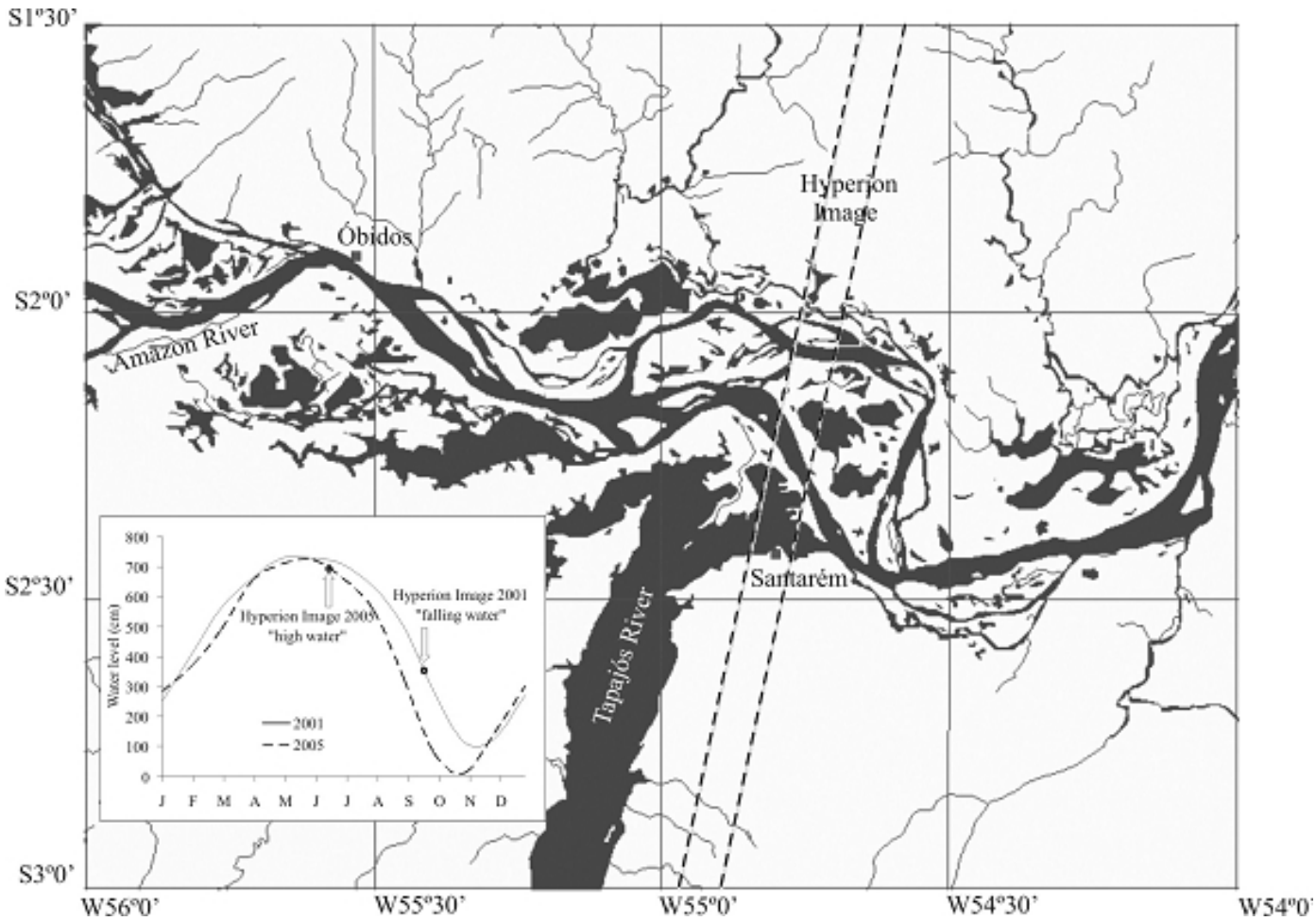
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Revista Ambiente & Água

An Interdisciplinary Journal of Applied Science



ISSN = 1980-993X (Online)
www.agro.unitau.br/ambi-agua

Edição 02 da Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Taubaté, v. 1, n. 2, p. 1-89, Agosto 2006. ***(doi:10.4136/ambi-agua.v1.n2)***

IPABHi

COMITÊ EDITORIAL

Editor

Getulio Teixeira Batista
Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi), Brasil

Editores Associados

Amaury Paulo de Souza
Universidade Federal de Viçosa (UFV), Brasil

Antonio Evaldo Klar
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil

Dar Roberts
Universidade de Stanford; BA pela Universidade da Califórnia, EUA

Hans Raj Gheyi
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Brasil

Hélio Nóbile Diniz
Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (IG/SMA), Brasil

João Vianei Soares
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil

Luis A. Bartolucci
Florida International University (FIU), EUA

Marcelo dos Santos Targa
Universidade de Taubaté (UNITAU), Brasil

Nelson Wellausen Dias
Universidade de Taubaté (UNITAU), Brasil

Paul W. Mausel
Indiana State University (ISU), EUA

Paulo Renato Schneider
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil

Sebastião do Amaral Machado
Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil

Silvio Jorge Coelho Simões
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Brasil

Yosio Edemir Shimabukuro
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil

Editor da Seção Editorial **Nelson Wellausen Dias,** PPGCA, UNITAU, Brasil
Editora de Texto **Maria de Jesus Ferreira Aires,** GELP, UNITAU, Brasil
Editora de Referência **Liliane Castro,** ECA/Civil, UNITAU, Brasil
Editor de Layout e Suporte Técnico **Tiago dos Santos Agostinho**, LAGEO, UNITAU, Brasil.

Ficha catalográfica elaborada pelo
SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science / Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas. Taubaté. v. 1, n. 2 (2006)- - Taubaté: IPABHi, 2006.

Quadrimestral
ISSN 1980-993X

1. Ciências ambientais. 2. Recursos hídricos. I. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas. III. Título.

CDD - 333.705
CDU - (03)556.18

Revisores Ad Hoc de Artigos do Ano 2006
(Ambi-Agua volume 1, nº. 1 e 2, 2006)

Revisores Ad Hoc	Instituição afiliada
Antonio Evaldo Klar	Universidade Estadual Paulista, FCA, Botucatu
Attilio Antonio Disperati	Universidade Estadual do Centro-Oeste
Carlos Souza Jr.	Amazon Institute of People and the Environment, PA
Claudinei Fonseca Souza	Universidade de Taubaté
Getulio T. Batista	Universidade de Taubaté
Gilberto F. Fisch	Centro Técnico Aeroespacial/Instituto de Aeronáutica e Espaço - Universidade de Taubaté
Henrique M. L. Chaves	Universidade de Brasilia
João Roberto dos Santos	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
João Vianei Soares	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
José Alexandre Melo Demattê	Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ Universidade de São Paulo
José Angel Alvarez Perez	Universidade do Vale do Itajaí
Jurandir Zullo Junior	Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura/ Universidade de Campinas
Luiz A. Bartolucci	Florida International University (FIU – EUA)
Marcelo dos Santos Targa	Universidade de Taubaté
Maria Helena de Arruda Leme	Universidade de Taubaté
Maria Lúcia Calijuri	Universidade Federal de Viçosa
Mario valério Filho	Universidade do Vale do Paraíba
Nelson de Jesus Ferreira	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/INPE
Nelson Delfino d´Ávila Mascarenhas	Universidade Federal de Santa Catarina
Nelson W. Dias	Universidade de Taubaté
Paul Mausel	Indiana State University (ISU - EUA)
Petrônio Alves Coelho	Universidade Federal de Pernambuco
Philippe Maillard	Universidade Federal de Minas Gerais
Silvio Jorge Coelho Simões	Universidade Estadual Paulista, FEG, Guaratinguetá
Waterloo Pereira Filho	Universidade Federal de Santa Maria
Yosio E. Shimabukuro	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Obs.: 1) A lista inclui revisores que avaliaram mais de um artigo.
2) A lista inclui revisores de artigos que foram rejeitados

Lista de Avaliadores Ad Hoc Registrados da Revista Ambiente & Água (até a presente edição)

Adão Benvindo Luz	Centro de Tecnologia Mineral
Adauto de Souza Ribeiro	Universidade Federal de Sergipe
Ademir Morelli	Universidade de Taubaté
Adilson Pinheiro	Universidade Regional de Blumenau
Adonis Moreira	Embrapa Pecuária Sudeste
Adriano Wagner Ballarin	FCA/Universidade Estadual Paulista
Alaide Aparecida Fonseca Gessner	Universidade Federal de São Carlos
Alcindo dos Santos	Universidade Federal de São Carlos
Alex Vladimir Krusche	Universidade de São Paulo
Alexandre de Avila Leripio	Universidade do Vale do Itajaí
Alexandre Gonçalves Evsukoff	COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro
Alexandre Guirland Nowosad	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Alexandre Magno Sebbenn	Instituto Florestal de São Paulo
Alexandre Marco da Silva	Universidade Estadual Paulista
Alfredo Pereira	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Ana Teresa Lombardi	Universidade Federal de São Carlos
Anderson Orestes Cavalcante Lobato	Universidade Federal de Pelotas
Andréa Bogatti Guimarães Tomazela	Universidade Estadual Paulista
Antônio Caetano Vaz Caltabiano	Internacional CLIVAR Project Office
Antônio Carlos Vitte	Universidade de Campinas
Antônio César Ortega	Universidade Federal de Uberlândia
Antônio José Teixeira Guerra	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Antônio Roberto Formaggio	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Antônio Teixeira Matos	DEA/Universidade Federal de Viçosa
Aparecido Osdimir Bertolin	Universidade Federal do Tocantins
Arimatéa Carvalho Ximenes	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Attilio Antonio Disperati	Universidade Estadual do Centro-Oeste
Áureo Eduardo Magalhães Ribeiro	Universidade Federal de Lavras
Bernardo Rudorff	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Brani Rozemberg	Fundação Oswaldo Cruz
Caetano Chang Dorea	Health Canada
Camilo Daleles Rennó	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Carlos Edwar Freitas	Universidade Federal do Amazonas

Carlos Ernesto Schaefer	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Carlos Moure Cícero	Universidade de Taubaté
Carlos Rogério Mello	DEG/Universidade Federal de Lavras
Carlos Souza Jr.	Amazon Institute of People and the Environment, PA
Carmen Lídia Amorim Pires Zottarelli	Instituto de Botânica de São Paulo
Carmen Lucia Paiva Silveira	Centro Universitário Plinio Leite
Catarina da Silva Pedrozo	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Cecília Volkmer Ribeiro	Fundação Zoobotânica do RGS
Celso Augusto Guimarães Santos	Universidade Federal da Paraíba
César Ulisses Vieira Veríssimo	Universidade Federal do Ceará
Chigueru Tiba	Universidade Federal de Pernambuco
Cilene Gomes	Universidade Federal do Rio Grande de Norte
Claudia de Albuquerque Linhares	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Claudinei Fonseca Souza	Universidade de Taubaté
Cláudio José Von Zuben	Universidade Estadual Paulista
Cláudio Luis Frankenberg	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Corina da Costa Freitas	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Cyro Barros Rezende Filho	Universidade de Taubaté
Daniel Alves Aguiar	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Denilson Teixeira	Centro Universitário de Araraquara
Dirceu Luis Herdies	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Durval Dourado	Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Edson Rodrigues	Universidade de Taubaté
Eduardo Antonio Gomes Marques	Universidade Federal de Viçosa
Eduardo Pereira Cabral Gomes	Instituto de Botânica
Eduardo Rodrigues Viana de Lima	Universidade Federal da Paraíba
Eduardo Von Sperling	Universidade Federal de Minas Gerais
Elmo Rodrigues da Silva	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Emilia de Rodat Fernandes Moreira	Universidade Federal da Paraíba
Enio F. F. Silva	Universidade Federal Rural de Pernambuco
Enner Herenio Alcântara	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Ernani Francisco da Rosa Filho	Universidade Federal do Paraná
Eugenio Ávila Pedrozo	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Evlyn Márcia Novo	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Fabrício Sanguinetti Cruz de Oliveira	Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

Flávia Cristina Sossae	Centro Universitário de Araraquara
Flavio César Borba Mascarenhas	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Flávio Jorge Ponzoni	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Flavio José Malta	Universidade de Taubaté
Francisco de Sousa Ramos	Universidade Federal de Pernambuco
Francisco Gonçalves da Silva	Universidade Federal da Paraíba
Francisco Roberto Azevedo	Universidade Federal do Ceará
Georgina Bond Buckup	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Gerson Cardoso Silva Jr.	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Getulio Rincon	Universidade Estadual Paulista
Getulio Teixeira Batista	Universidade de Taubaté
Gilberto Fisch	Instituto de Aeronáutica e Espaço/ Centro Técnico Aeroespacial e Universidade de Taubaté
Gilson Barbosa Athayde Júnior	Universidade Federal da Paraíba
Glicério Trichês	Universidade Federal de Santa Catarina
Gustavo Ferreira Simões	Universidade Federal de Minas Gerais
Helena Carvalho Lorenzo	Centro Universitário de Araraquara
Helio Grassi Filho	Universidade Estadual Paulista - FCA
Henrique M.L. Chaves	Universidade de Brasília
Herickson Akihito Sudo Lutif	Universidad Carlos III de Madrid
Hermann Johann Heinrich Kux	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Herminia Yohko Kanamura	Universidade de Taubaté
Homero Giorge Cerqueira	Polícia Militar do Estado De São Paulo
Horst Frischkorn	Universidade Federal do Ceará
Hugo Moreira Soares	Universidade Federal de Santa Catarina
Humberto Calloni	Fundação Universidade Federal do Rio Grande
Ijar Milagre da Fonseca	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Iraê Amaral Guerrini	FCA/Universidade Estadual Paulista
Itamar Alves Martins	Universidade de Taubaté
Jacob Binsztok	Universidade Federal Fluminense
Jaime Cabral	Universidade Federal de Pernambuco
Jairo José de Oliveira Andrade	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
João Carlos Pinheiro Beck	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
João Graciano Mendonça Filho	Departamento de Geologia, Inst. de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro
João Luiz Lani	Universidade Federal do Rio de Janeiro
João Roberto dos Santos	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

João Vianei Soares	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Joel Avruch Goldenfum	IPH-Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Jorge Luiz Gavina Pereira	Museu Paraense Emilio Göeldi
Jorge Rubio	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Jorge Xavier da Silva	Universidade Federal do Rio de Janeiro-Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Jose A. Marengo	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
José Alberto Quintanilha	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
José Alexandre Melo Demattê	ESALQ / Universidade de São Paulo
José Angel Alvarez Perez	Universidade do Vale do Itajaí
José Antonio Perrella Balestieri	Universidade Estadual Paulista
José Carlos Becceneri	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
José Carlos de Araújo	Universidade Federal do Ceará
José Carlos Mierzwa	Universidade de São Paulo
José Dias Corrêa Junior	Universidade Federal de Minas Gerais
José Eduardo dos Santos	Universidade Federal de São Carlos
José Eloi Guimarães Campos	Universidade de Brasília
José Euclides Stipp Paterniani	Universidade de Campinas
José Geraldo Querido	Universidade de Taubaté
José Marinaldo Gleriani	Universidade Federal de Viçosa
José Marques da Costa	Universidade de Taubaté
José Renato Boucas Farias	Embrapa Soja
Juliana Cristina Barreiro	Universidade Federal de São Carlos
Jurandir Zullo Junior	CEPAGRI/Universidade de Campinas
Leonardo Santos Collier	Universidade Federal do Tocantins
Leonor Almeida Souza-Soares	Fundacao Universidade do Rio Grande
Lia Osório Machado	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Lidriana de Souza Pinheiro	Universidade Estadual do Ceará
Loreley Gomes Garcia	Universidade Federal da Paraíba
Lucia Maria Sa Antunes Costa	PROURB - FAU - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Luciano Farinha Watzlawick	Universidade Estadual do Centro-Oeste
Luis Alberto Basso	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Luis Antônio Serrão Contim	Centro Universitário Nilton Lins
Luis Eduardo Aragon	Núcleo de Altos Estudos Amazônicos/Universidade Federal do Pará
Luís Fernando Stone	Embrapa Arroz e Feijão

Luiz Fernando Coutinho Oliveira	Universidade Federal de Lavras/ Universidade Federal de Goiás
Luiz Fernando Nascimento	Universidade de Taubaté
Magda Adelaide Lombardo	Universidade Estadual Paulista
Manoel Alonso Gan	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Mara Regina Rizzatti	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Marçal José Rodrigues Pires	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Marcelo Friederichs Landim Souza	Universidade Estadual de Santa Cruz
Marcelo Santos Chaves	Universidade Federal da Paraíba
Márcio J. Estefano de Oliveira	Universidade de Taubaté
Marco Antonio Igarashi	Universidade Federal do Ceará
Marcos Adami	Secretaria de Est. da Agricultura e do Abastecimento do Paraná
Marcos Gervasio Pereira	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Marcos Rivail Silva	Universidade Regional de Blumenau
Marcus Cesar Avezum Castro	Universidade Estadual Paulista - Rio Claro
Maria Anita Mendes	Universidade de São Paulo
Maria Claudia Barbosa	COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro
Maria Cristina Crispim	Universidade Federal da Paraíba
Maria Cristina Vidotte Blanco Tarrega	Universidade Federal de Goiás
Maria de Jesus Robim	Instituto Florestal, Secretaria Meio Ambiente e Universidade de Taubaté
Maria do Carmo Vieira	Universidade Federal da Grande Dourados
Maria Dolores Alves Cocco	Universidade de Taubaté
Maria Elaine de Oliveira	Universidade Federal Fluminense
Maria Helena Arruda Leme	Universidade de Taubaté
Maria Hermínia Ferreira Tavares	Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Maria Inês Salgueiro Lima	Universidade Federal de São Carlos
Maria Isabel Queiroz	Fundação Universidade Federal do Rio Grande-Fundacao Universidade do Rio Grande
Maria Jesus Robim	Instituto Florestal do Estado de São Paulo
Maria Lúcia Calijuri	Universidade Federal de Viçosa
Maria Lúcia Ribeiro	Centro Universitário de Araraquara
Maria Victoria Ramos Ballester	Centro de Energia Nuclear na Agricultura / Universidade de São Paulo
Mariko Ueno	Universidade de Taubaté
Mário Augusto Jardim	Museu Paraense Emilio Göeldi

Mario Valério Filho	Universidade do Vale do Paraíba
Marisete Dantas Aquino	Universidade Federal do Ceará
Mauricio Alves Alves Moreira	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Maurício Alves da Motta Sobrinho	Universidade Federal de Pernambuco
Mauro Antonio Homem Antunes	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Milton Kampel	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Neida Patias Volpi	Universidade Federal do Paraná
Nelson de Jesus Ferreira	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Nelson Delfino d´Ávila Mascarenhas	Universidade Federal de São Carlos
Nelson Wellausen Dias	Universidade de Taubaté
Nestor Aldo Campana	Universidade de Brasília
Néstor Antonio Heredia Zárate	Universidade Federal da Grande Dourados
Ney Augusto Nascimento	Universidade Federal do Paraná
Orivaldo Brunini	Instituto Agronômico de Campinas
Osmar Alves Lameira	Embrapa Amazônia Oriental
Pablo Santana Santos	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/SIPAM
Patrick Thierry Seyler	IRD/Universidade de Brasília
Paula Benevides de Morais	Universidade Federal do Tocantins
Paulo Cesar Sentelhas	Universidade de São Paulo-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Paulo Roberto Cecon Paulo Roberto Cecon	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Paulo Roberto Meneses	Instituto de Geociências - Universidade de Brasília
Paulo Sergio Graziano Magalhaes	Universidade de Campinas
Pedro Teixeira Lacava	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Petrônio Alves Coelho	Departamento de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco
Philippe Maillard	Universidade Federal de Minas Gerais
Rauquírio André Albuquerque Marinho da Costa	Universidade Federal do Pará
Regina Peralta Moreira	Universidade Federal de Santa Catarina
Regis Alexandre Lahm	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Reinaldo José da Silva	Universidade Estadual Paulista
Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel	Universidade Federal Rural de Pernambuco
Renato Mello Prado	Universidade Estadual Paulista
Ricardo Santos	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Richarde Marques Silva	Universidade Federal da Paraíba
Roberto de Oliveira	Universidade Federal de SergipeC

Roberto José Carvalho	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Roberto Luiz Carmo	IFCH/Universidade de Campinas
Ronaldo Borges Barthem	Museu Paraense Emílio Göeldi
Ronaldo Viana Soares	Universidade Federal do Paraná
Rosa Maria Formiga Johnsson	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Rouverson Pereira da Silva	Universidade Estadual Paulista
Sandro Froehner	Universidade Federal do Paraná
Serafim Daniel Ballestero	Universidade de Taubaté
Sérgio Campos	Universidade Estadual Paulista
Shiguenoli Miyamoto	Universidade Estadual de Campinas
Silvia Helena Govoni Brondi	Embrapa Pecuária Sudeste
Simey Thury Vieira Fisch	Universidade de Taubaté
Simone Pinheiro Pereira	Universidade Federal do Pará
Solon Jonas Longhi	Universidade Federal de SergipeM
Sonia Cristina J. G. de Andrade Perez	Universidade Federal de São Carlos
Stelio Maia Menezes	Universidade Federal de Lavras
Teresinha Guerra	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Thereza Christina Almeida Rosso	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Ubirajara Aluizio Mattos	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Ubiratan Ferrucio Faccini	UNISINOS
Ulisses Thadeu Vieira Guedes	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Valdemar Luiz Tornisielo	CENA/Universidade de São Paulo-Piracicaba
Valdemir Antonio Rodrigues	Universidade Estadual de São Paulo
Vicente de Paulo Rodrigues Silva	Universidade Federal de Campina Grande
Vicente Paulo Soares	Universidade Federal de Viçosa
Walter de Paula Lima	Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
Washington Franca-Rocha	Universidade Estadual de Feira de Santana
Yanko Marcius de Alencar Xavier	Universidade Federal do Rio Grande de Norte
Yosio Edemir Shimabukuro	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Yuri Tavares Rocha	Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo

ÍNDICE

CAPA

Foz do Rio Tapajós e trecho do Rio Amazonas entre Óbidos e Santarém, PA. As linhas tracejadas representam a faixa de dados imageada pelo sensor Hyperion. O gráfico embaixo à esquerda mostra as hidrógrafas do Rio Amazonas, em Óbidos para os anos de 2001 e 2005.

Fonte: RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M; GALVÃO, L. S. G. Spectral mixture analysis for water quality assessment over the Amazon floodplain using Hyperion/EO-1 Images. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 1, n. 2, p. 65-79, 2006. ***(doi:10.4136/ambi-agua.13)***

EDITORIAL

Publicação Científica *(doi:10.4136/ambi-agua.8)* 11

Getulio Teixeira Batista

ARTIGOS

SAR data for the analysis of forest features: current Brazilian experiences *(doi:10.4136/ambi-agua.9)* 15

João Roberto dos Santos; Fábio Furlan Gama; Fábio Guimarães Gonçalves

Monitoramento e estimativa da produtividade de soja auxiliados pelo modelo regional de previsão de tempo ETA *(doi:10.4136/ambi-agua.10)* 28

Rodrigo Rizzi; Bernardo Friedrich Theodor Rudorff; Ramon Morais de Freitas; Denise Cybis Fontana

Modelagem do volume e do peso da casca de Bracatinga (Mimosa scabrella – Bentham) na região metropolitana de Curitiba, Paraná *(doi:10.4136/ambi-agua.11)* 39

Sebastião do Amaral Machado; Luís César Rodrigues da Silva; Edilson Urbano;

Marco Aurélio Figura; Saulo Jorge Téo; Lorena Stolle

Avaliação de índices de vegetação MODIS para detecção de desmatamentos na Amazônia *(doi:10.4136/ambi-agua.12)* 52

Antonio Henrique Correia; Antonio Roberto Formaggio; Yosio Edemir Shimabukuro; Valdete Duarte

Spectral mixture analysis for water quality assessment over the Amazon floodplain using Hyperion/EO-1 images *(doi:10.4136/ambi-agua.13)* 65

Conrado de Moraes Rudorff; Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo; Lênio Soares Galvão

Avaliação do desempenho de diferentes classificadores (Isoseg, Bhattacharyya, Maxver e Maxver-ICM), utilizando imagens CCD/CBERS-1 e ETM+/Landsat-7 fusionadas *(doi:10.4136/ambi-agua.14)* 80

Camila Aguirre Góes; Wilson Lins de Mello Filho; Melissa Carvalho

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X
www.agro.unitau.br/ambi-agua
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br
Tel.: (12) 3625-4116

Scientific publication

(doi:10.4136/ambi-agua.8)

Getulio Teixeira Batista

Professor at the Master Degree Program in Environmental Sciences of the University of Taubaté.
Estrada Municipal Dr. José Luiz Cembranelli, 5.000; Bairro Itaim; 12.081-010 - Taubaté, SP
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br.

The necessary work for developing a scientific publication is sometimes underestimated and requires the effective participation of many players to obtain a result in good standard. Initially it depends upon the determination of the authors that decide to write the scientific article. Scientific writing is a very challenging and time consuming task, but at the same time essential for any scientist. A published scientific article is unquestionably one of the main indicators of scientific production, especially if published in a qualified scientific journal with highly qualified editorial committee and strict peer review procedure. By looking at evaluation criteria for scientific production of the several Thematic Scientific Committees of the Brazilian Council for Scientific and Technological Development (CNPq) it becomes clear publications in scientific journals that has certified quality is the most important item in the evaluation of a scientist production.

The process of scientific publication creates the opportunity of interaction among the editor, authors and peer reviewers. This may result in significant experience exchange and learning opportunity for all involved. In general, the editor is responsible for the overview of text preparation for publication (Kunsch, 2004) and assumes an important role in the intermediation of the communication among authors and peer reviewers to improve the quality of the scientific article to achieve the quality standard established by the journal's editorial board.

A scientific publication has to follow rules established for the journal since the article submission throughout the evaluation and review process. However, before the norms, comes the scientific content. It is essential that each article has a significant contribution to science advancement or reveals new knowledge about a theme or a particular region. According to Kunsch (2004) it is important to distinguish between "discover context" and "presentation context". In general, the first context determines whether the article has the potential to be published while the second context can be improved during the editorial and review process. It only requires critical sense, humbleness, persistence and interaction.

The structure of the text is essential. It is based on chapters that follow a logic sequence to expose the ideas that come from the experience reported by other authors, experimental data, analyses, etc. Articles with good scientific content presented in poor structured format are common. Krzyzanowski and Ferreira (1998) reporting on a critical analysis of scientific journals pointed out the following flaws: irregular publication and distribution of issues; lack of normalization of article's and journal's presentations; lack of editorial committee and peer reviewers. In addition, they reported that Brazilian journals have the difficulty of Portuguese language penetration and sometimes the lack of originality in the articles.

The editorial process of a scientific journal is complex because it involves articles from different authors, each one with particular style and approach. The editorial process involves the preparation of the original text for publication following the rules established for the journal. This necessarily requires standard procedures for evaluation and review of the submitted articles to achieve the quality goals established by the journal. For scientific

journals, the language details are less important than the technical evaluation of the scientific content of the article. However, it is essential that the text has good grammar standards and clarity. Thus, it an interdisciplinary journal must have a well composed peer review panel with broad scientific structure of proved qualified members. Therefore, this edition that closes the first published volume of Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science is dedicated to the peer reviewers, individually acknowledged in the first pages of this issue.

THE REVIEW PROCESS

The review process starts with the authors since the very first lines of the text. The authors should read the text from the beginning every time he/she restarts writing the article for continuous improvement of the language. This is an opportunity to revisit the text with different time perspectives. However, the author's vision can be amplified if the publication process offers plentiful opportunities for interaction. The process involves the work of scientists that have volunteered to review the scientific content of the article and critically analyze the scientific method and results. However, once the scientific analysis is concluded, the article should undergo a language review by a linguistic professional that will check the syntax, grammar, punctuation and expression clarity by eliminating any ambiguity in the text. A noticeable improvement in the initial text should be expected as a result of this procedure and although the article had significant scientific content, it might have had flaws in communication. The fundamental principle of this process is interaction. The reviewer cannot alter the meaning of the authors. Therefore, it is important the interaction between the reviewer and the authors to improve the text without missing any information. This is the fundamental role of the editor that intermediates the blind review process in which the authors and reviewers don't know the identity of each other. The editor should keep an efficient dialogue with the authors to make sure that the reviewers` suggestions are correctly interpreted and implemented.

The editor of a scientific journal should verify whether the set of articles are written following the journal's rules. To accomplish this, it is critical that, in accordance with international standards, the journal has clearly established a format for presentation and explicitly describe its procedure for the evaluation of submitted articles. The editor should guarantee that all operational details are running smoothly and the periodicity of publications are met, that a respectable panel of experienced peer reviewers is able to cover a broad diversity of knowledge and geographical areas.

Thus, the first editorial decision of Ambiente e Água - an Interdisciplinary Journal of Applied Science was to define the procedure for evaluation and review of submitted articles.

