses*. Nesta área existe maior influência da precipitação como fonte de água da zona úmida, devido à existência de microtopografia formada por acúmulo de matéria orgânica. Em termos de abrangência espacial, as áreas de porte arbóreo com floresta paludosa ocupam um total de aproximadamente 4,93km², o que vem a representar cerca de 3% do total das zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru. A cobertura da vegetação arbórea típica de água doce também está presente em pequenos trechos interioranos de alguns vales entalhados na Formação Barreiras também no subtipo 1.

3) *Zona úmida fluvial de baixo gradiente*: ocorre na planície associada a canais, neste caso o rio Itapicuru. Estudos da história evolutiva da planície costeira do rio Itapicuru (Dominguez *et al.*, 1996) indicaram que esta zona úmida fluvial está implantada sobre depósitos de um delta de cabeceira de baía construído pelo rio durante o máximo da Última Transgressão. Esta unidade é constituída por sedimentos areno-lamosos recobertos por depósitos de canais abandonados e de diques marginais (Dominguez *et al.*, 1996).

Este tipo de zona úmida desenvolveu-se sobre áreas com acúmulo de água na ou próximo à superfície por extensos períodos de tempo, resultando na presença de solo hídrico e vegetação higrófila, com poucas áreas de água aberta. Esta classe comumente é associada a declives menores que 0,5%, e a principal característica hidrológica é o fluxo lateral a partir do extravasamento do rio (Fig. 12). Estas zonas úmidas sofrem inundações com profundidades de apenas poucos centímetros (Fig. 5). Este tipo de zona úmida representa um tipo de “floodway” sem canais conectados com o rio durante fluxos normais. Esta classe de zona úmida é uma das mais extensas da planície costeira, com área total de 26,34km² representando 16,04% da área total ocupada pelas zonas úmidas na planície (Fig.7).

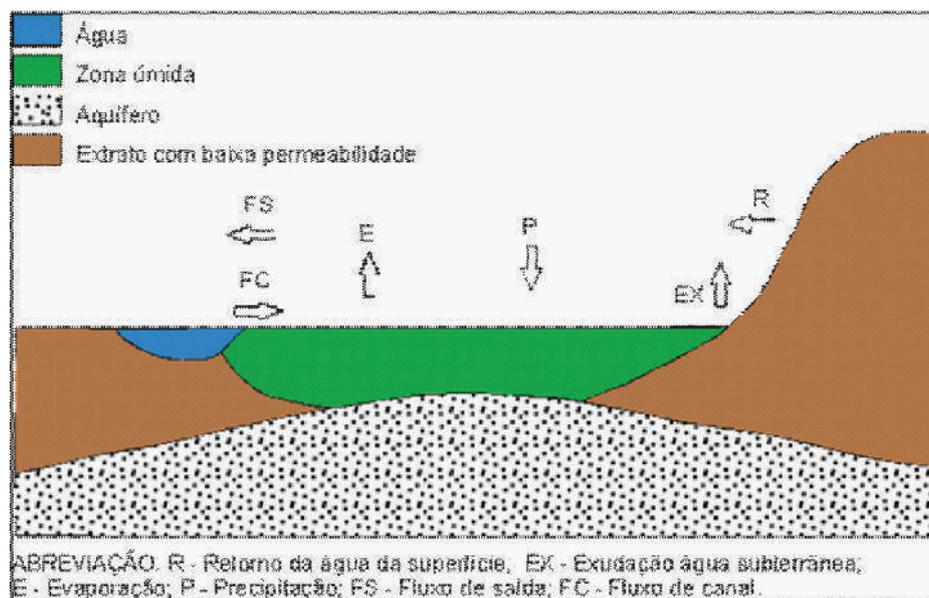


Figura 3. Seção da classe hidrogeomorfológica de zona úmida depressional alimentada por água subterrânea aberta em vales de canais.

Figure 3. Section view: open depression wetland hydrogeomorphic class, groundwater-fed on valleys of channels.

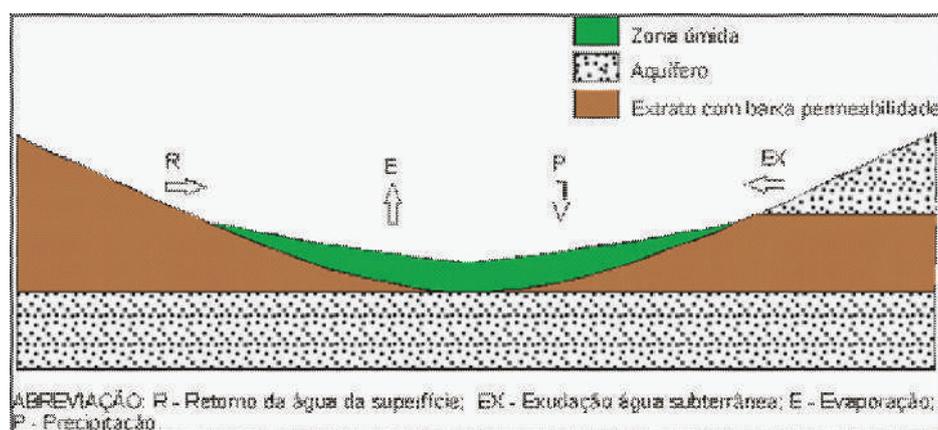


Figura 4. Seção da classe hidrogeomorfológica de zona úmida depressional fechada alimentada por água subterrânea.

Figure 4. Section view: closed depression wetland hydrogeomorphic class, groundwater-fed.

O rio Itapicuru extravasa anualmente, principalmente nos meses de verão como resultado do aumento do índice pluviométrico na área de cabeceira. O escoamento superficial local contribui para a manutenção da saturação entre as inundações principais, quando pequenas poças se desenvolvem depois das chuvas.

A cobertura da vegetação na planície de inundação é muito dinâmica e pode mudar em resposta às flutuações sazonais da saturação. As espécies de plantas incluem formas aquáticas com folhas flutuantes, como a *Nymphaea* sp. Com folhas submersas, podendo também ser livres como a *Utricularia* sp., ou enraizadas como a *Mayaca* sp. e com raízes flutuantes, como o aguapé (*Eichornia* sp.) principalmente em trechos correspondentes a paleocanais. Contudo, espécies emersas,

principalmente gramináceas tolerantes às inundações, sobretudo a exótica *Brachiaria* sp., domina uma extensa área da planície, principalmente no verão.

4) *Zonas úmidas em franjas mareais*: ocorrem em áreas costeiras e sofrem a influencia das marés. Elas fazem transição para zonas úmidas fluviais onde as correntes mareais diminuem e o fluxo do rio é a principal fonte de água. Fontes adicionais de água podem ser a água subterrânea e a precipitação. A interface entre as classes franja mareal e fluvial situa-se onde os fluxos bidirecionais dominam os fluxos unidirecionais do rio. Por serem frequentemente inundadas pelas marés, as franjas mareais raramente ficam secas por períodos significativos. Zonas

úmidas em franjas mareais perdem água pelas mudanças das marés, pela saturação do fluxo com transbordamento para canais de marés, e pela evapotranspiração. A matéria orgânica normalmente se acumula em áreas afastadas da ação erosiva das ondas na linha de costa.

Neste tipo de zona úmida há uma predominância de argilas escuras, com presença secundária de areias e siltes de origem fluvial ou marinha, formando lamas plásticas ricas em matéria orgânica (CPRM, 1982). Apresentam uma área total de 16,54km²; representando 10% do total das zonas úmidas na planície (Fig.7).

A cobertura da vegetação nesta classe de zona úmida em franja mareal costeira integra o ecossistema manguezal, no qual as plantas desenvolveram adaptações para colonizar solos e regiões caracterizadas por elevadas salinidades, sujeitas ao fluxo e refluxo das marés (Lugo & Snedaker, 1974), incluindo espécies emersas herbáceas halófitas, como *Spartina* sp. A principal comunidade dominante está associada à espécie *Rhizophora mangle*, com outras espécies típicas de manguezais brasileiros como *Avicennia* sp. e *Laguncularia* sp., constituindo formações florestais na desembocadura do rio Itapicuru (Fig.6; Fig.13).

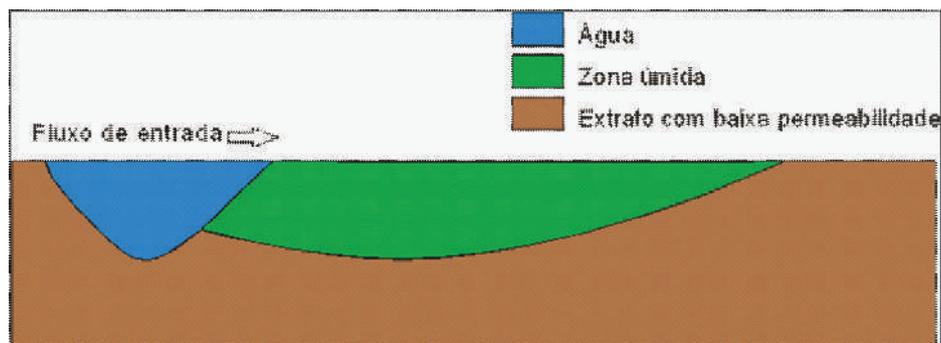


Figura 5. Seção da classe hidrogeomorfológica de zona úmida fluvial).

Figure 5. Section view: fluvial wetland hydrogeomorphic class.

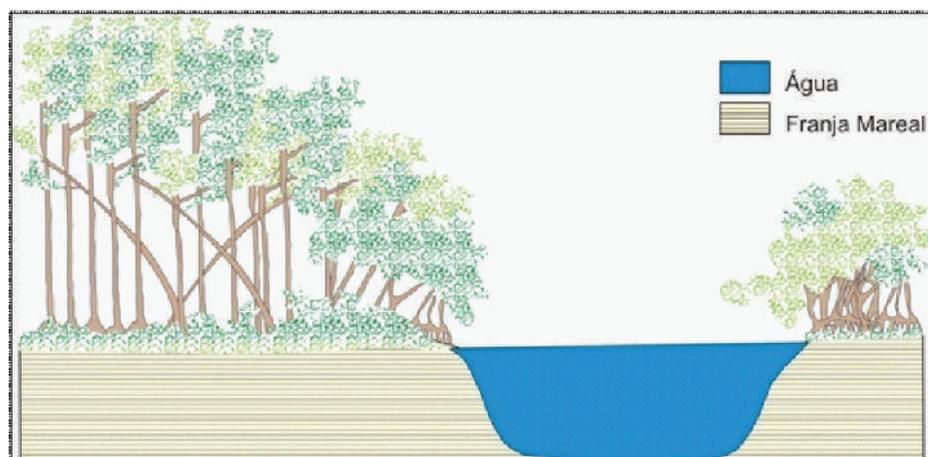


Figura 6. Zona úmida franja mareal na desembocadura do rio Itapicuru).

Figure 6. Mareal fringe wetland on Itapicuru river mouth.



Figura 7. Mapa de classificação das zonas úmidas na planície do rio Itapicuru).

Figure 7. Map of classification of coastal wetlands on Itapicuru river.

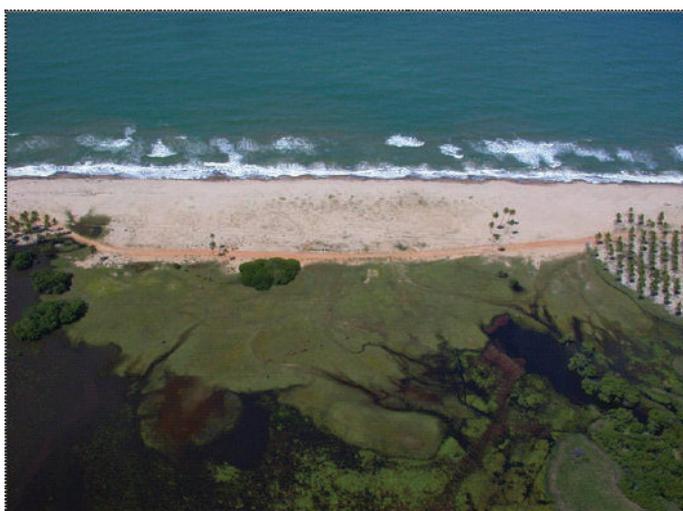


Figura 8. Zonas úmidas depressionais abertas alimentadas por água subterrânea, na localidade de Barra Nova.

Figure 8. Depressional wetlands groundwater-fed on Barra Nova locality.

Foto: Dominguez 01/2007.



Figura 9. Zonas úmidas depressionais abertas alimentadas por água subterrânea, ao fundo a localidade de Sítio do Conde).

Figure 9. Depressional wetlands groundwater-fed on Sítio do Conde.

Foto: Dominguez 01/2007.



Figura 10. Zona úmida depressional aberta com alimentação da água subterrânea, com vegetação arbórea.

Figure 10. *Depressional wetlands groundwater-fed with arboreo vegetation.*

Foto: Dominguez 01/2007.



Figura 12. Zona úmida fluvial na planície de inundação.

Figure 12. *Fluvial wetland on inundation plain.*

Foto: Soares 05/2007.



Figura 11. Zona úmida em declive por exudação da água subterrânea.

Figure 11. *Slope wetlands groundwater-fed.*

Foto: Soares 01/2008.



Figura 13. Zona úmida em franja mareal na desembocadura do rio Itapicuru.

Figure 13. *Mareal fringe wetland on Itapicuru river mouth.*

Foto: Esquivel 01/2006.

2. PARÂMETROS HIDROGEOMORFOLÓGICOS DAS ZONAS ÚMIDAS NA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO ITAPICURU E OS SERVIÇOS DO ECOSISTEMA

A ausência de um mapa de uso do solo detalhado para a área de estudo impediu uma aplicação mais quantitativa do esquema de Sutter *et al.* (1999). Apesar disto foi possível avaliar a significância dos serviços do ecossistema aplicando alguns dos parâmetros definidos pelos referidos autores para a área de estudos. Cujos resultados são apresentados na Tabela 3. Esta tabela mostra que as zonas úmidas na planície do rio Itapicuru desempenham importantes serviços para a região discutida, uma vez que quase todos os parâmetros apresentaram uma significância alta.

Alguns dos aspectos que foram considerados na avaliação da significância dos serviços das zonas úmidas identificadas são discutidos a seguir:

Proximidade das fontes não pontuais de poluição

Dado mais de 20% do perímetro das zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru ser ocupado por agricultura ou outras formas de uso do solo, a proximidade de fontes de poluição é classificada como alta em todas as classes de zonas úmidas estudadas. Este é um parâmetro que considera o uso do solo predominante na adjacência da zona úmida para avaliar suas condições na limpeza não pontual de águas poluídas e de limpeza das águas de inundações.

Proximidade de corpos d'água

Este parâmetro permite avaliar a significância da zona úmida em promover a limpeza não pontual de águas poluídas. Depende da proximidade de corpos d'água das zonas úmidas. Este parâmetro é classificado como alto dado as zonas úmidas estarem associadas com a planície costeira do rio Itapicuru.

Tabela 3. Significância dos serviços desempenhados pelas classes de zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru.

Table 3. Significance of services of coastal wetlands hydrogeomorphic class on Itapicuru river.

Parâmetro	Serviços de zonas úmidas	Zu em declive	Zu depressional	Zu fluvial	Zu franja mareal
Proximidade das fontes de poluição	Manutenção da qualidade das águas	A	A	A	A
Proximidade de corpos d'água	Manutenção da qualidade das águas	B	A	A	A
Tipo de vegetação	Manutenção da qualidade das águas e disponibilidade de <i>habitat</i>	M	A/M	B	A/M
Solos	Manutenção da qualidade das águas	M	A	M	A
Duração da inundação	Manutenção da qualidade das águas e hidrológicos	A	A	A	A
Largura perpendicular da zona úmida para o canal	Manutenção da qualidade das águas e hidrológicos	A	A	A	A
Tamanho da zona úmida	Hidrológicos	A	A	A	A
Geomorfologia	Hidrológicos	M	A	B	A
Posição na bacia	Hidrológicos	A	A	A	A
Ocorrência de espécies ameaçada ou ecossistema natural único	Disponibilidade de <i>habitat</i>	A	A	A	A
Justaposição da zona úmida	Disponibilidade de <i>habitat</i>	A	A	A	A
<i>Habitat</i> adjacente	Disponibilidade de <i>habitat</i>	A	A	A	A
Função da zona úmida como ilha	Disponibilidade de <i>habitat</i>	A	A	A	A
Tamanho do interior no complexo de <i>habitat</i>	Disponibilidade de <i>habitat</i>	A	A	A	A
Associação com a superfície de água	Disponibilidade de <i>habitat</i>	A	A	A	A
Heterogeneidade interna do complexo de <i>habitat</i>	Disponibilidade de <i>habitat</i>	A	A	A	A

Zu = zonas úmidas.

Tipos de vegetação

Os tipos de vegetação de zonas úmidas são importantes tanto como fonte de limpeza não pontual de poluição pelo escoamento superficial, quanto como de limpeza das águas das inundações pelos canais de drenagem. A vegetação herbácea influencia tanto a classe em declive quanto as depressionais ou franjas mareais, localizadas na planície costeira do rio Itapicuru, sendo nestas duas últimas encontradas em associação às espécies arbóreas, categorizando desta forma, este parâmetro como alto. Também durante o serviço de disponibilidade de *habitat* estes tipos de vegetação influenciam o *habitat* interno para espécies terrestres e o habitat para anfíbios e invertebrados aquáticos nestas classes. Este parâmetro é classificado como baixo durante o desempenho dos serviços citados acima pela classe fluvial, pois nessa classe, gramíneas exóticas dominam a vegetação atualmente.

Solos

Nas classes de zonas úmidas depressionais e franja mareal, localizadas na planície costeira do rio Itapicuru os solos frequentemente inundados com muita matéria orgânica caracterizam a alta significância no desempenho da limpeza da água da inundação.