THE REVIEW PROCESS OF AMBI-ÁGUA

All of the submitted articles are examined by the editor to verify whether the content of the article is appropriate for the journal and whether the manuscript was prepared in agreement with the instructions to the authors. The editor can reject the article if he/she detects: major disagreement with the instructions; careless writing; or if, the work doesn't contain enough scientific or technological merit. Once that phase is over, the editor will send the manuscript to a member of the Editorial Committee that will suggest at least two peer reviewers with knowledge in the theme of the proposed manuscript. The reviewers should be scientific specialists that work in areas related with the theme of the submitted manuscript and, therefore, should be fully qualified to evaluate the manuscript and to recommend the

acceptance or rejection. The reviewers will receive the manuscript, without any identification of the authors, a letter with instructions concerning the review process, and an evaluation form to manifest their comments and recommendations on the acceptance, correction or rejection of the article.

The reviewers will strictly consider all criteria suggested in the form for the evaluation of the submitted manuscript, and they will examine the quality of the text.

In any stage of the process, the reviewers will not know the authors' identity, as well as, the authors won't know the reviewers' identity.

After examining the reviewers' recommendations, the editor will take one of the following decisions: To accept the article with small changes and, in this case, the editor will return the manuscript to the authors with a list of small corrections to be implemented. Examples of small changes are typographic mistakes, pages without numbering, articles mentioned in the text that don't appear in the references and vice-versa, small discrepancies between the abstract in the two languages of the journal, and small corrections in the text. If the modifications don't alter the text significantly, the editor will read the article and conclude the process. Otherwise he will opt to send the next version of the manuscript to the reviewers of the manuscript.

When more significant modifications are needed, the editor will return the manuscript with a list of suggestions that the corresponding author should comply with to enable the article to be considered for publication. Examples of these modifications include the re-analysis of data using statistical proofs, revision of tables and figures, replication of experiments, and deep revision or substantial changes in the text. The opportunity to review the corrections after their suggestions will always be given to the reviewers.

In the case of rejection, the editor will inform the corresponding author the reasons for not publishing the article. In general, the reasons for rejection involve inappropriate content of the manuscript for the journal, serious violations of the publication rules, or article without scientific or technological merit.

When the final version of the manuscript is received, the editor will confirm to the corresponding author the acceptance, indicating the volume and issue it will be published and then the corresponding author will receive the proofs. At this time the authors will return a signed form, by regular mail authorizing the publication and attesting the originality of the article.

FINAL REMARKS

The integrated management of a scientific journal using a digital system that operates from any place with access to the Internet allows the monitoring of an article from the submission to the publication as in the Electronic Journal Publishing System (SEER, Soares et al., 2004). This represents a great progress in the editorial process not only for saving paper and mail costs, but mainly for fostering the editor's communication with the authors and reviewers. The editor should be extremely careful in fomenting that interaction. The motivation for publications varies among submitters and could affect the different phases of the publication process. Many students submit manuscripts to accomplish course requirements and when they have to face the revision process they give up since they already accomplished the requirement and don't want to invest the necessary time for improving their article. The editor has the role of intermediating interactions in search of quality improvement. The editor should be more than a transmitter of the reviewers' observations; he should also interpret the suggestions and interact with the authors to guarantee that the revisions are appropriately implemented for the sake of the article improvement. When

closing the first volume, the editorial board of Ambi-Água has the satisfaction of manifesting that the continuous interaction with the authors and reviewers resulted in a minimum processing time from the submission to the journal issue publication.

REFERENCES

KRZYZANOWSKI, R. F.; FERREIRA, M. C. G. Avaliação de periódicos científicos e técnicos brasileiros. **Ci. Inf.**, Brasília, v. 27, n. 2, p. 165-175, maio/ago. 1998.

KUNSCH, W. L. O que é editar um texto? In: ENCONTRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIAS DA COMUNICAÇÃO DA INTERCOM, 16., 06 a 09 de setembro de 2004. **Bibnews**... Disponível em: <http://listas.ibict.br/pipermail/bib_virtual/2006-August/003090.html>. Acesso em 12 dezembro 2006.

SOARES, S. B. C.; AMARAL, S. F.; ARELLANO, M. A. M.; SANTOS, G. C. Workshop Virtual Cibereduc: SEER: periódicos eletrônicos: editoração e acesso. **ETD: Educação Temática Digital**, Campinas, v. 1, n. 6, p.100-116, dez. 2004. Disponível em: <http://143.106.58.55/revista/viewarticle.php?id=30&layout=abstract >. Acesso em 15 dezembro 2006.

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X
www.agro.unitau.br/ambi-agua
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br
Tel.: (12) 3625-4116

SAR data for the analysis of forest features: current Brazilian experiences

(doi:10.4136/ambi-agua.9)

João Roberto dos Santos; Fábio Furlan Gama; Fábio Guimarães Gonçalves

National Institute for Space Research (INPE)
São José dos Campos – SP, Brasil
{jroberto, fabiogg}@dsr.inpe.br; fabio@dpi.inpe.br

ABSTRACT

This article presents some applications of airborne polarimetric and/or interferometric microwave data to improve the knowledge of forest structures. Three airborne SAR (Synthetic Aperture Radar) experiments were done in the Amazon tropical forest: (a) to study the spatial distribution of very large trees (VLTs) in the primary forest using local maximum filtering and a series of Markov processes; (b) to model the estimation of biomass variations in primary and secondary forests; (c) to analyze the retrieval of timber volume over selective logging areas. Another experiment (d) was to investigate the relation among SAR data and the volumetric configuration in stands of *Eucalyptus* sp. done by an airborne SAR imaging mission in SE-Brazil. To perform the objectives (b), (c) and (d) we carry out regression techniques, using variables got from multipolarimetric and/or interferometric SAR attributes and biophysical parameters from the forest cover. All data from the experiments were calibrated radiometrically to extract information during digital processing, besides an exhaustive field survey which was done simultaneously to SAR imaging, to know the physiognomy/structure of forest typology and to support the models produced for each case. The results of this series of experiments show advances at the techniques to treat SAR data, focusing on models of stand architecture and forest stock density. This will be helpful to increase the regional inventory and surveying procedures of forest conversion in the Brazilian territory in the near future.

Keywords: forest structure; SAR; forest inventory; remote sensing; tropical forest; *Eucalyptus* sp.; forest modeling.

Dados SAR para análise de parâmetros estruturais florestais: experiências brasileiras atuais

RESUMO

Este artigo apresenta alguns resultados da aplicação de dados polarimétricos e/ou interferométricos de radar aerotransportado no aprimoramento do conhecimento da estrutura florestal. Três experimentos científicos com radar de abertura sintética (SAR) foram realizados na floresta tropical Amazônica, tendo como linhas investigativas: (a) estudar a distribuição espacial de árvores de grande porte (Very Large Trees) em áreas de floresta primária, utilizando para tal, técnicas de filtragem de máximas locais (LM) e de processos de Markov; (b) modelar a estimativa de biomassa e suas variações em áreas de floresta primária e secundária; (c) estimar o volume de madeira em áreas de floresta tropical sob regime de exploração madeireira. Um outro experimento (d) foi investigar a relação dos dados SAR e a configuração volumétrica em povoamentos de *Eucalyptus* sp., cuja missão de imageamento SAR aerotransportado foi recentemente conduzida na região sudeste do Brasil. Os objetivos

(b), (c) e (d) foram investigados por meio de técnicas de regressão, empregando variáveis derivadas de atributos multi-polarimétricos e/ou interferométricos SAR versus aquelas derivadas de parâmetros biofísicos da cobertura florestal. Todos os experimentos acima mencionados tiveram seus dados devidamente calibrados radiometricamente para extração de informações no processamento digital, além de exaustivo trabalho de campo, simultâneo ao imageamento SAR, para o conhecimento fisionômico-estrutural da tipologia florestal e validação dos modelos gerados em cada caso. Os resultados dessa série de experimentos mostram avanços nas técnicas de tratamento dos dados SAR, focalizando na construção de modelos da arquitetura do povoamento e no estoque de biomassa florestal. Isso será muito útil para melhorar os procedimentos de inventário regional e monitoramento das conversões de floresta no território brasileiro.

Palavras-chave: estrutura florestal; SAR; inventário florestal; sensoriamento remoto; floresta tropical; *Eucalyptus* sp.; modelagem florestal.

1. INTRODUCTION

The multipolarimetric and/or interferometric approach, rather than using a single frequency radar, allows details to be obtained about three-dimensional forest structures of the scattering targets under study (Kasischke et al., 1997 and Treuhaft et al., 2004). Using this approach it is possible to set up relationships about biomass and volumetric contents of natural and planted forest stands. Some experiments using SAR data for mapping and forest inventory were conducted in different sites, as described below:

- the spatial distribution of very large trees (VLTs) in an Amazon primary forest was extracted from a digital model of interferometric height by an approach of local maximum filtering;
- the radar backscatter values drawn from specific polarizations were combined with an interferometric height model (derived from X- and P-bands) to settle a statistical relationship with forest aboveground biomass;
- a combination of multipolarimetric variables at amplitude and backscatter modes, derived from L-band, allows characterization those areas of forest with timber logging, as well as modeling estimating the commercial timber volume of the forest stands;
- multivariate analysis was used to produce a model to estimate forest volume of *Eucalyptus* sp. stands, associating the volumetric scattering (VSI), polarimetric coherence in P-band, as well as the interferometric height from DEM of X- and P-bands.

The studies are representative of knowledge of SAR (Synthetic Aperture Radar) data processing for forestry issues. To briefly introduce a reader on this subject, including ideas and applications of radar data in forestry, refer to Ulaby and Elachi (1990), Beaudoin et al. (1994), Rauste et al. (1994), Henderson and Lewis (1998), and Coops (2002). These authors studied multipolarimetric SAR backscatter for discriminating forest types, discussing those aspects of scattering and attenuation of SAR signals at different frequencies interacting with structural vegetation features. Further, Wegmüller and Werner (1997), Baltzer (2001), Neeff et al. (2005a), Kugler et al. (2006), Treuhaft et al. (2006) discuss the contribution of the interferometric mode to estimate biophysical parameters in forest areas. Pope et al. (1994) developed indices based on ratios and normalized differences of multipolarimetric data, which can be related to certain characteristics of vegetation cover, such as e.g. biomass index [BMI = $(\sigma^o_{HH} + \sigma^o_{VV}) / 2$], canopy structure index [CSI = $\sigma^o_{VV} / (\sigma^o_{VV} + \sigma^o_{HH})$], volume scattering index [VSI = $\sigma^o_{HV} / (\sigma^o_{HV} + \text{BMI})$], applied to tropical forests in Central America.

Power spectrum analysis was used for the analysis of spatial forest features (canopy structure and distances between major tree individuals) from airborne SAR (X-band) data in the Brazilian Amazon (Neeff et al., 2005b). Hoekman and Quiñones (2000), Hawkins et al. (2000), and Santos et al. (2002; 2003) specifically estimated forest biomass, and discussed backscatter saturation caused by the high-density of tropical forests.

2. THE AIRBORNE SAR CAMPAIGNS

Two early studies were conducted around the Tapajós National Forest, in the Brazilian Amazonia (W 54° 53' to 55° 06' and S 03° 03' to 03° 12'). The airborne SAR data were collected by the AeS-1 sensor system (Germany), which makes use of interferometric technology. It runs on X-band (λ = 3cm) with one polarization (HH) and, fully polarimetric on P-band (λ = 72cm; depression angle ~ 45°; range resolution 1.5m; azimuth resolution 0.7m for one-look slant range image).

The third study was also performed in the Tapajós region, but with data from SAR-R99B from SIPAM, onboard of an EMB-145 aircraft, in L-band HH, HV and VV polarization, with 10m spatial resolution. This mission was conducted within the technical cooperation between INPE/Brazilian Space Agency (AEB) and the German Aerospace Center (DLR) for analysis of construction of spaceborne radar (MAPSAR).

The fourth study was carried out recently in the Rio Paraíba Valley region (W 45° 23'to 45° 25'and S 22° 54' to 22° 55'), São Paulo State, provided airborne SAR data over reforested area with *Eucalyptus* sp., collected by the OrbiSAR-1 system (OrbiSat da Amazônia S.A.). It performs at X- band with HH polarization and 1m of resolution, including also, the full polarimetric P-band (range and azimuth resolution of 2m), both with an incidence angle of ~ 45°.

During all missions mentioned, corner reflectors were installed in the areas researched and used as references for the polarimetric and radiometric calibrations and/or also, as references for the interferometric phase analysis. A field survey was done simultaneously to the airborne SAR experiments that included several observation plots of land cover/land use classes and of sites of forest inventory, all georeferenced.

3. THE SAR INTERFEROMETRIC DATA FOR MODELING SPATIAL TREE PATTERNS

Of particular ecological significance for the carbon regime, the conditions of natural regrowth, and the patterns of the species diversity and distributions is assigned to very large trees (VLTs). Thus, the basic idea of this work is that trees with dominant crown position are VLTs, that therefore appearing in radar interferometric data, containing added information on the three-dimensional structure of the scattering targets of the area under study (Neeff et al., 2005a). Generally, the P-band radar signal penetrates a forest structure, to the ground surface, and it can be used for interferometric generation of a Digital Elevation Model (DEM). The X-band is reflected by canopy, and so the forest canopy is related to a Digital Surface Model (DSM). In this study, both models were thoroughly calibrated and had a spatial resolution (pixel size) of 2.5m. The difference between both models represents the height of vegetation, called "interferometric height" (hint). The application of local maximum (LM) filtering (Wulder et al., 2000) to a digital height model, directly makes use of the three-dimensional canopy structure of forest, where the areas of maximum vegetation height coincide with the tops of crowns. In this investigation, LM filtering, using circular windows with a radius of

three pixels (7.5m) were used focusing on three sample blocks (100 ha each) of undisturbed primary forest.

The spatial point patterns (stochastic process) of very large trees in the primary forest were modeled by a Markov point process models (Cressie, 1993), which could represent repulsive interactions of the structure that leads to a regular point pattern. In this case, the Complete Spatial Randomness model (CSR), Simple Sequential Inhibition model (SSI), Strauss process (Str), a Strauss Hard-Core model (StrHC) and a Soft-Core process (SC) were used.

Considering various specific results, it is possible to affirm that: the intensities of the VLT point patterns, considering all three blocks, are estimated to be ~ 7 trees/ha, and the mean distance of these trees is around 24m. The Soft-Core (SC) pair potential function (Figure 1) is a model that fits more significantly the data of these three blocks, where the empirical K-function remains within the confidence intervals from a Monte-Carlo simulation over the whole range of distances (Neeff et al., 2005a). Locations of very large trees are almost independent at distances above ca. ~ 29m, also, the repulsive dependence is shown to decrease smoothly with distance.

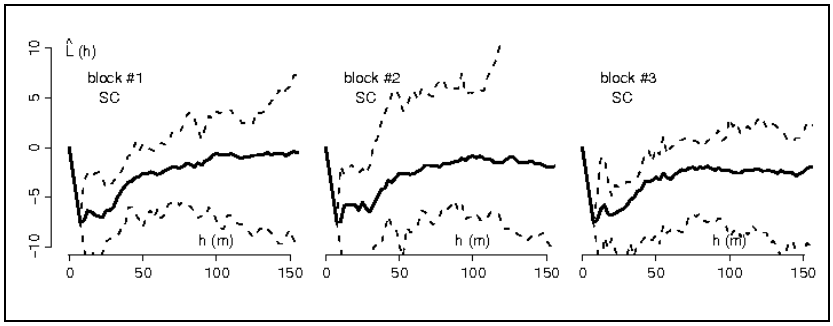


Figure 1. K-functions of the final model in all three sample blocks. Solid lines correspond to empirical K-functions, dotted lines are confidence intervals from Monte-Carlo simulations ($\alpha = 0.1$, $n = 20$), given the fitted soft-core model (SC). All functions are transformed for display purposes by the theoretical K-function under CSR to $L(h) = \sqrt{K_{CSR} / \pi} - h$.
Source: (Neeff et al., 2005a).

4. THE INTERFEROMETRIC AND POLARIMETRIC SAR DATA FOR ABOVEGROUND BIOMASS ESTIMATION

In previous studies, the stock of aboveground standing biomass of primary and secondary forests in the Tapajós region was related to backscatter values at P-band. Using logarithmic and polynomial functions R^2 values < 0.70 were obtained, with better data fitting at the HH polarization, when compared with HV and VV (Santos et al., 2003). The true ability and applicability of radar imagery may not be for biomass estimation "directly", but rather as a means to stratify forest stands along structural lines to reduce structural variation as a source of error (Coops, 2002). Considering that this fitting is not yet satisfactory for biomass estimation, it became necessary to insert the variable "interferometric height" in the modeling. So, the first methodological step was to segment the interferometric image (hint model), using a multilevel incremental algorithm (hierarchical region growth). This segmentation approach starts, according to (Sousa Jr. et al., 2003) with the image degradation (compression) in pyramid-like structural levels, where each level is represented by an average image (in this case, each pixel is formed by the average of four pixels from the image of the

hierarchical lower level). This relation with the neighborhood is defined by the t-Student test, to which an acceptance likelihood value is established (Cook et al., 1994). In this study, six hierarchical levels were considered. After the segmentation was ended, the interferometric height value for each polygon (matching to the positioning of SAR image of each georeferenced and inventoried sample during the field survey) was extracted. These interferometric height values of primary forests and secondary succession were then integrated into P_{HH} backscatter values, giving a biomass model, based on an adjusted equation. The thematic mapping was created sequentially with signs of biomass variations.

Because of this methodological development, the best biomass model [biomass = 44.965 + 13.887 × hint + 10.556 × $\sigma°_{Phh}$] was established after comprehensive testing of a range of specific allometric equations to achieve statistically high precision in standing biomass prediction (R^2 = 0.89). It is important to mention that during the absolute SAR calibration at P_{HH} band used during modeling, the values obtained varied +/- 0.77dB at the four corner reflectors used as calibration references. This biomass model was set up for all forest types occurring in this area; ranging from early regrowth with biomass levels below than 5 ton/ha to primary forest with biomass levels up to 350 ton/ha. This model is linear and thus not affected by saturation of backscatter response with increasing biomass levels that has been reported as a general problem of tropical forest watching by radar. Using this biomass modeling, the stratification of homogeneous landscape units with similar biophysical characteristics was done. The error of biomass estimation, using this model is of about 15% for primary forests (Figure 2).

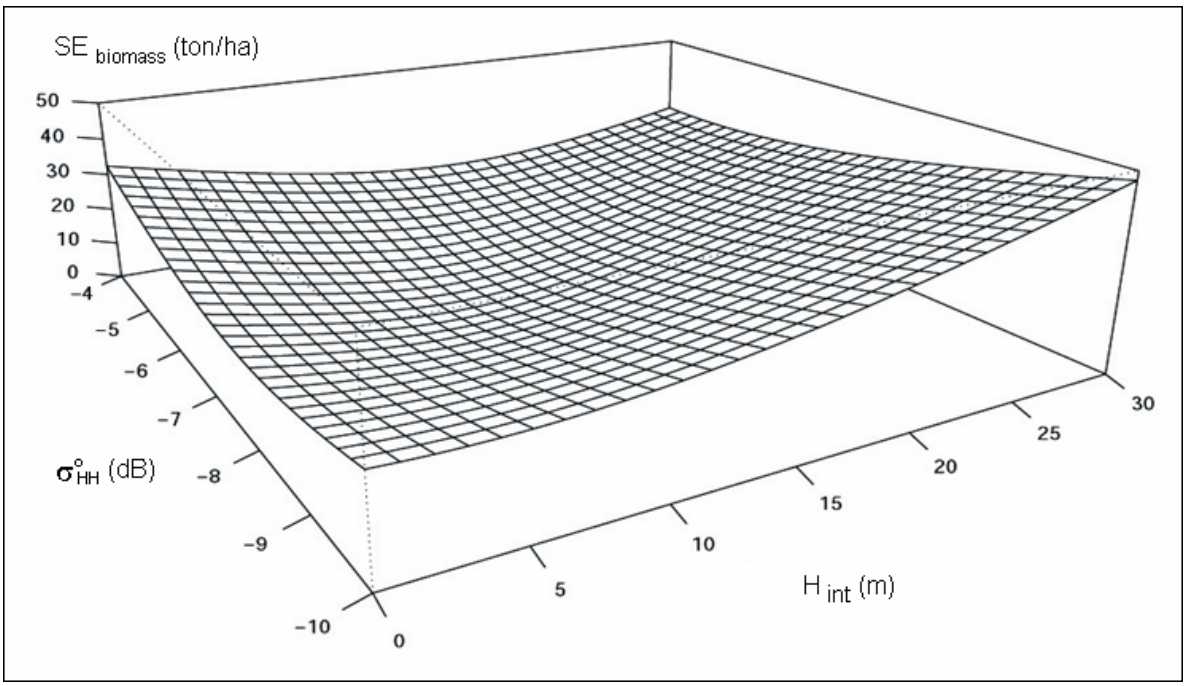


Figure 2. Variance of forest biomass estimation as a function of height interferometry and backscatter data. Source: (Santos et al., 2004).

Figure 2 plots the expected error of forest biomass prediction from radar data against the predictor variables. In multiple regression, uncertainty in predicting new observations changes with the values for the independent variables (here interferometric height and backscatter). We used the fitted regression model (presented above) for producing a surface of expected errors that would sketch the performance of the model. For this purpose, the prediction error is considered to match to the sum of the standard error of estimate and the

squared standard error of the mean prediction, both of which can be obtained from typical regression output. The surface of prediction errors shows the uncertainties in biomass estimation increase with extreme values for interferometric height and for backscatter.

5. THE MULTIPOLARIZED SAR DATA FOR MODELING VOLUME ESTIMATION IN FOREST WITH SELECTIVE LOGGING

An important point to be considered in this study is that SAR-R99B data were initially calibrated to perform the modeling. The following tasks were done: 1st antenna pattern correction to remove gain variations in the range direction (Ulaby et al., 1982) by a polynomial function applied to the sum of the amplitude values; and 2nd determination of the absolute calibration constant, based on the corner reflectors placed in the area under study during the imaging campaign, to allow transforming amplitude data in backscatter values of targets, using the method of peak power (Gray et al., 1999). For the absolute SAR calibration, the average error was -0.8443 dB and the standard deviation 0.18 dB, as related to the theoretical sigma, calculated from the response of 12 corner reflectors. Mura et al. (in press) describe, with more details, the calibration approach used for the polarimetric L-band of the SAR99-R99B. Based on this calibration, the similar σ^0 (dB) values for primary tropical forests (average σ^0_{HH} = -6.93; σ^0_{HV} = -11.66; σ^0_{VV} = -6.69) as those from Saatchi et al. (1997), Luckman et al. (1998), Hoekman and Quiñones (2000) and Santos et al. (2002). This shows the cohesion of the SAR-R99B response if compared with those responses of other L-band systems used, at similar polarizations.

To represent the variability existing at the forest management under study, 30 sample sections of 0.2 ha size, in blocks with different exploitation ages were established. Defining these forest inventory sections was done by stratified random sampling, and the polygons were delimited and positioned by GPS and Infrared Total Station. The commercial volumetric values of samples were determined by an allometric equation, developed by Queiroz (1984) for the Tapajós National Forest. This volumetric equation, based on the random collection of 110 trees in a stand of over 170 species, was defined as [Vest = a + b (DAP^2. H)]. Using this allometric model, and an uncertainty of 0.5% to 0.05% according to Brown et al. (1995), the coefficient values considered were a = 0.0775, b = 0.518 and R^2 = 0.965.

Multiple regression techniques were applied to derive a model for Commercial Timber Volume (VCM), using PolSAR L-band data. The model was defined by a set of explanatory variables which included the minimum, maximum, average, standard deviation and variation coefficient of amplitude and backscatter values (Henderson and Lewis, 1998), observed at the three polarizations (HH, HV and VV). Dispersion diagrams and correlation matrices were used at an exploratory analysis of the sensor data against those obtained in the field, to corroborate the need of transformations at the variables and/or to verify those which would best contribute to the model.

Table 1 shows the correlations among SAR polarimetric variables (amplitude and backscatter) and the commercial timber volume. Based on the adjusted determination coefficient criterion, the best subset of variables was the one formed by the minimum values of the interactions [$\sigma°_{HH}$ * $\sigma°_{HV}$] and [$\sigma°_{HH}$ * A_{HH}], as mentioned by Gonçalves et al. (2006). Using the statistical regression package of this model, we formed up to nine significant figures, simplified to only three significant figures. The general model is described by equation [VCM = - 140 + 0.0928 * ($\sigma°_{HH}$ * $\sigma°_{HV}$) – 0.00268 * ($\sigma°_{HH}$ * A_{HH})]. According to Brown et al. (1995) while studying the uncertainty of measurement, typical for environmental sciences, the use of five significant figures is false and misleading. Using the adapted Levene

test, it was verified the variance of residuals is constant at 5% significance level. During the validation process, this model was checked against independent data, with the spatialization of the timber volume estimates over 3,220ha of forest (38 blocks) checking estimated and observed values and using independent and representative blocks of the explored forest, it was shown the volume estimation error was below 20% for 80% of the samples (Figure 3).

Table 1. Correlation matrix between polarimetric and volume variables.

SAR variable	VCM minimum	VCM maximum	VCM average	Standard deviation	Variation coefficient
A_{HH}	0.50*	0.34	0.28	0.08	-0.22
A_{HV}	0.33	-0.05	0.22	-0.15	-0.32
A_{VV}	0.24	0.12	0.22	0.07	-0.15
σ^o_{HH}	0.49*	0.28	0.24	-0.30	-0.22
σ^o_{HV}	0.36*	-0.07	0.23	-0.31	0.15
σ^o_{VV}	0.24	0.05	0.20	-0.15	-0.23

(*) Significant correlations values at 5% significance level.
Source: Gonçalves et al. (2006).

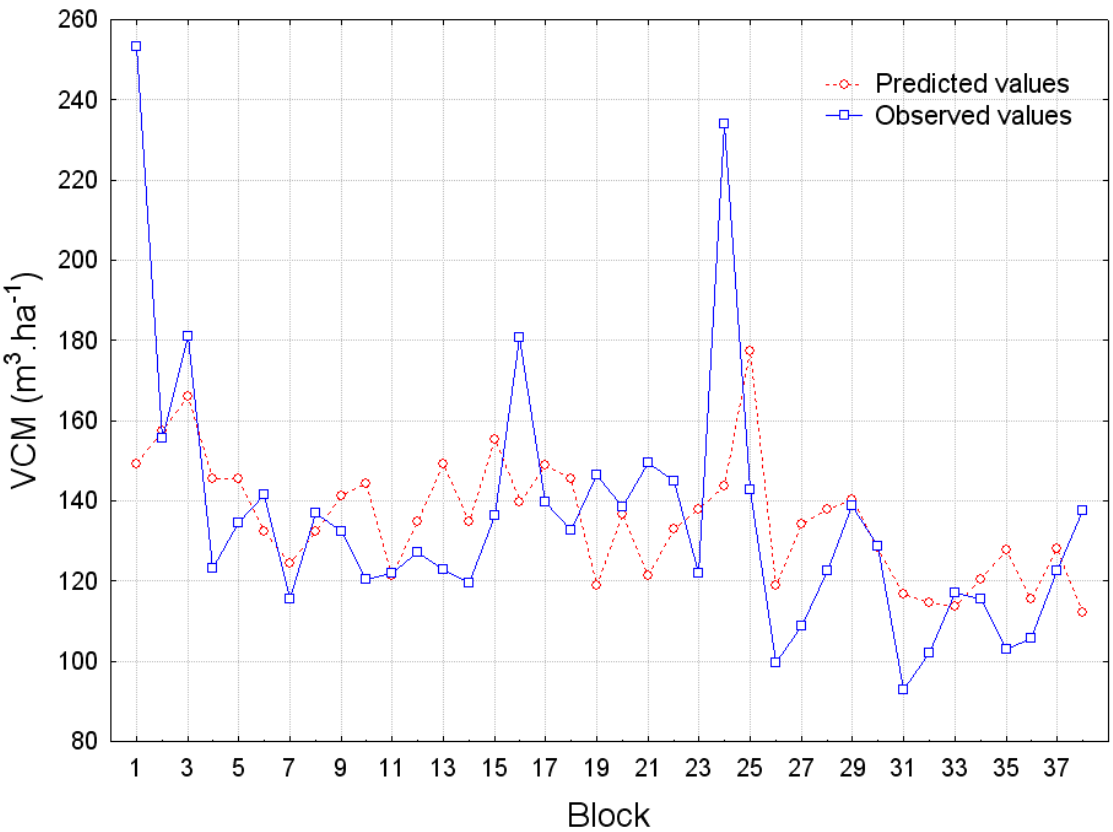


Figure 3. Comparison among estimated volume by a regression model and field measured volume in the sampling blocks of tropical forest under timber exploitation.

From the first results obtained with the amplitude and backscatter SAR values, we are doing analysis which allow to describe the polarimetric characteristics of forest targets from a new series of features which include: the phase difference ($\Delta\varphi$), and the polarimetric coherence (γ) among polarizations HH and VV, described by Henderson and Lewis (1998); the entropy (H), the anisotropy (A) resulting from the decomposition by autovectors from the coherence matrix (Cloude and Pottier, 1996) and the components of volumetric scattering

(Pv), double-bounce (Pd) and superficial (Ps), resulting from the incoherent decomposition of the covariance matrix (Freeman and Durden, 1998). To refine the models generated, some statistical procedures such as the diagnosis of multicolinearity, analysis of outliers and residuals (Neter et al., 1996; Shapiro et al., 1968) are part of the methodological approach, at the interaction of SAR and field survey data.

6. THE INTERFEROMETRIC AND POLARIMETRIC SAR DATA FOR VOLUMETRIC MODELING OF *EUCALYPTUS* SP. STANDS

To allow modeling, the OrbiSAR-1 data (X- and P-bands) was initially calibrated radiometrically from several corner reflectors, scattered on strategic places, along the imaging SAR lines. Therefore, the antenna pattern correction, the absolute calibration were done, and the polarimetric calibration to minimize the distortions imposed by the PolSAR system in the scattering matrix (cross talk and channel imbalance), using the method proposed by Quegan (1994).

The *Eucalyptus* volume model was estimated by linear regression modeling between by a field inventory data and the interferometric and radiometric SAR data. This study area in Pindamonhangaba/SP region was featured by a 6.1 years old *Eucalyptus saligna* culture. The field inventory data was obtained by measurement of the DBH and height of all trees in 23 independent stands of ~400m^2 each, these data were used to calculated the stands volume values using form factor. Simultaneously some topographic profiles were carried out using Infrared Total Station in the same stands, for the interferometric quality DEM analysis.

To select the variables to the regression model the Stepwise, Cp, R^2 and R^2a were used, as well as the Cook's distance to find the outliers cases. The Levene's method was used to corroborate the homoscedastic behavior of regression residues.

The comparison of the topographic surveying results and the Digital Elevation Model (DEM) by interferometry in P-band showed that a better correlation was obtained in the HH polarization, if compared with the result of other polarizations to describe the ground height. This result pointed out the diameter of the trees didn't influence the P-band interferometry, and only the interaction with the ground forest has happened. The DEM from interferometry in X-band followed the tree heights, when compared with the inventory data (Gama et al., 2006).

The SAR radiometry, and the volumetric scattering index (VSI) were also tested, but they weren't significant statistically for the timber volume model, so these variables were discarded for the regression model. Particularly the X-band radiometry had a significant capacity to discriminate differences in stands of *Eucalyptus* formed by clones; this response of the X-band, was expected because of shorter wavelength being attenuated by foliage in the canopy, making discrimination from lower parts of the forest stand more difficult (Coops, 2002). It was also expected that both indices VSI (measure of the depolarization of the linearly polarized incident radar angle, which expresses the canopy thickness or density) and CSI (measure of the relative importance of vertical versus horizontal structure in the forest cover), set up by Pope et al. (1994), would allow an improvement from the performance of the models, easing a physical explanation in the set of SAR variables for the volumetric estimation, but in fact it did not occur.

Similar to the SAR radiometry, the interferometric coherence in P- and X-band presented low sensitivity to the trees volume; however, the X-band coherence had also a significant ability to discriminate species differences in clones' stands.

The final volume regression model pointed out the logarithm of interferometric height (Log hint) (difference between interferometric DEM in X- and P-bands) was the most relevant SAR variable to this model. The reason for this behavior was due the fact the

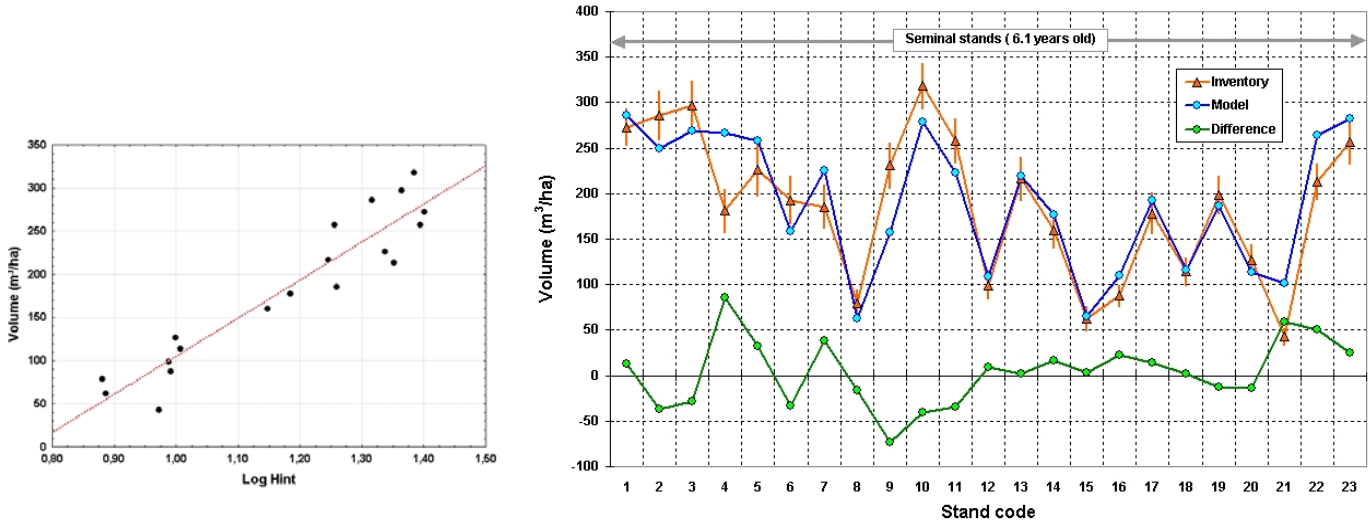
Eucalyptus trees structure are mainly cylindrical and vertically oriented, with a small crown, whose height is related to the timber volume, so the regression model using the interferometric height could estimate the volume.

The volume model earned 83.53% for the determination coefficient, with one outlier case. The graphics of the Figure 4a picture the model behavior, of the final model equation: Volume = -314.035 + 427.946 Log hint.

The graphics of the Figure 4b shows the model results in comparison with the inventory data, and the differences of these data. The biggest difference occurred in the stand 4 due this case was considered as outlier in the regression and was not used to build the regression model.

Comparing the predicted results with the inventory data, noticed that some cases showed differences beyond the standard deviation of the data, because of the outlier that was discarded in the regression and the presence of gaps in the stands between 6.9 to 60.3%, that prejudiced the interferometric height by the SAR sensor.

For the model validation the criterion PRESS (PREdiction Sum of Squares) and SSE (Sum of Squares Errors) were used, the values were similar, that allowed to use the MSE (Mean Squared Errors) and pointed out the prediction errors. The MSE for the volume regression model presented 1,126.6 of value, that represented 33.56 m^3/ha, or 10.55% of prediction error if compared with maximum stands volume.



a) b)

Figure 4. a) Volume regression model; b) Response of volumetric distribution of the *Eucalyptus sp.* stands based on the interferometric height logarithm.

7. CONCLUSIONS

Based on the three experiments, we concluded that:

- The very large trees with their dominant position in the forest can be identified by interferometric SAR technology drawn from X- and P-band, in ground resolution which is compatible with the object under study. The analysis and modeling of the spatial point patterns of very larges trees are possible by local maximum filtering technique and series of Markov process;
- Biomass estimates, when incorporating interferometric height and backscatter data, provide a higher accuracy to the estimation model. A good calibration of digital surface model and digital elevation model are necessary to create an acceptable image of interferometric height;

- The model selected to estimate the commercial volume of forest under timber exploitation, which uses the variables amplitude and backscatter at L-band, pointed out consistency for predicting the estimation, whose performance was proved by a large independent sampling;
- Considering these preliminary results, the interferometric products (Log hint) have a strong relationship with the *Eucalyptus* volume, mainly because this forest has a well defined and small understory, and the species under study has a small canopy despite its great height, and the volume is related to the height of stands.

The forest structure has a significant effect on the radar signal and, often, it is the overwhelming variable in controlling the type and quantity of backscatter observed in forest environments. Advances in analysis of SAR data, focusing in models of stand architecture, stocking density and picture forest growth will be helpful to increase regional inventory and surveying procedures of forest change-over in the Brazilian territory in the near future.

8. ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge CNPq and CAPES for the research grants; the 5th Divisão de Levantamento do Exército, 8th BEC (Brazilian Arm), IBAMA/MMA, LBA office (Santarém-PA), Nobrecel Celulose e Papel S.A., Diâmetro Biometria e Inventário Florestal, ORBISAT da Amazônia S.A. for the logistic support. These studies are a contribution to the "Science and Technology for the Management of Ecosystems" Program, from the Brazilian Ministry for Science and Technology (MCT).

9. REFERENCES

BALTZER, H. Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (INSAR). **Progress in Physical Geography**, London, v. 25, n. 2, p. 159-177, 2001.

BEAUDOIN, A.; LE TOAN, T.; GOZE, S.; NEZRI, E.; LOPEZ, A.; MOUGIN, E. et al. Retrieval of forest biomass from SAR data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 14, p. 2777-2796, 1994.

BROWN, I. F.; TURCQ, B.; ALECHANDRE, A. Teaching concepts of accuracy, precision, and opportunity cost in environmental sciences: arms, legs, and significant figures. **Ciência e Cultura**, Campinas, v. 47, n. 1/2, p. 41-44, 1995.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 34, n. 2, p. 498-518, 1996.

COOK, R.; Mc CONNELL, L.; OLIVER, C. J.; WELBOURNE, E. MUM (Merge Using Moments) segmentation for SAR images. In: EUROPTO SAR DATA PROCESSING FOR REMOTE SENSING – SPIE, 1994, Rome. **Proceedings…** Rome: [S.n.], 1994. p. 92-103. vol. 2316.

COOPS, N. C. *Eucalyptus* forest structure and synthetic aperture radar backscatter: a theoretical analysis. **Trees**, Berlin, v. 16, n. 1, p. 28-46, 2002.

CRESSIE, N. A. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley & Sons, 1993. 900p.

FREEMAN, A.; DURDEN, S. L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 36, n. 3, p. 963-973, 1998.

GAMA, F. F.; SANTOS, J. R.; MURA, J. C.; RENNÓ, C. D. Estimation of biophysical parameters in the *Eucalyptus* stands by SAR data. **Ambiência**, Guarapuava, v. 2, n. 1, p. 29-42, 2006.

GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R.; LOPES, A. L. B. Análise de dados SAR para estimativa volumétrica da floresta tropical em regime de exploração madeireira. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 7., Curitiba, 2006. **Anais…** Curitiba: [S.n.], 2006. p. 42-48.

GRAY, A. L.; VACHON, P. W.; LIVINGSTONE, C. E.; LUKOWSKI, T. L. Synthetic Aperture Radar calibration using reference reflectors. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,** Piscataway, v. 28, n. 3, p. 374-383, 1990.

HAWKINS, R. K.; ATTEMA, E.; CRAPOLICCHIO, R.; LECOMTE, P.; CLOSA, J.; MEADOWS, P. J. et al. Stability of Amazon backscatter at C-band: spaceborne results from ERS-1/2 and Radarsat-1. In: SAR WORKSHOP: CEOS COMMITTEE ON EARTH OBSERVATION SATELLITES, 1999, Toulouse. **Proceedings…** Paris: European Space Agency, 2000. p. 99-108.

HENDERSEN, F. M.; LEWIS, A. J. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: RYERSON, R. A. (Ed.). **Principles & applications of imaging radar**: manual of remote sensing. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. p. 131-181.

HOEKMAN, D. H.; QUINONES, M. J. Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in the Colombian Amazon. **IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 38, n. 2, p. 685–696, 2000.

KASISCHKE, E. S.; MELACK, J. M.; DOBSON, M. C. The use of imaging radar for ecological applications: a review. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 59, n. 2, p. 141-156, 1997.

KUGLER, F.; PAPATHANASSIOU, K. P.; HAJNSEK, I. Forest height estimation over tropical forest by means of polarimetric SAR interferometry. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 7., 2006, Curitiba. **Anais…** Curitiba: [S.n.], 2006. p. 504-512.

LUCKMAN, A.; BAKER, J.; HONZÁK, M.; LUCAS, R. Tropical forest biomass density estimation using JERS-1 SAR: Seasonal variation, confidence limits, and application to image mosaics. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 63, n. 2, p. 126-139, 1998.

MURA, J. C.; CORREIA, A. H.; HONDA, P. Calibração preliminar dos dados SAR polarimétricos em banda L do sensor R99B do CENSIPAM. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, in press.

NEEFF, T.; BIGING, G. S.; DUTRA, L. V.; FREITAS, C. C.; SANTOS, J. R. Modeling spatial tree pattern in the Tapajós forest using interferometric height. **Revista Brasileira de Cartografia**, Presidente Prudente, v. 57, n. 1, p. 1-6, 2005a.

NEEFF, T.; DUTRA, L. V.; SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAUJO, L. S. Power spectrum analysis of SAR data for spatial forest characterization in Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 26, n. 13, p. 2851-2865, 2005b.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. Applied linear statistical models 4 ed. Boston: McGraw-Hill, 1996. 1408p.

POPE, K. O.; REY-BENAYAS, J. M.; PARIS, J. F. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in Central American Tropics. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 2, n. 48, p. 205-219, 1994.

QUEGAN, S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data – theory and observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,** Piscataway, v. 32, n. 1, p. 89-99, 1994.

QUEIROZ, W. T. **Análise de fatores pelo método da máxima verossimilhança: aplicações ao estudo da estrutura de florestas tropicais.** 1984, 112f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

RAUSTE, Y.; HAME, T.; PULLIAINEN, J.; HEISKA, K.; HALLIKAINEN, M. Radar based forest biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing,** London, v. 15, n. 14, p. 2797-2808, 1994.

SAATCHI, S. S.; SOARES, J. V.; ALVES, D. S. Mapping deforestation and land use in Amazon rainforest by using SIR-C Imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 59, n. 2, p. 191-202, 1997.

SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAUJO, L. S.; DUTRA, L. V.; MURA, J. C.; GAMA, F. F. et al. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 87, n. 4, p. 482-493, 2003.

SANTOS, J. R.; NEEFF, T.; ARAUJO, L. S.; GAMA, F. F.; DUTRA, L. V.; SOUSA JR. M. A. Interferometria SAR (bandas X e P) na estimativa de biomassa florestal. **Série em Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 4, p. 161-175, 2004.

SANTOS, J. R.; PARDI LACRUZ, M. S.; ARAUJO, L. S.; KEIL, M. Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. **International Journal of Remote Sensing,** London, v. 23, n. 7, p. 1217-1229, 2002.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.; CHEN, H. J. A comparative study of various tests of normality. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, v. 63, n. 324, p. 1343-1372, 1968.

SOUSA JR., M. A.; DUTRA, L. V.; FREITAS, C. C. Desenvolvimento de um segmentador incremental multi-nível (SIM) para imagens ópticas e de radar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...**. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2293-2300.

TREUHAFT, R. N.; CHAPMAN, B.; DUTRA, L. V.; GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R.; MURA, J. C. et al. Estimating 3-dimensional structure of tropical forest from radar interferometry. **Ambiência**, Guarapuava, v. 2, n. 1, p. 111-119, 2006.

TREUHAFT, R. N.; LAW, B. E.; ASNER, G. P. Forest attributes from radar interferometric structure and its fusion with optical remote sensing. **BioScience,** Washington, v. 54, n. 6, p. 561-571, 2004.

ULABY, F. T.; ELACHI, C**. Radar polarimery for geoscience applications**. Norwood: Artech House, 1990. 365p.

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave remote sensing active and passive**. Norwood: Artech House, 1982. 1064p. vol. 2.

WEGMULLER, U.; WERNER, C. Retrieval of vegetation parameters with SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 35, n. 1, p. 18-24, 1997.

WULDER, M.; NIEMANN, K.; GOODENOUGH, D. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. **Remote Sensing of the Environment**, New York, v. 73, n. 1, p. 103–114, 2000.

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X
www.agro.unitau.br/ambi-agua
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br
Tel.: (12) 3625-4116

Monitoramento e estimativa da produtividade de soja auxiliados pelo modelo regional de previsão de tempo ETA

(doi:10.4136/ambi-agua.10)

Rodrigo Rizzi[1]; Bernardo Friedrich Theodor Rudorff[2]; Ramon Morais de Freitas[2]; Denise Cybis Fontana[3]

[1]Universidade Federal de Pelotas (UFPel)
E-mail: rodrigo.rizzi@ufpel.edu.br
[2]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
E-mail {bernardo, ramon}@dsr.inpe.br
[3]Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
E-mail dfontana@ufrgs.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi monitorar e estimar a produtividade de soja por meio de um modelo agronômico em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando os dados meteorológicos gerados pelo modelo regional de previsão de tempo Eta. O modelo agronômico permitiu a produção de mapas quinzenais de índices de penalização e estimativa da produtividade da soja para os estados do Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo, safra 2004/05. O resultado mostrou que os dados meteorológicos do modelo Eta, incorporados em um modelo agronômico, permitem monitorar, no tempo e no espaço, a cultura da soja. Além disso, os dados meteorológicos do Eta são disponibilizados em tempo quase real, permitindo uma rápida avaliação, objetiva e quantitativa, do efeito das condições meteorológicas sobre a produção da soja.

Palavras-chave: estatísticas agrícolas; modelagem; dados meteorológicos; índice de penalização.

Soybean grain yield monitoring and estimation aided by the mesoscale ETA Weather Forecast model

ABSTRACT

The objective of this work was to monitor and estimate soybean grain yield based on an agronomical model coupled to a Geographic Information System (GIS) using meteorological data generated by the Eta mesoscale weather forecast model. The agronomic model produced bi-weekly penalizing indices maps and soybean grain yield estimates for the States of Mato Grosso do Sul, Paraná and São Paulo, Brazil, during crop year 2004/05. Result showed that meteorological data from the Eta model, incorporated in an agronomic model, allowed monitoring, in time and space, the soybean crop. In addition, the meteorological data from Eta model are provided in almost real time allowing a quantitative and quick evaluation of weather conditions for soybean production.

Keywords: agricultural statistics; modeling; meteorological data; penalizing index.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o acompanhamento da safra agrícola das grandes culturas e o prognóstico da produção é realizado, predominantemente, com base na opinião de diversos profissionais ligados ao setor do agronegócio. A produção é dada pelo produto da área plantada com a produtividade, sendo que esta depende, principalmente, das condições meteorológicas que ocorrem ao longo da safra. O efeito da variabilidade do tempo e do clima sobre a produtividade é difícil de ser mensurado e, por isso, ainda é feito de forma subjetiva, dando margem à especulação. O recente avanço, tanto na disponibilidade de dados meteorológicos, quanto nos métodos de modelagem agronômica, pode conferir um caráter objetivo ao monitoramento da safra e à estimativa da produtividade.

A quantificação do efeito das variáveis agrometeorológicas sobre o crescimento e desenvolvimento das culturas pode ser realizada por meio de modelos agronômicos (Hoogenboom, 2000). Esses modelos podem ser incorporados aos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) para viabilizar o monitoramento das culturas não apenas no tempo, mas também no espaço (Hartkamp et al., 1999; Dang et al., 2000). Tal abordagem aponta os períodos dentro do ciclo das culturas e as regiões cultivadas em que o impacto das condições meteorológicas adversas sobre a produtividade foi mais expressivo (Berka et al., 2003; Rizzi, 2004).

As informações coletadas pelas estações meteorológicas são a principal fonte de dados para esses modelos. Entretanto, essas estações têm uma distribuição esparsa, em especial na zona rural, dificultando a utilização desses dados para muitas regiões de cultivo intenso, particularmente na fronteira agrícola. Além disso, os dados coletados por uma estação representam apenas uma pequena região em torno da qual e, muitas vezes, são adquiridos ou armazenados numa escala temporal inadequada para os modelos (Hoogenboon, 2000). Aliada a essas restrições está a dificuldade de acesso a esses dados em tempo oportuno, podendo inclusive inviabilizar o monitoramento da safra agrícola de modo a possibilitar a tomada de decisões em tempo hábil.

Uma alternativa aos dados coletados pelas estações são aqueles provenientes de modelos numéricos de previsão de tempo, os quais podem ser disponibilizados diariamente e para grandes regiões, imediatamente após a sua geração. O modelo regional de previsão de tempo Eta (letra grega η) foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia (Mesinger et al., 1988). Esse modelo foi instalado no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no final de 1996, para complementar a previsão numérica de tempo que vem sendo realizada desde o início de 1995, a partir do modelo de circulação geral atmosférica (Chan, 1996). O CPTEC disponibiliza, diariamente, previsões geradas pelo modelo Eta para diversos elementos meteorológicos. Os dados possuem resolução espacial horizontal em versões de 40 x 40 km e 20 x 20 km, esta com caráter operacional desde o final de 2005, e cobrem a maior parte da América do Sul.

Este trabalho tem por objetivo monitorar e estimar a produtividade de soja por meio de um modelo agronômico em um SIG, utilizando dados meteorológicos gerados pelo modelo regional de previsão de tempo Eta.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Como área de estudo foi selecionada uma região de cultivo intenso de soja, que abrange parte dos estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul (Figura 1). A safra da

soja analisada foi a de 2004/05, muito prejudicada por condições meteorológicas adversas, sobretudo a partir do mês de fevereiro desse período.

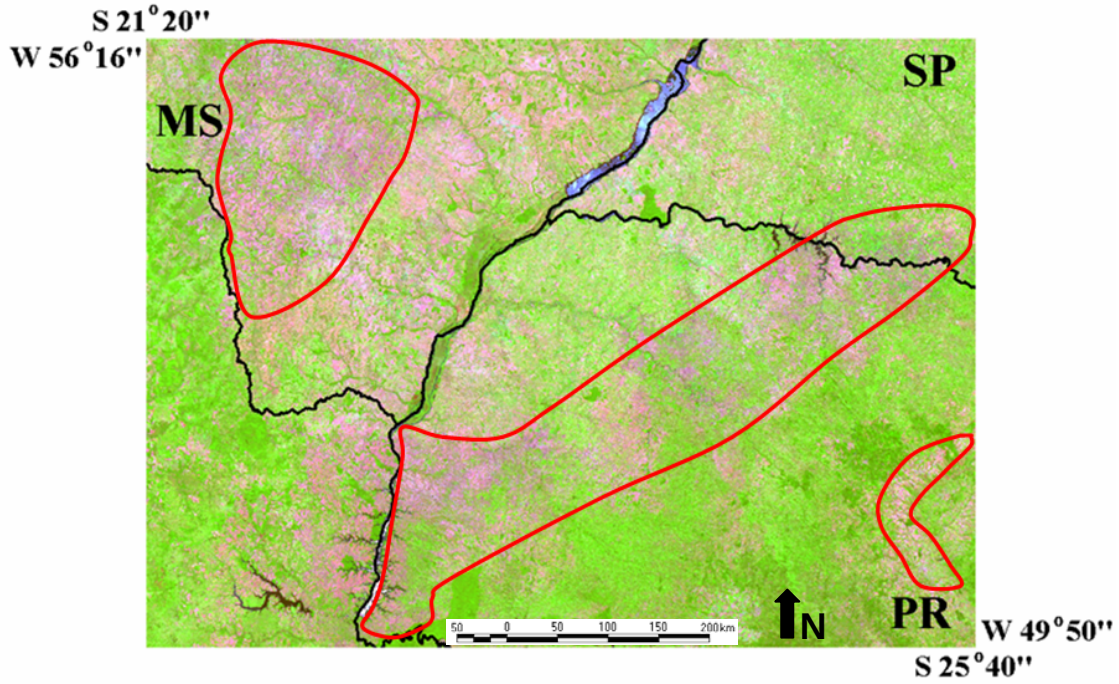


Figura 1. Área de estudo com a respectiva localização geodésica e o limite político estadual (linha preta), indicando as regiões de maior concentração de cultivo de soja (linha vermelha) sobre uma imagem do sensor MODIS.

O monitoramento da safra e a estimativa da produtividade da soja foram realizados por meio de um modelo agronômico, denominado AGRO (Berka et al, 2003), integrado ao SIG do aplicativo SPRING (Sistema de PRocessamento de INformações Georreferenciadas; www.dpi.inpe.br/spring) que reúne funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica do terreno e consulta a bancos de dados espaciais (Câmara et al., 1996).

O modelo AGRO tem por base o Relatório N°33 da FAO (Food and Agriculture Organization) de Doorenbos e Kassam (1979). Rudorff e Batista (1990) utilizaram a metodologia descrita por esses autores e desenvolveram um modelo com programação em linguagem FORTRAN para estimar a produtividade em locais específicos. Berka et al. (2003) empregaram as facilidades computacionais da análise espacial e dos SIGs para espacializar o modelo a fim de obter a estimativa da produtividade para grandes regiões. Outro avanço recente nesse modelo foi a introdução dos valores do índice de área foliar (IAF) estimados por meio das imagens do sensor MODIS a bordo do satélite Terra (Rizzi, 2004).

As variáveis meteorológicas necessárias ao modelo AGRO são: *temperatura média do ar* (^{o}C); *velocidade do vento* a 2 metros de altura (km.dia^{-1}); *umidade relativa do ar* (%); *radiação solar incidente* (cal.cm^{-2}.dia^{-1}) e *precipitação pluvial* (mm.dia^{-1}). São necessários, ainda, dados referentes à altitude e à capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) dos solos. Para o dado de altitude, foi utilizado um modelo digital de elevação com resolução espacial de aproximadamente 1 x 1 km (GTOPO), disponibilizado pelo *Eros Data Center*-USGS (www.usgs.gov). Para o dado referente à CAD, foi utilizado um mapa de classificação de solos em escala 1:750.000 (Brasil, 1973). Os valores de CAD (50, 70 ou 100mm) foram atribuídos para cada classe pedológica, de acordo com Embrapa (1999) e Farias et al. (2000).

As previsões do modelo regional Eta, operacional no CPTEC, são fornecidas duas vezes ao dia, com condição inicial às 00:00 e às 12:00 horas UTC e englobam previsões para sete dias em um intervalo de seis horas. No presente trabalho, os dados utilizados foram aqueles oriundos das previsões com condição inicial às 00:00 horas UTC e com resolução espacial horizontal de 40 x 40 km, pois a versão que utiliza a grade de 20 x 20 km ainda não estava operacional por ocasião da aquisição dos dados. Como tecnicamente os dados referentes aos dois primeiros horários (00:00 e 06:00 horas UTC) estão associados a incertezas, principalmente para as variáveis *velocidade do vento* e *precipitação pluvial*, optou-se por utilizar os dados a partir da previsão das 12:00 horas UTC. Por exemplo, as variáveis meteorológicas do dia 01-11-05 dizem respeito às previsões das 12:00 e 18:00 horas UTC do dia 01-11-05 e das 00:00 e 06:00 horas UTC do dia 02-11-05 (condição inicial às 00:00 UTC de 01-11-05), totalizando 24 horas. Os dados das variáveis meteorológicas do modelo Eta foram transformados, primeiramente, para a escala diária, de modo a se assemelharem aos dados coletados pelas estações meteorológicas.

Para a variável *precipitação pluvial*, realizou-se o somatório das previsões dos quatro horários do dia, já que cada previsão representa a precipitação pluvial acumulada das últimas seis horas, de acordo com a Equação [1].

$$Pt = \sum_{t1}^{tn} f_i \qquad [1]$$

em que Pt é a precipitação total (mm.dia^{-1}) e f é a precipitação pluvial acumulada (mm) observada nos horários 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 horas UTC.

Para a variável *radiação solar incidente*, fez-se o somatório das previsões para os quatro horários, visto que cada previsão representa a média das últimas seis horas, de acordo com a Equação [2].

$$RS = c.\sum_{t1}^{tn} \bar{r}_i \qquad [2]$$

em que RS é a radiação solar incidente acumulada (cal.cm^{-2}. dia^{-1}) nas últimas 24 horas; $\bar{r}$ *é* a radiação média observada (W.m^{-2}) nos horários 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 horas UTC e c é o fator de conversão da radiação solar incidente de W.m^{-2} para cal.cm^{-2}.dia^{-1} = 0,51624, de acordo com Allen et al. (1998).

Para a variável *temperatura média do ar*, utilizou-se a média entre a temperatura observada às 06:00 horas UTC (considerada neste trabalho como a temperatura mínima diária) e às 18:00 horas UTC (considerada neste trabalho como a temperatura máxima diária) (Allen et al., 1998), de acordo com a Equação [3].

$$Tm = \left(\frac{T_{06:00} + T_{18:00}}{2} \right) - x \qquad [3]$$

em que Tm é a temperatura média do ar (^{o}C); T é a temperatura do ar (K) observada às 06:00 e 18:00 horas UTC e x é o fator de conversão da temperatura do ar de K para ^{o}C = 273,15.

A variável *velocidade do vento* (magnitude), foi estimada a partir do vetor resultante das componentes cartesianas de vento U e V, de acordo com a Equação [4].

$$Vv = \sqrt{U^2 + V^2} \qquad [4]$$

em que Vv é a velocidade do vento (m.s^{-1}) e U e V são as componentes cartesianas de vento (m.s^{-1}).