Duração da inundação e largura perpendicular da zona úmida para o canal

As classes de zonas úmidas localizadas na planície costeira do rio Itapicuru são inundadas por períodos variáveis, como a classe fluvial, ou são inundadas permanentemente. Quanto maior o período de inundação, mais favoráveis são as condições funcionais de limpeza das águas de inundação, durante a manutenção das qualidades das águas; e de armazenamento de águas de inundação, durante o desempenho de serviços hidrológicos. Outro parâmetro que influencia o desempenho de serviços do ecossistema é a largura perpendicular da zona úmida em relação aos canais principais. Quanto maior esta largura, mais favoráveis é para às condições de limpeza das águas.

Tamanho e geomorfologia da zona úmida

A área ocupada pelas zonas úmidas na planície costeira condiciona tanto o seu desempenho funcional na manutenção da qualidade das águas, quanto dos serviços hidrológicos, devido ao armazenamento de água na superfície. Quanto maior for a área das zonas úmidas maior será a significância destes serviços. Enquanto nas zonas úmidas depressionais, com geomorfologia em bacia, este parâmetro é alto, na classe fluvial este parâmetro é considerado baixo, pois esta atua como área para o espriamento da inundação com capacidade de retenção dependente mais da infiltração da água do que do armazenamento em áreas com contornos fechados.

Posição da zona úmida

A posição da zona úmida em relação a um canal é outro parâmetro importante para a avaliação dos serviços dos ecossistemas. Quando a zona úmida está próxima a um canal de terceira ordem ou maior, como é o caso da planície costeira do rio Itapicuru, este parâmetro é considerado alto no que diz respeito à significância no armazenamento das águas da inundação durante o desempenho de serviços hidrológicos.

Ocorrência de espécies ameaçadas ou ecossistema natural único

A ocorrência de espécies ameaçadas e a presença de um ecossistema natural único (Dominguez *et al.*, 1996) são parâmetros que condicionam como alta a disponibilidade de habitat pelas zonas úmidas da planície costeira do rio Itapicuru, no litoral Norte do estado da Bahia.

Justaposição de zonas úmidas

A justaposição das classes de zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru, interligadas num complexo com áreas onde mais de 50% são bordejadas por outras classes de zonas úmidas, caracterizam este parâmetro como alto no fornecimento de *habitat* para espécies que utilizam as zonas úmidas.

Habitat adjacente

Para as zonas úmidas da planície costeira do rio Itapicuru o parâmetro habitats adjacentes é considerado alto, porque mais de 30ha do complexo de zonas úmidas é circundado por ecossistemas naturais, como a Mata Atlântica, disponibilizando *habitat* para espécies terrestres e para anfíbios e invertebrados aquáticos. A presença de canais cortando as zonas úmidas é favorável também para habitat de peixes.

Função da zona úmida como ilha

A ocorrência do complexo de zonas úmidas na planície costeira do rio Itapicuru de forma isolada, resulta na atribuição de um valor alto para o parâmetro 'função da zona úmida como ilha' pela elevada influência na condição funcional da paisagem para *habitat* de espécies terrestres que utilizam as zonas úmidas.

Tamanho do interior da zona úmida no complexo de habitat

O tamanho do interior da zona úmida no complexo de *habitat* é um parâmetro também importante, pois quanto mais alto for o mesmo, maior a sua influência no fornecimento de habitat interno para espécies terrestres que utilizam as zonas úmidas. A disponibilidade de habitats proporcionados pelas zonas úmidas da planície costeira do rio Itapicuru este parâmetro é considerada alta, uma vez que mais de 30ha do complexo das zonas úmidas é circundado por ecossistemas naturais, como a Mata Atlântica.

Associação com a superfície de água

Por as zonas úmidas classificadas serem associadas às superfícies de água, o rio Itapicuru, espécies terrestres que utilizam as zonas úmidas são favorecidas nesta região.

Heterogeneidade interna do complexo de habitat

No complexo de zonas úmidas associadas a planície costeira do rio Itapicuru, o número de tipos de vegetação favorece sua heterogeneidade interna e, portanto, aumenta a significância na disponibilidade de *habitat* interno para espécies terrestres que utilizam as zonas úmidas.

3. RISCO POTENCIAL DE PERDA DOS SERVIÇOS DESEMPENHADOS POR ZONAS ÚMIDAS

O risco potencial de perda dos serviços para a paisagem onde as classes de zonas úmidas estão inseridas avalia a significância delas em relação ao uso do solo e características da água na paisagem onde o serviço é desempenhado, para

determinar o risco para a integridade da zona costeira.

Em todas as classes de zonas úmidas o tipo de cobertura vegetal é o fator determinante para que dois parâmetros sejam considerados na avaliação do risco de perda da zona úmida: a dificuldade de reposição da vegetação e o uso do solo.

O risco de perda da zona úmida em declive por exudação da água subterrânea é muito influenciado pelo tipo de uso do solo nos terraços arenosos e pela extração de areia. O risco potencial de perda das zonas úmidas depressionais é relacionado à vulnerabilidade destas a subtração de água subterrânea e à contaminação do lençol freático.

Para as zonas úmidas depressionais, associadas a vales existe também uma maior vulnerabilidade a aterros, devido a presença de terrenos elevados.

O risco de perda dos serviços prestados pelas classes de zonas úmidas fluvial e franja mareal é altamente influenciado por suas vulnerabilidades à poluição e às intervenções que visam a regulação do rio.

Resumindo, o risco potencial de perda dos serviços de todas as zonas úmidas na área de estudo foi classificado como alto. Para as classes com cobertura da vegetação de porte arbóreo este risco de perda tem grande relevância principalmente pela dificuldade de reposição deste tipo de vegetação.

CONCLUSÕES

Neste trabalho as zonas úmidas da planície costeira do rio Itapicuru foram classificadas. Esta abordagem permitiu também avaliar parâmetros hidrogeomorfológicos importantes para o conhecimento dos serviços do ecossistema. Este tipo de investigação tem aplicabilidade, pois oferece informações qualitativas do que pode ser feito nas zonas úmidas considerando seus principais controles ambientais e significância ecológica.

A classificação proposta se aplicada adequadamente é útil por diversas razões:

1. é simples, para zonas úmidas depressionais os critérios (conectividade com corpos d'água) e os dois tipos (aberta e fechada) priorizam a adição de parâmetros descritivos;
2. o nome de uma zona úmida transmite consigo o contexto hidrogeomorfológico (e.g. o termo 'depressional com alimentação da água subterrânea', carrega em si a noção de uma depressão rasa, permanente, mantida pela exudação da água subterrânea);
3. os diferentes serviços dos ecossistemas de zonas úmidas podem ser claramente separados em um nível primário – e.g. depressional *vs.* fluvial;
4. a hidrogeomorfologia inerente à classe de zona úmida pode ser usada como requisito para uma adequada reabilitação futura;
5. a distribuição dos serviços nas classes dos ecossistemas de zonas úmidas mostra como a avaliação hidrogeomorfológica pode discriminar lugares ao longo de um gradiente ecológico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a grande contribuição dos revisores do artigo, do Soledade Filho para a logística das expedições na Mata Paludosa, financeira da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

BIBLIOGRAFIA

- Brinson, M.M. (1993) - *A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands*. 79p., U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-4, Washington, DC, USA. <http://el.erdc.usace.army.mil/wetlands/pdfs/wrpde4.pdf>
- Centro de Estatística e Informação (CEI) (1994) - *Informações Básicas dos Municípios Baianos, Litoral Norte*. volume 6, 440p., Salvador, BA, Brasil. ISBN 8571170150.
- Clausen, J.C.; Ortega, I.M.; Glaude, C.M.; Relyea, R.A.; Garay, G.; Guíneo, O. (2006) - Classification of Wetlands in a Patagonian National Park, Chile. *Wetlands* 26(1):217-229. doi: 10.1672/0277-5212(2006)26%5b217:COWIAP%5d2.0.CO;2
- Cole, C.A. (2006) - HGM and wetland functional assessment: Six degrees of separation from the data? *Ecological Indicators*, 6(1):485-493. DOI: 10.1016/j.ecolind.2005.06.004
- Cowardin, L.M.; Carter, V.; Golet, F.C.; LaRoe, E.T. (1979) - *Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States*. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, DC., U.S.A. Disponível em <http://www.npwrc.usgs.gov/resource/wetlands/classwet/index.htm>
- CPRM (1982) - Lima, R.C.C.; Costa, I.V.G.; Silva, I.F.; Rocha, A.J.D. (1982) - *Projeto Turfa na faixa costeira Bahia-Sergipe. Relatório Integrado*. 129p., CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, Salvador, BA, Brasil.
- Dalton, H.C. (1999) - *Terrenos Inundáveis ("Wetlands") da Zona Costeira do Brasil: Herança Geológica e Alterações por Mudanças Regionais e Globais*. VII Congresso da ABEQUA, Porto Seguro, BA, Brasil.
- Diegues, A.C. (1990) - *Inventário de zonas úmidas do Brasil: versão preliminar*. 450p., Programa de Pesquisa e Conservação de Áreas Úmidas no Brasil, PRP, USP, São Paulo, SP, Brasil.
- Dominguez, J.M.L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Martin, L. (1990) - Geologia do Quaternário costeiro de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geociências* (ISSN: 2177-4382), 20(1-4):208-215, São Paulo, SP, Brasil.
- Dominguez, J.M.L.; Leão, Z.M.A.N.; Lyrio, R.S. (1996) - *Litoral Norte do Estado da Bahia: evolução costeira e problemas ambientais*. Roteiro da Excursão E4 do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia, 32p. Salvador, BA, Brasil.
- Ehrenfeld, J.G. (2000) - Evaluating wetlands within an urban context. *Ecological Engineering*, 15(3-4):253-265. DOI: 10.1016/S0925-8574(00)00080-X
- Esquivel, M.S. (2006) - *Quaternário costeiro do município de Conde: implicações para a gestão ambiental*. 113p., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil. Não publicado.
- Ewart-Smith, J.L.; Ollis, D.J.; Day, J.A.; Malan, H.L. (2006) - *National Wetland Inventory: Development of a Wetland*

- Classification System for South Africa*. Water Research Commission, Report No.KV 174/06, Pretoria, South Africa. ISBN: 1-77005-429-4
- Finlayson, C.M.; Begg, G.W.; Howes, J.; Davies, J.; Tagi, K.; Lowry, J. (2002) - *A Manual for an Inventory of Asian Wetlands: Version 1.0*. Wetlands International Global Series 10, Kuala Lumpur, Malaysia. ISBN: 9058820106.
- Franklin, S. B.; Kupfer, J. A.; Pezeshki, R.; Gentry, R.; Smith, R.D. (2008) - Efficacy of the hydrogeomorphic model (HGM): A case study from western Tennessee. *Ecological Indicators*, 9:267-283. 10.1016/j.ecolind.2008.05.004.
- Gilvear, D.J.; McInnes, R.J. (1994) - Wetland Hydrological Vulnerability and the Use of Classification Procedures: a Scottish Case Study. *Journal of Environmental Management*, 42(4):403-414. DOI: 10.1006/jema.1994.1080
- Ivanauskas, N.M.; Rodrigues, R.R.; Nave, A G. (1997) - Aspectos ecológicos de um trecho de floresta de brejo em Itatinga, SP: florística, fitossociologia e seletividade de espécies. *Revista Brasileira de Botânica* (ISSN 0100-8404), 20(2):139-153, São Paulo, SP, Brasil.
- Leão, Z.M.A.N.; Dominguez, J.M.L. (2000) - Tropical coast of Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 41(1-6):112- 122. DOI: 10.1016/S0025-326X(00)00105-3.
- Lugo, A.E.; Snedaker, S.C. (1974) - The Ecology of Mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5:39-64. DOI: 10.1146/annurev.es.05.110174.000351
- Maltby, E. (2004) - *Integration of Europe wetland research in sustainable management of the water cycle*. General Presentation of 1ª Conferência do Eurowet Project, Apresentação em PowerPoint, 36 slides. Disponível em http://eurowet.brgm.fr/Documents/conference/présentations_2809/EUROWET_INTRO_280904.pdf
- Martin, G.; Fitzsimons, V.; Duncan, W.; Bauer, I.; Harris, L.; Habron, D.; McBride, A.; Johnstonova, A. (2007) - *WFD66: Wetland Hydrogeomorphic Classification for Scotland*. 94p., Sniffer - Scotland & Northern Ireland Forum for Environmental Research, Edinburgh, U.K. Disponível em [http://www.sniffer.org.uk/Webcontrol/Secure/ClientSpecific/ResourceManagement/UploadedFiles/WFD66 Final Report.pdf](http://www.sniffer.org.uk/Webcontrol/Secure/ClientSpecific/ResourceManagement/UploadedFiles/WFD66%20Final%20Report.pdf)
- Martin, L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Vilas Boas, G.S.; Flexor, J.M. (1980) - *Mapa Geológico do Quaternário Costeiro do Estado da Bahia, Texto Explicativo*. 60p., Secretária de Minas e Energia / Coordenação de Produção Mineral, Salvador, BA, Brasil.
- MEA (2005) - *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water. Synthesis*. 68p., MEA - Millennium Ecosystem Assessment, World Resources Institute, Washington, D.C., U.S.A. ISBN: 1569735972 Disponível em <http://www.maweb.org/documents/document.358.aspx.pdf>
- Merkey, D.H. (2006) - Characterization of Wetland Hydrodynamics Using HGM and Sub classification Methods in Southeastern Michigan, USA. *Wetlands*, 26(2):358-367. DOI: 10.1672/0277-5212(2006)26%5b358:COWHUH%5d2.0.CO;2
- NWWG (1997) - Warner, B.G.; Rubec, C.D.A. (eds.) (2007) - National Wetlands Working Group - *The Canadian Wetland Classification System*. Second Edition, 68p., NWWG - National Wetlands Working Group, Wetlands Research Centre, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canadá. ISBN: 0662258576. Disponível em http://www.gret-perg.ulaval.ca/fileadmin/fichiers/fichiersGRET/pdf/Doc_generale/Wetlands.pdf
- Pasternack, G.B.; Hilgartner, W.B.; Brush, G.S. (2000) - Biogeomorphology of an Upper Chesapeake Bay River-Mouth Tidal Freshwater Marsh. *Wetlands*, 20(3):520-537. doi: 10.1672/0277-5212(2000)020<0520:BOAUCB>2.0.CO;2
- Peck, D. (1999) - Classification system for wetland type. In: *Strategic framework for the list of wetlands of international importance: Key documents of the Ramsar Conventions*, 7th Meeting of the conference of the contracting parties to the convention on wetlands, San Jose, Costa Rica.
- Shafer, D.J.; Roberts, T.H.; Peterson, M.S.; Schmid, K. (2007) - *A Regional Guidebook for Applying the Hydrogeomorphic Approach to Assessing the Functions of Tidal Fringe Wetlands Along the Mississippi and Alabama Gulf Coast*. Ecosystem Management and Restoration Research Program, Report ERDC/EL TR-07-2, 76p. + anexos, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, U.S.A. Disponível em <http://el.ercd.usace.army.mil/elpubs/pdf/trel07-2.pdf>
- Smith, D.R.; Ammann, A.; Bartoldus, C.; Brinson, M.M. (1995) - *An Approach for Assessing Wetland Functions Using Hydrogeomorphic Classification, Reference Wetlands, and Functional Indices*. 71p. + anexos, US Army Corps of Engineers. Waterways Experiment Station. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-9, Vicksburg, MS, U.S.A. Disponível em <http://el.ercd.usace.army.mil/wetlands/pdfs/wrpde9.pdf>
- Suguió, K.; Martin, L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Flexor, J.; Azevedo, A.E.G. (1985) - Flutuações do nível relativo do mar durante o quaternário superior ao longo do litoral Brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências* (ISSN: 2177-4382), 15(4):273-286, São Paulo, SP, Brasil.
- Sutter, L.A.; Stanfill, J.B.; Haupt, D.M.; Bruce, C.; Wuenscher, J.E. (1999) - *NC-CREWS: North Carolina Coastal Region Evaluation of Wetland Significance. A report of the strategic plan for improving coastal management in North Carolina*. 111p., North Carolina Division of Coastal Management, Department of Environment and Natural Resources. Raleigh, NC. Disponível em <http://dcm2.enr.state.nc.us/wetlands/NCCREWSDOC.pdf>
- UNESCO (1998) - *Wetlands of The Humid Tropics. Water - Related Issues and Problems of the Humid Tropics and Other Warm Humid Regions*. 52p., UNESCO, Division of Water Sciences, Humid Tropics Programme Series N° 12, Paris, França. Disponível em <http://unesdoc.unesco.org/images/0011/001160/116084eo.pdf>
- Wardrop, D. H.; Kentula, M.E. Jensen; S.F., Stevens Jr.; D.L.; Hychka, K.C.; Brooks, R.P. (2007) - Assessment of Wetlands in the Upper Juniata Watershed in Pennsylvania, USA Using the Hydrogeomorphic Approach. *Wetlands*, 27(3):432-445. ISSN: 1943-6246 (electronic version) doi: [http://dx.doi.org/10.1672/0277-5212\(2007\)27\[432:AOWITU\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1672/0277-5212(2007)27[432:AOWITU]2.0.CO;2)
- Whigham, D.F.; Jacobs, A.D.; Weller, D.E.; Jordan, T.E.; Kentula, M.E.; Jensen, S.F.; Stevens, D.L. (2007) - Combining HGM and EMAP Procedures to Assess Wetlands at the Watershed Scale — Status of Flats and Non-Tidal Riverine Wetlands in the Nanticoke River Watershed, Delaware And Maryland (USA). *Wetlands* (ISSN: 1943-6246), 27(3):462-478. ISSN: 1943-6246
- Whittecar, G.R.; Daniels, W.L. (1999) - Use of hydrogeomorphic concepts to design created wetlands in southeastern Virginia. *Geomorphology*, 31(3-4):355-371. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00081-1.