A média da velocidade do vento diária foi calculada a partir da Equação [5].

$$Vvm = \left(\frac{Vv_{12:00} + Vv_{18:00} + Vv_{00:00}}{3} \right) h.t \qquad [5]$$

em que *Vvm* é a média da velocidade do vento (km.dia^{-1}) para os horários 12:00, 18:00 e 00:00 horas UTC; *h* é o fator de conversão de (m.s^{-1}) para (km.dia^{-1}) = 86,4 e *t* é o fator de conversão da velocidade do vento de 10 para 2 m de altura = 0,75, segundo Allen et al. (1998).

Como a variável *umidade relativa do ar* não é fornecida diretamente pelo modelo Eta, ela foi estimada a partir das variáveis *temperatura de ponto de orvalho* e *temperatura do ar*, a partir da equação de Clausius-Clapeyron, segundo Bolton (1980), apresentada na Equação [6].

$$UR = 100.\frac{6{,}112^{\frac{17{,}67Td}{Td+243{,}5}}}{6{,}112^{\frac{17{,}67T}{T+243{,}5}}} \qquad [6]$$

em que *UR* é a umidade relativa (%); *Td* é a temperatura de ponto de orvalho (^{o}C) e *T* é a temperatura do ar (^{o}C). A média da umidade relativa do ar diária foi calculada a partir da Equação [7].

$$URm = \frac{(UR\%_{12:00}) + (UR\%_{18:00}) + (UR\%_{00:00})}{3} \qquad [7]$$

em que *URm* é a média da umidade relativa do ar (%) e UR é a umidade relativa do ar (%) para os horários 12:00, 18:00 e 00:00 horas UTC.

A escala temporal utilizada no modelo AGRO foi quinzenal, ou seja, são calculadas produtividades parciais a cada 15 dias, desde a implantação da cultura até a sua senescência, totalizando nove quinzenas (135 dias). O período de monitoramento das condições meteorológicas foi desde 01-11-04 (semeadura) até 15-03-05 (colheita), sendo definido de acordo com o calendário agrícola da soja na região em estudo. A produtividade final é resultado do somatório das produtividades parciais. Assim sendo, os dados meteorológicos diários foram organizados em médias quinzenais, salvo os dados referentes à *precipitação pluvial*, que foram somados quinzenalmente. Toda a metodologia que envolve a transformação dos dados do Eta para as escalas diária e quinzenal foi desenvolvida em uma rotina computacional de modo a minimizar o tempo entre a disponibilização dos dados e a sua utilização no modelo AGRO.

A resolução espacial empregada no modelo AGRO foi de 1 x 1 km. Dessa forma, todas as variáveis são representadas por meio de uma grade regular (matriz) em que cada ponto (pixel) corresponde a uma área de 1 x 1 km no terreno, sendo que o modelo calcula a produtividade da soja para cada ponto. Como os dados gerados pelo modelo Eta na versão utilizada são representados por uma grade regular de 40 x 40 km, eles foram espacializados[1] pelo algoritmo *média ponderada por quadrante*, disponível no SIG do aplicativo SPRING, para a resolução espacial de 1 x 1 km, de modo a compatibilizá-los à resolução espacial empregada no modelo AGRO.

A produtividade agrícola estimada pelo modelo AGRO utiliza a Equação [8] (Doorenbos; Kassam, 1979).

$$P = PM\left[1 - ky\left(1 - \frac{ETr}{ETm}\right)\right] \qquad [8]$$

[1] Na espacialização, uma grade regular é gerada a partir de amostras pontuais por meio de uma interpolação espacial.

em que *P* é a produtividade real estimada pelo modelo (kg.ha^{-1}), *PM* é a produtividade máxima (kg.ha^{-1}), *ky* é o fator de resposta à produtividade que relaciona o déficit da evapotranspiração relativa (ETr/ETm) com a diminuição da produtividade e varia de acordo com o estádio em que a cultura se encontra (Doorenbos; Kassam, 1979). A média da produtividade da soja, em nível estadual, foi realizada por meio de um mapa contendo a divisão política estadual. Ressalta-se que somente os *pixels* representados por áreas de soja foram computados no cálculo da média estadual. Tais áreas foram definidas por meio de uma classificação multitemporal de imagens do sensor MODIS.

O acompanhamento do impacto das variáveis meteorológicas ao longo da estação de crescimento e desenvolvimento da soja foi realizado pelo modelo AGRO por meio do Índice de Penalização (IP) quinzenal, determinado pela Equação [9].

$$IP = \frac{Pa}{Pma} \qquad [9]$$

em que *IP* é o Índice de Penalização, *Pa* é a produtividade real estimada acumulada (kg.ha^{-1}) até a quinzena considerada e *Pma* é a produtividade máxima acumulada (kg.ha^{-1}) até a quinzena considerada.

Dessa forma, o valor do *IP* expressa a produtividade real estimada obtida pela cultura em relação à sua produtividade potencial máxima, desde o início do seu ciclo até a quinzena considerada. Por exemplo, o *IP* 1,0 indica a melhor situação, quando as condições meteorológicas foram favoráveis e a cultura expressou 100% do seu potencial produtivo, não havendo prejuízo para sua produtividade em função da disponibilidade meteorológica no período considerado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra os *IPs* quinzenais acumulados para a cultura da soja na região compreendida pelo estudo, safra 2004/05. Pela análise dos mapas de *IP*, na Figura 2, é perceptível a ocorrência de condições meteorológicas adversas durante o ciclo da soja em toda a região considerada, principalmente a partir de fevereiro, que se estendeu até o final do ciclo da cultura. Nota-se que a produtividade da soja começou a ser penalizada com maior intensidade a partir da segunda quinzena de dezembro e se agravou à medida que a safra avançou no tempo. As três últimas quinzenas analisadas foram as que apresentaram a maior penalização no potencial produtivo, pois a cultura se encontrava nos estádios de florescimento e enchimento de grãos. Nesses estádios, as plantas aumentam a demanda por água e são muito sensíveis ao déficit hídrico que compromete significativamente a produtividade da soja (Sediyama et al., 1996).

O *IP* acumulado da última quinzena expressa a produtividade obtida pela cultura em relação a sua produtividade potencial máxima, em função da demanda e da disponibilidade meteorológica durante todo o ciclo da cultura. No presente estudo, a maior parte da região considerada indica valores de *IP* entre 0,4 e 0,5, o que significa uma perda entre 50 e 60% no potencial produtivo da soja. Isso refletiu-se nos valores de produtividade final estimados pelo modelo AGRO, que foram de 1.797, 1.586 e 1.682 kg.ha^{-1} para os estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul, respectivamente. Observa-se, ainda, que a porção sul do Mato Grosso do Sul e noroeste do Paraná foram as regiões mais prejudicadas pela estiagem, indicando valores de *IP* entre 0,1 e 0,2, que refletem uma perda entre 80 e 90% no potencial produtivo da cultura. Apesar disso, tais regiões concentram poucas lavouras de soja, sobretudo devido à baixa CAD dos solos.

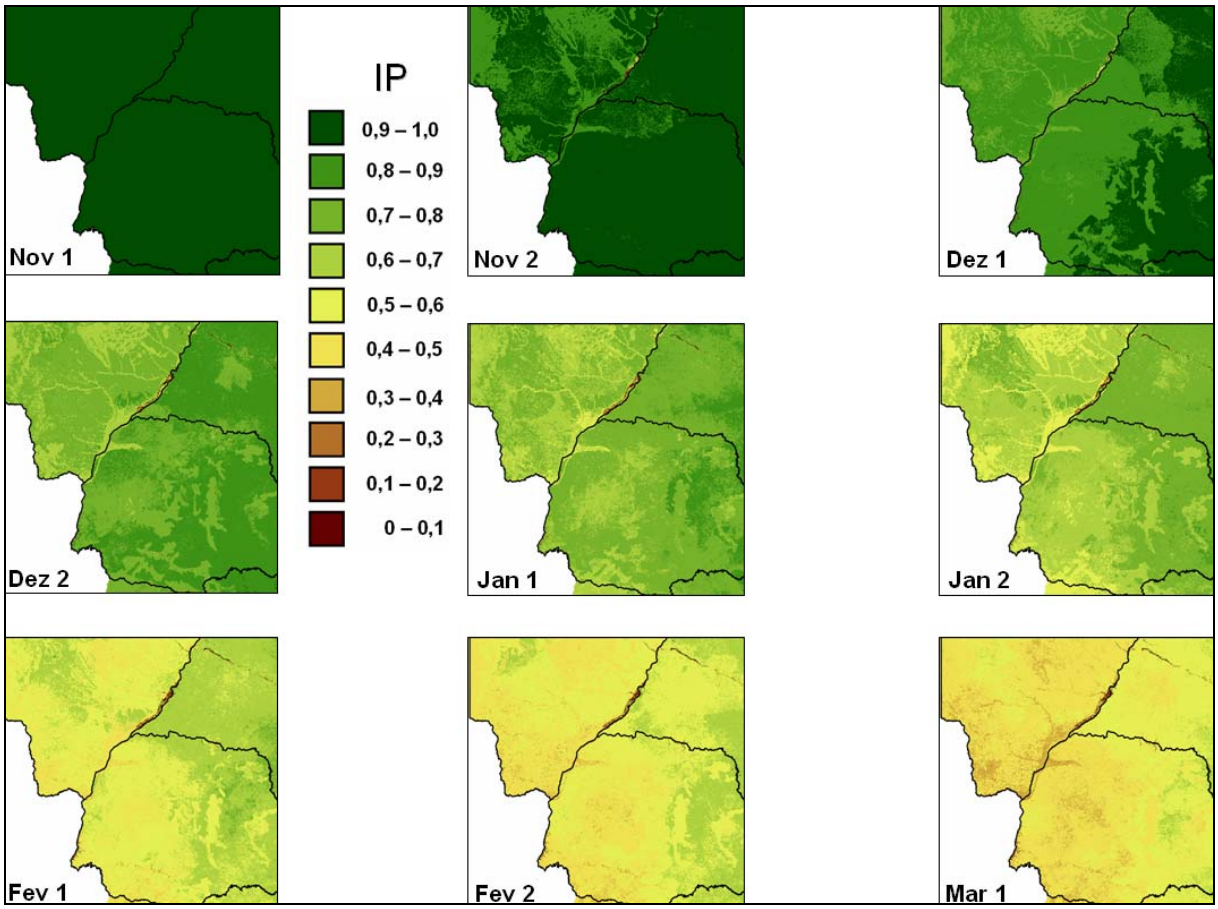


Figura 2. Índices de penalização (IP) quinzenais acumulados para a cultura da soja para a região compreendida pelo estudo, safra 2004/05.

A Figura 3 mostra a produtividade obtida pelo modelo AGRO em comparação à informada pelo IBGE, para os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná, para plantio em 01-11-2004. Nota-se que o modelo AGRO, utilizando os dados do modelo Eta, acompanhou a variação interanual dos valores de produtividade para os 3 estados estudados. O Mato Grosso do Sul foi o estado mais atingido pela estiagem, já que tanto o IBGE quanto o modelo AGRO forneceram os menores valores de produtividade. A diferença existente entre a estimativa do IBGE e a do modelo pode estar associada ao fato do IBGE considerar a média estadual que foi consideravelmente superior à produtividade observada na região estudada. Nos três estados houve regiões localizadas fora da área de estudo e que foram menos afetadas pela estiagem, fato que contribuiu para que a média estadual fosse mais elevada.

Enfatiza-se que os dados do modelo Eta podem ser disponibilizados imediatamente após a sua geração, sendo prontamente utilizáveis pelo modelo AGRO, após um simples pré-processamento efetuado por uma rotina computacional. Isso permite a obtenção dos mapas de *IP* imediatamente após o término da quinzena considerada. É oportuno lembrar, ainda, que o modelo AGRO pode utilizar intervalos de monitoramento menores que o quinzenal (ex. 5, 7 e 10 dias) e ser adaptado para diversas culturas de grande interesse econômico. Além disso, esse modelo pode englobar todas as regiões produtoras do país, já que os dados do Eta são gerados para todo o Brasil e grande parte da América do Sul.

A possibilidade de monitoramento das condições meteorológicas e a avaliação do seu impacto sobre a produtividade potencial das mais variadas culturas, em tempo hábil, são de grande importância para diversos setores do agronegócio, em especial, para o governo. Essas

informações auxiliam na tomada de decisões, tanto em relação à balança comercial, quanto ao adequado abastecimento interno, auxiliando no estabelecimento de preços justos a produtores e consumidores.

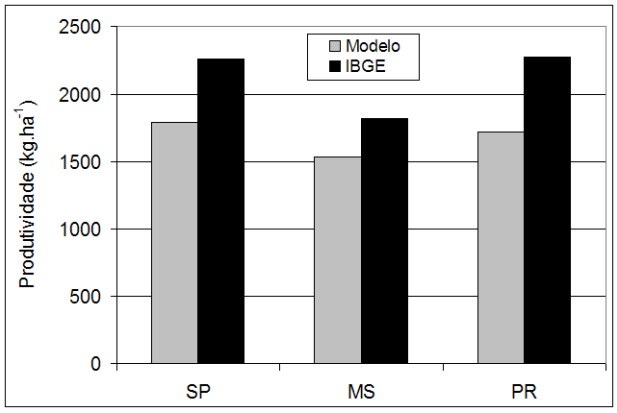


Figura 3. Produtividade obtida pelo modelo AGRO em comparação à informada pelo IBGE, para os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná, para plantio em 01-11-2004.

Outra aplicação está relacionada às operações de securidade agrícola. Nesse caso, a identificação dos períodos e das regiões de maior impacto das condições meteorológicas adversas fornece subsídios objetivos para otimizar e tornar mais eficiente o processo de vistoria de campo das lavouras seguradas. Desse modo, pode ser efetuado um direcionamento prioritário às áreas a serem fiscalizadas para avaliação e quantificação das perdas. Esse procedimento impõe um caráter objetivo às vistorias para inibir a possibilidade de fraude e, conseqüentemente, proporcionar um melhor equilíbrio entre o prêmio, pago pelo agricultor, e a indenização, paga pela seguradora.

A despeito da possibilidade da estimativa da produtividade e o monitoramento quinzenal das condições meteorológicas no decorrer da safra de soja em tempo hábil, um fato a ser destacado que se refere aos dados gerados pelo modelo Eta é a regularidade espacial aliada à uniformidade. Em se tratando das estações meteorológicas, além da sua distribuição esparsa e irregular, especialmente nas principais regiões agrícolas, elas são administradas por diferentes instituições. Assim, os dados coletados, em grande parte das vezes, não são disponibilizados de uma maneira integrada, ou seja, no mesmo momento, formato e local, de modo a permitir o monitoramento das culturas, particularmente no que se refere à tomada de decisão em tempo oportuno.

Um local onde são disponibilizados dados coletados por diferentes estações é o portal AGRITEMPO (www.agritempo.gov.br). Mesmo assim, além da baixa densidade das estações em grande parte das regiões agrícolas, apenas estão disponíveis dados referentes à precipitação pluvial e a temperatura (máxima e mínima) do ar, muitas vezes insuficientes para o monitoramento de culturas por meio de modelos agronômicos. Outra opção são os dados coletados automaticamente pelas Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) e disponibilizados pelo CPTEC. Todavia, elas incorrem no mesmo problema relacionado à distribuição esparsa e irregular e ao não fornecimento de todos os elementos meteorológicos requeridos por alguns modelos agronômicos. Na Figura 4, visualiza-se a distribuição espacial das PCDs e das estações cujos dados são disponibilizados pelo portal AGRITEMPO, além da grade regular (20 x 20 km) dos dados gerados pelo modelo Eta, para a região compreendida pelo estudo.

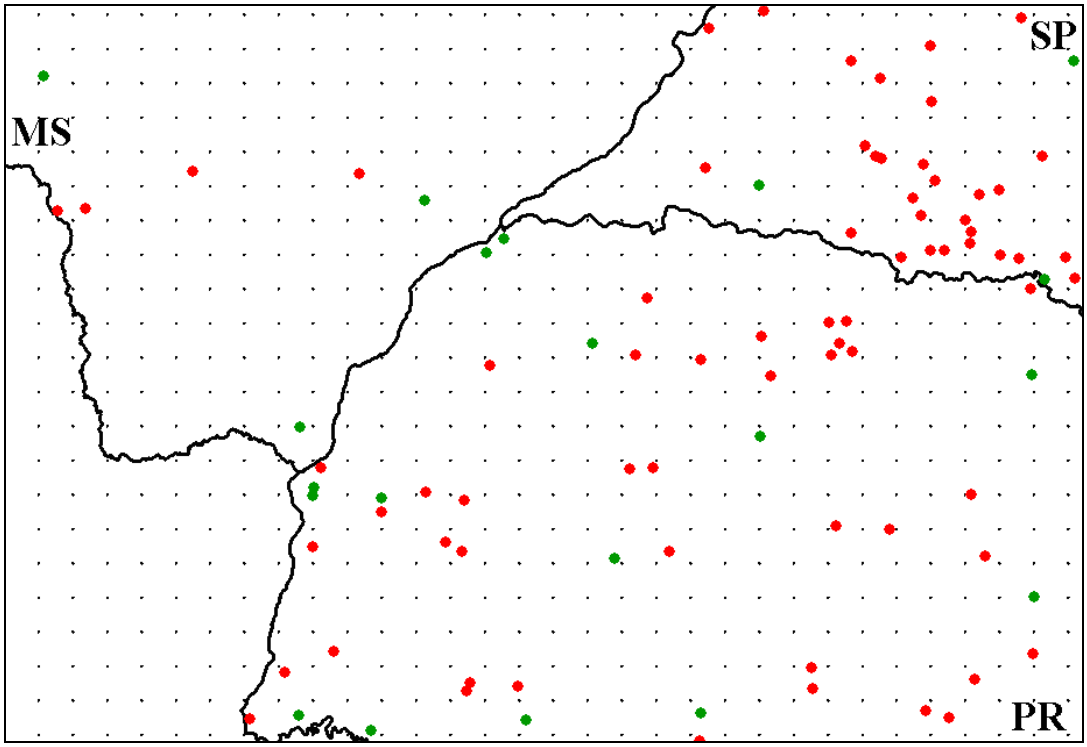


Figura 4. Distribuição espacial das PCDs (esferas verdes), das estações cujos dados são disponibilizados pelo portal AGRITEMPO (esferas vermelhos) e da grade regular (20 x 20 km) referente aos dados gerados pelo modelo Eta (pontos pretos), para a região compreendida pelo estudo.

Pela Figura 4 percebe-se claramente a distribuição esparsa e irregular dos pontos amostrais que dizem respeito às PCDs e às estações disponibilizadas pelo AGRITEMPO. Já o modelo Eta fornece um número muito maior de pontos amostrais que estão distribuídos regularmente sobre toda a área considerada no estudo, inclusive além do limite político nacional. Além disso, o caráter operacional da previsão de tempo gerada pelo CPTEC praticamente assegura a regularidade na disponibilização dos dados gerados pelo modelo Eta, reforçando a idéia de que eles podem ser utilizados em métodos objetivos e operacionais de monitoramento de safras e geração de estatísticas agrícolas.

4. CONCLUSÃO

Os dados das variáveis meteorológicas gerados pelo modelo regional de previsão de tempo Eta apresentam bom potencial de utilização em modelos agronômicos. Esses dados possibilitam o monitoramento temporal e espacial de culturas agrícolas, além de fornecer a estimativa da produtividade de culturas agrícolas em grandes regiões. O modelo agronômico, em conjunto com os dados do Eta, permite acompanhar o efeito do clima sobre o crescimento e desenvolvimento da cultura da soja, fornecendo informações em tempo hábil para fins de abastecimento do mercado, seguro agrícola entre outros.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam agradecimentos à Chou Sin Chan, ao Rildo Gonçalves de Moura e à Andreza Fogaça Coelho do CPTEC por terem auxiliado na disponibilização dos dados meteorológicos gerados pelo modelo Eta.

6. REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper, 56).

BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 433-440, july/sept., 2003.

BOLTON, D. The computation of equivalent potential temperature. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 108, n. 9, p. 1046-1053, 1980.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: DNPEA, 1973. 431 p. (Boletim técnico, 30).

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. **SPRING**: integrating remote sensing and GIS with object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, [S.l.], v. 15, n. 6, p. 13-22, july 1996.

CHAN, S. C. Modelo regional *Eta*. **Climanálise**, São José dos Campos: CPTEC/INPE, ed. comemorativa, v. 10, out. 1996.

DANG, A.; WANG, X.; WU, H. GIS based study on the potential grain productivity of China. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM – IGARSS, 2000, Honolulu. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Publications, 2000. 1 CD-ROM.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193 p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper, 33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. F.; NEUMAIER, N.; OYA, T. Ecofisiologia. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **A cultura da soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2000. 1 CD-ROM.

HARTKAMP, A. D.; WHITE, J. W.; HOOGENBOOM, G. Interfacing geographic information systems with agronomic modellings: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 5, p. 761-722, sept./oct. 1999.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.l.], v. 103, n. 1/2, p. 137-157, jun. 2000.

MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: model description and performance for cases of alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 30/04/2004. 214 p. (INPE-12271-TDI/983). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/ jeferson/2004/07.02.14.17>. Acesso em: 02 jun. 2006. rep: sid.inpe.br/jeferson/ 2004/07.02.14.17.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 33, n. 3, p. 183-192, 1990.

SEDIYAMA, T.; PEREIRA, M. G.; SEDYIAMA, C. S.; GOMES, J. L. L. **Cultura da soja**: I parte. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1996. 96p.

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X
www.agro.unitau.br/ambi-agua
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br
Tel.: (12) 3625-4116

Modelagem do volume e do peso da casca de Bracatinga (*Mimosa scabrella* – Bentham) na região metropolitana de Curitiba, Paraná

(doi:10.4136/ambi-agua.11)

Sebastião do Amaral Machado[1]; Luís César Rodrigues da Silva[2]; Edilson Urbano[3]; Marco Aurélio Figura[4]; Saulo Jorge Téo[5]; Lorena Stolle[6]

[1]Prof. Sênior do Dep. de Ciências Florestais da UFPR, Eng. Florestal M. Sc., Ph.D. – Pesq. 1A do CNPq
E-mail: sammac@floresta.ufpr.br
[2]Graduando em Engª. Florestal, UFPR, Bolsista CNPq – [2]Graduando em Engª. Florestal, UFPR
E-mail: nabravomova@hotmail.com
[3]Eng. Florestal, mestrando em Engª. Florestal, UFPR
E-mail: edurbano2@hotmail.com
[4]Graduando em Engª. Florestal, UFPR, bolsista CNPq
E-mail: figura_floresta@hotmail.com
[5]Graduando em Engª. Florestal, UFPR, bolsista CNPq
E-mail: sauloteo@yahoo.com.br
[6]Eng. Florestal Mestrando em Engª. Florestal, UFPR, bolsista CNPq
E-mail: lorenastolle@yahoo.com.br.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a modelagem do volume e do peso da casca da bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham). Foram cubadas 440 árvores de bracatinga pelo método relativo de Hohenadl para 10 seções, com idades de 6 a 17 anos, em vários municípios da região metropolitana de Curitiba, Paraná. Os fustes de 194 árvores foram pesados no campo. Amostras de casca dessas árvores foram coletadas, pesadas no campo (peso verde) e trazidas para secagem até peso constante (peso seco), possibilitando assim calcular a relação peso seco/peso verde da amostra e extrapolação para todo o fuste. Por meio da literatura foram selecionados modelos tradicionalmente usados em estimativas de volume. Foram também gerados modelos próprios com as variáveis que mais se correlacionavam com o peso e o volume da casca da bracatinga. Ao todo foram ajustados 20 modelos, sendo utilizado o peso $1/d^2h$ para a ponderação dos modelos aritméticos de dupla entrada e $1/d^2$ para os de simples entrada. Os melhores modelos foram então selecionados, com base no seu desempenho em relação ao coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa em porcentagem ($s_{yx\%}$) e distribuição gráfica dos resíduos. No geral, os modelos próprios, compostos com as variáveis de maior correlação, foram os mais precisos. Os melhores ajustes foram obtidos para o volume e o peso verde da casca, com $s_{yx\%}$ variando de 15 a 18% e R^2_{aj} de 0,96 a 0,98. Já quando se estimou o volume da casca em porcentagem, o melhor modelo para esta situação apresentou um R^2_{aj} de apenas 0,47 e $s_{yx\%}$ de 17%. Quando se estimou o peso seco da casca, os melhores modelos apresentaram $s_{yx\%}$ maiores e R^2_{aj} mais baixos do que os obtidos para peso verde.

Palavras-chave: *Mimosa scabrella*; biomassa; estimativa; inventário florestal; modelagem.

Bark volume and weight modeling of *Mimosa scabrella* Bentham trees in the Curitiba metropolitan region

ABSTRACT

The objective of this paper was to model bark volume and weight of *Mimosa scabrella* Bentham trees. To achieve this objective 440 trees were cubed by the Hohenadl's method using 10 sections. These trees had ages ranging from 6 to 17 years, and were located in

several counties inside the Curitiba (Parana) metropolitan region. The stems from 194 trees were weighed in the field. Samples of bark from these trees were collected, weighed in the field (green weight) and brought to the laboratory for drying until constant weight (dry weight); thus it was calculated the relationship dry weight/green weight of the sample and extrapolation for the whole stem. For the modeling, several mathematical models from the literature for estimating dry weight of *Acacia mearnsii* were selected. New models based on the forward's method were also built. Twenty different models were adjusted using the $1/d^2h$ to weight the arithmetic models with two entries and $1/d^2$ for the models with single entry. The best models for each case were selected basing on the adjusted coefficient of determination (R^2_{aj}), standard error of estimate in percentage ($s_{yx\ \%}$) and on the residual graphic distribution. In general, the new models built with variables most correlated with the respective independent variables were the most precise. The best fitting were obtained for bark volume and green weight, with $s_{yx\%}$ ranging from 15 to 18%, and R^2aj from 0.96 to 0.98. The best equation for estimating bark volume in percentage presented R^2_{aj} = 0.47 and $s_{yx\%}$ = 17%.The best models for estimating bark dry weight presented higher $s_{yx\%}$ and lower R^2_{aj} than those obtained for green weight.

Keywords: *Mimosa scabrella;* biomass; estimative; forest inventory; modeling.

1. INTRODUÇÃO

A *Mimosa scabrella* , da família Mimosaceae, é uma espécie exclusiva da vegetação secundária da floresta ombrófila mista de formação Montana e Altomontana, de clima frio e úmido. É encontrada, principalmente, na forma de bosques conhecidos como bracatingais. Bracatinga como é conhecida, é a pioneira mais importante na região da Araucaria angustifolia. Forma agrupamentos densos e é manejada em povoamentos homogêneos com finalidade energética e madeireira (Bakes; Irgang, 2002).

Heliófita de rápido crescimento e pouco exigente quanto às condições de solo. A idade ideal de corte vai depender da necessidade do mercado, da finalidade de aproveitamento da madeira e dos objetivos da empresa. De uma maneira geral, pode-se preconizar a idade de 4 a 7 anos como a de máxima produção biológica (Reitz et al., 1988).

Embrapa (1988) registrou três variedades: a bracatinga branca, que é a mais abundante e preferida por ser mais fácil de trabalhar; a vermelha, que tem madeira mais dura e avermelhada e ocorre em menor quantidade junto com a variedade branca e por fim, a variedade argentina, que tem crescimento mais rápido, tem folhas mais claras e os frutos e sementes são maiores e mais rugosos.

A espécie ocupa grandes superfícies da área metropolitana de Curitiba e outras, principalmente nos estados do Paraná e Santa Catarina, na forma de densas associações em que cerca de 61% correspondem à bracatinga e o restante engloba mais de 80 espécies (Baggio, 1994).

Silva e Paula Neto (1979) constataram que a casca pode representar até 25% do volume do fuste, dependendo da espécie e do local onde ela se encontra. Para Husch et al. (1982), esse valor chega no máximo a 20%. Esse autor destacou o método do fator de casca "K" para se determinar o volume de casca em porcentagem e afirmou que dá resultados mais acurados para a maioria dos propósitos.

O método do fator de casca foi desenvolvido por Meyer (1946), que deduziu a fórmula para calcular o volume de casca em porcentagem, usando apenas os diâmetros com e sem casca à altura do peito. O autor concluiu que K é constante ao longo do fuste e também desenvolveu uma metodologia para estimar a espessura de casca. Machado e Garcia (1984) testaram tal metodologia em plantações de *Pinus taeda* e concluíram que o fator de casca K

não foi constante ao longo do fuste e que a fórmula de Meyer superestimou muito o volume de casca em porcentagem para todas as classes de diâmetro. Mais tarde, Machado e Silva (2006) aplicaram a mesma metodologia em bracatingais da região metropolitana de Curitiba, Paraná, e observaram a mesma inconstância no valor de K. Nunes (1981) estudou a porcentagem de casca em três espécies do gênero Eucalyptus e da mesma forma constatou uma inconstância no fator K ao longo do fuste. Loetsch et al. (1973) já haviam afirmado que a relação entre espessura de casca e DAP depende de influências específicas como clima, idade e sítio e que a relação entre diâmetro sem casca e diâmetro com casca pode ser ou não constante ao longo do tronco, dependendo da espécie. Até certa altura a casca é grossa, mudando, então, abruptamente em algum ponto em direção à extremidade mais fina.

Schneider (1978) elaborou tabelas para avaliar o peso verde e seco de casca de Acácia negra (Acacia mearnsii) e em todos os modelos de equações sugeridos por ele pelo procedimento Forward, estava presente a variável d^2h, mostrando que a combinação do diâmetro a 1,30m de altura (d) com a altura (h) forneceu alta correlação com a variável dependente peso de casca.

Batista et al. (2004) destacaram que, de uma ampla lista de modelos volumétricos propostos na literatura, apenas dois modelos têm uso generalizado que são o modelo da variável combinada de Spurr e o logaritmo de Schumacher e Hall.

Desde 1909, quando começou o estímulo do plantio da bracatinga para atender demandas energéticas, essa espécie desempenha um papel importante na economia da região metropolitana de Curitiba, Paraná, onde ocupa aproximadamente 60.000 ha (Grodzki et al., (2004) citaram área de 85.000 ha), distribuídos, principalmente, em pequenas propriedades. É tradicionalmente manejada de uma forma conhecida como "Sistema Agroflorestal da Bracatinga". Nele se associam culturas agrícolas no ano de implantação e após o corte final, costuma-se queimar a área para induzir a regeneração de outro bracatingal (Embrapa, 1988; Laurent et al., 1990). Trata-se de uma fonte de renda segura e com baixa requisição de mão-de-obra para o produtor. O principal destino é mesmo a produção de energia como carvão e lenha para indústrias e residências, embora já existam usos mais nobres como produção de celulose, compensados e até móveis.

Hoje a forma tradicional de condução da bracatinga já é alvo de críticas como a de Baggio e Carpanezzi (1997), que mostraram que a exportação de nutrientes pela lenha tem reposição economicamente inviável e sugeriram mudanças nas práticas do sistema de manejo para equilibrar o balanço de nutrientes. Da mesma forma, comentou Bartoszeck (2000), destacando que o manejo tradicional pode não ser a maneira mais adequada de condução da bracatinga. Por outro lado, estudos tentam otimizar a espécie, agregando valor cultural e econômico, como relatado em Fabrowski (1998), que identificou compostos na casca da bracatinga que podem ser explorados como taninos e alcalóides, ou aquele de Baggio e Carpanezzi (1995), que estudaram a utilização dos resíduos da exploração de bracatingais, ao invés de simplesmente queimá-los.

Estimativas em florestas é um problema relevante na Silvimetria. Tal estimativa é de fundamental importância, pois é suporte para a tomada de decisões no manejo e planejamento florestais. Assim o presente trabalho teve como objetivo testar modelos matemáticos para estimativas do volume da casca, volume da casca em porcentagem, peso verde da casca e peso seco da casca de bracatinga, para aquelas situações em que for necessária uma quantificação da casca para posterior utilização.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta dos Dados

O trabalho foi realizado em bracatingais formados por regeneração natural induzida, pertencentes a diversos proprietários, com idades variando de 6 a 17 anos, localizados em alguns municípios que compõem a região metropolitana de Curitiba, Paraná, ao norte da capital, sendo eles: Tunas do Paraná, Rio Branco do Sul, Almirante Tamandaré, Bocaiúva do Sul, Colombo e Campina Grande do Sul.

A região encontra-se no primeiro planalto do Paraná com altitudes variando de 850 a 950 m, clima tipo Cfb segundo classificação de Köppen, em que se registram temperaturas médias anuais em torno de 16 a 17 °C e a precipitação anual atinge 1500 mm.

Para a construção das equações de volume da casca foram cubadas 440 árvores pelo método relativo de Hohenadl, distribuídas numa amplitude diamétrica de 4 a 30 cm. Os fustes de 194 árvores foram pesados no campo. Amostras de casca dessas árvores foram coletadas, pesadas no campo (peso verde) e trazidas para secagem até peso constante (peso seco), possibilitando assim calcular a relação peso verde/peso seco da amostra e extrapolação para todo o fuste. Dessa forma, obtiveram-se os pesos de casca verde e seco de cada fuste das 194 árvores.

2.2. Modelagem

Para as variáveis dependentes volume de casca verde (*vc*), volume de casca verde em porcentagem ($vc_{\%}$), peso verde da casca (*pv*) e peso seco da casca (*ps*), foram ajustados 20 modelos, aritméticos e logarítmos, citados na literatura (Tabela 1). Também foram gerados mais 5 modelos aritméticos com base numa matriz de correlação simples da seguinte forma: com as variáveis independentes coletadas no campo, espessura de casca (*e*), diâmetro a 1,30m de altura (*d*), idade (*id*), altura do fuste (*h*), foram feitas dezenas de combinações e as que apresentaram correlações simples mais altas (acima de 0,9) com as variáveis dependentes foram selecionadas para serem usadas como variáveis independentes na montagem de modelos usando o processo *Forward*, disponível no *software Statgraphics 4.1*. Esse programa produziu todas as combinações possíveis para as variáveis independentes fornecidas, bem como o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) para cada possível combinação. Foram selecionadas as melhores combinações para volume e peso, considerando um R^2_{aj} alto e o menor número possível de variáveis independentes (Tabela 1).

Os modelos de melhor ajuste foram escolhidos com base no seu desempenho quanto ao coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa em porcentagem ($s_{yx\%}$) e distribuição dos resíduos. Para os modelos aritméticos, foi feito um ajuste ponderado para corrigir a heterogeneidade da variância do erro. O peso $\frac{1}{d^2}$ foi usado para os modelos de simples entrada, já para os modelos de dupla entrada, a ponderação usada foi $\frac{1}{d^2 h}$. Em relação aos modelos logaritmizados, não ocorre heterogeneidade de variância dos erros porque a transformação logarítmica tende a corrigi-la (Batista et al., 2004). Apenas a discrepância logarítmica foi tratada, usando-se o fator de correção de Meyer.

Tabela 1. Modelos matemáticos testados para a estimativa do volume de casca verde (*vc*), volume de casca verde em porcentagem ($vc_{\%}$), peso seco (*ps*) e peso verde (*pv*).

Variável independente	N.º	Autor	Modelo
d	1	Kopezky-Gehrhardt	$z = \beta_0 + \beta_1 . d^2 + \varepsilon$
	2	Dissescu-Meyer	$z = \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$
	3	Hohenadl-Krenn	$z = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \varepsilon$
	4	Berkhout (linearizada)	$\ln z = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \varepsilon$
	5	Brenac (linearizada)	$\ln z = \beta_1 \ln d + \beta_2 \frac{1}{d} + \varepsilon$
d, h	6	Spurr	$z = \beta_1 d^2 h + \varepsilon$
	7	Spurr (variável combinada)	$z = \beta_0 + \beta_1 d^2 h + \varepsilon$
	8	Stoate (australiana)	$z = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 d^2 h + \beta_3 h + \varepsilon$
	9	Schumacher-Hall (linearizada)	$\ln z = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h + \varepsilon$
	10	Spurr logarítma (linearizada)	$\ln z = \beta_0 + \beta_1 \ln(d^2 h) + \varepsilon$
	11	Schneider (1978)	$z = \beta_0 + \beta_1 (d^2 h) + \beta_2 (d^2 h^2) + \varepsilon$
	12	Schneider (1978)	$\ln z = \beta_0 + \beta_1 \ln(d^2 h) + \beta_2 \ln(d^2 h^2) + \varepsilon$
	13	Schneider (1978)	$z = \beta_0 + \beta_1 (d^2 h) + \beta_2 (de) + \varepsilon$
	14	Schneider (1978)	$z = \beta_0 + \beta_1 (d^2 h) + \beta_2 (de) + \beta_3 e^2 + \varepsilon$
	15	Schneider (1978)	$\ln z = \beta_0 + \beta_1 \ln(d^2 h) + \beta_2 \ln(d^2 e) + \varepsilon$
d, h, e	16	Modelos gerados pelo processo *Forward*, com base em variáveis de matriz de correlação simples	$vc = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 (d^2 h) + \beta_3 (ed) + \varepsilon$
	17		$pv = \beta_0 + \beta_1 (d^2 h) + \beta_2 (dhe) + \varepsilon$
	18		$pv = \beta_0 + \beta_1 (dh) + \beta_2 (d^2 he) + \varepsilon$
	19		$ps = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 (dh^2 e) + \varepsilon$
	20		$ps = \beta_0 + \beta_1 (d^2 h) + \beta_2 (dhe) + \varepsilon$

Onde: z = (*vc*) ou (*vc%*) ou (*ps*) ou (*pv*).

vc = volume de casca individual verde (m³)
$vc_{\%}$ = volume de casca individual verde (%)
d = diâmetro com casca a 1,30m do solo (cm)
e = espessura simples de casca (cm)
ε = erro estatístico
ps = peso seco da casca (kg)
pv = peso verde da casca (kg)
h = altura do fuste (m)
β = coeficiente ajustado

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Características dos Dados

O tamanho inicial da amostra foi reduzido tanto para o volume da casca quanto para o peso da casca, em conseqüência da presença de dados discrepantes, apontados pelos gráficos de resíduos, elaborados no decorrer dos ajustes. A Tabela 2 apresenta as estatísticas das variáveis utilizadas nos ajustes.

Tabela 2. Estatística descritiva das variáveis usadas na construção dos modelos.

Variável	Estatística				
	Tamanho da amostra	**Valor Mínimo**	**Média**	**Valor Máximo**	**cv%**
DAP (cm)	411	4,6	12,8	30,6	47,7
Espessura casca (cm)	411	0,2	0,44	1,0	42,2
Altura fuste (m)	411	3,3	8,9	15,4	27,9
Volume casca (%)	411	9,0	14,51	24,2	18,4
Volume casca verde (m^3)	411	0,0010	0,0148	0,0768	96,4
Peso casca verde (kg)	181	1,3	17,6	74,3	98,9
Peso casca seca (kg)	181	0,6	7,2	26,1	91,0

Como se observa na Tabela 2, a variabilidade do DAP, da espessura da casca, da altura do fuste, do volume da casca em porcentagem é relativamente baixa. No entanto, o volume da casca verde e os pesos verde e seco da casca têm uma amplitude de variação alta. A espessura da casca da bracatinga é relativamente baixa, principalmente se comparada às espécies coníferas, conforme detectado por Machado e Garcia (1984), no entanto, o volume da casca em termos percentuais é relativamente maior do que o da maioria das folhosas, e seu valor máximo ultrapassando 24% mostra que Silva e Paula Neto (1979) estavam certos, quando constataram que a porcentagem de casca de um fuste pode atingir 25% do volume total e não apenas 20% como afirmado por Husch *et al.* (1982).

Para observar o comportamento da casca no fuste da bracatinga, foram elaboradas as Figuras 1 e 2, que mostram, respectivamente, a porcentagem da casca no fuste, ao longo das classes de DAP e o quanto dessa porcentagem de casca representa apenas o peso de matéria seca utilizável. Comparando os dois gráficos, observa-se que os menores diâmetros têm uma tendência a ter uma porcentagem de casca um pouco maior (Figura 1) e nessa mesma porcentagem de casca, o peso seco também é maior que nas classes de DAP maiores (Figura 2), ou seja, há mais matéria seca, em porcentagem, na casca dos menores diâmetros.

Na Tabela 3 são apresentados os melhores resultados de uma matriz de correlação simples, envolvendo as variáveis dependentes volume e peso da casca e dezenas de outras variáveis independentes, sendo que apenas as correlações acima de 0,9 foram utilizadas. Nessa tabela pode ser observado que o volume da casca expresso em porcentagem ($vc_{\%}$), não se correlacionou satisfatoriamente com nenhuma variável independente, por isso essa variável não foi utilizada para a elaboração de modelos matemáticos. Ainda pode ser verificado que embora as variáveis espessura da casca (*e*) e altura do fuste (*h*) não apresentassem correlação satisfatória quando usadas individualmente, quando combinadas com outras variáveis independentes, seus desempenhos melhoraram consideravelmente. Embora a variável idade

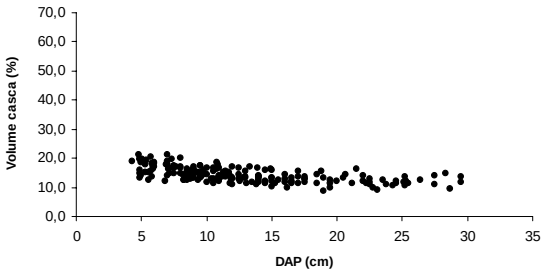


Figura 1. Volume da casca em porcentagem, ao longo das classes diamétricas.

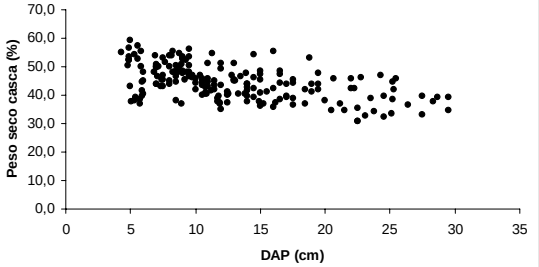


Figura 2. Peso seco da casca em porcentagem, ao longo das classes diamétricas.

tenha sido utilizada para compor a matriz de correlação, essa não apresentou boas correlações e por isso não aparece na Tabela 3 que apresenta somente as variáveis independentes cuja correlação foi acima de 0,9 com alguma variável dependente.

A partir dessa matriz foram ajustados os modelos 16, 17, 18, 19 e 20 da Tabela 1, como já explicado anteriormente.

Tabela 3. Matriz de correlação simples entre variáveis dependentes e independentes.

	d	*e*	*H*	*d²h*	*d²*	*dh*	*ed*	*eh*	*d³*	*dhe*	*d²he*	*dh²e*
vc	0,93	0,88	0,48	0,96	0,94	0,91	0,94	0,91	0,91	0,97	0,96	0,95
$vc_{\%}$	-0,53	-0,19	-0,45	-0,47	-0,45	-0,54	-0,31	-0,33	-0,37	-0,35	-0,31	-0,35
pv	0,92	0,83	0,54	0,97	0,93	0,94	0,91	0,90	0,91	0,97	0,96	0,95
ps	0,92	0,84	0,55	0,95	0,92	0,93	0,91	0,90	0,90	0,96	0,94	0,93

Onde: *vc* = volume individual de casca (m³)
$vc_{\%}$ = volume individual de casca (%)
pv = peso verde da casca (kg)
ps = peso seco da casca (kg)
d = DAP com casca (cm)
e = espessura de casca (cm)
h = altura do fuste (m)

3.2. Modelagem

3.2.1. Volume da Casca

De todos os modelos ajustados para prever o volume da casca (*vc*), os modelos 15 e 16 foram os melhores segundo os critérios de seleção utilizados. Na Tabela 4, são apresentados os coeficientes, os R^2_{aj}, os $s_{yx\%}$ e o gráfico da distribuição dos resíduos desses modelos, bem como o fator de Meyer para o modelo logarítmico de número 15. O que mais influenciou na escolha de tais modelos foi a estatística de precisão ($s_{yx\%}$) que foi mais baixa que a dos demais modelos. Mesmo assim, o valor de $s_{yx\%}$ foi acima de 15, valor aquém do esperado para um modelo considerado de ótima precisão, mas o fato positivo de tais modelos é que não apresentaram tendenciosidade ao longo das classes diamétricas, como mostram os gráficos de resíduos inseridos na Tabela 4. Isso indica que tais modelos podem ser usados para estimar o volume de casca de árvores de bracatinga tendo em vista que os erros para mais e para menos se compensam.

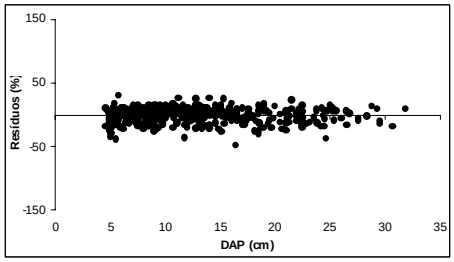
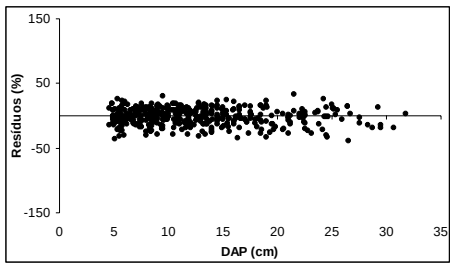
Quando os modelos foram ajustados para estimar o volume da casca em porcentagem ($vc_{\%}$), o de melhor desempenho, como mostra a Tabela 5, obteve um coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) de apenas 0,47, porém a precisão ($s_{yx\%}$) foi semelhante à situação anterior, assim como o gráfico de resíduos não apresentou tendenciosidade ao longo das classes diamétricas. Então, pode-se considerar esse modelo também útil quando não é exigida

uma precisão alta para estimar o volume de casca em porcentagem do fuste da bracatinga. Como se trabalhou com valores percentuais, foram também testados para essa situação, sem sucesso, ajustes com os dados transformados.

O modelo mostrado na Tabela 5, para prever o volume de casca em porcentagem, é, por enquanto, uma boa opção já que uma outra alternativa, a metodologia desenvolvida por Meyer (1946), para essa finalidade, já foi testada, sem sucesso, por Machado e Silva (2006) em bracatingais.

Outro fato é que não houve qualquer variável independente que se correlacionasse satisfatoriamente com o volume de casca em porcentagem, como pôde ser observado na Tabela 3. Isso pode explicar o R^2_{aj} baixo apresentado pelo melhor modelo. Por essa baixa correlação com variáveis independentes é que o volume de casca em porcentagem não foi incluído no processo *Forward* de composição de modelos.

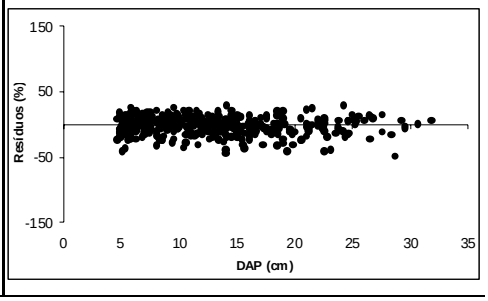
Tabela 4. Melhores modelos para avaliar volume de casca verde (*vc*) com seus respectivos coeficientes e estatísticas de ajuste e precisão.

Modelo	F. M.	Coef.	R^2_{aj}	$S_{yx\%}$	Gráfico de resíduos
16	-	$\beta_0 = -0{,}000041$ $\beta_1 = -0{,}000031$ $\beta_2 = 0{,}0000058$ $\beta_3 = 0{,}001514$	0,97	15,6	
15	1,0083	$\beta_0 = 0{,}0000738$ $\beta_1 = 0{,}51841$ $\beta_2 = 0{,}30738$	0,98	17,6	

Onde: F. M. = Fator de correção de Meyer para modelos logaritmos
Coef = Coeficientes ajustados
R^2_{aj} = Coeficiente de determinação ajustado
$S_{yx\%}$ = Erro padrão da estimativa em porcentagem

No geral, percebe-se que o modelo 15, construído por Schneider (1978), também foi adequado tanto para estimar o volume em metros cúbicos quanto para estimar o volume da casca em percentagem de bracatinga. Modelos tradicionais como os de Schumacher & Hall e Spurr, embora tenham apresentado R^2_{aj} superior a 0,96, tiveram erro ($s_{yx\%}$) maior que 25%.

Tabela 5. Melhor modelo para avaliar volume de casca verde em porcentagem ($vc_{\%}$) com seu respectivo coeficiente e estatística de ajuste e precisão.

Modelo	F. M.	Coef.	R^2_{aj}	$S_{yx\%}$	Gráfico de resíduos
15	1,0088	$\beta_0 = 51{,}7059$ $\beta_1 = -0{,}2691$ $\beta_2 = 0{,}15246$	0,47	17,4	

3.2.2. Peso da Casca

Considerando o peso verde da casca, os modelos de melhor ajuste foram os 14, 17 e 18 (Tabela 6), por apresentarem desempenhos similares. Dos três modelos, destaca-se o 14 que apesar de ter um erro ($s_{yx\%}$) um pouco maior que o modelo 17, apresentou uma distribuição de resíduos menos dispersa. Isso indica que das três alternativas, o modelo 14 seria o mais recomendado para estimar o peso verde da casca de bracatinga. Esse modelo está entre os sugeridos por Schneider (1978) para prever o peso verde e seco da casca de acácia negra (*Acacia mearnsii*). Como pode ser visualizado na Tabela 6, o ajuste desse modelo resultou num R^2_{aj} de 0,97 contra 0,93 encontrado por Schneider. Já o $s_{yx\%}$ foi de 18,1% ou s_{yx} = $\pm$3,1853 kg, enquanto que Schneider encontrou um s_{yx} de $\pm$2,2005 kg para o mesmo modelo.

Quando se ajustaram os modelos para estimar o peso seco da casca (*ps*), o resultado foi diferente do produzido por Schneider. Os modelos gerados por ele, usando o processo *Forward* de seleção, estimavam, ao mesmo tempo, o peso verde e o peso seco da casca, ou seja, os modelos tinham o mesmo arranjo de variáveis independentes para prever as duas situações.

Na presente pesquisa, o processo *Forward* gerou quatro modelos para estimativas do peso da casca (Tabela 1, modelos de 17 a 20), sendo dois para estimar o peso verde e dois para o peso seco da casca, porém, apenas um tem o mesmo arranjo de variáveis independentes para as duas situações. Trata-se do modelo 17, gerado pelo processo para estimar a variável dependente peso verde da casca e que depois foi gerado novamente quando se considerou o peso seco da casca como variável dependente (modelo 20).

Levando em consideração os resultados obtidos por Schneider, esperava-se que o processo *Forward* gerasse apenas modelos idênticos para estimar o peso verde e o peso seco da casca da bracatinga também. Ocorreu que tal processo acabou gerando o modelo 18 que é exclusivo para estimar o peso verde da casca e o modelo 19 que é exclusivo para estimativas sobre o peso seco da casca. Entende-se então que, nem sempre, o processo gera um arranjo idêntico de variáveis para prever situações parecidas como o caso dos pesos verde e seco da casca em que a diferença entre ambos é a presença de água no peso verde.

Como pode ser constatado nas Tabelas 6 e 7, os modelos gerados pelo processo *Forward* estão presentes entre os selecionados como os melhores, de acordo com os critérios adotados para a seleção deles, mostrando que é um recurso útil quando se procura construir modelos matemáticos.

Considerando os resultados obtidos para as estimativas do peso seco da casca da bracatinga, não se recomenda o uso dos modelos indicados na Tabela 7 para estimar o peso seco da casca de árvores com diâmetros pequenos porque, como pode ser visto no gráfico de

resíduos dos modelos constantes em tal tabela, há tendência de superestimativa do peso seco da casca para árvores com tais diâmetros.

No geral, a variável d^2h foi a que mais contribuiu para a eficiência dos melhores modelos, pois teve a maior correlação com as variáveis dependentes. Nos modelos desenvolvidos por Schneider para a acácia negra, essa variável esteve sempre presente, mostrando que é uma variável que não pode deixar de ser testada, quando se desejam modelos eficientes para estimativas com relação à casca.

Tabela 6. Melhores modelos para avaliar peso verde da casca (pv) com seus respectivos coeficientes e estatísticas de ajuste e precisão.

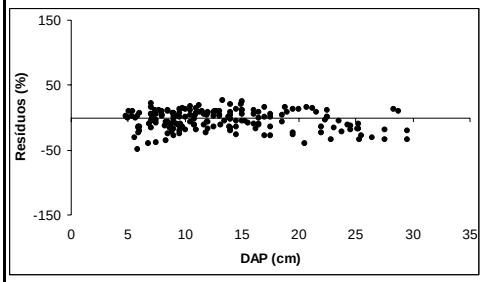
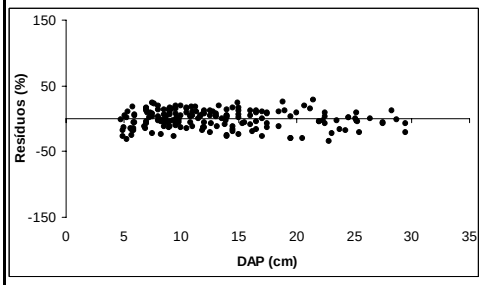
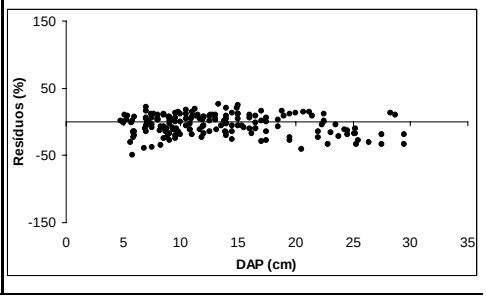
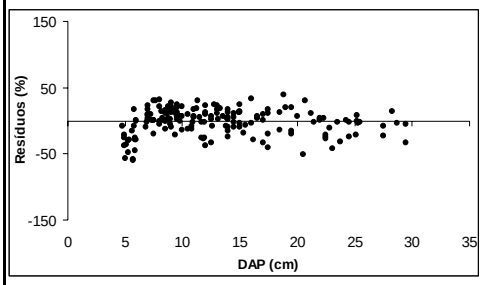
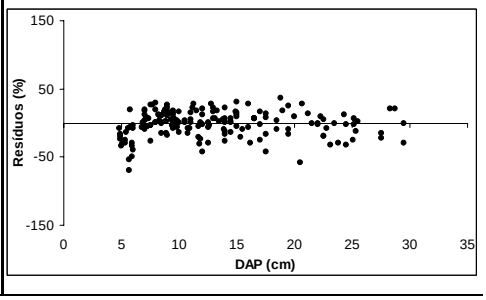
Modelo	F. M.	Coef.	R^2_{aj}	$S_{yx\%}$	Gráfico de resíduos
17	-	$\beta_0 = 0{,}00252$ $\beta_1 = -0{,}000602$ $\beta_2 = 0{,}28889$	0,96	17,19	
14	-	$\beta_0 = 0{,}25422$ $\beta_1 = 0{,}00707$ $\beta_2 = -0{,}20754$ $\beta_3 = 18{,}2945$	0,97	18,1	
18	-	$\beta_0 = -0{,}08552$ $\beta_1 = 0{,}06623$ $\beta_2 = 0{,}00874$	0,97	18,6	

Tabela 7. Melhores modelos para avaliar peso seco da casca (ps) com seus respectivos coeficientes e estatísticas de ajuste e precisão.

Modelo	F. M.	Coef.	R^2_{aj}	$S_{yx\%}$	Gráfico de resíduos
19	-	$\beta_0 = 0{,}44752$ $\beta_1 = 0{,}01680$ $\beta_2 = 0{,}00498$	0,94	22,7	
20	-	$\beta_0 = 0{,}4080$ $\beta_1 = 0{,}000932$ $\beta_2 = 0{,}07622$	0,94	22,9	

4. CONCLUSÕES

Os modelos para estimavas do peso verde e seco da casca, especialmente desenvolvidos neste trabalho, usando o processo *Forward,* foram os que apresentaram melhor desempenho comparativamente a outros retirados da literatura;

A variável independente que mais contribuiu para a composição dos modelos no processo *Forward* foi a variável combinada d^2h (diâmetro ao quadrado vezes a altura do fuste);

Dentre os modelos selecionados na literatura, apenas os de Schneider serviram como modelos que podem ser usados para estimar o volume de casca em metros cúbicos e em porcentagem e o peso verde da casca, em quilogramas, de bracatinga.

5. REFERÊNCIAS

BAGGIO, A. J. **Estúdio sobre el sistema agroforestal tradicional de la Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) en Brasil: productividad, manejo de residuos y elaboración de compost**. 242f. 1994. Tese (Doutorado em Pascicultura) - Departamento de Silvopascicultura, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, 1994

BAGGIO, A. J.; CARPANEZZI, A. A. **Exportação de nutrientes na exploração de Bracatingais**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 1997. p. 3-15. (Boletim de Pesquisa Florestal, 34).

_____. **Quantificação dos resíduos florestais em Bracatingais na região metropolitana de Curitiba, PR**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 1995. p. 51-66. (Boletim de Pesquisa Florestal, 30/31).

BAKES, P.; IRGANG, B. **Árvores do sul**: guia de identificação & interesse ecológico. Santa Cruz do Sul: Instituto Souza Cruz, 2002. 326p.

BARTOSZECK, A. C. P. S. **Evolução da relação hipsométrica e da distribuição diamétrica em função dos fatores idade, sítio e densidade inicial em Bracatingais da Região metropolitana de Curitiba**. 214f. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

BATISTA, J. L.; MARQUESINI M.; VIANA, V. M. Equações de volume para árvores de Caxeta (*Tabebuia cassinoides*) no Estado de São Paulo e sul do Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 65, p.162-175, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual técnico da Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth)**. Curitiba: Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, 1988. 70p. (Série documentos, 20).