Contribuição para o conhecimento da vegetação de restinga de Massarandupió, Município de Entre Rios, BA, Brasil *

Contribution to the knowledge of the vegetation of Massarandupió Restinga, Entre Rios, BA, Brazil

Vanessa Íris Silva da Silva^{@, 1}, Christiano Marcelino Menezes²

RESUMO

As formações de restinga são predominantes por toda a costa brasileira e diversas são as conotações empregadas para essas formações, seja referindo-se à composição vegetal, ou seja, no sentido geológico. A vegetação ocorrente sobre as planícies costeiras brasileiras, onde se enquadram as Restingas, tem recebido um tratamento muito heterogêneo pelos pesquisadores e estudiosos que atuaram ou atuam na área. Diferentes fitofisionomias de restinga podem ocorrer em apenas um trecho da costa brasileira. Apesar da área de estudo se tratar de uma APA – Área de Proteção Ambiental, os estudos sobre a vegetação de restinga são ainda escassos. As regiões litorâneas principalmente as Restingas, vem sofrendo ao longo dos tempos com a degradação e perdas ambientais, devido ao grande e crescente desenvolvimento imobiliário e turístico devido a sua beleza cênica ambiental. O objetivo deste trabalho permeiou em contribuir ao conhecimento da vegetação das restingas do Litoral Norte da Bahia através de análises florísticas e fitossociológicas de um trecho da vegetação em Massarandupió, no município de Entre Rios-BA, Brasil, a fim de subsidiar a indicação de áreas prioritárias para a criação de Unidades de Conservação mais restritivas dentro da APA – Área de Proteção Ambiental do Litoral Norte do Estado da Bahia. Para o levantamento florístico, foram realizadas caminhadas por trilhas escolihas aleatoriamente, enquanto que para a amostragem fitossociológica, apenas foram consideradas as fisionomias lenhosas terrestres (arbustivo-arbórea e arbórea). Nestas foram distribuídas 5 parcelas de 10x10m cada ao longo de transecções de 200m, perfazendo um total de 2000m² de área amostrada. Na fisionomia arbórea foram amostrados todos os indivíduos com CAP \geq 10cm enquanto que para a arbustiva-arbórea, os indivíduos que apresentaram CAS \geq 5cm foram amostrados. Foram coletadas informações sobre o número de indivíduos de todas as espécies incluídas nas parcelas além da estimativa visual das alturas. Foram caracterizadas e identificadas quatro fitofisionomias: a) Manguezal, b) Zonas Úmidas, c) Mata de Restinga, d) Restingas em Moitas e Vegetação Praial. Foram identificadas 136 espécies distribuídas em 59 famílias botânicas, sendo as famílias de maior riqueza específica Cyperaceae (12) Fabaceae (10), Asteraceae (7), Araceae (7) Myrtaceae (5), Rubiaceae (5), Araceae (4), Clusiaceae (4), Poaceae (4) e Melastomataceae (4). Quanto aos dados fitossociológicos, na Mata de Restinga a espécie mais importante é *Coccoloba alnifolia* (VI = 151,90), enquanto que *Alibertia* sp. (VI = 117,95) é espécie mais importante na Restinga em Moitas. Dentre as espécies identificadas a *Poecilanthus itapuanus* e *Bactris soeiroana* são endêmicas para o Litoral Norte do Estado da Bahia, além das espécies ditas focais e com distribuições restritas ao longo do Litoral Brasileiro. Neste sentido é de extrema importância a conservação da vegetação local, haja vista a sua complexidade ecológica e a pressão da implantação de grandes projetos hoteleiros, aspectos relevantes para a delimitação do perímetro das Unidades de Conservação (UC's).

Palavras-chave: Vegetação, Litoral Norte, Planície Costeira.

@ - Corresponding author: vanessaissilva@yahoo.com.br.

1 - Instituto de Geociências – UFBA. Pesquisadora-Colaboradora do Centro de Ecologia e Conservação Animal (ECOA), Campus de Pituvaçu, Av. Prof. Pinto de Aguiar, 2.589 - Pituvaçu, CEP 40.710-000 – Salvador, Bahia, Brasil.

2 - Universidade Católica do Salvador, Departamentos de Botânica e Geografia, UCSal.

ABSTRACT

*Restinga formations are prevalent throughout the Brazilian coast and there are several connotations used for these formations, is referring to the vegetation composition, in other words, in geologic sense. The vegetation found in coastal plains, where restingas are found, has received a very heterogeneous treatment by researchers who have worked or work in the field. Different restinga physiognomies can occur in only a part of the Brazilian coast. Although the study area it is an EPA - Environmental Protection Area, studies about restinga vegetation are still shortage. The coastal regions especially Restingas, has suffered over time with environmental degradation and growing estate development and tourism because of its natural beauty. The objective of this work is to contribute to knowledge about restingas vegetation of the North Coast of Bahia through floristic and phytosociological analysis of the components shrubs - a stretch of arboreal vegetation in Massarandupió in the city of Entre Rios, Bahia, Brazil, in order subsidizing an indication of priority areas for the creation of protected areas within the more restrictive area inside the EPA - Environmental Protection Area of the North Coast of Bahia. For the floristic analysis were performed random walks across the polygon of interest, while for phytosociological sampling, were leased a transect of 200 m with 5 parcels of 10x10m in each for a total of 2000m² samples from the individuals that fit the character selection with CAP ≥ 15cm for trees and shrubs in the areas of Restinga Forest and CAS ≥ 5cm for individuals in the "Restinga's Moita" beyond count of specimens and measurement of visual height. Were characterized and identified four vegetation types. a) Mangrove: Throughout Subaúma River estuarine zone located in the city of Massarandupió, Bahia, Brazil represents one of the main ecosystems of object extraction, and the vegetation characteristic of the species *Rhizophora mangle* and *Laguncularia racemosa* are much more frequent in areas at higher tidal influence; b) Wetlands: In the pleistocene marine terraces can be caused or flood plains of river systems (perennial) or zones of deflation of the dune fields tipe "blowout" (non-perennial systems). In perennial systems that are constantly supplied by continental drainage occurs a peculiar vegetation, with a predominance of herbaceous plants; c) the Restinga Forest: This forest type is associated with older sediments of pleistocene alluvial or occurrence in areas downwind of the dune system "blowout" where local environmental conditions favor the formation of a forest sclerophyllous forest with physiognomy closed with canopy readily apparent with 7-10m in height, in this training is the most common species *Kilmeyera reticulata*, *Coccoloba alnifolia*, *Ouratea suaveolans*, *Myrcia rostrata*; d) in Restingas Clumps: An open physiognomy with vegetation arranged in clumps, or as islands of vegetation interspersed with clean soil, herbaceous or sub-shrub. The bushes mostly have one or a few tree species that can reach up to 4-5 meters high, they almost always prominent in a central position in the bush as *Clusia hilariana*, *Manilkara salzmanii*, *Emmotum affine* and *Coccoloba alnifolia* that suggesting function facilitator e) Vegetation Praia: here we found a small number of species, small and creeping appearance, being somewhat variable in width, generally not exceeding 50m extension on cord on the dunes and dune-front locations. Some shrubs occur as *Chrysobalanus icaco*. As regards the provision of the species, would *Remirea maritima* and *Panicum racemosum*, both stoloniferous, with *Marsypianthes chamaedrys*, *Panicum racemosum* and *Chamaesyce hyssopifolia* are common throughout the cord-dune. *Ipomoea pes-capre* and *Ipomoea stolonifera* near the line of the beach, usually not exceeding in the first 25m from the beginning of the vegetation toward the mainland. In floristic analysis 124 species were identified, that the richest families are *Cyperaceae* (11), *Fabaceae* (10), *Asteraceae* (7), *Arecaceae* (6) *Myrtaceae* (5), *Rubiaceae* (5), *Araceae* (4), *Clusiaceae* (4) and *Melastomataceae* (4). For the phytosociological information, especially in Restinga Forest, the most important species are *Coccoloba alnifolia* (VI = 151.90), while *Alibertia* sp. (VI = 117.95) is the most important species in restinga bushes. In compilations where floristic and phytosociological demonstrate the connectivity of the vegetation types, vegetation characteristics for both in size and species, as described by the geomorphology of the area. Among the species identified *Bactris soeiroana* and *Poecilanthe itapuana* are endemic to the northern coast of Bahia, in addition to said focal species and restricted distributions along the Brazilian coast. In this regard it is of utmost importance to conservation of local vegetation, due to their ecological complexity and pressure of the deployment of large hotel projects, aspects relevant to the delimitation of the boundaries of Conservation Units (CUs).*

Keywords: Vegetation, North Coast, Coastal Plain.

1. INTRODUÇÃO

As formações de restinga são predominantes por toda a costa brasileira e diversas são as conotações empregadas para essas formações, seja referindo-se à composição vegetal, ou seja no sentido geológico (Suguió & Tessler, 1984).

Uma variedade de ecossistemas e habitats compõe as restingas do Litoral Norte do Estado da Bahia, contudo os estudos não são convergentes para essa região. Pinto *et al.* (1984), Dias & Menezes (2007), Menezes (2007) e Queiroz *et al.* (2005) foram alguns dos poucos estudos florísticos e fisionômicos voltados para a costa norte do Estado da Bahia, enquanto que Menezes *et al.* 2007, Silva & Menezes (2007a, 2007b), realizaram trabalhos de manejo desse tipo de vegetação. Menezes *et al.* (2007), para a mesma região, consideraram oito fitofisionomias distintas, classificadas com base nas terminologias empregadas em outros estudos sobre vegetação de restinga no Brasil (Araújo & Henriques

1984; Henriques *et al.*, 1986; Silva, 1998; Assumpção & Nascimento, 2000).

A vegetação ocorrente sobre as planícies costeiras brasileiras, onde se enquadram as restingas, tem recebido um tratamento muito heterogêneo pelos pesquisadores e estudiosos que atuaram ou atuam na área. Esta heterogeneidade manifesta-se tanto nas abordagens dos estudos realizados, como no maior ou menor esforço de investigação em uma área específica, muitas vezes de abrangência geográfica restrita. Na literatura concernente à costa brasileira podem ser encontrados relatos genéricos sobre os principais aspectos fitofisionômicos dos seus diferentes tipos vegetacionais, listagens e descrições detalhadas de diferentes regiões do litoral, e ainda propostas de mapeamento e denominação das suas diferentes formações ou comunidades vegetacionais (Silva, 1998).

Para Ormond (1960), as restingas constituem-se em inúmeras formações vegetacionais de características próprias,

a partir de uma relação particular com o ambiente. Essa heterogeneidade vegetal observada nas restingas é também considerada por Rizzini (1997) ao utilizar o termo “complexo da restinga”, demonstrando a complexidade de formações. Para Peixoto *et al.* (2005), a vegetação está relacionada com a temperatura; no entanto, sabe-se que o solo é crucial para a composição vegetal de restingas e com a formação praial, que sofre com o déficit hídrico e com a proximidade com o mar. Um grande incremento do porte dos indivíduos nesse tipo de vegetação é indicado por Menezes *et al.* (2007), além de apontar que o sistema de dunas “blowout” é controla a origem e diferenciação das fitofisionomias locais.

O objetivo deste trabalho visou contribuir com o conhecimento da vegetação de um trecho da Restinga de Massarandupió, no município de Entre Rios-BA, Brasil, a fim de subsidiar a indicação de áreas prioritárias para a criação de Unidades de Conservação no Litoral Norte do Estado da Bahia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

- Área de estudo:

O Litoral Norte da Bahia apresenta cerca de 200km de restinga inserida na Área de Proteção Ambiental – APA do Litoral Norte, localizado aproximadamente entre os paralelos 11°30' e 13°00'S e meridianos de 37°20' e 38°00'W, é considerado do ponto de vista climático, como uma área quente-úmida, de relativa homogeneidade, caracterizando-se por apresentar médias térmicas elevadas, e altos índices pluviométricos distribuídos regularmente ao longo de todos os meses do ano. Os índices pluviométricos anuais variam espacialmente de sul para o norte e situam-se entre 2.000mm a 1.200mm a respectivamente. Os ventos dominantes sopram de sudeste (SE), registrando-se ainda fluxos de leste (E) e nordeste (NE) no verão (Gonçalves, 1991 *apud* Lyrio 1996). Cerca de 75% dos ventos são de NE-E-SE sendo que deste percentual, 18% de NE e 47% de E, principalmente na primavera-verão, enquanto que durante o outono-inverno, época da chegada das frentes frias na região, os ventos predominantes são os de SSE. O município de Entre Rios-BA (UTM 622178/ 8634251) representa para a região relevante importância turística, haja vista a grande variedade de ambientes naturais.

- Delineamento Amostral:

Para a análise fitossociológica, apenas foram consideradas as formações lenhosas terrestres (arbustivo-arbórea e arbórea). Nestas foram distribuídas 5 parcelas de 10x10m cada, ao longo de transecções de 200m, perfazendo um total de 2000m² de área amostrada. Na formação arbórea foram amostrados todos os indivíduos com Circunferência a Altura do Peito (CAP) ≥10cm, enquanto que para a arbustiva-arbórea, os indivíduos que apresentaram Circunferência a Altura do Solo (CAS) ≥5cm foram amostrados (Figura 2). A definição dos critérios de inclusão nas amostragens, se baseou nos conceitos de Taxocenose descritos por Scudeller *et al.* (2001), que sugere que os trabalhos fitossociológicos feitos no Brasil considerem a comunidade (taxocenose) de arbustos e ou árvores ou comunidade (taxocenose) de subarbustos e ou ervas.

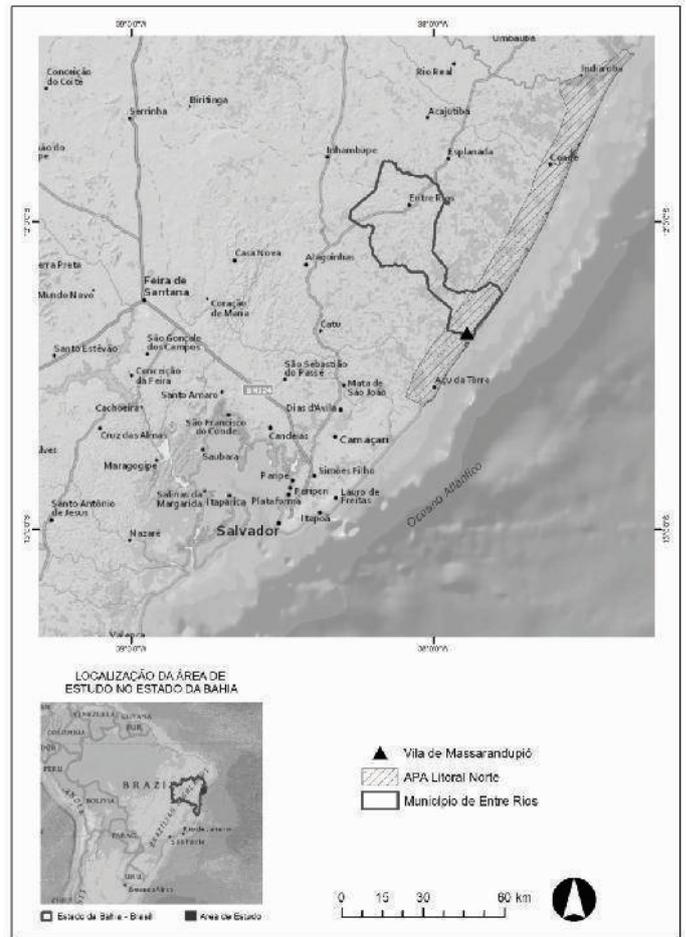


Figura 1. Localização de Massarandupió (local de estudo), na APA do Litoral Norte da Bahia.

Figure 1. Location of Massarandupió (study site), the APA of the North Coast of the Bahia.

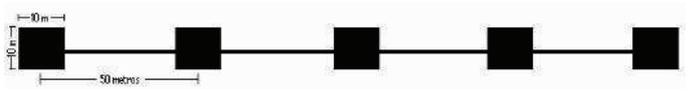


Figura 2. Distribuição das parcelas ao longo do transecto de 200m.

Figure 2. Distribution of plots along the transect of 200m.

- Parâmetros Fitossociológicos:

Para cumprimento dos objetivos, escolheu-se traçar os parâmetros fitossociológicos básicos, pois estes fornecem a relação das espécies mais abundantes com a composição destas na comunidade como um todo. Essa base descritiva permite não só uma estimativa da diversidade como também um diagnóstico rápido, informações imprescindíveis tanto para a bioprospecção quanto para a conservação.

Os parâmetros fitossociológicos calculados foram: Densidade Absoluta e Relativa (DA e DR), Dominância Absoluta e Relativa (DoA e DoR), Freqüência Absoluta e Relativa (FA e FR), Índice de Valor de Importância (IVI) e o Quociente de Mistura (QM). Os valores relativos de dominância (cobertura), densidade e freqüência foram utilizados para determinar o VI (Martins, 2006). Segundo



Figura 3. Demarcação de parcela (à esquerda) e coleta de circunferência (CAS) (à direita) para estudo quantitativo na formação aberta em moitas.
Figure 3. Demarcation of plots (left) and collection of a circle (CAS) (right) for a quantitative study on the formation open shrublands.

Mueller-Dombois & Ellenberg (1974), qualquer um dos três parâmetros – Densidade, Dominância, Freqüência – pode ser interpretado como Valor de Importância (VI), já que é o investigador quem determina qual destes é o mais importante para alcançar os objetivos da pesquisa. Neste caso o VI é a soma dos valores relativos das três variáveis. Os dados da fitossociologia coletados foram tabulados utilizando o programa Microsoft Excel.

-Identificações Florísticas

Para a identificação das espécies foram realizadas caminhadas aleatórias por trilhas pré-existent, de forma que todas as formações fossem contempladas. As coletas de material botânico se restringiram apenas aos espécimes que se encontravam férteis e não identificados em campo, sendo estes prensados segundo as técnicas usuais (Bridson & Forman, 1992). Todo o material coletado foi triado e herborizado no Laboratório do Centro de Pesquisa em Ecologia e Conservação Animal da Universidade Católica do Salvador (UCSal/ECO) para posteriores identificações e adensamento da coleção de referência do Herbário RADAMBRASIL do Jardim Botânico de Salvador - Mata dos Oitis (JBSSA). Os espécimes, quando possível, foram identificados em campo e neste caso com o uso de bibliografias específicas (Barroso, 1978, Lorenzi, 2002, Souza & Lorenzi, 2005). A revisão nomenclatural foi baseada nas informações contidas no site International Plant Names Index (<http://www.ipni.org/ipni/plantnamesearchpage.do>), enquanto que para a classificação dos taxa foi utilizado o Sistema de Cronquist (1981).

Para a identificação de espécies ameaçadas, foram utilizadas as listas oficiais do IBAMA (<http://www.ibama.gov.br>) e da IUCN (<http://www.iucnredlist.org>), que incluem distintas categorias de ameaça.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A diversidade de ambientes ao longo das planícies arenosas do litoral brasileiro suporta uma vegetação com características distintas entre si, no que se reflete em fisionomias vegetacionais complexas e dinâmicas. A deposição de areia pelo mar, as tempestades, as correntes litorâneas e os ventos modelaram uma topografia complexa e diversificada que pode assumir a forma de altas barreiras que bloqueiam a foz dos rios ou separam lagunas do mar, de dunas móveis ou ainda de planícies de cordões arenosos de relevo pouco acidentado. Esses depósitos arenosos são em geral cobertos por vegetação muito diversificada, e a esse conjunto de formações geomorfológicas e as diferentes comunidades biológicas (Lacerda *et al.*, 1982).

- Florística:

Foram identificadas 136 espécies distribuídas em 59 famílias botânicas, sendo as famílias de maior riqueza específica Cyperaceae (12) Fabaceae (10), Asteraceae (7), Arecaceae (7) Myrtaceae (5), Rubiaceae (5), Araceae (4), Clusiaceae (4), Poaceae (4) e Melastomataceae (4). Os dados encontrados nos estudos de Assumpção & Nascimento (2000), Araújo & Henriques (1984) afirmam que Myrtaceae, Rubiaceae e Fabaceae são as famílias mais comuns tanto nas restingas quanto em outras composições vegetacionais de Mata Atlântica, onde assemelham-se aos resultados obtidos no presente estudo que demonstra a importância dessas famílias nas formações arbustivas e arbóreas para as Restingas Brasileiras.

As restingas há muito vêm sendo estudadas principalmente pelos profissionais das áreas da geologia e da botânica. De fato a paisagem dominante é caracterizada por uma variedade de depósitos arenosos costeiros, e diversas fisionomias vegetacionais aí instaladas. A vegetação se apresenta com fisionomias herbáceas até florestas com

árvores podendo alcançar até trinta metros de altura. Dados representados na riqueza das famílias, que vão do herbáceo, as Cyperaceas nas zonas úmidas, como as Fabaceae e Myrtaceae nas Matas de Restingas, em destaque as Clusiaceae das áreas de Restingas em Moitas, além das Melastomataceae, família que caracterizam áreas onde a sua preservação original foi perdida, compilando ai um complexo de fitofisionomias interconectadas.

Tabela 1. Lista das espécies identificadas na área de estudo.
Table 1. List of species identified in the study area.

Família	Espécie
Anacardiaceae	<i>Anacardium occidentale</i> L.
	<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi
	<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.
Annonaceae	<i>Annona glabra</i> L.
Apocynaceae	<i>Hancornia speciosa</i> Gomez
	<i>Hymatanthus sucuuba</i> (Spruce) Woods.
Araceae	<i>Anthurium affine</i> Schott
	<i>Montrichardia arborescens</i> Schott
	<i>Philodendron acutatum</i> Schott
	<i>Philodendron imbe</i> Schott
Arecaceae	<i>Allagoptera brevicalyx</i> M.Moraes
	<i>Atallea funifera</i> Mart. ex. Spreng.
	<i>Cocos nucifera</i> L.
	<i>Bactris soeiroana</i> Noblick ex A.J. Henderson
	<i>Bactris setosa</i> (Mart.)
	<i>Syagrus coronata</i> (Mart.) Becc.
Asteraceae	<i>Syagrus schizophylla</i> (Mart.) Glassman
	<i>Acriptotopus confertus</i> (Gardner) R.M. King & Robins
	<i>Ageratum conyzoides</i> L.
	<i>Calea</i> sp.
	<i>Conyza sumatrensis</i> (Retz.) E. Walker
	<i>Elephantopus hirtiflorus</i> DC.
Avicenniaceae	<i>Sphagneticola trilobata</i> (L.) Pruski
	<i>Vernonia cotoneaster</i> Less.
	<i>Avicennia schaueriana</i> Stapf & Leechm. ex Moldenke
	<i>Blechnum serrulatum</i> Rich.
Blechnaceae	
Bonnetiaceae	<i>Bonnetia stricta</i> Mart.
Boraginaceae	<i>Cordia nodosa</i> Lam.
Bromeliaceae	<i>Aechmea multiflora</i> L.B.Smith
	<i>Hohenbergia littoralis</i> L. B. Smith
Bursereae	<i>Protium bahianum</i> D.C.Daly
	<i>Protium heptaphyllum</i> (Aubl.) March.
Cactaceae	<i>Cereus pernambuensis</i> Lam.
	<i>Melocactus violaceus</i> Pfeiffer

As características dos depósitos arenosos quaternários ao longo da costa brasileira variam de acordo com sua origem que por sua vez, determina características edáficas muito importantes para o desenvolvimento das plantas como, por exemplo, a textura do substrato, ou pelas suas distintas fisiografias e topografias, fatores estes muito influentes no desenvolvimento das espécies vegetais de Restinga (Rizzini, 1997; Waechter, 1995).

Tabela 1. Continuação.
Table 1. Continuation.

Caesalpiniaceae	<i>Bauhinia</i> sp.
	<i>Chamaecrista ramosa</i> (Vog.) Irwin & Barneby
	<i>Senna</i> sp.
Celastraceae	<i>Maytenus</i> sp.
Chrysobalanaceae	<i>Chrysobalanus icaco</i> L.
	<i>Hirtella ciliata</i> Mart. & Zucc.
Clusiaceae	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess
	<i>Clusia hilariana</i> Schltdl.
	<i>Kielmeyera reticulata</i> Saddi
	<i>Vismia guianensis</i> DC.
Combretaceae	<i>Conocarpus erectus</i> L.
	<i>Laguncularia racemosa</i> C.F.Gaertn.
Commelinaceae	<i>Commelina</i> sp.
Convolvulaceae	<i>Ipomoea pes-caprae</i> (L.) R.Br.
	<i>Ipomoea stolonifera</i> J.F.Gmel.
Cyperaceae	<i>Cyperus</i> sp.
	<i>Cyperus distans</i> Beyr. ex Kunth
	<i>Cyperus amabilis</i> Vahl.
	<i>Cyperus exaltatus</i> Sol. ex Kunth
	<i>Cyperus rigidus</i> Vahl
	<i>Eleocharis interstincta</i> (Vahl) Roem & Schult
	<i>Fimbristylis cymosa</i> R.Br.
	<i>Fuirena umbellata</i> Rottb.
	<i>Killingia</i> sp.
	<i>Remirea maritima</i> Aubl.
Dilleniaceae	<i>Rhynchospora exaltata</i> Kunth
	<i>Scleria secans</i> (L) Urb.
	<i>Davilla flexuosa</i> St. Hil.
	<i>Curatella americana</i> L.
Eriocaulaceae	<i>Sygonanthus imbricatus</i> (Koenr.) Kuhl
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum passerinum</i> Mart.
Euphorbiaceae	<i>Croton selowii</i> Baillon
	<i>Chamaesyce</i> sp.

Tabela 1. Continuação.
Table 1. Continuation.

Fabaceae	<i>Andira nitida</i> Mart.
	<i>Bowdichia virgilioides</i> Kunth
	<i>Inga affinis</i> DC.
	<i>Inga capitata</i> Desv.
	<i>Inga fagifolia</i> Willd.
	<i>Macrobium latifolium</i> Vog.
	<i>Poecilanthe itapuana</i> G.P.Lewis
	<i>Rynchosia</i> sp.
	<i>Stylosanthes viscosa</i> SW.
<i>Swartzia apétala</i> Raddi	
Guttiferae	<i>Clusia hilariana</i> Schleich.
Icacinaceae	<i>Emmotum affine</i> Miers
Krameriaceae	<i>Krameria spartiodes</i> Klotzsch ex. O. Berg.
Lamiaceae	<i>Marsypianthes chamaedrys</i> Kuntze
Lauraceae	<i>Ocotea notata</i> (Nees) Mez
Lecythidaceae	<i>Eschweilera ovata</i> (Cambess.) Miers.
	<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.
Lentibulariaceae	<i>Utricularia subulata</i> L.
Loranthaceae	<i>Strutanthus</i> sp.
Lythraceae	<i>Cuphea brachiata</i> Mart. ex Koehne
	<i>Cuphea flava</i> Spreng.
Malpighiaceae	<i>Byrsonima blanchetiana</i> Miq.
	<i>Byrsonima sericea</i> DC.
	<i>Stigmaphyllon paralias</i> Juss.
Melastomataceae	<i>Comolia ovalifolia</i> (DC.) Triana
	<i>Clidemia hirta</i> (L.) D. Don
	<i>Miconia albicans</i> Steud.
	<i>Tibouchina</i> sp.
Mimosaceae	<i>Mimosa pudica</i> L.
	<i>Stryphnodendron pulcherrimum</i> (Willd.) Hochr.
Musaceae	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f.
Myrtaceae	<i>Calycolpus legrandii</i> Mattos
	<i>Eugenia</i> sp.
	<i>Myrcia rostrata</i> DC.
	<i>Myrcia</i> sp.
	<i>Myrciaria floribunda</i> O. Berg
Nyctaginaceae	<i>Guapira pernambucensis</i> (Casar.) Lundell
Nymphaeaceae	<i>Nymphaea rudgeana</i> G. Mey.
Ochnaceae	<i>Ouratea suaveolans</i> (St. Hil.) Engler
Orchidaceae	<i>Epidendrum cinnabarinum</i> Salzm. ex Lindl.
	<i>Vanilla babiliana</i> Hoehne
Poaceae	<i>Panicum racemosum</i> Spreng.
	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) K. Richt.
	<i>Sporobolus virginicus</i> Kunth
	<i>Trachypogon spicatus</i> Kunth

Tabela 1. Continuação.
Table 1. Continuation.

Polygalaceae	<i>Polygala cyparissias</i> St. Hil.
	<i>Polygala</i> sp.
Polygonaceae	<i>Coccoloba alnifolia</i> Casar
	<i>Coccoloba laevis</i> Casar.
	<i>Coccoloba</i> sp.
Pteridaceae	<i>Acrostichum aureum</i> L.
Rhizophoraceae	<i>Rhizophora mangle</i> L.
Rubiaceae	<i>Alibertia</i> sp.
	<i>Borreria verticillata</i> G.Mey.
	<i>Guettarda platypoda</i> DC.
	<i>Tocoyena formosa</i> (Cham. et Schldl.) K. Shum.
	<i>Psicobrya</i> sp.
Rutaceae	<i>Esenbeckia grandiflora</i> Mart.
Sapotaceae	<i>Manilkara salzmanii</i> (A DC.) Lamarck
	<i>Pouteria grandiflora</i> (A. DC.) Baehni
Scrophulariaceae	<i>Angelonia cornigera</i> Hook. f.
Smilacaceae	<i>Smilax</i> sp.
Solanaceae	<i>Schwenckia</i> sp.
	<i>Solanum auriculatum</i> Mart. ex Dun.
Typhaceae	<i>Typha angustifolia</i> L.
Verbenaceae	<i>Lantana radula</i> Sw.
	<i>Diospyrus</i> sp.
Vochysiaceae	<i>Vochysia tucanorum</i> Mart.
Xyridaceae	<i>Xyris</i> sp.

a) Manguezais: Este ocorre ao longo de toda zona estuarina do Rio Subaúma localizado no Município de Massarandupio, sendo um dos principais ecossistemas objeto de extrativismo na região. Quanto a sua vegetação, *Rhizophora mangle* L. e *Laguncularia racemosa* C.F.Gaertn. são as espécies mais frequentes nas zonas sob maior influência da maré (Figura 4), enquanto que *Avicennia shaueriana* nas zonas sob menos influência e *Conocarpus erectus* com ocorrência mais restrita às zonas de transição. *R. mangle*, e *L. racemosa* são as espécies dominantes e formam um dossel denso com cerca de 15 m de altura, sendo que alguns indivíduos podem alcançar até 20 m de altura. Parte do manguezal encontra-se em transição com a zona úmida. Nestes trechos, onde a influência salina é menor, é comum a ocorrência de espécies herbáceas tipicamente dulcícolas como *Eleocharis interstincta*.

b) Zonas Úmidas: Essas podem ter origem ou da inundação das planícies fluviais (sistemas perenes) ou das zonas de deflação dos campos de dunas tipo “blowout” (Dominguez, 2004) (sistemas não perenes). Nos sistemas perenes que, se encontram constantemente abastecidos pela drenagem continental ocorre uma vegetação peculiar, com predomínio de plantas herbáceas, de pequeno porte, onde o “junco” *Eleocharis interstincta* é muito comum,

assim como *Thypha angustifolia* e *Cyperus rigidus*, *Cyperus* sp., *Nymphaea rudgeana*, dentre as espécies arbóreas se destacam, o “musserengue” (*Bonnetia stricta*) e o “araticum-de-brejo” (*Annona glabra*) principalmente nos sistemas perenes. Os sistemas não perenes que se encontram associados às zonas de deflação no campo de dunas, que durante os meses de chuvas apresentam afloramento do lençol freático, tendo como espécies mais comuns, *Schwenckia* sp., *Comolia ovalifolia* e uma espécie da família Eriocaulaceae (ainda não identificada) *Cuphea flava* e *Borreria verticillata*. Neste sistema *Conocarpus erectus*, *Myrcia* sp. e *Tocoyena formosa* se desenvolvem em moitas intercaladas com vegetação herbácea.

c) Mata de Restinga: Este tipo vegetacional se encontra associado a sedimentos mais antigos dos Leques Aluviais Pleistocênicos ou de ocorrência em áreas a sotavento do sistema de dunas “blowout” (Dominguez, 2004; Menezes *et al.* 2007), onde as condições ambientais locais favorecem a formação de uma floresta esclerófila de fitofisionomia florestal fechada de dossel com 7 - 10m de altura aproximadamente, nesta formação as espécies mais comuns são: *Kielmeyera reticulata*, *Coccoloba alnifolia*, *Coccoloba* sp., *Ouratea suaveolans*, *Myrcia rostrata*, *Myrcia* sp. *Calycolpus legrandi*, *Anacardium occidentale*, *Manilkara salzmanii*, *Lecythis pisonis*, *Byrsonima sericea*, *Emmotum affine*, *Hirtella ciliata* e *Pouteria grandiflora*. *Scleria secans* e *Davilla flexuosa* encontram-se associadas a áreas mais abertas, enquanto *Anthurium affine* encontra-se associada ao sub-bosque.

e) Vegetação Praia: Nesta se encontra número reduzido de espécies, de pequeno porte e de aparência rasteira, sendo de largura pouco variável, não ultrapassando geralmente de 50m de extensão sobre o cordão-duna e dunas frontais locais. Ocorrem alguns arbustos como *Chrysobalanus icaco*. Quanto à disposição das espécies, *Remirea maritima* e *Panicum racemosum*, ambas estoloníferas, juntamente com *Marsypianthes chamaedrys* e *Chamaesyce hyssopifolia* são comuns ao longo de todo o cordão-duna. *Ipomoea pes-capre* e *Ipomoea stolonifera* próxima à linha de praia, não ultrapassando geralmente nos primeiros 25m a partir do início da vegetação e em direção ao continente. *Polygala* sp., *Sporobolus virginicus*, *Commelina* sp., *Dactyloctenium aegyptium* e *Chamaecrista ramosa* só foram observadas nas porções voltadas para o continente. Na formação praial, é marcante a presença do coco-da-baia, *Cocos nucifera*, espécie característica e intimamente associada à vegetação litorânea da Bahia.

- Fitossociologia:

A fitossociologia é uma ferramenta que detalha a distribuição dos indivíduos e espécies no plano horizontal e o gradiente de relacionamento no sentido vertical, é incrementado com os dados referentes a distribuição diamétrica, análise de agrupamentos de parcelas e espécies e associação interespecífica.

Nas análises verticais, no que se refere ao Quociente de mistura (QM) de *Jentisch*, que demonstra a relação entre o número de indivíduos e o número de espécies encontradas na



Figura 4. *Laguncularia racemosa* (a esquerda) e *Rhizophora mangle* (a direita), espécies dominantes no manguezal local.

Figure 4. *Laguncularia racemosa* (left) and *Rhizophora mangle* (right), the dominant species in the mangrove site



Figura 5. Zonas Úmidas em Zona de Deflação do campo de Dunas *Blowout*.
Figure 5. Wetlands in Deflation Zone et the *Blowout* dune field.



Figura 6. Aspecto do dossel da mata de restinga que se desenvolve a sotavento do sistema de dunas “*blowout*”.
Figure 6. Aspect of the canopy of the *Restinga* Forest et the lee of the *Bloecout* dune system.



Figura 7. Aspecto do interior da Mata de restinga, Massarandupio-BA.
Figure 7. Aspect of the interior of the *Restinga* Forest.



Figura 8. Aspecto da vegetação sobre o cordão-duna, denominada de Vegetação Praial (à esquerda) e em detalhes a espécies *Chrysobalanus icaco* (à direita).

Figure 8. Appearance of vegetation on the dune-strand, called Vegetation Praial (left) and details *Chrysobalanus icaco* species (right).

amostragem e a representação feita em forma de fração, visto que para interpretar o índice diz-se para quantos indivíduos há uma espécie diferente. Portanto para Mata de Restinga foi de 0,406, ou 1/2,46 e para as Restingas em Moitas de 0,480, ou 1/2,08, o que significa que para cada 2,0 a 2,50 indivíduos nas Restingas, é possível de se encontrar uma espécie diferente, dados refletidos em uma heterogeneidade vegetacional dentro das formações, seja ela, Mata ou Moita. Para os indícios sobre o estágio sucessional dos dois estratos (Mata e Moita).