FABROWSKI, F. J. **Abordagem anatômica, químico-quantitativa e botânica da Bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham) e suas variedades populares**. 87f. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Curso de Pós- graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

GRODZKI, L.; SOARES, R. C.; BATISTA, A. C.; CARAMORI, P. H. Efeitos do fogo sobre algumas variáveis micrometeorológicas em uma floresta de Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) no município de Colombo, PR. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 2, p.151-156, 2004.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 1982. 402 p.

LAURENT, J. M. E.; CAMPOS, J. B.; BITTENCOURT, S. M. de. **Análise técnico-econômica do sistema agroflorestal da Bracatinga na região metropolitana de Curitiba.** Curitiba: Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, 1990. 72p. (Série Estudos Florestais, 4).

LOETSCH, F.; ZÖHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV Verlagsgesellchaft, 1973. 469p. vol. 02.

MACHADO, S. A.; GARCIA, E. R. Determinação do volume da casca em plantações de *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba, v. 15, n. 1, p.17-25, 1984.

MACHADO, S. A.; SILVA, L. C. R da. Análise do volume da casca em porcentagem em Bracatingais de regeneração natural induzida da região metropolitana de Curitiba, PR. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 1, p.1-11, 2006.

MEYER, H. A. Bark volume determination in trees. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 44, n. 12, p.1067-1070, 1946.

NUNES, J. R. S. **Análise do volume e da porcentagem de casca em povoamentos de eucaliptos de origem híbrida, segundo a idade, local, espécie e método de regeneração.** 103f. 1981. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1981.

REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. **Projeto madeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Herbário Barbosa Rodrigues, 1988. 525p.

SCHEIDER, P. R. **Modelos de equação e tabelas para avaliar o peso de casca de Acácia negra (*Acacia mearnsii* Wild)**. 149f. 1978. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1978.

SILVA, J. A. A da; PAULA NETO, F. de. **Princípios Básicos de Dendrometria**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1979. 185p.

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X
www.agro.unitau.br/ambi-agua
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br
Tel.: (12) 3625-4116

Avaliação de índices de vegetação MODIS para detecção de desmatamentos na Amazônia

(doi:10.4136/ambi-agua.12)

Antonio Henrique Correia; Antonio Roberto Formaggio; Yosio Edemir Shimabukuro; Valdete Duarte

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Coordenação de Observação da Terra / Divisão de Sensoriamento Remoto
Av. dos Astronautas, 1758; 12227-010 São José dos Campos (SP), Brasil
E-mail: {correia, formag, yosio, valdete}@dsr.inpe.br.

RESUMO

Os índices de vegetação NDVI e EVI obtidos a partir de dados MODIS (25m e 50m, reflectância de superfície) foram avaliados com relação à possibilidade de detectar e monitorar áreas de desmatamentos na Amazônia. Além disso, foi também proposto o índice DNRG [Diferença Normalizada entre as bandas do Vermelho (Red) e do Verde (Green)], com o mesmo objetivo. Avaliou-se a qualidade radiométrica dos dados multidatas MODIS, com o objetivo de verificar a possibilidade de usar índices de vegetação para gerar mapas de desmatamento. A acurácia interna das composições multidatas MODIS foi avaliada, tendo fornecido um valor de erro de localização menor que 1 pixel (< 25m) e, portanto, não são necessárias correções geométricas. A potencialidade dos produtos MODIS reflectância de superfície foi avaliada na região da Terra do Meio (Estado do Pará, Brasil, entre as latitudes 06°00'S a 08°00'S e as longitudes 51°00'W a 54°00'W), utilizando-se o classificador supervisionado de mínima distância euclidiana. Exatidões globais superiores a 87% foram obtidas, demonstrando uma boa potencialidade dos produtos MODIS, quando utilizados em sistemas de detecção de desmatamentos em tempo quase real

Palavras-chave: desmatamento; Terra do Meio (Brasil); índices de vegetação; sensor MODIS.

Evaluation of MODIS vegetation indices for detecting deforestation in Amazonia

ABSTRACT

Vegetation indices (NDVI and EVI) obtained from MODIS products (25m and 50m, surface reflectance) were evaluated in relation to the possibility of detecting and monitoring deforestation areas in Amazonia. A new vegetation index, the DNRG (Normalized Difference between Red and Green spectral bands), was proposed with the same objective. The radiometric quality of the multi-date MODIS products was evaluated to verify the possibility of using vegetation index to generate deforestation maps. The internal accuracy of multi-date composites were evaluated providing a value of positional error less than 1 pixel (< 25m) and, consequently geometric corrections were not necessary. The potential of surface reflectance MODIS products was evaluated in the region of Terra do Meio (Pará State, Brazil, between latitudes 06°00'S to 08°00'S and longitudes 51°00'W to 54°00'W), using the Euclidian minimum distance supervised algorithm of classification. Global accuracies above 87% were

obtained demonstrating a good potential for using these products in systems for deforestation detection in near real time.

Keywords: deforestation; Terra do Meio (Brazil); vegetation indices; MODIS sensor.

1. INTRODUÇÃO

As transformações na cobertura e uso da terra estão ocorrendo de forma acelerada, principalmente na região dos trópicos. Nas últimas duas décadas, porções significativas de florestas tropicais foram desmatadas como resultado da expansão das fronteiras agrícolas e da exploração madeireira, atingindo taxas anuais da ordem de 25.000km^2, como, por exemplo, em 2003 (INPE, 2005a).

Até recentemente, os dados de satélites de sensoriamento remoto proporcionavam apenas duas opções para análises de áreas consideradas grandes (ou seja, da ordem de milhares de km^2), como as da Amazônia: (a) porções de imagens de resolução espacial grosseira, adquiridas por satélites/sensores como o NOAA/AVHRR ou o SPOT/Vegetation, que se caracterizam por alta repetitividade temporal; ou (b) mosaicos de imagens de média resolução espacial obtidas por sistemas como o Landsat/TM, o SPOT/HRV ou o CBERS/CCD, cuja repetitividade temporal é baixa (16 dias para o Landsat e 26 dias para os outros dois sistemas).

Os sensores de resolução mais detalhada, como os citados em (b), acima, são considerados de grande utilidade para mapeamento e monitoramento em regiões onde os tamanhos dos talhões de interesse são médios ou pequenos. Porém, a limitada abrangência espacial das imagens desses sensores, a baixa repetitividade temporal contraposta à alta susceptibilidade à cobertura de nuvens, o elevado custo e a quantidade elevada de dados acabam tornando esses sensores menos viáveis para empreendimentos nacionais ou, até mesmo, regionais.

Com o lançamento dos satélites Terra (dezembro/1999) e Aqua (maio/2002), ambos portando o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), passa a ser disponibilizada uma nova perspectiva, com resoluções espaciais de 25m / 50m / 100m e repetitividade temporal quase diária para praticamente toda a superfície terrestre.

Os instrumentos dos satélites Terra e Aqua dão suporte aos objetivos do programa de medições sistemáticas da NASA/ESE (National Aeronautic and Space Administration / Earth Science Enterprise), cujo objetivo é avaliar como o Planeta está mudando e quais as conseqüências dessas mudanças para a vida na Terra (NASA, 2005).

Os satélites Terra e Aqua carregam o instrumento MODIS, que imageia uma faixa da ordem de 2.330km ("swath width") e, a cada dia, recobre praticamente a superfície terrestre inteira. Esse instrumento é um sistema radiômetro-imageador com resoluções geométricas de 250, 500 e 10m, atuando em 36 bandas espectrais desde o visível até o infravermelho termal (Tabela 1). As primeiras sete bandas destinam-se prioritariamente ao sensoriamento remoto da superfície terrestre com resolução de 25m para as bandas 1 (620-670nm) e 2 (841-876nm) e 5m para as bandas de 3 a 7 (459-479, 545-565, 1230-1250, 1628-1652, 2105-2155nm, respectivamente). As outras bandas destinam-se preferencialmente a estudos sobre áreas oceânicas e sobre atmosfera (Running et al., 1994; Zhan et al., 2002).

Os dados MODIS propiciam a geração de 44 diferentes tipos de produtos que os pesquisadores de várias disciplinas das geociências estão usando para estudos relacionados com mudanças globais, incluindo oceanografia, biologia e ciências atmosféricas. Dentre estes tipos de produtos MODIS, podem ser citados, por exemplo, as imagens: reflectância de

superfície, temperatura de superfície, índices de vegetação e outros, com disponibilidade diária e em composições de 8, 16 e 30 dias, composições essas que se constituem em mosaicos, visando minimizar o problema de nuvens (NASA, 2005).

Com relação às resoluções espaciais intermediárias, análises de Strahler et al. (1999) mostraram que muitas das mudanças de uso e cobertura da terra ocasionadas por ações antrópicas possuem escalas espaciais próximas de 25m e que as bandas mais apropriadas para a detecção dessas mudanças estão localizadas na região do visível e do infravermelho próximo. São, portanto, requisições que podem ser amplamente atendidas pelas imagens MODIS.

Tabela 1. Características gerais do instrumento MODIS.

Órbita	705km, sol-síncrona, quase-polar, cruzando o Equador às 10:30 h (Terra) e às 13:30 h (Aqua)
Faixa de imageamento	2330km ± 55° cross-track
Bandas espectrais	36 bandas, entre 405 e 14.385nm, com calibração a bordo
Taxa de dados	11mbps (pico)
Resolução radiométrica	12 bits
Resolução espacial (a nadir)	25m (bandas 1 e 2) 5m (bandas 3 a 7) 10m (bandas 8 a 36)
Repetitividade	Diária (para latitudes norte acima de 30°) 2 dias (para latitudes abaixo de 30°)
Precisão de geolocação	< 15m (1 sigma) a nadir
Registro entre bandas para as bandas 1 a 7	< 5m na direção transversal < 1m na direção da linha de vôo

Fonte: Zhan et al. (2002).

Desta forma, é de grande interesse que os dados e produtos MODIS sejam avaliados quanto à aplicabilidade para análises em escalas regionais, principalmente, na forma de composições multitemporais que possuem um grande potencial de aplicação para regiões com alta probabilidade de cobertura de nuvens, como é o caso da região Amazônica.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi o de avaliar a aplicabilidade de dois índices de vegetação amplamente conhecidos (NDVI e EVI) e um proposto neste trabalho [DNRG, **D**iferença **N**ormalizada entre as bandas do Vermelho (**R**ed) e do Verde (**G**reen)] obtidos a partir de composições MODIS de 8 dias (ou seja, reflectância da superfície com correção atmosférica nas resoluções de 250 e 5m), quanto à possibilidade de seu emprego no monitoramento e na detecção de desmatamentos na região Amazônica em tempo quase-real. As qualidades radiométrica e geométrica dessas composições também foram analisadas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo, na região denominada Terra do Meio, abrange um território de 330 x 221 km^2 e localiza-se aproximadamente nas latitudes 06°00’S a 08°00’S e longitudes 51°00’W a 54°00’W, e a imagem MODIS que a recobre pertence à quadrícula (*“tile”*) h12v09 (Figura 1).

A Terra do Meio estende-se por cerca de oito milhões de hectares entre os rios Xingu e Tapajós. Ali estão as últimas áreas ainda relativamente intactas de floresta Amazônica ao sul do rio Amazonas. A atuação antrópica na região originou-se com a invasão por garimpeiros na década de 70 e por madeireiros no final dos anos 80, motivados pela existência das maiores concentrações remanescentes de mogno no Brasil, as quais estão localizadas na Terra do Meio e nas terras indígenas dos arredores. A exploração madeireira e a pecuária são, atualmente, as principais forças motivadoras da apropriação ilegal de terras nessas localidades, justificando os estudos desenvolvidos para monitorar os desmatamentos que vêm ocorrendo na região.

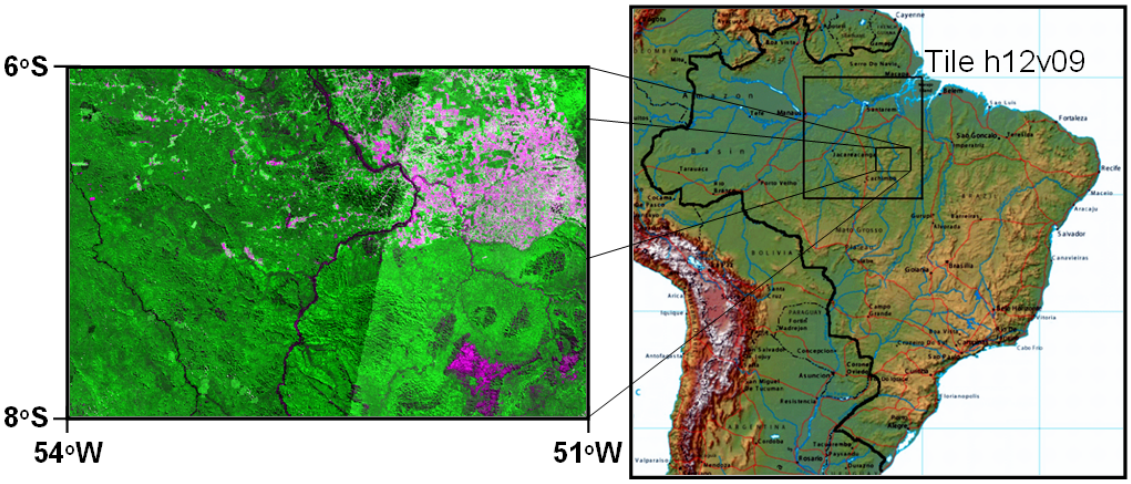


Figura 1. Área de estudo, localizada na Terra do Meio, no Estado do Pará.

2.1. Composições MODIS

Os dados "MODIS Surface-Reflectance Product (MOD09)" são computados como MODIS nível 1B nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 (centradas em 648nm, 858nm, 470nm, 555nm, 1240nm, 1640nm, e 2130nm, respectivamente), correspondendo à reflectância espectral de superfície para cada banda como se tivesse sido medida no nível de terreno (ou seja, sem a interferência dos efeitos de espalhamento e de absorção atmosférica) (NASA, 2005).

Por outro lado, os produtos "MODIS Vegetation-Index (VI)", representados pela sigla MOD13, destinam-se a avaliações das condições globais da vegetação da superfície terrestre, permitindo o monitoramento da atividade fotossintética da vegetação em suporte a detecções de mudanças e a interpretações fenológicas e biofísicas. Esses produtos são oferecidos na forma de mapas de índices de vegetação, que mostram variações espaciais e temporais do vigor da vegetação, sendo derivados em intervalos de 8 ou 16 dias ou, ainda, mensalmente, para o monitoramento sazonal e interanual da vegetação terrestre (NASA, 2005). As referidas composições são obtidas pela seleção dos *pixels* com o máximo valor de NDVI (Anderson, 2004) dentro dos intervalos considerados (8, 16 ou 32 dias).

No presente trabalho, objetiva-se contribuir para os esforços de monitoramento da vegetação amazônica em tempo quase-real e, assim, busca-se auxiliar no alerta de novos desmatamentos ocorridos durante o menor intervalo de tempo possível. Desta forma, optou-se pelo uso dos produtos MOD09, que representam a reflectância da superfície com correção atmosférica, o MOD09A1 (bandas de 1 a 7 com 5m) e o MOD09Q1 (bandas 1 e 2 com 25m), que são processados como composições de 8 dias dos produtos diários MOD09GHK (5m) e MOD09GQK (25m), respectivamente.

Duas composições de 8 dias foram selecionadas (produtos MOD09A1 e MOD09Q1), a primeira correspondendo ao período de 9 a 16/junho/2004 (denominada no presente trabalho como "**composição 1**"), e a segunda, correspondendo ao período de 25/junho a 2/julho/2004 (aqui denominada "**composição 2**"). Esses dois períodos foram selecionados, em função da disponibilidade de mapas de desmatamentos produzidos pelo projeto DETER do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, também com imagens MODIS (INPE, 2005b), em 8/junho/2004 e em 22/junho/2004, que aqui foram usados como referência.

As composições MODIS foram convertidas da projeção Sinusoidal, em que são fornecidas, para as seguintes projeções: (1) UTM (*datum* SAD69), visando à comparação geométrica com as cartas topográficas; e (2) Policônica (*datum* SAD69), com a finalidade de confrontar os mapas de desmatamento produzidos pelo PRODES/INPE (a partir de imagens Landsat) e os obtidos aqui com as composições temporais do MODIS.

2.2. Base Cartográfica

Para a análise da qualidade geométrica das composições MODIS, foram utilizadas as cartas topográficas na escala de 1:250.000 produzidas pelo IBGE (1983), com os seguintes índices de nomenclatura: SB22-Y-A (MIR 196), SB22-Y-B (MIR 197), SB22-Y-C (MIR 223) e SB22-Y-D (MIR 224), convertidas para o meio digital via processo de alta qualidade geométrica e radiométrica.

Para garantir a confiabilidade geométrica das cartas digitais, todas as coordenadas planas (quadriculado UTM) e geográficas (cruzetas e cantos), disponíveis nas cartas topográficas, foram verificadas, uma vez que, são facilmente identificadas e as coordenadas teóricas são conhecidas. Desta forma, foram avaliados 802 pontos referentes às quatro cartas topográficas utilizadas, por meio de um aplicativo semi-automático desenvolvido na linguagem de programação *IDL* (*Interactive Data Language*). O valor máximo para o erro médio quadrático foi igual a 44,4m. Do total de pontos verificados, apenas três apresentaram erro local acima de 125m (máximo valor igual a 141,98m). Com isso, mais de 90% dos pontos apresentaram erros locais menores que 0,5mm na escala de 1:250.000. Desta forma, os erros encontrados foram menores que o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) planimétrico de cartas classe A, que estabelece um erro máximo aceitável de 0,5mm na escala da carta, em 90% dos pontos de controle utilizados (Brasil, 1986). Portanto, concluiu-se que as cartas digitais 1:250.000 são uma base confiável para obtenção de pontos de controle necessários para a avaliação geométrica das composições MODIS.

2.3. Dados de Desmatamento da Amazônia

A atividade anual de monitorar o desmatamento da Amazônia vem sendo realizada, sistematicamente, pelo Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia-PRODES e pelo Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real – DETER (INPE, 2005a, 2005b) com o uso de dados orbitais.

No presente trabalho, os dados históricos do PRODES digital, obtidos pela análise de imagens Landsat, foram complementados e registrados com dados de alerta de desmatamentos (DETER) para duas datas de referência (9 a 16/junho/2004 e 25/junho a 2/julho/2004), visando à obtenção de mapas temáticos atualizados com resolução espacial de 25m. Para maiores detalhamentos sobre a metodologia DETER, pode ser consultado Shimabukuro et al. (2005). Desta forma, a metodologia aqui proposta de avaliação dos mapas de desmatamento obtidos via composições MODIS foi referida aos mapas produzidos pelo INPE, dada a sua confiabilidade.

2.4. Avaliação da Qualidade Geométrica das Composições MODIS

No momento do lançamento, o sensor MODIS apresentava uma precisão de geolocalização de 1.7*m*etros, e com os ajustes realizados posteriormente, em maio de 2000, a precisão já era de 15metros. Em dezembro de 2000, a precisão atingiu 5metros, conforme havia sido projetado (Anderson, 2004). Essa precisão deve ser verificada, principalmente, para composições multitemporais, que poderão ser utilizadas como fonte primária de dados de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) de desmatamento, cuja finalidade é a integração de diferentes bases de dados.

Para realizar a quantificação do erro interno e global das composições MODIS de 8 dias, foram selecionados pontos de controle nas cartas topográficas digitais, (*Seção 2.2*) que possuíam homólogos nas composições MODIS, com os seguintes requisitos: (1) mínima variância temporal; (2) qualidade (boa identificação nas cartas e nas imagens); (3) distribuição espacial, a mais uniforme possível, sobre toda a área de estudo; e (4) quantidade adequada de pontos para a obtenção de resultados representativos.

A avaliação da geometria interna das imagens foi realizada por meio da transformação de similaridade (Vergara et al., 2001). O erro global de posicionamento foi obtido por meio do erro médio quadrático total das coordenadas planas E e N, que correspondem aos pontos de controle (diferença entre a imagem e a carta).

2.5. Qualidade Radiométrica das Composições MODIS

Considerando que as imagens MOD09, ao serem produzidas, passam por um processo de correção atmosférica, é esperado que os dados obtidos para diferentes datas sejam altamente correlacionados, o que garante a homogeneização das respostas espectrais. Desta forma, é possível realizar análises quantitativas multitemporais, sem a necessidade de retificações radiométricas entre as imagens.

Essa suposição de homogeneização radiométrica deve ser avaliada, quando composições de imagens multitemporais são produzidas e, assim, foi realizada a avaliação radiométrica dessas composições, tendo sido empregada a transformação linear *Tasseled Cap* (Kauth; Thomas, 1976; Crist; Cicone, 1984; Huang et al., 2002).

2.6. Classificação das Composições MODIS

Segundo Cihlar (2000), estudos preliminares mostraram que as variações na geometria de visada de composições multitemporais para os casos de sensores de largos “swaths”, como é o caso dos produtos MODIS, causam diferenças radiométricas em *pixels* adjacentes ainda que correspondam ao mesmo tipo de cobertura, o que pode conduzir a erros de classificação. A variabilidade na reflectância é uma conseqüência das propriedades de BRDF de dosséis com textura rugosa. Para aquisições obtidas durante a manhã, em um pixel de floresta localizado na extremidade oeste da varredura, as sombras das árvores serão menores do que nos pixels captados na extremidade leste. A porcentagem de sombra afeta a reflectância bidirecional do pixel e os pixels obtidos das duas extremidades podem ficar adjacentes no mosaico temporal, criando manchas artificiais.

Para contornar esse problema, foram utilizados índices de vegetação, que visam amenizar diferenças sazonais relativas a ângulo solar e a efeitos da atenuação atmosférica observados para dados multitemporais. Dentre esses índices, usou-se o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), já amplamente conhecido, para a banda MODIS 2 [infravermelho próximo (NIR), em 841-876nm] e MODIS 1 [vermelho (R), em 620-670nm].

Outro índice utilizado foi o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), que melhora a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, produzindo uma saturação

mais lenta quando comparado com o NDVI (Anderson, 2004). O EVI foi calculado pela seguinte equação (Justice et al., 1998):

$$\mathbf{EVI} = \mathbf{G} * (\mathbf{NIR} - \mathbf{R}) / (\mathbf{L} + \mathbf{NIR} + \mathbf{C1} * \mathbf{R} - \mathbf{C2} * \mathbf{B}) \quad [1]$$

em que: **R** é a reflectância bidirecional na banda do vermelho (banda MODIS 1: 620-670nm); **NIR** é a reflectância bidirecional na banda do infravermelho próximo (banda MODIS 2: 841-876nm); e **B** é a reflectância bidirecional na banda do azul (banda 3: 459-479nm); **G=2,5** é o fator de ganho; **L=1** é o fator de ajuste para o solo, sendo o valor adequado em pixels com pequena fração de solo; e **C1=6** e **C2=7,5** são coeficientes de ajuste para efeitos de aerossóis da atmosfera.

Considerando que a reflectância do solo é, em geral, maior que a da vegetação nas faixas do vermelho e do verde, foi utilizado também o índice **DNRG** [Diferença Normalizada entre as bandas do Vermelho (**R**ed) e do Verde (**G**reen)], proposto no presente trabalho, para ampliar o realce entre as áreas desmatadas e as áreas com cobertura vegetal, pela expressão:

$$\mathbf{DNRG} = (\mathbf{R} - \mathbf{G}) / (\mathbf{R} + \mathbf{G}) \quad [2]$$

em que: **R** é a reflectância bidirecional na banda do vermelho (banda MODIS1: 620-670nm) e **G** é a reflectância bidirecional na banda do verde (banda MODIS 4: 545-565nm).

É importante destacar que as bandas do azul e do verde, originalmente com resolução de 5m, foram reamostradas para 25m, pelo método bilinear (Mather 1999).

Para detecção das áreas desmatadas, foi utilizado o classificador supervisionado de mínima distância euclidiana (INPE, 2006), utilizando-se como dados de entrada as três imagens obtidas pelos índices **NDVI**, **EVI** e **DNRG**, além das amostras de treinamento referentes às classes: *floresta, não-floresta, água e desmatamento*, que foram baseadas em dados do PRODES digital.

2.7. Avaliação da Acurácia das Classificações MODIS

Para quantificar os resultados obtidos entre a verdade considerada [mapa temático do PRODES digital (Duarte et al., 1999, 2002)] e os resultados obtidos para as classificações MODIS, as estimativas de erro e acurácia, extraídas das matrizes de confusão, foram baseadas na metodologia descrita em Zhan et al. (2002).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Qualidade Geométrica das Composições MODIS

Para esta análise foram selecionados 30 pontos de controle bem distribuídos sobre a **composição 2** (que abrange o período entre 25/junho e 2/julho/2004), para obtenção dos parâmetros que descrevem a transformação de similaridade, por meio de ajustamento pelo método dos mínimos quadrados. Em seguida, esse modelo de transformação foi aplicado sobre 19 pontos de teste diferentes dos pontos de controle, visando à quantificação do erro médio quadrático (EMQ) referente à geometria interna das composições MODIS. Todos os 49 pontos foram utilizados para quantificar o erro global de posicionamento das imagens MODIS.

Na Tabela 2, são apresentados os resultados obtidos para o erro interno e global das composições avaliadas, podendo-se afirmar que a composição MODIS de 8 dias apresentou uma boa geometria interna, fato esse comprovado pelo erro médio quadrático total (erro interno) não ter ultrapassado 1 *pixel*.

Tabela 2. Avaliação do Erro Interno e Global das Composições MODIS.

ERRO	Nº DE PONTOS	EMQ Mínimo		EMQ Máximo		EMQ Total	
		(metros)	(*pixel*)	(metros)	(*pixel*)	(metros)	(*pixel*)
Interno	19	19,43	0,070	170,61	0,68	122,23	0,49
Global	49	0,34	0,001	325,23	1,30	157,84	0,63

Além da boa geometria interna, o erro global de posicionamento é compatível com a exatidão geodésica esperada para esse produto (ou seja, erro menor que 1 *pixel*, conforme o padrão cartográfico brasileiro), apesar da variabilidade da geometria de visada existente nessa composição de oito dias de dados MODIS, conforme apresentado na imagem da Figura 2, que representa a variação do ângulo zenital de visada para cada *pixel* da **composição 2** (25/junho a 2/julho/2004, para o produto MOD09A1 de 5m de resolução).

3.2. Qualidade Radiométrica das Composições MODIS

Para a análise da qualidade radiométrica das composições MODIS, os produtos MOD09A1 (bandas de 1 a 7 com resolução de 5m) foram convertidos para o formato *TIFF*, e, então, foram importados para o programa ENVI, onde foi realizada a transformação de *Tasseled Cap*, para as duas composições MODIS.

As análises das relações entre as imagens *Brightness* e *Greenness* para as duas composições MODIS mostraram–se ajustadas, o que indica uma boa homogeneização das respostas espectrais.

Com isso, pode-se dizer que os dados estão radiometricamente retificados, possibilitando a comparação das respostas espectrais das duas composições MODIS. Esse resultado comprova a boa qualidade do processo de correção atmosférica realizada para as duas composições MODIS utilizadas na presente pesquisa.

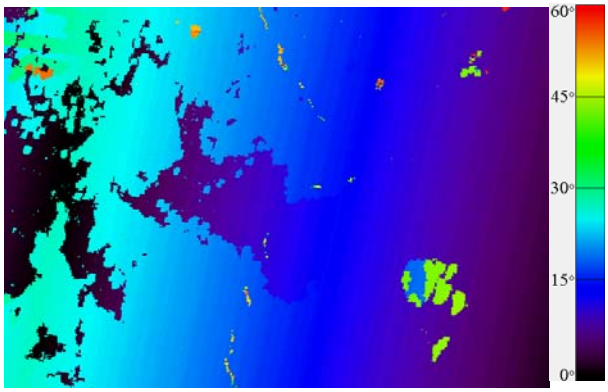


Figura 2. Variação do ângulo zenital de visada da "composição 2" (oito dias de dados MODIS).

3.3. Classificação das Composições MODIS

A partir de amostras de treinamento selecionadas sobre a **composição 1**, foram obtidos o vetor de médias amostrais de cada classe de cobertura presente na área e a respectiva classificação por mínima distância euclidiana. Esses vetores foram utilizados para obter a classificação da **composição 2**.

Após a classificação, foi utilizado o filtro da moda (janela 3x3) para eliminar *pixels* isolados e, em seguida, foram eliminadas áreas menores que 250.00m^2 (4 *pixels* de 25m), seguindo a metodologia do sistema DETER (Detecção de Desmatamento em Tempo Real) (INPE, 2005b).

Na Figura 3(a), é apresentada a imagem-referência, que mostra a realidade terrestre para a data da imagem ETM+/Landsat do dia 8 de junho de 2004 utilizada, onde os desmatamentos até agosto/2003 são mostrados em amarelo e os desmatamentos no ano seguinte, até a data da imagem usada, são mostrados em cor rosa. Nas Figuras 3(b) e 3(c), são apresentados os resultados finais de classificação obtidos para as duas composições MODIS usadas no presente trabalho.