Nas análises das distribuições de classes de diâmetro dos indivíduos das fisionomias estudadas (Figura 09), a maioria dos indivíduos, 41% e 27% na Restinga em Moitas e 39% e 24% na Mata de Restinga está concentrada na segunda e terceira classe representada na Figura 09, o que de acordo com Silva Júnior & Silva (1988), corresponde a populações em fase de inicial a médio de estabelecimento. Considerando-se as alturas (Figura 10), pode-se observar que os indivíduos da Mata de Restinga estão entre duas classes de altura (2,1-4 a 4,1-6m de altura), mas em um número pouco expressivo de indivíduos nos segmentos de maiores alturas (6,1-8m), o que indica que essa vegetação não forma um dossel tão regular, e sim que os indivíduos mais altos têm alturas diferentes. Para a Restinga em Moitas, também em duas classes (0-2,0m a 2,1-4m), as espécies com maior número de indivíduos dentro das classes, *Alibertia edulis* e *Coccoloba alnifolia*, com exceção para a espécie *Clusia hilariana*, única espécie com média de 3,5m de altura, característica esta importante na sua provável atuação focal (posicionamento em destaque na moita) (Menezes *et al.*, 2012).

a) Mata de Restinga: Os dados florísticos estão em concordância com os dados da fitossociologia da Mata de Restinga que aponta como espécies de maior valor de importância (VI) *Coccoloba alnifolia*, (151,90) da família Polygonaceae e *Myrcia rostrata* (36,89), das Myrtaceae.

No amostrado em relação a sua estrutura horizontal, a *Coccoloba alnifolia*, apresentou os maiores valores de Dominância Absoluta e Relativa (DoA e DoR), com cerca de 72,97% da dominância total. *C. alnifolia*, Indet 01 e *Myrcia rostrata* se destacam como as espécies com maiores densidades, apresentando 32,4%, 16,2% e 16,2% de Densidade Relativa (DR), respectivamente. *Myrcia* sp., juntamente com as três espécies citadas acima são as mais frequentes, com 50% da frequência total. Sendo que *C. alnifolia* obteve o maior Valor de Importância (VI).

b) Restinga em Moitas: No estudo fitossociológico, *Alibertia* sp. se destacou com 9,95 da DoA, com os maiores valores de CAS. *Alibertia* sp., *Coccoloba alnifolia*, *Clusia hilariana* e *Protium bahianum* apresentaram 15,79%, 15,79%, 10,53% e 15,79% de FR, respectivamente, além das maiores densidades, dentre as espécies amostradas. *Alibertia* sp. apresentou o maior índice de valor de importância (IVI), 0,99, representando 30% do IVI. As moitas em sua grande maioria apresentam uma ou poucas espécies arbóreas que podem atingir até 4-5 metros de altura, estas quase sempre em posição central e destacada na moita como: *Clusia hilariana*, *Manilkara salzmanii* (“massaranduba-de-praia”), *Emmotum affine* (“aderno”) e *Coccoloba alnifolia* (“buji”), o que sugere atuação focal. As demais espécies que compõem as moitas são frequentemente melhor representadas por indivíduos arbustivos como: *Syagrus schizophylla*, *Chamecrista ramosa*, *Maytenus* sp., *Davilla flexuosa*, *Diospyrus* sp., *Cuphea brachiata*, *Byrsonima blanchetiana*, *Guettarda platypoda* e *Guapira pernambucensis*

Na área de estudo, esta fisionomia se desenvolve sobre o Terraço Marinho Pleistocênico, recobrimdo grande parte da zona de deflação do sistema de dunas “blowout” e intercaladas pelas zonas úmidas não perenes.

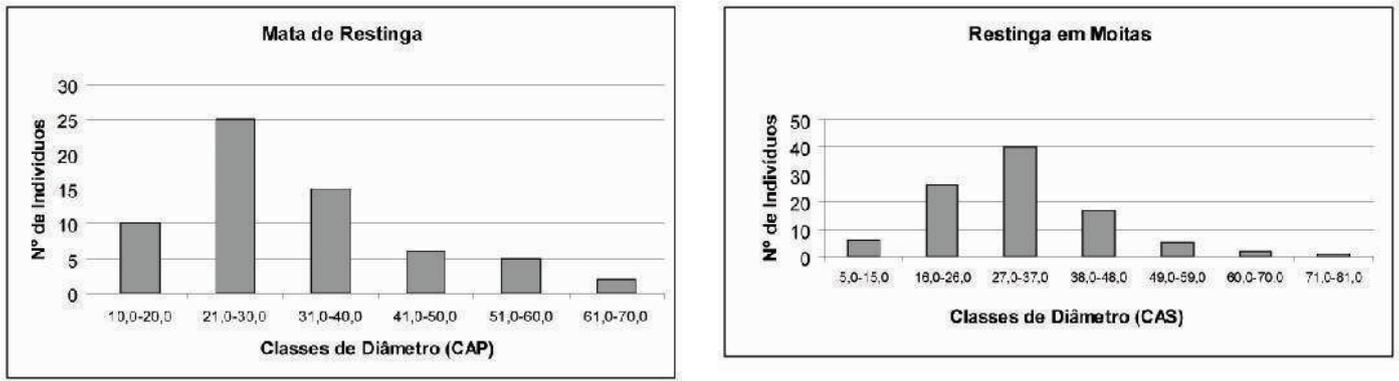


Figura 9. Classes de diâmetro (cm) dos indivíduos das áreas estudadas (Mata de Restinga e Restinga em Moitas) na localidade de Massarandupio-BA.

Figure 9. Diameter classes (cm) of the subjects of the study areas (Forest of Restinga Restinga and shrublands) in the town of Massarandupió-BA

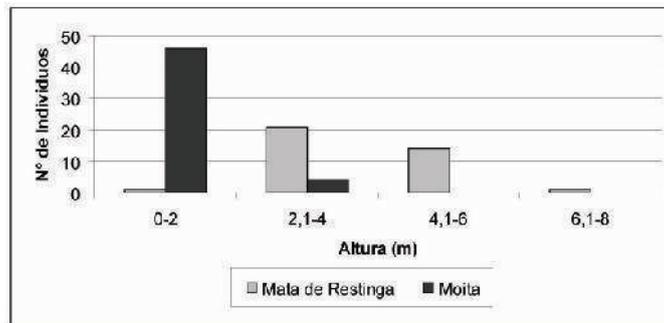
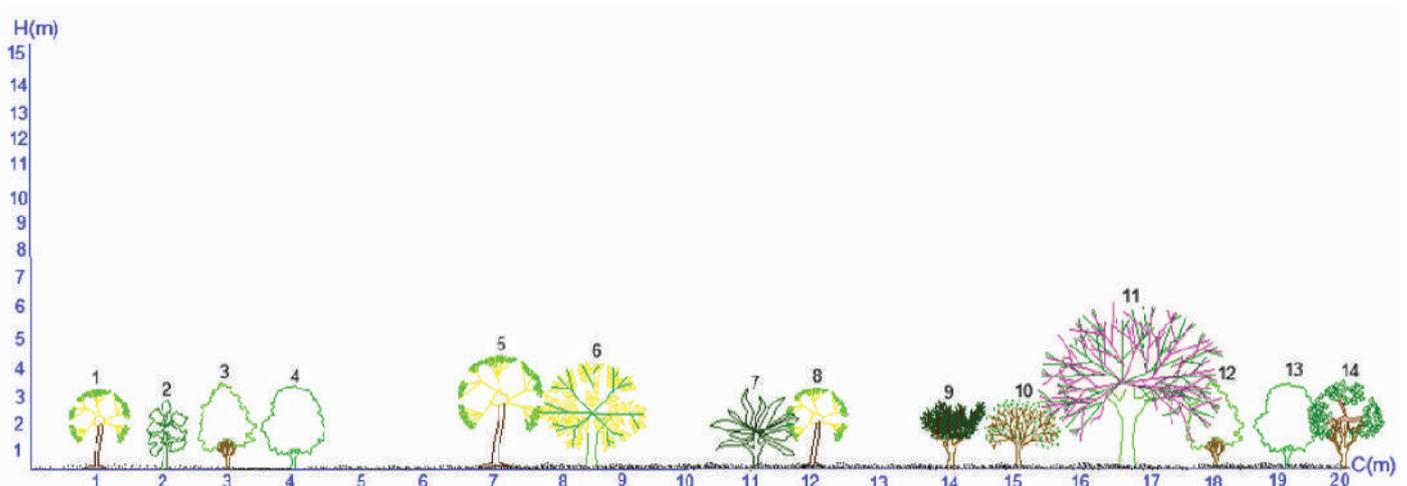


Figura 10. Altura (m) dos indivíduos amostrados na área (Mata de Restinga e Moita) na localidade de Massarandupio-BA.

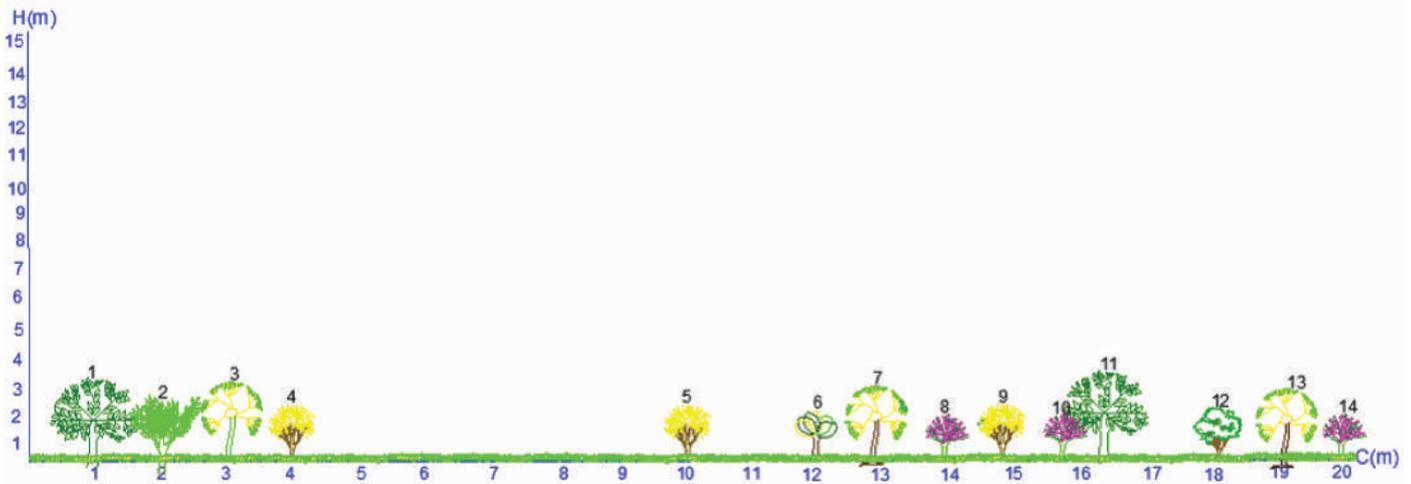
Figure 10. Height (m) of the individuals in the area (Forest of Restinga and Moita) in the town of Massarandupió-BA.



LEGENDA: 1 - Coccoloba alnifolia, 2 – Ouratea notata., 3 – Myrcia sp., 4 - Myrcia rostrata, 5 - Coccoloba alnifolia, 6 - Coccoloba leavis, 7 - Calycopus legrandii, 8 - Cocoloba alnifolia, 9 – Kielmeyera reticulata, 10 - Anacardium occidentale, 11 - Myrcia sp., 12 - Manilkara salzmanii, 13 - Myrcia rostrata, 14 - Lecythis pisonis.

Figura 11. Perfil Esquemático da Vegetação Mata de Restinga na área de estudo. Massarandupio-BA, Brasil.

Figure 11. Schematic profile of the Restinga Forest Vegetation in the study area. Massarandupió, Bahia, Brazil.



LEGENDA: 1 - *Clusia hilariana*, 2 - *Guapira, pernambucensis*, 3 - *Coccoloba alnifolia*, 4 - *Alibertia* sp., 5 - *Alibertia* sp., 6 - *Emmotum affine*, 7 - *Coccoloba alnifolia*, 8 - *Protium bahianum*, 9 - *Alibertia* sp., 10 - *Clusia hilariana*, 11 - *Protium bahianum*, 12 - *Byrsonima blanchetiana*, 13 - *Coccoloba alnifolia*, 14 - *Protium bahianum*.

Figura 12. Perfil Esquemático da Vegetação Restinga em Moitas na área de estudo. Massarandupio-BA, Brasil.

Figure 12. Schematic profile of the Restinga Vegetation in thickets in the study area. Massarandupio, Bahia, Brazil.

Tabela 2. Parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas na Mata de Restinga em Massarandupio, Entre Rios, Bahia, Brasil. FA – Freqüência Absoluta; FR – Freqüência Relativa; DA – Densidade Absoluta; DR – Densidade Relativa; DoA – Dominância Absoluta; DoR – Dominância Relativa; VI – Valor de Importância.

Table 2. Phytosociological parameters of the species in the Mata de Restinga in Massarandupio, Entre Rios, Bahia, Brazil. FA - Frequency Absolute; FR - Relative Frequency; DA - Absolute Density; DR - Relative density; DoA - Absolute Dominance, Pain - Relative Dominance VI - Importance Value.

Espécies	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVI
<i>Coccoloba alnifolia</i>	0.024	32.43%	34.28	72.97%	0.60	16.67%	122
Indet 01	0.012	16.22%	7.71	16.40%	0.40	11.11%	44
<i>Myrcia rostrata</i>	0.012	16.22%	0.74	1.57%	0.40	11.11%	29
<i>Myrcia</i> sp.	0.004	5.41%	0.16	0.35%	0.40	11.11%	17
<i>Ouratea</i> sp.	0.004	5.41%	1.47	3.12%	0.20	5.56%	14
<i>Calycolpus legrandii</i>	0.004	5.41%	0.61	1.30%	0.20	5.56%	12
Indet 02	0.002	2.70%	0.76	1.61%	0.20	5.56%	10
<i>Coccoloba</i> sp.	0.002	2.70%	0.74	1.57%	0.20	5.56%	10
<i>Lecythis pisonis</i>	0.002	2.70%	0.24	0.52%	0.20	5.56%	9
<i>Kielmeyera reticulata</i>	0.002	2.70%	0.12	0.25%	0.20	5.56%	9
<i>Anacardium occidentales</i>	0.002	2.70%	0.10	0.21%	0.20	5.56%	8
Indet 03	0.002	2.70%	0.04	0.09%	0.20	5.56%	8
<i>Manilkara salzmanii</i>	0.002	2.70%	0.02	0.05%	0.20	5.56%	8
Totais	0.074	100.00%	46.98	100.00%	3.60	100.00%	300



Figura 13. Aspecto da Restinga Moitas. Massarandupio-BA, Brasil.

Figure 13. Aspect of the Scattered Restinga Thickets.

Tabela 3. Parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas nas Restingas em Moitas em Massarandupió, Entre Rios, Bahia, Brasil. FA – Frequência Absoluta; FR – Frequência Relativa; DA – Densidade Absoluta; DR – Densidade Relativa; DoA – Dominância Absoluta; DoR – Dominância Relativa; VI – Valor de Importância.

Table 3. Phytosociological parameters of the species in the Restingas Shrublands in Massarandupió, Entre Rios, Bahia, Brazil. FA - Frequency Absolute; FR - Relative Frequency; DA - Absolute Density; DR - Relative density; DoA - Absolute Dominance, Pain - Relative Dominance VI - Importance Value.

Espécies	DA	DR	DoA	DoR	FA	FR	IVI
<i>Alibertia sp.</i>	0.014	28.00%	9.95	54.77%	0.6	15.79%	99
<i>Coccoloba alnifolia</i>	0.01	20.00%	2.00	10.99%	0.6	15.79%	47
<i>Clusia hilariana</i>	0.004	8.00%	2.90	15.97%	0.4	10.53%	34
<i>Protium bahianum</i>	0.006	12.00%	0.80	4.42%	0.6	15.79%	32
<i>Indet 05</i>	0.002	4.00%	1.72	9.48%	0.2	5.26%	19
<i>Guapira pernambucensis</i>	0.002	4.00%	0.34	1.85%	0.2	5.26%	11
<i>Emmotum affine</i>	0.002	4.00%	0.13	0.74%	0.2	5.26%	10
<i>Indet 01</i>	0.002	4.00%	0.13	0.74%	0.2	5.26%	10
<i>Indet 04</i>	0.002	4.00%	0.06	0.35%	0.2	5.26%	10
<i>Indet 05</i>	0.002	4.00%	0.06	0.35%	0.2	5.26%	10
<i>Byrsonima blanchetiana</i>	0.002	4.00%	0.05	0.28%	0.2	5.26%	10
<i>Indet 03</i>	0.002	4.00%	0.01	0.06%	0.2	5.26%	9
Totais	0.05	100.00%	18.17	100.00%	3.8	100.00%	300

As regiões litorâneas, principalmente as Restingas, vêm sofrendo ao longo dos tempos com a degradação e perdas ambientais, devido ao grande e crescente desenvolvimento imobiliário e turístico. A perda da diversidade biológica envolve aspectos sociais, econômicos, culturais e científicos e é agravada pelo crescimento explosivo da população humana e pela distribuição desigual da riqueza. Como resultado das pressões da ocupação humana na zona costeira, a Mata Atlântica, por exemplo, ficou reduzida a aproximadamente 10% de sua vegetação original.

A geomorfologia tem sido apontada por muitos como sendo fator influenciador dos diferentes tipos de vegetação de restinga ao longo da costa brasileira. Em Massarandupió são encontrados três tipos de depósitos arenosos. Os leques aluviais pleistocênicos onde é comum a ocorrência de Matas esclerófilas denominadas por muitos de Mata de Restinga e com composição e estrutura semelhante a outras encontradas no litoral brasileiro. De idade aproximada de 120.000AP, os Terraços Marinheiros Pleistocênicos apresentam uma vegetação distribuída em moitas, de dinâmicas próprias, associadas principalmente a zonas de deflação em campos de dunas. Em áreas mais deprimidas, formam-se então zonas úmidas temporárias, onde se desenvolve uma vegetação exclusiva. As diferentes fisionomias identificadas estão associadas aos tipos de depósitos arenosos descritos acima. A manutenção da conectividade entre os diferentes depósitos arenosos manterá conseqüentemente a conectividade entre as comunidades vegetais, permitindo o fluxo genético da fauna e flora locais, garantindo então a manutenção dos processos ecológicos naturais. Apesar de serem pouco reconhecidos os endemismos nas Restingas, *Poecilanthus itapuana* e *Bactris soeiroana* possuem ocorrência restrita para costa norte do Estado da Bahia (Queiroz, 2001), enquanto que a palmeira *Allagoptera brevicalyx* o caxulé, possui ocorrência restrita para o litoral norte da Bahia e Sergipe (Lorenzi, 2002). Dentre as espécies identificadas, não foram constatadas espécies raras ou ameaçadas de extinção.