Com base nas duas composições MODIS classificadas e nos mapas temáticos da imagem-referência, para as datas de 8/junho/2004 [Figura 3(a)] e 22/junho/2004, foram obtidas as matrizes de confusão apresentadas na Tabela 3. O mapa temático de referência do dia 22/junho/2004 não foi apresentado aqui devido à similaridade com o mapa do dia 8/junho/2004.

Para a **composição 1**, a acurácia de detecção para a classe *desmatamento* (AD=75,82%) não foi maior devido ao fato de que algumas áreas de desmatamento que apresentavam alguns tipos de cobertura vegetal (vegetação secundária) não foram melhor discriminadas pelo classificador, ocorrendo uma maior confusão com a classe *floresta* (21,85%). As áreas desmatadas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal (praticamente solos expostos), independente da dimensão espacial, foram bem classificadas.

Essa baixa discriminação se deve ao fato de que, nos mapas do PRODES, essas subclasses de desmatamentos são consideradas como uma única classe, além da segmentação utilizada e edição dos mapas, que produz áreas homogêneas, diferentemente da classificação obtida. A classe *não-floresta* (AD=28,22%) não foi bem classificada, em função de variações espectrais similares às respostas espectrais da classe *desmatamento* (25,26%) e *floresta* (46,38%). Uma das causas desse problema é a existência de uma região na imagem, que pertence à classe *não-floresta* [ver Figura 3(a)] e apresenta uma resposta espectral semelhante ao solo exposto. Apesar da acurácia de detecção para a classe *desmatamento* não ter sido alta, os erros de inclusão (24,18%) e omissão (20,78%) foram baixos.

Analisando os resultados obtidos para a **composição 2**, observa-se que a acurácia de detecção, para a classe *desmatamento*, foi maior (AD=84,94%) que o valor obtido para a **composição 1**, em função da melhor discriminação das áreas desmatadas que possuíam cobertura vegetal, provavelmente pelas diferenças de ângulos de visada entre uma composição e outra, que foram obtidas em diferentes datas de passagens do MODIS.

Em contrapartida, houve uma maior confusão dessa subclasse de desmatamento com a classe *floresta*, conforme pode ser visto no aumento da confusão ocorrida entre essas classes (de 2,30% para 4,92%). Da mesma forma que ocorreu com a **composição 1**, a classe *não-floresta* não foi bem classificada, em função, novamente, de alguma confusão com a classe *floresta* (28,02%) e *desmatamento* (40,91%). Para a **composição 2**, os erros de omissão (15,06%) e inclusão (29,41%) ficaram bem próximos aos obtidos para a **composição 1**.

Os valores da acurácia global obtidos para as duas composições foram bem próximos (89,44% e 87,62%), demonstrando a boa adequação do vetor de médias amostrais para as composições analisadas. É importante destacar que, de modo análogo ao ocorrido com a **composição 1**, as áreas de desmatamento com pouca ou nenhuma cobertura vegetal foram bem classificadas na **composição 2**, mesmo utilizando-se as médias amostrais da **composição 1**. Esse resultado pode ser visto na Figura 3(d), onde os polígonos de desmatamento estão destacados em vermelho.

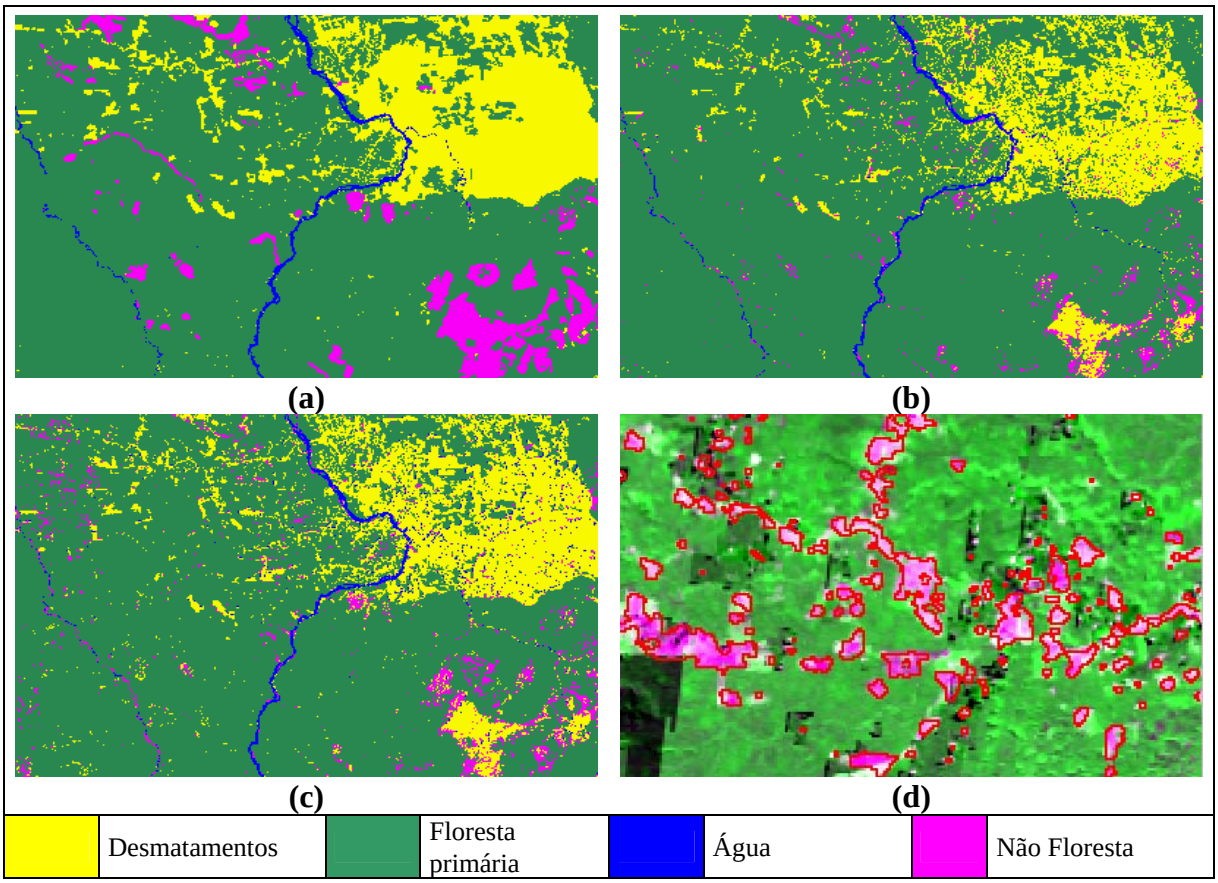


Figura 3. Imagem-referência da realidade terrestre (8/junho/2004) (a); classificação da composição 1 (b); classificação da composição 2 (c); e polígonos de desmatamento (composição 2) (d).

Tabela 3. Matrizes de confusão (em %) para a composição1 (9/6/2004) *(a)*; e para a composição2 (25/6/2004) *(b)*.

		Imagem-referência					
		Des	**Flr**	**Água**	**NFlr**	**EC**	**AD**
Classificação	**Des**	**75,82**	2,30	8,67	25,26	20,78	75,82
	Flr	21,85	**96,24**	9,34	46,38	7,20	96,24
	Água	0,68	0,41	**76,42**	0,14	41,97	76,42
	NFlr	1,65	1,05	5,52	**28,22**	44,27	28,22
	EO	24,18	3,76	23,58	71,78	100,0	100,0
Acurácia Global = 89,44%							
(a)							

		Imagem-referência					
		Des	**Flr**	**Água**	**NFlr**	**EC**	**AD**
Classificação	**Des**	**84,94**	4,92	4,65	40,91	29,41	84,94
	Flr	9,94	**91,38**	3,65	28,02	3,81	91,38
	Água	3,74	0,91	**86,80**	1,02	73,99	86,80
	NFlr	1,38	2,79	4,90	**30,06**	65,00	30,06
	EO	15,06	8,62	13,20	69,94	100,0	100,0
Acurácia Global = 87,62%							
(b)							

Legenda:

Des:	Desmatamento	NFlr:	Não-Floresta
Flr:	Floresta Primária	EO:	Erro de Omissão
EC:	Erro de Inclusão	AD:	Acurácia de Detecção

Finalmente, é importante ressaltar que quanto menor o tamanho do pixel das imagens utilizadas, melhores resultados deverão ser obtidos, uma vez que para pixels grandes ocorrem efeitos de bordas, além de maiores taxas de misturas intra-pixels. Futuros sensores com resoluções geométricas melhores que as do MODIS, porém com resoluções temporais semelhantes, poderão propiciar resultados ainda melhores que os encontrados no presente trabalho.

4. CONCLUSÕES

Com relação à geometria interna, o resultado de 122m para o erro interno obtido pela transformação de similaridade mostrou que as composições MODIS avaliadas são compatíveis com a planimetria de cartas topográficas em escalas iguais ou menores que 1:250.000. A diferença entre a geometria de obtenção das composições (perspectiva cônica) e das cartas (perspectiva ortogonal) reforça a qualidade geométrica desse produto MODIS. Apesar do erro global (157m) não ter atingido o erro teórico de posicionamento (5m), o que é difícil de ser obtido com uma imagem de 25m, o resultado apresentado confirma a qualidade geodésica das composições MODIS (< 1 *pixel*), possibilitando a incorporação desses dados em um SIG, suprimindo a fase de georreferenciamento.

A análise radiométrica mostrou que as duas composições MODIS possuem uma correção atmosférica similar, garantindo a homogeneização das respostas espectrais de diferentes datas, porém, é importante que essa análise seja extrapolada para diferentes estações climáticas. Apesar das diferenças radiométricas existentes para uma mesma classe de cobertura, o que inviabiliza a utilização das bandas originais sem algum tipo de razão entre elas, foi possível obter bons resultados de classificação, utilizando índices de vegetação. A utilização desses índices, especialmente o NDVI, minimizou o efeito da variação radiométrica das composições multitemporais, mais expressivos sobre as áreas de floresta. Esse resultado pode ser explicado pela saturação do NDVI, proporcionando uma atenuação dessa variação radiométrica. A combinação das imagens de 25m com as de 5m permitiu uma melhor discriminação das classes de interesse.

Considerando o objetivo principal do presente trabalho, ou seja, detectar novos desmatamentos por meio do uso de imagens MODIS, a metodologia mostrou-se adequada para a área de estudo analisada.

As amostras de treinamento devem ser avaliadas para outras imagens (diferentes regiões, diferentes padrões de desmatamentos e maior sazonalidade); porém, devido à semelhança entre os resultados obtidos para duas datas distintas, há a indicação de que as perspectivas são boas.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que novos desmatamentos serão bem discriminados, o que é de vital importância para um sistema de alerta de desmatamentos. Além disso, os erros de inclusão e omissão foram baixos, o que reforça as perspectivas de bons resultados para outras composições MODIS.

Os resultados obtidos pelo classificador (mínima distância euclidiana) foram satisfatórios. Recomenda-se a realização de testes e avaliações de outros classificadores, como, por exemplo, árvore de decisão, para melhorar os resultados, pela definição de métricas que possibilitem uma melhor discriminação entre as classes de interesse.

5. REFERÊNCIAS

ANDERSON, L. O. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS**. 231f. 2004. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Inclusão de Cartografia (COCAR). **Cartografia e Aerolevantamento**: legislação. Brasília, Ministério da Ciência e Tecnologia, 1986.

_____. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cartas Topográficas**: SB22-Y-A (MIR 196), SB22-Y-B (MIR 197), SB22-Y-C (MIR 223) e SB22-Y-D (MIR 224). Rio de Janeiro: IBGE, 1983. Escala 1:250.000.

CIHLAR, J. Land cover mapping from satellites: Status and research priorities. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 21, n. 3, p. 1093–1114, 2000.

CRIST, E. P.; CICONE , R. C. A physically-based transformation of Thematic Mapper Data: The TM Tasseled Cap. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 22, n. 3, p. 256-263, 1984.

DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. E.; AULICINO, L. C. M. **Metodologia para corrigir as distorções observadas entre os mapeamentos temporais do projeto PRODES Digital**. São José dos Campos: INPE, 2002. 21p.

DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J.R.; MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C. et al. **Metodologia para criação do PRODES Digital e do banco de dados digitais da Amazônia**: Projeto BADDAM. São José dos Campos: INPE, 1999. 33p.

HUANG, C.; WYLIE, B.; YANG, L.; HOMER, C.; ZYLSTRA, G. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 8, p. 1741–1748, 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite**: projeto PRODES. São José dos Campos: INPE, 2005a. Disponível em: <www.obt.inpe.br/prodes/index.html>. Acesso 13 abr. 2005.

_____. **Sistema DETER** (Detecção de Desmatamento em Tempo Real). São José dos Campos: INPE, 2005b. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/deter/>. Acesso 13 abr. 2005.

_____. **Tutorial SPRING**. 2006. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html>. Acesso 14mar. 2006.

JUSTICE, C.O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND. J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D. et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, 1998.

KAUTH, R. J.; THOMAS, G. S. The tasseled cap – a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen in Landsat. In: SYMPOSIUM ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, jun. 1976, West Lafayette. **Proceedings…** West Lafayette: [S.n.], 1976. p.41-51.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely sensed images**: an introduction. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 365p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Modis Home Page**. 2005. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>. Acesso 12 abr. 2005.

RUNNING, S. W.; JUSTICE, C. O.; SALOMONSON, V. V.; HALL, D.; BARKER, J. et al. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 17, p. 3587– 3620, 1994.

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M. A.; ARAI, E.; RUDORFF, B. F. T. et al. **Detecção de áreas desflorestadas em tempo real:** conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do Projeto DETER. São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/deter/metodologia.pdf>. Acesso 15 mar. 2006.

STRAHLER, A.; MUCHONEY, D.; BORAK, J.; FRIEDL, M.; GOPAL, S. **MODIS land cover and land-cover change products algorithm theoretical basis document (ATBD)**. Vs. 5.0. Boston: Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston University, 1999. 72p.

VERGARA, O. R.; CINTRA, J. P.; D'ALGE, J. C. L. Avaliação da exatidão cartográfica de documentos atualizados com imagens orbitais e sistemas de informação geográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 20., 2001, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBC. 10p. 1 CD-ROM.

ZHAN, X.; SOHLBERG, R. A.; TOWNSHEND, J. R. G.; DIMICELI, C.; CARROLL, M. L. et al. Detection of land cover changes using MODIS 25m data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, n. 1/2, p. 336-350, 2002.

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X
www.agro.unitau.br/ambi-agua
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br
Tel.: (12) 3625-4116

Spectral mixture analysis for water quality assessment over the Amazon floodplain using Hyperion/EO-1 images

(doi:10.4136/ambi-agua.13)

Conrado de Moraes Rudorff; Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo; Lênio Soares Galvão

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
E-mail:{cmr, evlyn, lenio}@ltid.inpe.br

ABSTRACT

Water composition undergoes complex spatial and temporal variations throughout the central Amazon floodplain. This study analyzed the spectral mixtures of the optically active substances (OASs) in water with spaceborne hyperspectral images. The test site was located upstream the confluence of Amazon (white water) and Tapajós (clear-water) rivers, where two Hyperion images were acquired from the Earth Observing One (EO-1) satellite. The first image was acquired on September 16, 2001, during the falling water period of the Amazon River. The second image was acquired on June 23, 2005, at the end of the high water period. The images were pre-processed to remove stripes of anomalous pixels, convert radiance-calibrated data to surface reflectance, mask land, clouds and macrophytes targets, and spectral subset the data within the range of 457-885nm. A sequential procedure with the techniques Minimum Noise Fraction (MNF), Pixel Purity Index (PPI) and n-dimensional visualization of the MNF feature space was employed to select end-members from both images. A single set of end-members was gathered to represent the following spectrally unique OASs: clear-water; dissolved organic matter; suspended sediments; and phytoplankton. The Linear Spectral Unmixing algorithm was applied to each Hyperion image in order to map the spatial distribution of these constituents, in terms of sub-pixel fractional abundances. Results showed three patterns of changes in the water quality from high to falling flood periods: decrease of suspended inorganic matter concentration in the Amazon River; increase of suspended inorganic matter and phytoplankton concentrations in *varzea* lakes; and increase of phytoplankton concentration in the Tapajós River.

Keywords: Hyperspectral remote sensing; spectral mixture analysis; phytoplankton; dissolved organic matter; suspended inorganic matter.

Avaliação da qualidade da água na planície de inundação amazônica por meio de análise de mistura espectral de imagens do sensor Hyperion/EO-1

RESUMO

A água distribuída pelos diversos ambientes na planície de inundação da Amazônia central passa por complexas variações espaciais e temporais na sua composição. O presente estudo analisou a mistura espectral de constituintes opticamente ativos (COAs) na água, usando imagens orbitais de sensor hiperespectral. A área de estudo localiza-se à montante da confluência dos rios Amazonas (água branca) e Tapajós (água clara), onde duas imagens Hyperion foram adquiridas a partir do satélite *Earth Observing One* (EO-1). A primeira

imagem foi adquirida em 16 de setembro de 2001, durante o período de vazante do rio Amazonas. A segunda imagem foi adquirida em 23 de junho de 2005, no final do período de cheia. As imagens foram pré-processadas para remover faixas de *pixels* anômalos, converter dados calibrados de radiância para reflectância de superfície, aplicar máscara de alvos terrestres, nuvens e macrófitas, e limitar os dados ao intervalo espectral 457-885nm. Um procedimento seqüencial das técnicas Fração Mínima de Ruído (MNF), Índice de Pureza de Pixel (PPI) e visualização do espaço de atributos n-dimensional gerado entre as bandas MNF foi empregado para selecionar membros de referência a partir das duas imagens. Um conjunto único de membros de referência foi composto para representar os seguintes COAs, espectralmente distintos: água clara, matéria orgânica dissolvida, sedimentos em suspensão; e fitoplâncton. O Modelo Linear de Mistura Espectral foi aplicado a cada imagem Hyperion para mapear a distribuição espacial destes constituintes em termos das abundâncias fracionais sub-*pixels*. Os resultados demonstraram três padrões de mudanças na qualidade da água entre as situações de inundação nos períodos de cheia e de vazante: diminuição na concentração de matéria inorgânica em suspensão no rio Amazonas; aumento nas concentrações de matéria inorgânica em suspensão e fitoplâncton nos lagos da várzea; e aumento na concentração de fitoplâncton no rio Tapajós.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto hiperespectral; análise de mistura espectral; fitoplâncton; matéria orgânica dissolvida; matéria inorgânica em suspensão.

1. INTRODUCTION

Natural waters are complex physical-chemical-biological media comprising living, nonliving, and once-living materials that may be present in aqueous solution or suspension. Climate and hydrology may cause major changes in water quality and in the ecological status of water. The annual flood pulse propagating throughout the Amazon Basin characterizes a monomodal hydrologic regime (Junk, 1997), which can be summarized, in terms of the water level of the floodplain-river system, into four important periods: low; rising; high; and falling. In the Central Amazon Floodplain, the water level of the Amazon River varies annually with the amplitude of around 7 to 6 m. The maximum level is reached during the high water period between May and July, and the minimum level is reached during the low water period between November and December. Water properties respond to the flood pulse. At the beginning of the rising water level period, submerged organic material such as plant and animal detritus begins to decompose and the development of a great amount of macrophytes takes place near the margins of water bodies. During the high water level period, suspended matter with associated nutrients from the Amazon River are introduced into floodplain lakes and are deposited as the turbulence is reduced. Macrophyte continues to grow, since they are very efficient in retrieving the nutrients available in the water. This causes the nutrients to be less available for phytoplankton. In fact, the major events of phytoplankton blooms occur when macrophytes begin to decompose at the falling water level period. Also, during this period other environmental factors induce the development of phytoplankton blooms, such as more intensive solar illumination, favored by clearer skies, and re-suspension of sediments with nutrients deposited at the bottom of the lakes, favored by depth reduction and wind intensification. The level of connection of the mainstream with floodplain lakes decreases towards the low water period. Thus, the contribution of water from the river into the floodplain lakes decreases and lakes develop their own limnological characteristics. At low

water a great portion of the floodplain area have turned from aquatic to terrestrial phase (Junk, 1997).

Human induced changes over the basin are causing water pollution which in turn threatens the ecology of the Amazon floodplain and the health of the riverside population. Pollutants in water include a wide spectrum of chemicals, pathogens, and physical chemistry or sensory changes. For instance, the disturbance and mobilization of large quantities of sediment into the water column during mining operations (Telmer et al., 2006) and soil erosion process associated to deforestation (Mainville et al., 2006) is contributing to fish mercury (Hg) contamination. Pinheiro et al. (2006) observed that the Hg levels detected in exposed fish eating populations of the Tapajós River are above the World Health Organization acceptable levels. Organic wastes such as urban sewage and farm waste (specially from water buffalo and cattle ranching) impose high oxygen demands on the receiving water leading to oxygen depletion. Higher frequency of phytoplankton blooms can be associated with the increases of nutrient loadings that lead to eutrophication (Novo et al., 2006).

The significant spatial-temporal variability in the composition of Amazon floodplain water, derived from the ever-changing water level over a vast and diverse environment, makes the distinction between natural and human induced impacts over water quality extremely difficult. Also, traditional water quality monitoring techniques, based only on sporadic sampling over time and space, becomes ineffective for monitoring wide regions of the Amazon floodplain. Optical Remote sensing methods and technology have been largely considered and tested for water quality assessment. Along with the pure water molecules themselves, there are materials in water column, denominated Optically Active Substances (OASs), which interact with the light field. The main OASs in natural water are: phytoplankton; dissolved organic matter (DOM); and suspended inorganic matter (SIM). The optical properties of these substances are closely related to the water quality, and have been discussed in detail by several authors (Bukata et al., 2000; Dekker, 1993; Kirk, 1994). “Ocean color” sensors (e.g., SeaWiFS and MODIS) have not been suitable for inland water quality mapping due to spatial resolution constraints, and other “land” sensors (e.g., Landsat-7/ETM$^+$ and CBERS-2/CCD) due to radiometric and spectral limitations.

In November 21, 2000, Hyperion was brought to the scientific community as the first orbital sensor to produce hyperspectral images of the terrestrial surface. It is transported on board of the Earth Observing One (EO-1) satellite, at a 705 km altitude orbit. The EO-1 satellite is part of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) "New Millennium Program". This orbital platform was projected to evaluate the performance of new technologies and strategies that seek to improve satellite Earth observation for a wide range of applications. The key feature of Hyperion imagery is that it provides measurements of a near complete spectrum, from visible (VIS) to short wave infrared (SWIR) range, for each pixel (with 30 m spatial resolution) using narrow wavebands (with 10 nm spectral resolution). The Hyperion sensor was not designed for water applications, since its signal-to-noise ratio (SNR) is relatively low (160:1). In spite of that, preliminary studies have provided encouraging results showing its applicability to coastal water mapping (Vittorio and Dekker, 2003). Therefore we found it worthy to assess applications with Hyperion images to study the composition of inland Amazonian waters.

Hyperspectral imagery presents a number of opportunities for interpretation and analysis (Aspinall et al., 2002). The Linear Spectral Unmixing (LSU) algorithm has been widely used in hyperspectral image analysis to determine the pixel composition by modeling the abundances of spectrally unique substances, denominated “end-members” (Adams et al.,

1986). Novo and Shimabukuro (1994) proposed a spectral mixture analysis of OASs for inland waters, to reduce high spectral resolution data to images where the fractional abundance of a given substance is readily observed. The success of this approach will depend on the availability of pure end-members and the linearity of the interaction between the optical components of the mixture. Preferably, end-members should be obtained from the image under analysis once the reflectance spectra measured in laboratory can not account for undesirable environmental and instrumental signal variation that interferes in an orbital sensor measurement (Kruse et al., 2003).

The present study was carried out to evaluate the use of Hyperion images to map water constituents in the Amazon floodplain, by determining the fractional abundances of clear-water, DOM, SIM and phytoplankton, using a LSU algorithm.

2. MATERIAL AND METHODS

The experimental site is situated just upstream the confluence of Amazon and Tapajós rivers, near the city of Santarém-PA, Brazil (**Figure 1**). An archived Hyperion image, acquired on September 16, 2001, was identified within the USGS EROS Data Center, and showed a wide range of multi-componental mixtures along the floodplain waters. In the hydrologic context, this image represented the falling water period. A second Hyperion image asked to be programmed by our team and was successfully collected over the same site on June 23, 2005, at the end of the high water period.

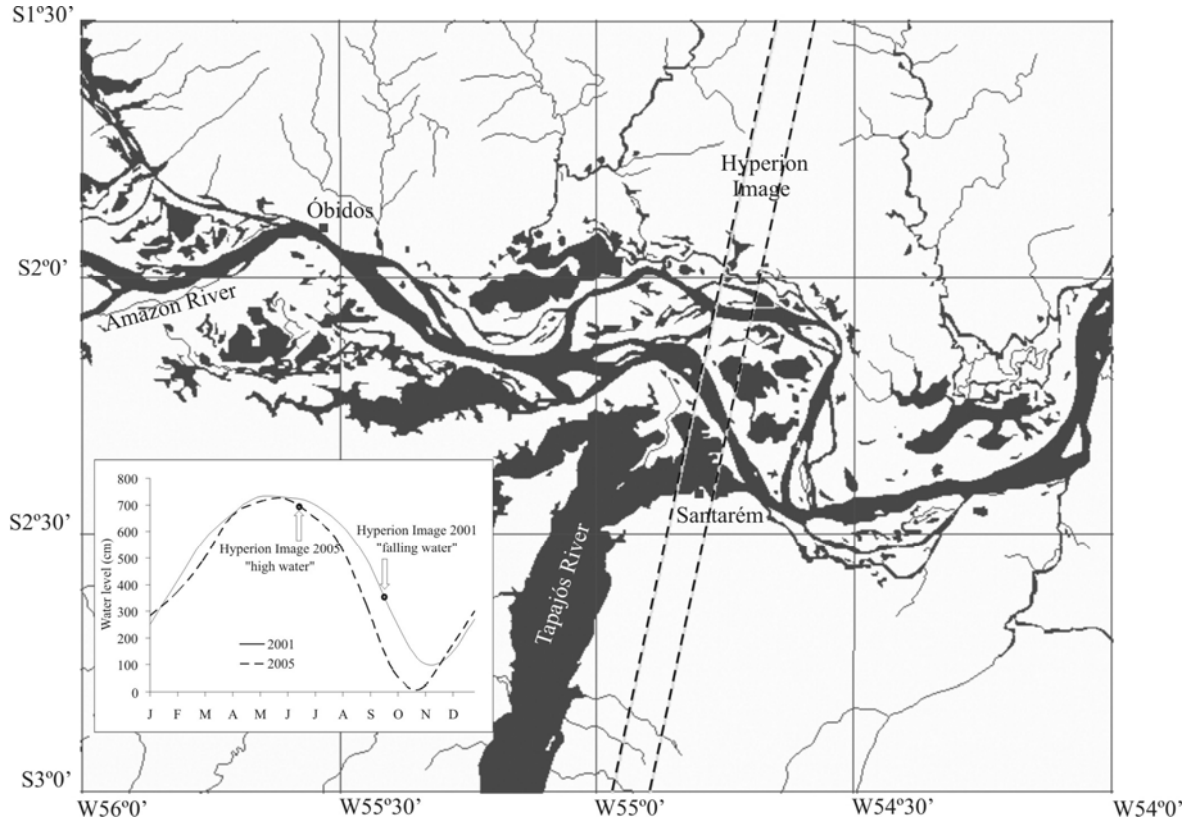


Figure 1. Location map of the study area. The parallel dashed lines present the swaths of the Hyperion images collected over the area. Hydrographs registered for the Amazon River at Óbidos-PA, over the years 2001 and 2005, are shown in the inset.

The Hyperion images were preprocessed according to the following steps: de-striping to remove anomalous pixels (Han et al., 2005); correction of radiance-calibrated data to surface reflectance, using the Atmospheric CORrection Now (ACORN) model-based software which uses licensed MODTRAN4 technology (AIG, 2001); building and applying a mask to remove land, clouds and macrophytes targets; and spectral range subsetting within the range 457-885nm.

The main concept of spectral mixture analysis to study the water composition is that the reflectance measured at a given pixel is represented by the sum of end-members, which represent each OAS, weighted by its relative proportion or abundance (Novo; Shimabukuro, 1994)

$$R_{pi} = \sum f_j r_{ij} + \varepsilon_i \ , \qquad [1]$$

where, for a given pixel p, R_{pi} is the water remote sensing reflectance of the ith band, j represents the end-member for a certain OAS, f_j is the fractional abundance of the jth end-member, r_{ij} is the jth end-member reflectance of the ith band, and ε_i is the error in the ith waveband.