CONCLUSÕES

Neste sentido é de extrema importância na conservação da vegetação local, haja vista a sua complexidade ecológica e a pressão da implantação de grandes projetos hoteleiros, trazendo ai um grande desafio para o manejo e conectividade das diferentes fitofisionomias. A ocorrência de espécies em comum entre as Restingas em Moitas e Matas de Restinga é aspecto relevante para a delimitação do perímetro das Unidades de Conservação (UC's), já que a colonização de espécies das Matas de Restingas mais interioranas nas Restingas em Moitas é comum nas planícies quaternárias costeiras, aspecto inclusive apontado por estudiosos para as outras regiões do Brasil.

BIBLIOGRAFIA

- Araújo, D.S.D; Henriques, R.P.B. (1984) - Análise Florística das Restingas do Estado do Rio de Janeiro: Origem. In: L.D. Lacerda; D.S.D. Araújo; R. Cerqueira; B. Turcq (org.), *Restingas: Origem, Estrutura e Processos*, pp.159-193. Editora CEUFF, Niterói, RJ. Brasil. ISBN: 8585720492.
- Assumpção, J.; Nascimento, M.T. (2000) - Estrutura e composição florística de quatro formações vegetais de restinga no complexo Lagunar Grussaí/Iquipari, São João da Barra, Rio de Janeiro, Brasil, *Acta Botanica Brasílica*. (ISSN: 0102-3306), 14(3):301-315, Feira de Santana, BA, Brasil. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/abb/v14n3/5175.pdf>
- Barroso, G.M. (1978) - *Sistemática de Angiospermas no Brasil*. 309p., vol. 1. 2 Ed. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. ISBN: 85-7269-127-8.
- Bridson, D.; Forman, L. (1992) - *The herbarium handbook*. Royal Botanic Gardens, London, UK. ISBN: 9780947643454.
- Cronquist, A. (1981) - *An Integrated System of Classification of Flowering Plants*. 1262p., Columbia University Press, New York, NY, USA. ISBN: 9780231038805.

- Dias, F.K.; Menezes, C.M. (2007) - Fitossociologia da vegetação sobre um cordão-duna no Litoral Norte da Bahia, Mata de São João, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Biociências* (ISSN: 1980-4849), 5(supl. 2): 1171-1173, Porto Alegre, RS, Brasil. Disponível em: <http://www6.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/view/986/769>
- Dominguez, J.M.L. (2006) - The coastal zone of Brazil: an overview. *Journal of Coastal Research* (ISSN 0749-020816 – 20), 39:16-20, Itajaí, SC, Brazil, Disponível em http://www.cerf-jcr.org/images/stories/02_landim.pdf
- Henriques, R.P.B.; Araújo, D.S.D. de; Hay, J.D. (1986) - Descrição e classificação dos tipos de vegetação da restinga de Carapebus, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Botânica* (ISSN: 0100-8404), 9:173-189. São Paulo SP, Brasil.
- Lacerda, L.D.; Araújo, D.S.D.; Maciel, N.C. (1982) - *Restingas brasileiras: uma bibliografia*. Fundação. José Bonifácio, 55p., Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Não publicado.
- Lorenzi, H. (2002) - *Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil*. 368 p, vol. 1. Plantarum-Nova Odessa, São Paulo, SP, Brasil. ISBN: 85-86714-16-X.
- Lyrio, R.S. (1996) - *Modelo Sistêmico Integrado para a Área de Proteção Ambiental do Litoral Norte da Bahia*. 102p., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil. Não publicado.
- Martins, F.R. (2006) - *O Papel da Fitossociologia na Conservação e na Bioprospecção*. 14p., Instituto de Biologia, Departamento de Botânica, Campinas, SP, Brasil. Não publicado.
- Menezes, C.M. (2007) - *Influência da Evolução Quaternária da Zona Costeira sobre a Vegetação de Restinga no Litoral Norte da Bahia*. 99p., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil. Não publicado.
- Menezes, C.M.; Santana, F.D.; Silva, V.D.A.; Silva, V.I.S.; Araújo, D.S.D. (2012) - Florística e fitossociologia em um trecho de restinga no Litoral Norte do Estado da Bahia. *Revista Biotemas*, 25(1):31-38. doi: 10.5007/2175-7925
- Menezes, C.M.; Tinoco, M.S.; Tavares, M.H.; Browne-Ribeiro, H.C.; Silva, V.S.A.; Carvalho, P.A.. (2007) - Implantação, manejo e monitoramento de um corredor ecológico na restinga do litoral norte da Bahia, *Revista Brasileira de Biociências* (ISSN: 2177-4382), 5(supl.1):201-203. Porto Alegre, RS, Brasil. Disponível em <http://www6.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/viewFile/202/196>
- Mueller-Dombois, D. & Ellenberg, H. (1974) - *Aims and methods of vegetation ecology*. 547 p., Wiley & Sons, New York City, NY, USA. ISBN: 9781930665736.
- Ormond, W.T. (1960) - *Ecologia das restingas do Sudeste do Brasil: Comunidades vegetais das praias arenosas*, Parte I. Arquivo do Museu Nacional, 51p., Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Não Publicado.
- Peixoto, G.L.; Martins, S.V.; Silva, A.F.; Silva, E. (2005) - Estrutura do componente arbóreo de um trecho de floresta atlântica na Área de Proteção Ambiental da Serra da Capoeira Grande, Rio de Janeiro, Brasil. *Acta Botânica Brasileira* (ISSN: 0102-3306), 19(3):539- 547, Feira de Santana, Bahia, Brasil. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/abb/v19n3/27369.pdf>
- Pinto, G. C. P.; Bautista, H. P.; Ferreira, L. D. C. A. (1984) - A restinga do litoral nordeste da Bahia. *Anais Simpósio sobre Restingas Brasileiras*, CEUFF, 21p., Niterói, Rio de Janeiro, Brasil. Não Publicado.
- Queiroz, E.P.; Menezes, A.P.; Silva, V.I.S. da; Silva, M.S.; Santana, F.D.; Silva, B.R. (2005) - Fitossociologia do Estrato Arbóreo/Arbustivo nas Restingas de Sauípe-Mata de São João-Bahia. *Anais do 56 Congresso Nacional de Botânica*, Curitiba, PR, Brasil. Não publicado.
- Queiroz, E.P. (2001) - *A subfamília Faboideae (Leguminosae) nas dunas e ante-dunas das restingas da APA Lagoas e Dunas do Abaeté e APA Litoral Norte do Estado da Bahia*. 102p., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil. Não publicado.
- Rizzini, C.T. (1997) - *Tratado de Fitogeografia do Brasil*. 756p., Ed. Âmbito Cultural, São Paulo, SP, Brasil. ISBN: 8586742201.
- Scudeller, V.V.; Martins, F.R.; Shepherd, G.J. (2001) - Distribution and abundance of arboreal species in the Atlantic Ombrophilous Dense Forest in Southeastern Brazil. *Plant Ecology*, 152(2):185-199. doi: 10.1023/a:1011494228661.
- Silva Júnior, M.C.; Silva, A.F. (1988) - Distribuição dos diâmetros dos troncos das espécies mais importantes do cerrado na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba. EFLEX, MG. *Acta Botanica Brasílica* (ISSN: 0102-3306), 2(1-2):107-126, Feira de Santana, BA, Brasil. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/abb/v2n1-2/v2n1-2a06.pdf>
- Silva, S.M (1998) - *As Formações Vegetais na Planície Litorânea da Ilha do Mel, Paraná, Brasil: Composição Florística e Principais Características Estruturais*, 262p., Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Não publicado.
- Silva, V.I.S.; Menezes, C.M. (2007a) - Manejo de Espécies Vegetais em uma Restinga em Moitas no Litoral Norte da Bahia. *Revista Brasileira de Biociências* (ISSN: 2177-4382), 5(supl.1):183-185, Porto Alegre, RS, Brasil. Disponível em <http://www6.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/viewFile/252/184>
- Silva, V.I.S.; Menezes, C.M. (2007b) - Manejo de Espécies Vegetais em uma Mata de Restinga no Litoral Norte da Bahia. *Revista Brasileira de Biociências* (ISSN: 2177-4382), 5(supl.1):1:159-161, Porto Alegre, RS, Brasil. Disponível em <http://www6.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/viewFile/251/170>
- Souza, V.C.; Lorenzi, H. (2005) - *Botânica Sistemática: Guia ilustrado para identificação das famílias de Angiospermas da flora brasileira, baseado em APG II*. 640p., Instituto Plantarum, Nova Odessa, São Paulo, SP, Brasil. ISBN: 8586714216.
- Suguió, K.; Tessler, M.G. (1984) - Planícies de cordões arenosos quaternários do Brasil: Origem e nomenclatura. *Anais Simpósio sobre Restingas Brasileiras*, p.15-26, CEUFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil. Não Publicado.
- Waechter, J.L. (1995) - Aspectos ecológicos da vegetação de restinga no Rio Grande do Sul, Brasil. *Comunicações do Museu de Ciências PUCR* (ISSN: 0100-3380), 33:49-68, Porto Alegre, RS, Brasil.

NOTA TÉCNICA / *TECHNICAL NOTE*

Limpet shell modifications at intertidal hydrothermal vents *

Modificações na concha de lapas em fontes hidrotermais de superfície

Ruben P. Couto^{@, 1,2}, Ana I. Neto^{1,2}, Armindo S. Rodrigues^{1,3}

ABSTRACT

Calcareous organisms are known to be sensitive to acidified seawater, and they have been reported as potential sentinels for ocean acidification studies. Limpets are among the organisms that characterise intertidal zones, and in the Azores can also be found at sites with shallow water hydrothermal activity, where the acidity of seawater in the vicinity of hydrothermal vents is naturally higher due to CO₂ release. During an occasional intertidal survey on the occurrence and abundance of intertidal algae we found limpets with abnormal shells, and specimens of *Patella candei gomesii* (Patellidae) collected under such conditions exhibited weak and almost transparent shells with reduced shell thickness.

Keywords: Hydrothermal vents; *Patella candei*; Acidification; Shell erosion; Azores.

RESUMO

Os organismos calcários são conhecidos por serem sensíveis à água do mar acidificada, e têm sido apontados como potenciais sentinelas para estudos sobre acidificação do oceano. As lapas estão entre os organismos que caracterizam a zona intertidal e nos Açores, podendo também ser encontradas em locais com actividade hidrotermal de superfície, onde a acidez da água do mar na proximidade das fontes hidrotermais é naturalmente mais elevada devido à libertação de CO₂. Durante uma visita ocasional para avaliar a ocorrência e abundância de algas no intertidal encontraram-se vários espécimes de *Patella candei gomesii* (Patellidae) com conchas aberrantes, na proximidade de fontes hidrotermais. Estes indivíduos, colectados sob tais condições exibiam conchas frágeis, quase transparentes, com espessura muito reduzida.

Palavras-chave: Fontes hidrotermais; *Patella candei*; Acidificação; Erosão de conchas; Açores.

@ - Corresponding author: coutoruben@uac.pt

1 - CIRN & Departamento de Biologia, Universidade dos Açores, Rua da Mãe de Deus, 9501-801 Ponta Delgada, Portugal.

2 - CIIMAR – Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Porto, Rua dos Bragas, 289, 4050-123 Porto, Portugal.

3 - CVARG – Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, Rua da Mãe de Deus, 9501-801 Ponta Delgada, Portugal.

1. INTRODUCTION

Shallow water hydrothermal activity is common along the shores of volcanic regions like the Azores. Studies conducted at marine hydrothermal vents in the Azores (Cardigos *et al.*, 2005; Colaço *et al.*, 2006; Wallenstein *et al.*, 2009) concluded that the gaseous discharge from the vents is dominated by CO₂ (90%), with low levels of H₂S, H₂ and CH₄, while the fluids are generally warm, rich in dissolved sulphide (S), H₂, CH₄ and Pb, and poor in Fe and Mn. In such environments seawater is naturally acidified due to the CO₂ flux released from volcanic activity and marine organisms that live there (e.g. coralline algae, corals, echinoderms or molluscs, among others) are chronically exposed to conditions that promote the dissolution of their calcified structures/components (Hall-Spencer *et al.*, 2008; Marshall *et al.*, 2008; Martin *et al.*, 2008). The limpet *Patella candei gomesii* Drouet is common at Azorean intertidal shores, occurring also nearby shallow water hydrothermal vents. The present study firstly reports the occurrence of erosion in shells of *Patella candei gomesii* as a result of its exposure to natural acidified seawater by hydrothermal activity conditions.

2. MATERIALS AND METHODS

Specimens of limpets exhibiting abnormal shells were found next to shallow water hydrothermal vents during a survey on the occurrence and abundance of intertidal coralline algae. Sampling took place in the summer 2009 at Porto Formoso (37°49'18.8"N, 025°27'25.2"W, Fig. 1) on São Miguel island (Azores; Portugal). Four specimens were collected with a chisel and preserved in 70% ethanol. The marginal thickness (MT), central thickness (CT), length (SL), width at the apex (SW) and height (SH) of each shell was measured with a Vernier caliper to the nearest 0.02 mm, and its conicity (SH/SL) and base ellipticity (SW/SL) calculated.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The collecting spot at the hydrothermal vent location is characterised by a warmer and acidic environment (higher temperatures and lower pH) when compared with the surrounded marine environment. Temperature values range from 17.1°C in April and 24.4°C in July and pH from 6.5 to 5.5 (Couto *et al.*, 2010; unpublished data), where

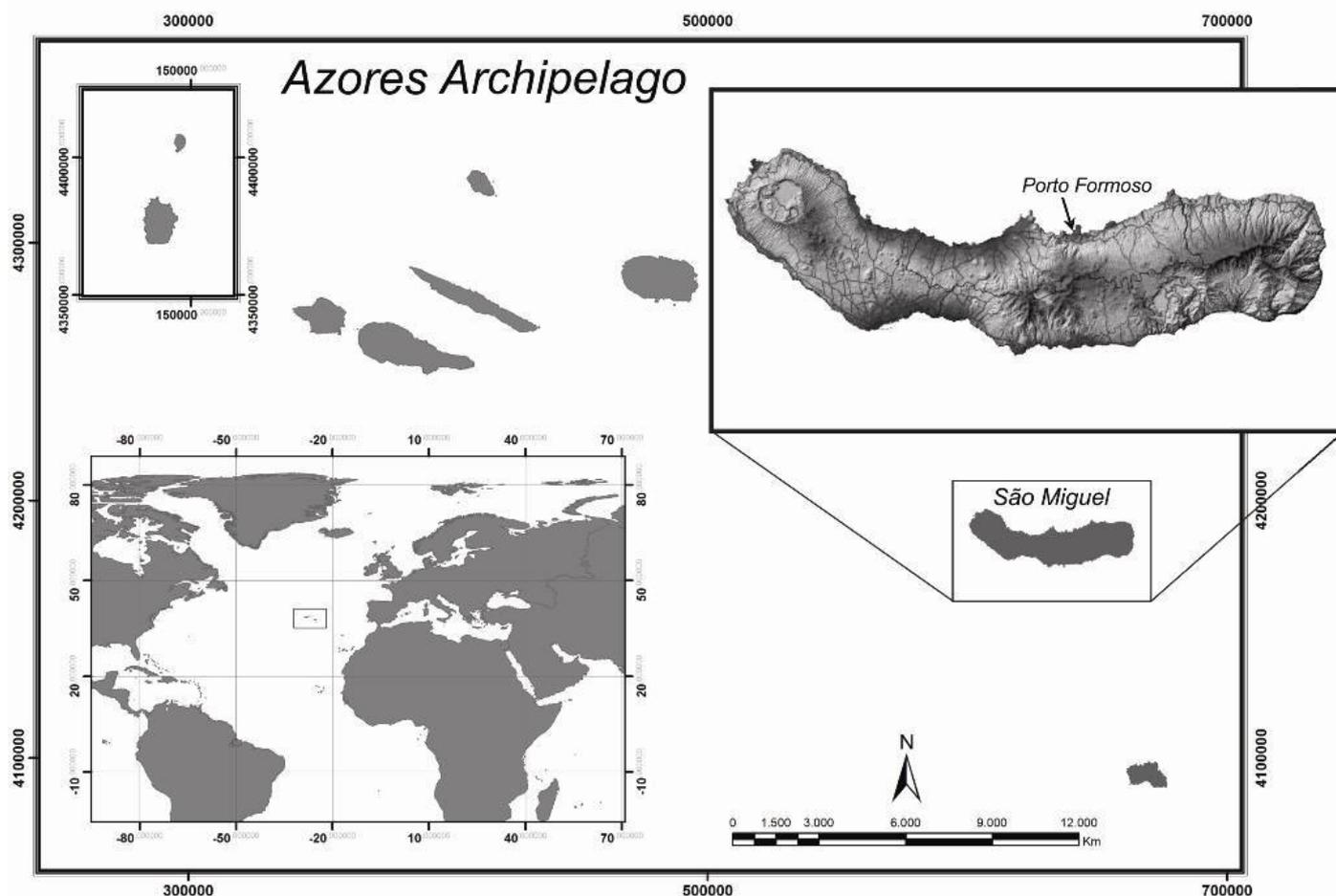


Figure 1. Azores archipelago; São Miguel Island, showing the hydrothermally active location (Porto Formoso) where samples were collected.
Figura 1. Arquipélago dos Açores; Ilha de São Miguel, mostrando o local com actividade hidrotermal (Porto Formoso) onde as amostras foram colhidas.

normal seawater temperature values in the Azores for the same months are 15.5 °C and 21.1°C in April and July, respectively (Instituto Hidrográfico, 2000) and the average pH of surface oceans is 8.07 (Royal Society, 2005).

Limpets usually exhibit strong and resistant shells (Cabral & Jorge, 2007) and resistant to the collection method. However, studied specimens presented weak and almost transparent shells (Fig. 2), in some cases allowing the visibility of internal structures. Some of the shells broke in the course of their collection (Fig. 2, B,C), suggesting a lower breaking stress as reported for other organisms living at acidic conditions (Tunnicliffe *et al.*, 2009). Similar effects have been reported by Hall-Spencer *et al.* (2008) for *Patella caerulea* Linnaeus and by Martin *et al.* (2008) for other calcified organisms in the Mediterranean Sea.

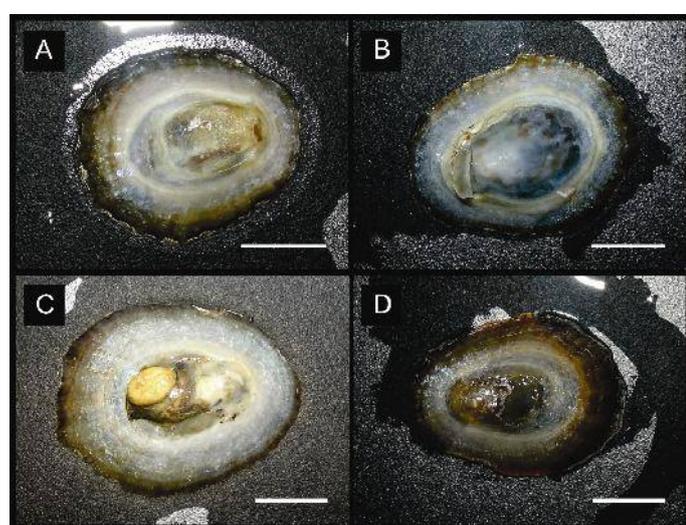


Figure 2. Dorsal view of *Patella candei gomesii* specimens exhibiting weakly calcified shells (A,B,C,D) and shells broken (B,C) during collection. (Scale bar – 1 cm).

Figura 2. Vista dorsal de exemplares de *Patella candei gomesii* exibindo conchas pouco calcificadas (A,B,C,D) e conchas partidas (B,C) durante a colecta. (Escala – 1 cm).

Concerning shell thickness, it can be observed a major reduction from MT to CT (Table 1), which is not normal for *Patella* genus (Cabral & Jorge, 2007). In specimen a) (Table 1) the CT value is more or less 10% of MT. Also, almost transparent and crushing weak shells, suggests erosion/dissolution or lack of biomineralization. Limpets appear to have thinner shells, however there is a lack of shell thickness values from limpets from outside the influence of the hydrothermal vents for comparison.

Additionally, no epibiont organisms such as crustose coralline algae were observed on the shells of specimens collected at the hydrothermal vent location, as is usual in limpets throughout Azorean shores.

On the other hand, no major differences were found in shell conicity (SH/SL) or base ellipticity (SW/SL) between specimens from the hydrothermally active location (Table 1) and when compared with limpets from outside the influence of the hydrothermal vents (Cabral & Jorge, 2007; Cúrdia *et al.*, 2005), suggesting that limpets did not change their shell shape as a result of exposure to hydrothermal activity. Increasing shell thickness with increasing size and age appears to be a strategy for maintaining the resistance of the limpet shell to applied compression forces (Cabral & Jorge, 2007). On the other hand, limpets, with thinner shells, are more exposed and susceptible to predation (Haugan *et al.*, 2006; Hall-Spencer *et al.*, 2008) and to wave action (Cabral & Jorge, 2007).

Organisms with calcareous structures and the habitats occupied by them have been considered as key type species and key type ecosystems for future research on the effects of ocean acidification (Haugan *et al.*, 2006). The present results, although preliminary, provide compelling evidence that limpets are sensitive to such environmental changes, and have an enormous potential to be used as sentinel organisms in further studies. It also shows how limpets could be affected by a future scenario of ocean acidification.

Table 1. Morphometry of *Patella candei gomesii* specimens. Dimensions (mm) and ratios. Values of MT and CT are “Mean (Min-Max)”. MT – marginal thickness; CT – central thickness; SL – length; SW – width at the apex; SH – height; na – not available.

Tabela 1. Dados morfológicos de indivíduos de *Patella candei gomesii*. Dimensões (mm) e ratios. Valores de MT e CT correspondem a “Média (Min-Máx)”. MT – espessura marginal; CT – espessura central; SL – comprimento; SW – largura no vértice; SH – altura; na – não disponível.

Specimens	SL	SW	SH	MT (n=4)	CT (n=5)	SH/SL	SW/SL
a)	26.34	22.24	6.52	0.77 (0.68-0.88)	0.08 (0.02-0.016)	0.25	0.84
b)	31.38	24.10	7.56	0.56 (0.48-0.60)	0.28 (0.08-0.70)	0.24	0.77
c)	31.20	24.00	na	0.80 (0.70-0.86)	na	na	0.77
d)	31.06	22.66	6.36	0.73 (0.68-0.80)	0.15 (0.02-0.40)	0.20	0.73

CONCLUSION

Shallow water hydrothermal vents are unique habitats with specific abiotic characteristics known to influence marine organisms. Limpets, a food resource at the Azores, were shown to be affected by these environments. Increasing knowledge on those areas will allow understanding processes and relations affecting biological communities creating tools for a proper management.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Francisco M. Wallenstein for helpful discussions and the English revision of the MS.

REFERENCES

- Cabral J.P.; Jorge R.M.N. (2007) - Compressibility and shell failure in the European Atlantic *Patella* limpets. *Marine Biology*, 150(4):585-597. doi: 10.1007/s00227-006-0379-0.
- Cardigos, F.; Colaço, A.; Dando, P.R.; Ávila, S.P.; Sarradin, P.M.; Tempera, F.; Conceição, P.; Pascoal, A.; Santos, R.S. (2005) - Shallow water hydrothermal vent field fluids and communities of the D. João de Castro Seamount (Azores). *Chemical Geology*, 224(1-3):153-168. doi:10.1016/j.chemgeo.2005.07.019.
- Colaço, A.; Raghukumar, C.; Mohandass, C.; Cardigos, F.; Santos, R.S. (2006) - Effect of shallow-water venting in Azores on a few marine biota. *Cahiers de Biologie Marine* 47(4):359-364, disponível em <http://www.sb-roscoff.fr/cbm/pdf/14102793>
- Couto, R.P.; Neto, A.I.; Rodrigues, A.S. (2010) - Metal concentration and structural changes in *Corallina elongata* (Corallinales, Rhodophyta) from hydrothermal vents. *Marine Pollution Bulletin*, 60(4):509-514. doi: 10.1016/j.marpolbul.2009.11.014.
- Cúrdia J., Rodrigues A.S., Martins A.M.F., Costa M.J. (2005) - The reproductive cycle of *Patella candei gomesii* Drouët, 1858 (Mollusca: Patellogastropoda), an Azorean endemic subspecies. *Invertebrate Reproduction and Development*, 48(1-3):137-145. doi: 10.1080/07924259.2005.9652180.
- Hall-Spencer, J.M.; Rodolfo-Metalpa, R.; Martin, S.; Ransome, E.; Fine, M.; Turner, S.M.; Rowley, S.J.; Tedesco, D.; Buia, M.C. (2008) - Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, 454:96-99. doi: 10.1038/nature07051.
- Haugan, P.M.; Turley, C.; Pörtner, H.O. (2006) - Effects on the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO₂ in the atmosphere. Report on Ocean Acidification OSPAR, disponível em [http://www.ospar.org/documents/dbase/publications/p00285_Ocean acidification.pdf](http://www.ospar.org/documents/dbase/publications/p00285_Ocean%20acidification.pdf).
- Instituto Hidrográfico (2000) - *Roteiro da costa de Portugal: Arquipélago dos Açores* – 2nd Edition, 233p., Instituto Hidrográfico, Lisboa, Portugal. ISBN: 972-8486-09-X.
- Marshall, D.J.; Santos, J.H.; Leung, K.M.Y.; Chak, W.H. (2008) - Correlations between gastropod shell dissolution and water chemical properties in a tropical estuary. *Marine Environmental Research*, 66(4):422-429. doi: 10.1016/j.marenvres.2008.07.003.
- Martin, S.; Rodolfo-Metalpa, R.; Ransome, E.; Rowley, S.J.; Buia, M.C.; Gattuso, J.P.; Hall-Spencer, J.M. (2008) - Effects of naturally acidified seawater on seagrass calcareous epibionts. *Biology Letters*, 4(6):693-695. doi: 10.1098/rsbl.2008.0412.
- Royal Society (2005) - *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*. 60p., The Clyvedon Press Ltd, Cardiff, United Kingdom. ISBN: 0 85403 617 2.
- Tunncliffe, V.; Davies, K.T.A.; Butterfield, D.A.; Embley, R.W.; Rose, J.M.; Chadwick Jr, W.W. (2009) - Survival of mussels in extremely acidic waters on a submarine volcano. *Nature Geoscience*, 2:344-348. doi: 10.1038/ngeo500.
- Wallenstein, F.M.; Torrão, D.F.; Neto, A.I.; Wilkinson, M.; Rodrigues, A.S. (2009) - Effect of exposure time on the bioaccumulation of Cd, Mg, Mn and Zn in *Cystoseira abies-marina* samples subject to shallow water hydrothermal activity in São Miguel (Azores). *Marine Ecology* 30(supplement s1):118-122. doi: 10.1111/j.1439-0485.2009.00322.x.

NOTA TÉCNICA / *TECHNICAL NOTE*

Levantamento do Perfil da Antepraia (Shoreface) com uso de Ecobatímetro Portátil e Caiaque *

Measuring Shoreface Profiles with a Kayak and Handheld Depth Finder

Fábio Mayo Belligotti ¹ & Dieter Muebe ^{@, 1}

RESUMO

A extensão de perfis topográficos da praia para a zona submarina através de nivelamento convencional se limita à distância que o portador da mira topográfica consegue avançar mar-a-fora, necessitando de acoplamento com perfilagem ecobatimétrica para o levantamento de segmentos mais distantes e profundos da zona submarina adjacente. O emprego de uma embarcação para o levantamento batimétrico implica em custos e às vezes longos percursos até o local do levantamento, inviabilizando este tipo de levantamento de forma rotineira. O presente trabalho apresenta o resultado do emprego de um caiaque, que pode ser lançado diretamente ao mar na área de interesse, juntamente com utilização de um GPS e ecobatímetro portátil, permitindo a realização de perfis para a caracterização morfológica da antepraia, assim como a comparação entre perfis sucessivos e a comparação com o perfil de equilíbrio teórico.

Palavras-chave: Levantamento ecobatimétrico, antepraia, caiaque.

ABSTRACT

The extension of topographic beach profiles toward offshore is limited to the depth the level rod can be read as also the ability to carry the rod through the surf and breaker zone. To avoid the high cost of a bathymetric survey by a conventional boat in order to extend the profiles to the entire shoreface, the survey may be done using a kayak, which can be launched directly in the research area with measures made using a handheld fish finder together with a hand held GPS. The measurements are made on previously defined waypoints along a line perpendicular to the shoreline with subsequent correction of deviations through the projection of each segment between waypoints to the direction of the profile in order to avoid distortions in length and declivity. In spite of the imprecision of the positioning as also the depth measurement due to the influence of waves, the method is sufficiently accurate to allow the comparison between profiles and the characterization of the morphology of the shoreface in terms of bathymetric gradients and comparison with the equilibrium profile.

Keywords: Echo-bathymetry, shoreface, kayak.

@ - Autor correspondente: dieter.muebe@gmail.com

1 - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Pós-Graduação em Geografia e Laboratório de Geografia Marinha, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 2194-611, Rio de Janeiro, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, o estudo de praias arenosas se concentra na porção emersa das praias, abrangendo a pós-praia, a face de praia e, ocasionalmente, a região da antepraia superior ocupada pela zona de surfe. Entretanto, sabe-se que tanto em eventos episódicos de alta hidrodinâmica quanto em escalas de tempo mais amplas, de anos a décadas, a troca de sedimentos entre a praia e a zona marinha adjacente freqüentemente extrapola os limites da zona de surfe e ocupa toda a antepraia, chegando a incluir a plataforma continental interna (Lee *et al.*, 1998). Além disso, a preocupação com uma possível subida do nível do mar e a ocorrência de erosão das praias, assim como suas implicações no estabelecimento de faixas de não edificação no planejamento urbano dos municípios costeiros cria uma demanda de estudos consistentes, que permitam a utilização de modelos atuais como subsídio à tomada de decisão, como a determinação da profundidade de fechamento.

A extensão dos perfis batimétricos para além da zona de arrebentação apresenta dificuldades logísticas, por exigir o emprego de embarcação para o levantamento batimétrico, encarecendo o trabalho, além da dificuldade associada ao deslocamento da embarcação. Este trabalho apresenta uma metodologia que contorna tais dificuldades por meio do emprego de uma embarcação de pequeno porte (caiaque), lançada ao mar no local do levantamento, e uso de um ecobatímetro de mão e um aparelho de posicionamento por satélite (GPS). O emprego de caiaque para levantamento batimétrico foi apresentado em forma de painel por Belligotti & Muebe (2007) e por Hampson *et al.* (2011). Neste último é utilizado um sistema de posicionamento mais preciso, porém mais caro e que exige a montagem de uma estrutura de suporte o que pode dificultar a estabilidade da embarcação principalmente ao atravessar a zona de surfe e arrebentação.

2. METODOLOGIA

A porção emersa da praia pode ser nivelada através do método das balizas de Emery (Emery, 1961) ou por nivelamento topográfico convencional, com o uso de teodolito, nível topográfico ou estação total. Este nivelamento pode ser estendido até à zona submersa próxima até o limite de visão da mira topográfica, incluindo a zona de surfe ou ao menos de parte da mesma, de acordo com as condições de mar.

O perfil submarino deve ser levantado através da medição da profundidade em pontos discretos ao longo do mesmo, com o uso de ecobatímetro portátil, e posicionamento por meio de GPS, sendo as medidas de profundidade registradas em gravador (Figura 1). O ecobatímetro utilizado (fabricado pela NorCross Marine Products, modelo DF2200PX) possui dimensões reduzidas (20 cm de comprimento e 6,7 cm de diâmetro máximo) e é capaz de medir de 0,8 a 60 metros de profundidade com resolução de 0,1 m. Possui um feixe de 20° de abertura e opera em freqüência de 200 kHz. Tem o formato e a dimensão de uma lanterna de mão típica.

A amarração entre os dois perfis pode ser executada através de um datum vertical comum, como o nível médio do mar local, quando houver previsão de maré adequada.



Figura 1. Medições realizadas a bordo do caiaque. Em destaque o ecobatímetro, à esquerda acima, e o GPS e gravador condicionados em saco à prova de água, à direita.

Figura 1. Measures taken on board the kayak. Inserted in the upper left corner is a picture of the handheld echo sounder and at the right the GPS and voice recorder.

Muebe *et al.* (2003) propõem a utilização de uma referência de nível vertical (RN) ajustada ao nível médio do mar através do levantamento da altura no ponto de refluxo máximo da onda na face de praia e correção desta altura pela previsão de maré mais próxima. No presente trabalho, foi utilizada a previsão de maré para o local das medições, cedida pela Marinha do Brasil (36 constantes harmônicas obtidas entre 20/12/1974 e 20/01/1975).

Previamente ao trabalho de campo, devem ser programadas as coordenadas geográficas dos pontos ao longo do perfil onde se deseja medir a profundidade, atentando à precisão do método de posicionamento e às dimensões de estruturas que se deseja mapear. A partir de duas posições geográficas pré-determinadas (através de cartas, imagens georreferenciadas ou no próprio campo, é possível obter uma direção de perfil perpendicular à linha de costa e calcular as coordenadas geográficas de pontos homogeneamente espaçados ao longo deste perfil. Para corrigir os desvios entre cada posição programada e a posição da medição, decorrente de deriva da embarcação, cada segmento, entre duas posições, é projetado de forma a ficar paralelo ao perfil previsto, empregando a metodologia descrita por Muebe (2004, 2006).

Ao contrário do registro batimétrico contínuo dos ecobatímetros convencionais, as profundidades foram determinadas por meio de medidas sucessivas pontuais, considerado o valor de maior ocorrência, buscando realizar a leitura da profundidade numa posição entre a crista e o vale de cada onda. Para reduzir o efeito da variação das medidas devido ao efeito da passagem das ondas, é recomendado que, além da questão de segurança, esta metodologia seja aplicada em condições de mar calmo.

Dois testes foram realizados no centro da praia de Piratininga (Niterói, RJ), uma praia oceânica de alta energia localizada imediatamente a leste da entrada da Baía de Guabara, a fim de avaliar a metodologia proposta. O primeiro foi uma comparação entre o método proposto e a utilização de levantamento topográfico com o uso de nível e mira. O segundo consistiu no levantamento de cinco perfis

batimétricos consecutivos, abrangendo um período completo de maré vazante. A figura 2 mostra a localização dos perfis e da praia de Itaipu, para a qual foi realizada a previsão de maré.

3. RESULTADOS

O primeiro teste, realizado para avaliar a precisão do método proposto através de comparação com nivelamento topográfico convencional, foi realizado na praia de Piratininga em abril de 2009 em condições de mar muito calmo, isto é ondas com altura de até 0,5 m e período de 7s. A maré foi considerada constante durante o período de medição (15 minutos) e igual à altura do refluxo máximo da onda na face da praia. Os perfis foram levantados simultaneamente, utilizando os mesmos sete pontos de medição e totalizando aproximadamente 30 m de sobreposição dos dois métodos (Figura 3).

O perfil ecobatimétrico indicou profundidades 0,46 m, em média, maiores que o perfil através de nivelamento topográfico com desvio padrão de 0,09 m. A geometria dos perfis, entretanto, manteve-se constante. Este desvio entre o perfil topográfico e o batimétrico está relacionado à determinação da altura do nível do mar como sendo representado pelo refluxo máximo da onda na face da praia para o nivelamento topográfico, enquanto que as medidas com o ecobatímetro representam a profundidade da água conforme indicado pelo ecobatímetro. A figura 4 mostra os mesmos perfis, mas com a aplicação de um fator de correção, ou calibração, dos dados batimétricos de + 0,46 m. É evidente a correspondência entre os perfis, apesar dos pequenos desvios na porção mais profunda.

A figura 5 mostra a relação entre as profundidades determinadas através de cada método. As duas medidas apresentam estreita relação entre si, como mostra a regressão linear na figura.

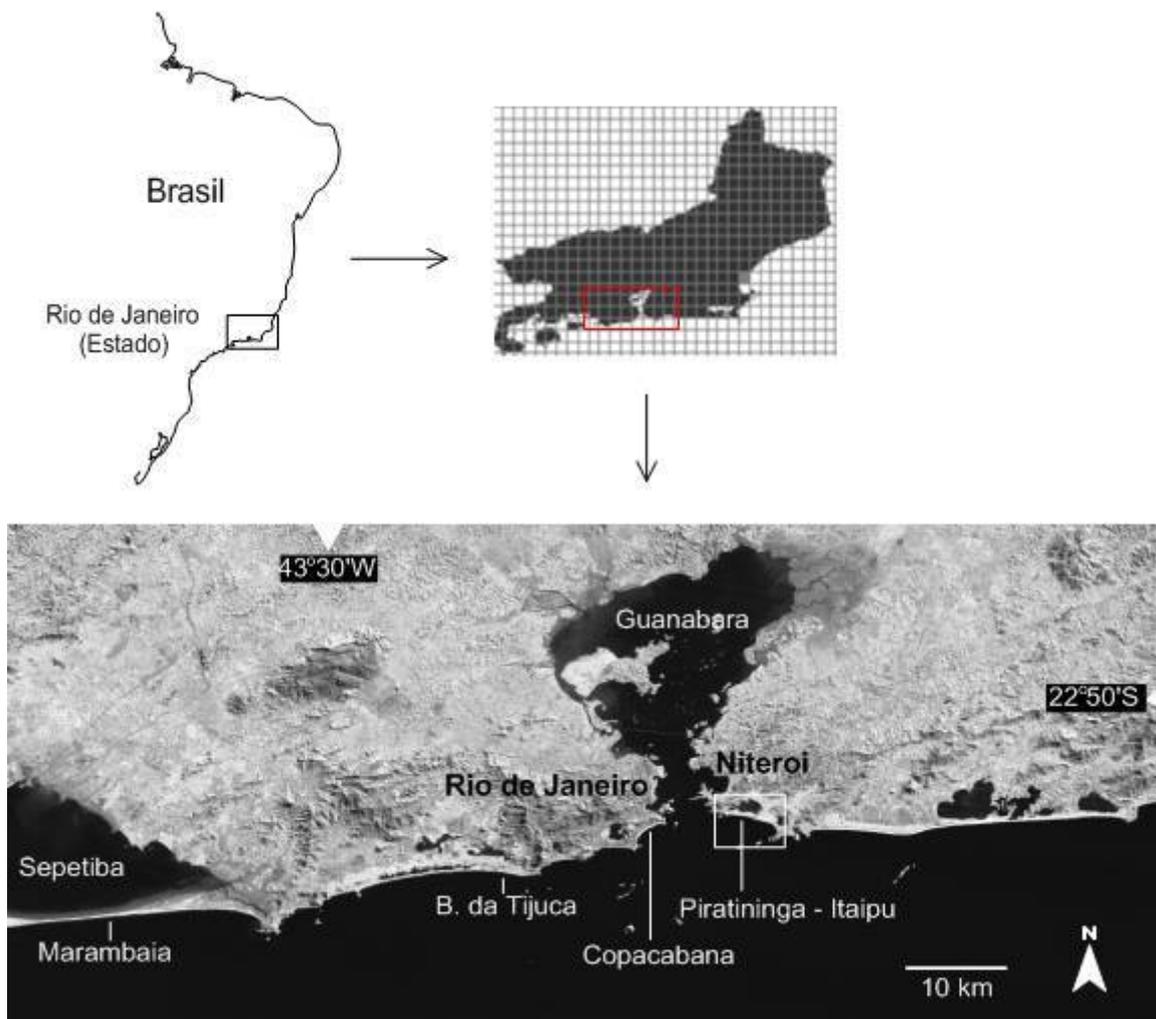


Figura 2. Localização do perfil batimétrico na praia de Piratininga e da praia de Itaipu, local da previsão maregráfica.

Figure 2. Location of the bathymetric profile in front of the Piratininga Beach and Itaipu Beach where the tidal forecasting came from.

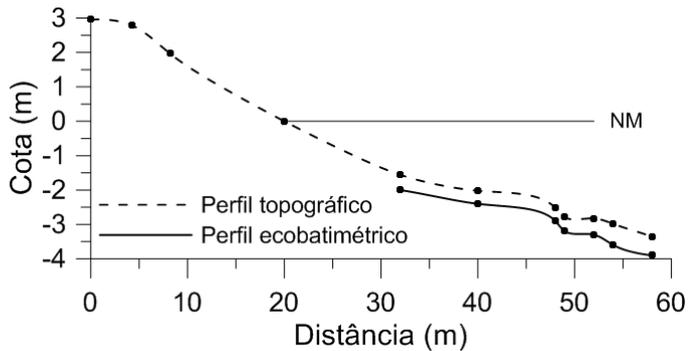


Figura 3. Comparação entre perfis batimétricos levantados por meio de nivelamento topográfico e ecobatimetria. Cada dado batimétrico é representado por um ponto.

Figure 3. Comparison between bathymetric profiles measured through topographic survey and echobathymetry. Each measured depth is represented by a dot.

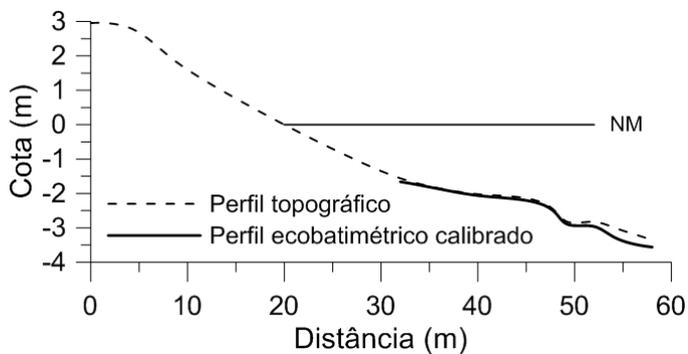


Figura 4. Comparação entre o perfil levantado por meio de nivelamento topográfico e o perfil ecobatimétrico calibrado (+0,46 m).

Figure 4. Comparison between topographic and calibrated echosounder profiles.

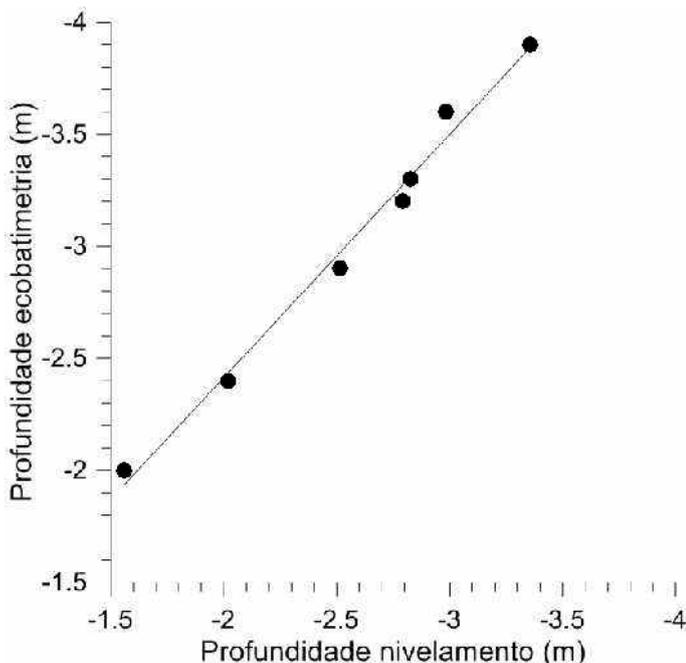


Figura 5. Relação entre as profundidades determinadas por ecobatimetria e nivelamento topográfico.

Figure 5. Relation between depths measured through echosounder and topographic survey.

3.1. Comparação entre perfis consecutivos

Em 23 de junho de 2007, foram levantados cinco perfis consecutivos no centro da praia de Piratininga. O ensaio foi realizado das 07:49 às 14:04 horas e cada levantamento teve duração média de 65 minutos. Este período abrange uma maré vazante completa. A correção da profundidade pela maré foi feita a cada 10 minutos aproximadamente com a utilização de previsão horária de maré, calculada para a praia de Itaipu (Fig. 6).

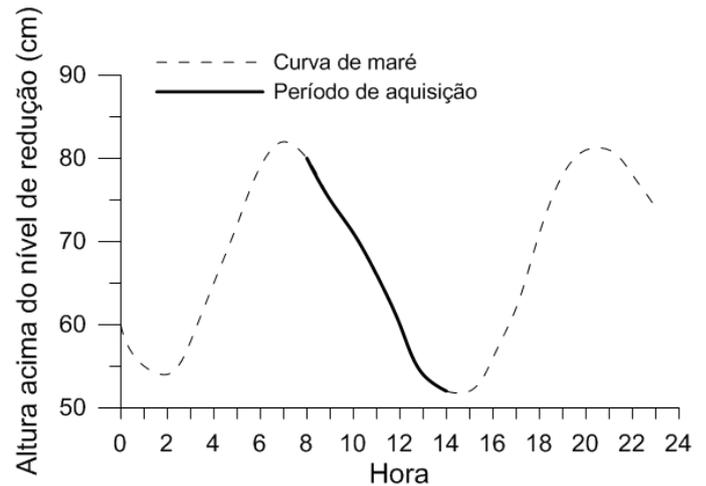


Figura 6. Previsão horária de maré para a praia de Itaipu ressaltando o período de levantamento dos perfis topográficos.

Figure 6. Tidal prediction for Itaipu Beach. The bold curve indicates the period of the survey.

A figura 7 mostra o resultado do teste, realizado na praia de Piratininga. O perfil submarino se estendeu por 673 m, com 40 pontos de medição, chegando a uma profundidade de 16,1 m. Estes perfis foram interpolados a cada metro para fins de análise utilizando o software BMAP 2.0 (Beach Morphology Analysis Package), que interpola os perfis de forma linear, não modificando a geometria medida. O desvio padrão médio das profundidades ao longo do perfil foi de 0,07 m, chegando a um máximo de 0,12 m e um mínimo de 0,01 m. Apesar das diferenças, a distribuição do desvio padrão ao longo do perfil não apresentou relação com a profundidade ou distância. A diferença média de profundidade entre o envoltório máximo e mínimo foi de 0,17 m \pm 0,05, sendo a maior diferença 0,31 m e a menor 0,04 m.

4. MONITORAMENTO

A metodologia apresentada vem sendo utilizada no monitoramento de perfis em várias praias, com resultados consistentes em termos de definição de sua morfologia e mudanças de gradiente. A figura 8 mostra a superposição de perfis na praia de Piratininga, incluindo o desvio padrão ao longo do perfil. Os perfis foram levantados entre março de 2007 e julho de 2008.

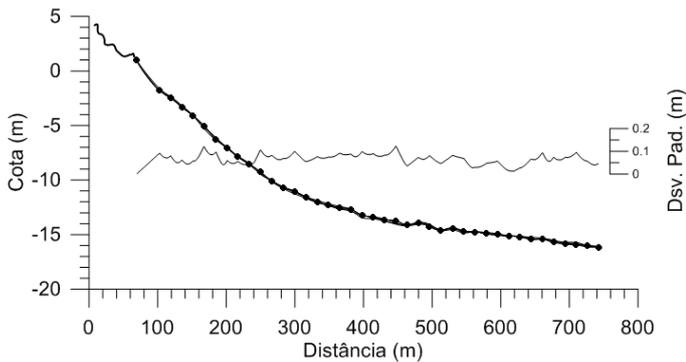


Figura 7. Perfil de praia e superposição de cinco perfis batimétricos levantados na praia de Piratininga de forma consecutiva em um período de 6 horas.

Figure 7. Superposition of five consecutive bathymetric profiles in front of Piratininga Beach during a period of six hours.

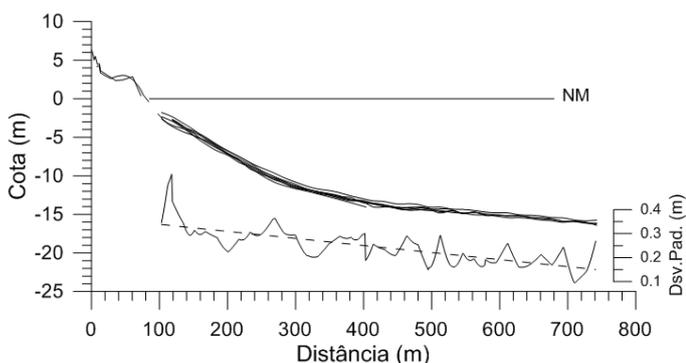


Figura 8. Perfis topo-batimétricos na praia de Piratininga monitorados por 16 meses. Parte da variabilidade vertical dos perfis decorre da morfodinâmica natural e que mostra um aumento em direção a profundidades menores.

Figure 8. Bathymetric profiles in front of Piratininga Beach measured during a time span of 16 months. The onshore increase in vertical variability of the profiles is partly due to the natural increase in morphodynamic activity due to wave action.

Apesar da metodologia não ser refinada o bastante para uma determinação precisa da profundidade de fechamento, a partir da identificação da profundidade de convergência dos perfis observa-se, no conjunto dos perfis batimétricos, uma nítida mudança de declividade na profundidade entre 11 e 12 m (Fig. 8). Outra maneira de avaliação é o desvio padrão das variações entre perfis e que indica um aumento significativo na profundidade de 10 m. Dessa forma a profundidade de fechamento parece se localizar na faixa dos 10 a 12 m o que a situa dentro da faixa de profundidade encontrada em outros trabalhos realizados em praias de alta energia no litoral brasileiro e que encontraram valores entre 7 e 12 m (Gruber *et al.* 2006; Belligotti, 2009; Muebe *et al.*, 2011).

5. CONCLUSÕES

A metodologia apresentada, mesmo sem o refinamento e precisão dos registros ecobatimétricos contínuos, se mostrou satisfatória na caracterização e monitoramento do perfil topográfico da antepraia, permitindo a avaliação da mobilidade morfológica do fundo através de superposição de perfis, da identificação de bancos, da configuração do perfil e de mudanças de gradientes, muitas vezes associadas à localização da profundidade de fechamento ou do limite da antepraia e início da plataforma continental interna. Entretanto, apesar de identificar a configuração de perfis da antepraia para fins de caracterização e comparação, o método não oferece precisão suficiente para atender aos quesitos de um levantamento hidrográfico no sentido de indicar a profundidade precisa de cada ponto. Esta, no entanto, mesmo que se faça uma calibração das sondagens por meio da medição das profundidades de uma placa refletora, dependerá sempre das condições de ondulação e da precisão da previsão maregráfica que por sua vez é influenciada pela distância ao marégrafo mais próximo. Outra limitação é a extensão mar-a-fora dos levantamentos devido ao pequeno tamanho da embarcação, razão pela qual se restringe à antepraia, isto é da zona de arrebentação à transição com a plataforma continental interna.

BIBLIOGRAFIA

- Belligotti, F.M. (2009) - *Avaliação metodológica da profundidade de convergência (profundidade de fechamento) de perfis de três praias de energia moderada a alta no litoral do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado, 130p., Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Não publicado.
- Belligotti, F.M.; Muebe, D. (2007) - Levantamento do perfil da antepraia (*shoreface*) com uso de ecobatímetro portátil e mini-embarcação (measuring shoreface profiles with a small boat and handheld depth finder). *XI Congresso da ABEQUA*, Belém,. Disponível em http://www.abequa.org.br/trabalhos/2007_fabio_mayo_quatcost.pdf
- Emery, K.O. (1961) - Simple method of measuring beach profiles. *Limnology and Oceanography*, 6(1):90-93. Disponível em http://www.aslo.org/lo/toc/vol_6/issue_1/0090.pdf
- Gruber, N.L.S.; Toldo, E.E.; Barboza, E.G.; Nicolodi, J.L.; Ayup-Zouain; R.N. (2006) - A shoreface morphodynamic zonation and the equilibrium profile variability on the Northern coastline of Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research* (ISSN: 0749-0208), S139:504-508. Disponível em http://www.cerf-jcr.org/images/stories/100_gruber.pdf
- Hampson, R.; MacMahan, J; Kirby, T. (2011) - A low-coast hydrographic kayak survey system. *Journal of Coastal Research*, 27(3):600-603. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-09-00108.1
- Lee, G.; Nicholls, R.; Birkemeier, W. (1998) - Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981-1991. *Marine Geology*, 148(3-4):163-177. DOI: 10.1016/S0025-3227(98)00010-3
- Muebe, D. (2004) - Método de levantamento topo-batimétrico do perfil do sistema praia-antepraia. *Revista Brasileira de Geomorfologia* (ISSN: 2236-5664), 5(1):95-

100. Disponível em <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/285/204>
- Muehe, D. (2006) - Método de levantamento topobatimétrico do perfil do sistema praia-antepraia (errata). *Revista Brasileira de Geomorfologia* (ISSN: 2236-5664), 7(1):91-92. Disponível em <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/283/203>
- Muehe, D.; Fernandez, G.B.; Bulhões, E.M.R.; Azevedo, I.S. de (2011) - Avaliação da vulnerabilidade física da orla costeira em nível local, tomando como exemplo o arco praial entre Rio das Ostras e o cabo Búzios/RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia* (ISSN: 2236-5664), 12(2):45—58. Disponível em <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/234/182>
- Muehe, D.; Roso, R.H.; Savi, D.C. (2003) - Avaliação de método expedito de determinação do nível do mar como *datum* vertical para amarração de perfis de praia. *Revista Brasileira de Geomorfologia* (ISSN: 2236-5664), 4(1):53-57. Disponível em <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/19/17>.