Thus, the first step in the spectral mixture analysis is to select end-members for the model. A semi-automated procedure was used for the end-member extraction directly from the Hyperion images, as proposed by Kruse et al. (2003). This procedure is implemented in the ENVI image analysis software, and includes: spectral data reduction using the Minimum Noise Fraction (MNF) transformation (Green et al., 1988; Kruse et al., 1993); spatial data reduction using the Pixel Purity Index (PPI) (Kruse et al., 1993); and end-member selection using a n-Dimensional Visualizer (Kruse et al., 1993). Once the end-members were selected they were identified according to their spectral properties. As the two Hyperion images were acquired presenting much different conditions of water quality, it was considered that the end-members selected from each image should be combined to form one unique set of end-members to represent clear-water and waters dominated, individually, by each OAS: DOM, SIM, and phytoplankton. This strategy was adopted to increase the availability of 'pure' end-members.

The inversion process of equation (1) determines the fractional abundance of each end-member. The fractional end-member abundance calculated for each pixel of the hyperspectral image is then spatially reassembled to produce separate images. At last, the fractional abundances (f) of clear-water and the OASs were mapped applying LSU to each Hyperion image.

A field campaign was carried out between June 23 and 29, 2005 to provide ground truth data, in order to help explain the results obtained from the analysis of the Hyperion image acquired on June 23, 2005. Water samples and simultaneous radiometric measurements were collected at 43 stations distributed over the water bodies in the study site. A Global Positioning System (GPS) was used to register their geographic position.

A Spectron Engineering SE-590 spectroradiometer was used to collect radiance upwelling from the water with a barium sulphate painted panel serving as reference. The spectroradiometer acquires data in the spectral range from 368.4 to 1113.7 nm. For our study, data from 445.3 to 896.4 nm (153 channels) were used for comparison with Hyperion spectral reflectance data, in order to check for the occurrence of any important variations of water inherent optical properties along the seven days period of the field campaign.

The bidirectional reflectante factor (in %) was calculated by using the following equation:

$$R_{water}(\lambda) = \frac{DN_{water}(\lambda)}{DN_{panel}(\lambda)} \times R_{panel}(\lambda), \qquad [2]$$

where $R_{water}(\lambda)$ is the bidirectional reflectante factor of the water, DN_{water}, is the raw digital number measured over the water, DN_{panel} is the raw digital number measured over the reference panel, R_{panel} is the bidirectional reflectante factor of the reference panel, and λ is the wavelength.

Each day of the field campaign, sampling was carried out between 10h00m and 14h00m (local time), in order to minimize changes in measurement conditions due to variation of the Sun's illumination geometry. The sensor was positioned over each sampling station with orientation of 90° solar azimuth, 45° inclination and approximately 2 m height of above the water.

Assuming that the portion of the water column with the major influence over the water upwelling radiance detected by the sensor remains close to the subsurface, water samples of five liters were collected at 0.5 m depth below the surface at each station immediately after the field spectra1 measurements were made. The water samples were filtered at the field site and adequately conserved for transportation, following the specific orientations of each method of analysis. After a period of 18 days, the concentrations (C) of chlorophyll-*a* (Chl-*a*) in $\mu g \cdot l^{-1}$ (Nush, 1980), suspended inorganic matter (SIM) in $mg \cdot l^{-1}$ (Wetzel e Likens, 1991), and dissolved organic carbon (DOC) in ppm (APHA, 1998) were determined in laboratory.

Geometric correction was performed on a true color composition Hyperion image (RGB: 640; 549; 457nm), by selecting ground control points (GCPs) from a Landsat/TM orthorectified image, and applying a second degree polynomial warp with the nearest neighbor resampling method. The inverse geometric model was used to match the ground sampling stations to their correspondent location in the Hyperion image. The mean values of the fractional end-member abundance bands were computed for a 4 × 4 pixels window, centered at the position of each sampling station. Statistical relationships were determined between the measured *in situ* concentration of OASs variables and the respective fractional end-member abundances.

The Hyperion image acquired on September 16, 2001 yields an important contribution by increasing available Hyperion data for end-member selection. However, despite the fact that there was no ground truth data correspondent to this period, this image was also analyzed using the LSU algorithm, in order to demonstrate somewhat of the potential of carrying out temporal analysis through this approach. In which case, by attempting only to seasonal changes, the image acquired on June 23, 2005 represented the flood situation of high water period and the image acquired on September 16, 2001 represented the flood situation of falling water period.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 End-member selection

There will always be mixtures of dissolved or suspended materials present in any natural water body, thus, the desired conceptual 'pure' end-members for OASs in the water is not accessible. In this case, the LSU results will not lead to a complete virtual separation of the fractions; they will rather indicate a relative proportion of each end-member, in which the relationship with the actual concentration of a certain OAS will be stronger according to its

reflectance spectral dominance. The end-members that resulted from the procedure of selection described in section 2 represented the pixels that were most spectrally dominated by each individual OAS. The clear-water and DOM end-members (**Figure 2**) were extracted from June 23, 2005 Hyperion image, and the SIM and phytoplankton end-members (**Figure 2**) were extracted from September 16, 2001 Hyperion image. Clear-water presents very low concentrations of OASs; consequently, the spectral reflectance is low and shaped according to the optical properties of pure water molecules, which produce an exponential increase of absorption towards longer wavelength and scattering towards shorter wavelength, over the VNIR. Dissolved organic matter increases the water absorption exponentially towards shorter wavelengths (Kirk, 1994) and produces fluorescence in the red and NIR bands. The phytoplankton spectrum shows a prominent reflectance peak in the green region, representing the minimal aggregate absorption of all algal pigments. The red band of chlorophyll (Chl) absorbance at 670–675 nm was prominent and sensitive to both pigment absorption and aggregate scattering by algae and other particles. A pronounced absorption feature at about 620–630 nm was present. A second prominent reflectance peak was observed near 700 nm, a wavelength longer than the red absorbance band of algal pigments and lower than the region of maximal water absorbance. Although Chl fluorescence, centered near 685 nm, contributes to this feature, the majority of the radiance measured in this peak is due to scattering from algal cells and other particulate matter (Dekker, 1993). The spectrum of water dominated by SIM is characterized by an increase in reflectance through all the VNIR spectral range, but more particularly towards the 580-680 nm range (Novo et al., 1991).

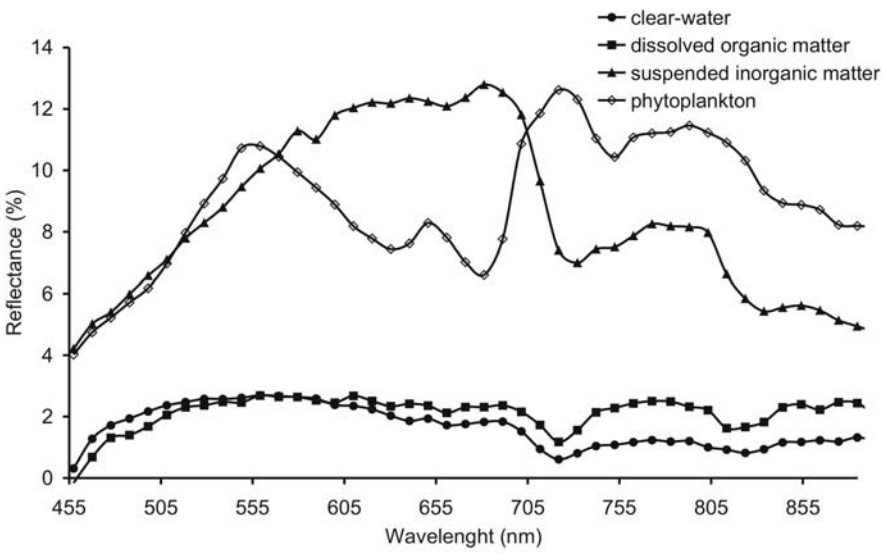


Figure 2. Hyperion end-members spectra of waters dominated by optically active substances.

3.2 Relationships between ground sampled concentrations and Hyperion mapped abundances of optically active substances at high water period

Image data was acquired instantaneously over the study site by the synoptic view of the Hyperion detectors. However, field measurements could not be taken simultaneously at all sampling stations, and therefore they were subjected to small but inevitable environmental instabilities along the period of the field campaign, especially due to wind once local precipitation did not occur. A good satisfactory match between orbital (Hyperion) and field (SE-590) data sets, in the range from 450 to 900 nm, was observed by means of two

comparison approaches: visual analysis of reflectance spectra for each sampling station; and correlation analysis (n = 43 sampling station) between reflectance bands and concentrations of the OASs. These comparisons allowed verifying that it was possible to assume that the water inherent optical properties remained stable during the seven days of the field campaign period, providing confidence for the subsequent analysis of the Hyperion image acquired on June 23, 2005. Such stable characteristic for high water period was also observed by Barbosa (2005).

Figure 3 shows the relationships between fractional abundances (f), derived from spectral mixture analysis of Hyperion reflectance data, and concentration of water OASs in different environments. The concentration of dissolved organic carbon (C_{DOC}) does not vary significantly between turbid water from the Amazon River and water with low turbidity from floodplain lakes (**Figure 3a**). The increase of C_{SIM} causes the reduction of f_{DOM} in spite of having an effective variation of C_{DOC} in water. For this reason, the quantification of DOM spatial variation by means of the spectral mapping was not accomplished. The clear-water samples (Tapajós River) are set apart by presenting low C_{DOC}, and were correctly determined with f_{DOM} close to zero.

As phytoplankton was not abundant during the high water level period, it had a relatively small effect on water spectral characteristics. As a consequence, the maximum value of fractional phytoplankton end-member abundance ($f_{phytoplankton}$) was 0.08, which corresponds to $C_{Chl\text{-}a}$ = 48 µg l^{-1}. However, mapping results of $f_{phytoplankton}$ still presented a positive correlation with $C_{Chl\text{-}a}$ (r = 0.515; *p-value* = 0.000). The algorithm provided better results in waters characterized by low turbidity. Clear-water (Tapajós River) and water with high loads of DOM, present in small floodplain lakes surrounded by vegetation, both with low $C_{Chl\text{-}a}$, were mapped with $f_{phytoplankton}$ close to 0 (**Figure 3b**). Triangle marks in **Figure 3b** indicate that SIM-rich water (Amazon River) caused the reduction of $f_{phytoplankton}$ towards negative values.

The reflectance of SIM is dominant over all the others OASs in water. In fact, the LSU showed the best potential to estimate the abundance of SIM (f_{SIM}). Mapping results for fractional SIM end-member abundance (f_{SIM}) showed high correlation with the C_{SIM} measured on the ground sampling stations (r = 0.75; *p-value* = 0.000). A nonlinear effect over the spectral mixture of SIM with the others OASs was observed. As a result, f_{SIM} values determined by the LSU algorithm were not directly proportional to the C_{SIM} (mg l^{-1}) measured *in situ*. The negative f_{SIM} estimates over the sampling stations were coincident with those stations that presented high $C_{Chl\text{-}a}$. Low turbidity waters were correctly mapped by presenting f_{SIM} close to 0 (**Figure 3c**). The relationship presented in **Figure 3c** indicates that, in the abundance range between 0 and 0.5, there is a quasi-linear increase in C_{SIM} up to 15 mg l^{-1}. For f_{SIM} larger than 0.5, the increase of actual C_{SIM} becomes exponential.

The Linear Spectral Unmixing (LSU) algorithm assumes that the sum of all fractions should be equal to 1. Therefore, in cases of nonlinearities, such as observed with the OASs mixtures in inland waters, when the model overestimates one fraction, any of the other fractions may have to be underestimated in order to compensate for the overestimation. This explains negative or over 1 estimates of end-member abundances (f_j) that were observed from the results.

3.3 Temporal Variability

The variation of water quality condition was analyzed using the information derived from the Hyperion images of high and falling water periods. Figure 4 shows true color composites of the two Hyperion scenes (a, g), the fractional abundance images of the water

constituents (b to e; and h to l), and the root mean square (RMS) error images (f and m) resultant from the spectral mixture model.

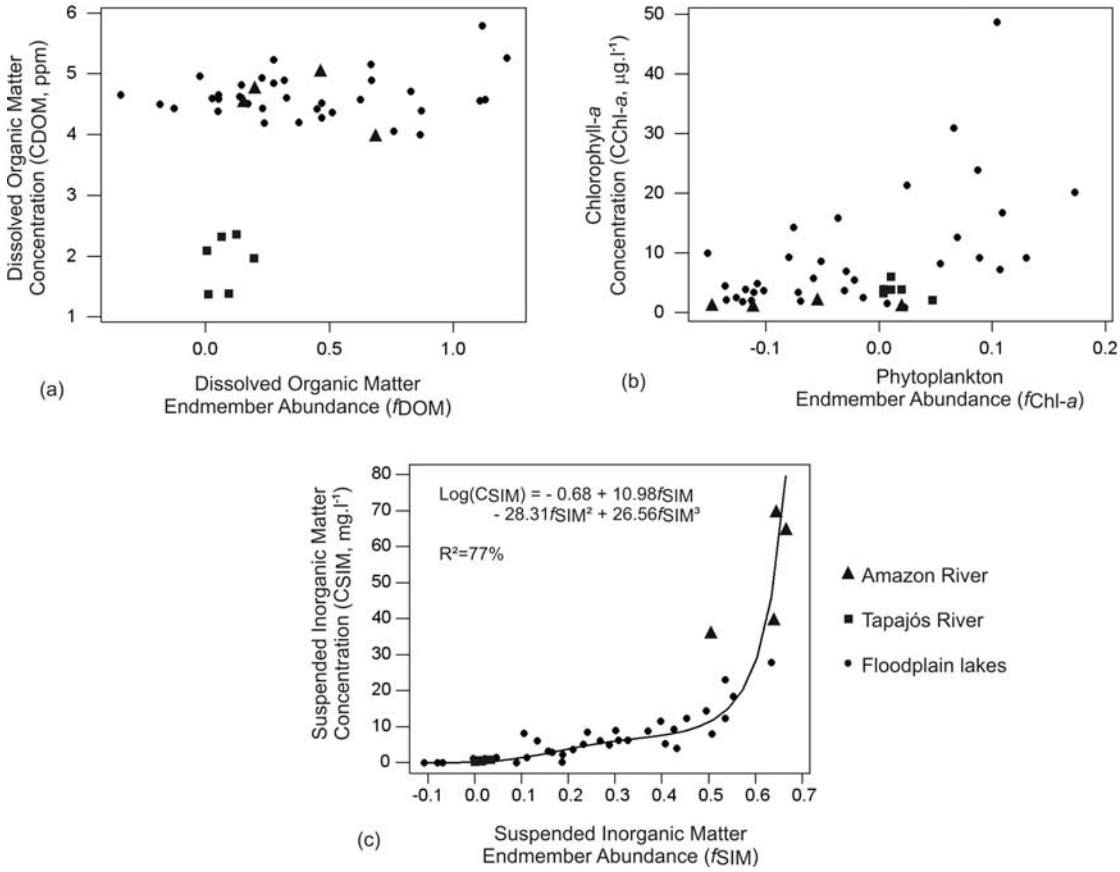


Figure 3. Relations between: (a) C_{DOC} and f_{DOM}; (b) $C_{Chl\text{-}a}$ and $f_{phytoplankton}$; and (c) C_{SIM} and f_{SIM}.

The RMS error image presented in **Figure 4m** showed larger uncertainties over lakes with mixture of high concentrations of algae and SIM. The dominant influence of SIM reflectance, not only detracts the evidences of phytoplankton Chl-*a* features over the spectra, but also produces an opposite spectral behavior on the red bands, where Chl-*a* acts as an absorber and SIM as a scatterer. This effect led the LSU to map $f_{phytoplankton}$ with negative values over waters with strong SIM influence.

The low reflectance signal of water is highly affected by undesired fluxes of radiance also captured by the sensor (Bukata et al., 2000), which introduce uncertainties to the results. For instance, the high water RMS error image (**Figure 4f**) shows larger uncertainties over regions affected by haze, mainly concentrated at the north of Tapajós River and south of the Amazon River. The presence of haze seemed to affect the values of $f_{phytoplankton}$, causing a false apparent increase. Even though the Hyperion data were transformed from radiance to surface reflectance, the atmospheric conditions were more rigorous during the image acquired at high water, which contaminated part of the image with haze that could not be totally removed by the atmospheric correction procedure.

Generally, considering the fractional abundance and RMS error images resulted from LSU mapping and the relations observed in section 3.2, we conclude that: SIM presented the best potential for estimation; $f_{phytoplankton}$ mapped for both periods showed important features over the images, capable of indicating the spatial distribution of Chl-*a*; $f_{clear\text{-}water}$ and f_{DOM} presented reliable results only over non turbid waters, where the LSU determined values of

either $f_{\text{clear-water}}$ or f_{DOM} close to 1 and abundance values of the others OASs close to 0. Over water with low turbidity, the LSU abundance results $f_{\text{clear-water}}$ and f_{DOM} were very sensitive to slight reflectance variation, controlled by: water molecules scattering and DOM absorption, in the blue bands; and water molecules absorption and DOM fluorescence, in the red and NIR bands. Over turbid waters, the spectral influence of SIM and phytoplankton caused total uncertainties on the results of $f_{\text{clear-water}}$ and f_{DOM}.

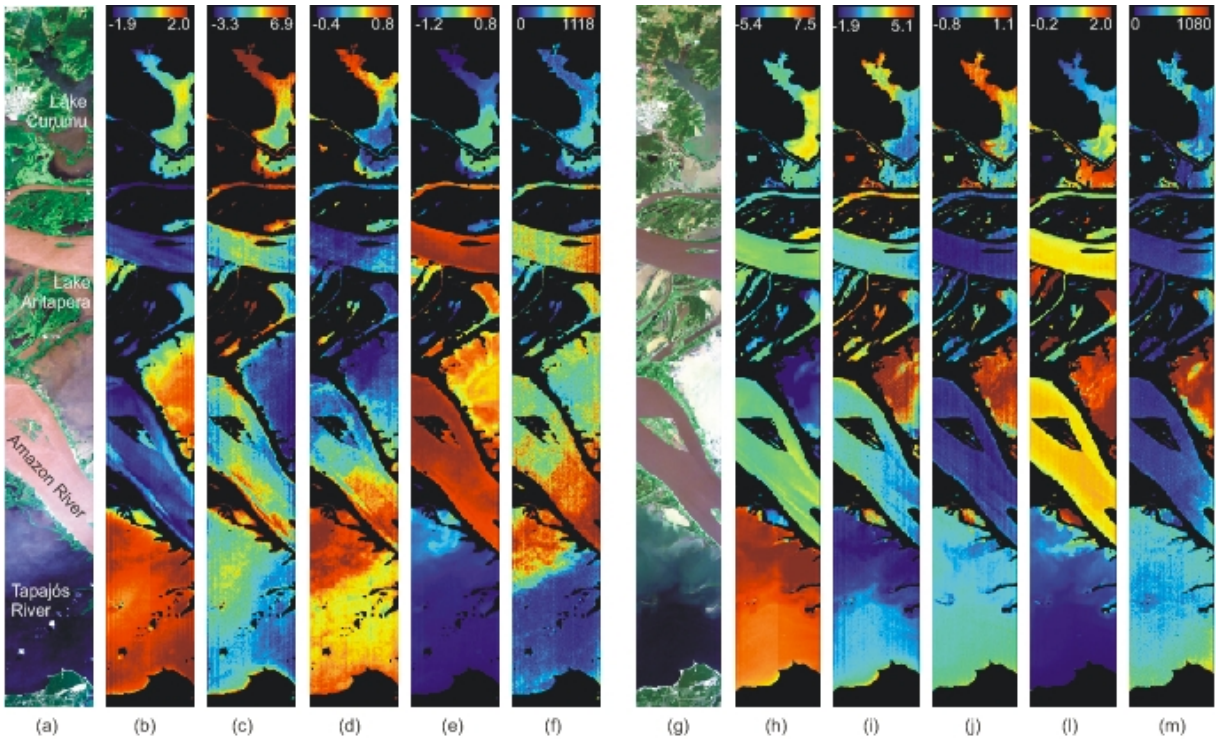


Figure 4. True color composites (RGB: 640; 549; 457nm) of Hyperion images collected on: (a) June 23, 2005; and (g) September 16, 2001. Fractional end-member abundance results presented as color images: (b) and (h) $f_{\text{clear-water}}$; (c) and (i) f_{DOM}; (d) and (j) $f_{\text{phytoplankton}}$; (e) and (l) f_{SIM}. Root mean square (RMS) error images are presented in (f) for June 23 and in (m) for September 16.

In order to discuss the effects of reflectance spectral-temporal variation over f_{SIM} and $f_{\text{phytoplankton}}$, four sampling stations placed over representative water bodies with distinct physicochemical and hydrological conditions were selected over the study area: Tapajós River; Amazon River; Lake Aritapera; and Lake Curumu. **Figure 4a** shows the location of these water bodies. **Figure 5** shows the mean reflectance spectra obtained from 4 x 4 pixels windows and the respective calculation of f_{SIM} and $f_{\text{phytoplankton}}$, for high and falling water periods. The data extracted for each image was geographically correspondent.

The Tapajós River is a large tributary of the Amazon. The euphotic zone in the Tapajós is deep, but these clear-waters are considered poor in nutrients when compared to the Amazon River (Junk, 1997). Over the Tapajós, at both flood periods, the model determined values of $f_{\text{clear-water}}$ close to 1 and fractional abundances of the OASs (f_{DOM}; f_{SIM}; e $f_{\text{phytoplankton}}$) close to 0. This was expected since the concentrations of OASs in clear-waters are low. The reflectance spectra and the calculated abundances both evidenced an increase of algae production in the Tapajós River towards the falling water period (**Figure 5a**).

The Amazon is the main river of the floodplain. The water reflectance of the Amazon River is permanently dominated by SIM. Thus, the model showed good efficiency by determining values of f_{SIM} higher than 0.5 and $f_{\text{phytoplankton}}$ close to 0 for pixels placed over the

Amazon River during both water level periods (**Figure 5b**). The water of the Amazon River has nitrogen limitations (Junk, 1997), shallow euphotic zone, and turbulence. These factors limit the growth of phytoplankton throughout the seasons. According to Barbosa (2005), concentration of SIM in the Amazon River at the falling water period is around 20 mg l^{-1}. The concentration of SIM measured at the field during high water was 64.33 mg l^{-1}. From these values it is possible to consider a variation of around 40 mg l^{-1} in C_{SIM} between the two periods. This resulted in a higher f_{SIM} mapped for high water. The concentration of SIM at high water is more than two times higher than at falling water period, but f_{SIM} observed for high (0.66) and falling (0.58) water periods do not demonstrate this same direct proportion. This can be explained by the variation of the inorganic and organic fraction of the total suspended matter composition observed between these periods (Barbosa, 2005), as well as the nonlinear effects between f_{SIM} determined by LSU and the actual C_{SIM} (**Figure 3c**). In fact, the spectra measured over Amazon water during high water presented higher reflectance values in, practically, the whole spectral range, except at wavelengths lower than 510 nm. This absorption effect is most likely to be associated with the presence of suspended organic matter and dissolved organic matter adsorbed to the suspended particles (Dekker, 1993; Kirk, 1994).

Lake Aritapera is located in the interior of an island in the Amazon River. The fractional abundance of suspended inorganic matter determined for this lake was 0.55 during high water and 1.01 during falling water. This result agrees with the physical characteristics of this lake and the spectral variation observed from the images, evidencing conditions of high C_{SIM} during the falling water period. The concentration of SIM becomes higher over shallow regions of the floodplain lakes as the water level falls. The gradual increase of C_{SIM} causes reflectance elevation over the VIS and IVP spectral range. However, this occurs in a nonlinear manner: at a certain point of transition from high C_{SIM} to muddy water or wet soil, the increase upon the reflectance saturates over the VIS but continues over the IVP due to the reduction of water absorption (the spectral response becomes similar to a soil spectrum). This brings severe complications to a linear spectral mixture analysis, because phytoplankton cells also produce light scattering in the IVP range. Hence, the increase in $f_{phytoplankton}$ mapped for this lake during the falling period is uncertain (Figure 5c). As mentioned before, the RMS error image presented greater uncertainties in shallow water lakes.

The Hyperion images show important spectral variability between high and falling water periods over Lake Curumu. During high water, the condition of low flow within the lake favors deposition resulting in water with low turbidity but with high concentration of DOM. The concentration of SIM increases towards the entrances of incoming water from the Amazon River. Over Lake Curumu, where this situation was observed, the LSU presented 0.31 for f_{SIM} and negative values for $f_{phytoplankton}$. A phytoplankton bloom was observed at the moment of the acquisition of the falling water Hyperion image, and the LSU showed 0.12 for f_{SIM} and 0.51 for $f_{phytoplankton}$ (**Figure 5d).** According to the geomorphological characteristics of this lake, C_{SIM} is actually expected to increase towards falling water, instead of decreasing as indicated by comparing the values of f_{SIM} determined for the two periods. This can be explained by the fact that at falling water the phytoplankton bloom occurred close to the surface and dominated the reflectance signal detected by the remote sensor, while SIM distributed itself more homogeneously along the water column with higher concentration towards the bottom.

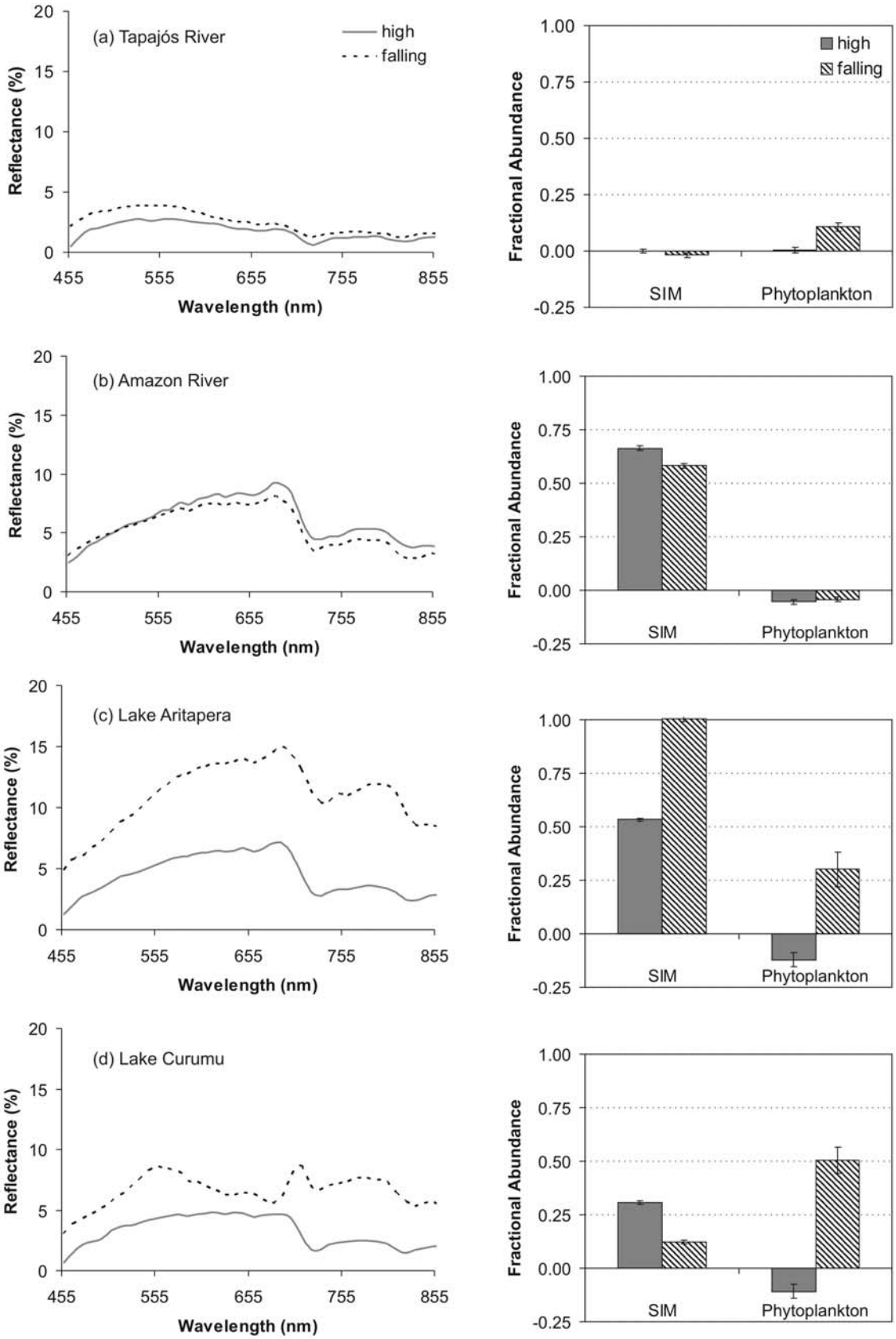


Figure 5. Temporal variability of reflectance, SIM and phytoplankton end-member abundances calculated for selected water bodies over the floodplain.

4. CONCLUSIONS

The variation of water composition in the central Amazon floodplain is intense along the flood pulse periods. Hence, the approach of "key" spectral end-member selection from Hyperion data of both periods included in the analysis (high and falling water), favored for a greater availability of pixels dominated by clear-water and each individual optically active substance (OAS): suspended inorganic matter (SIM); dissolved organic matter (DOM); and phytoplankton. End-members obtained directly from the images under analysis allowed the removal of undesirable environmental and instrumental signal variations that may have affected Hyperion variations. However, the LSU algorithm could not lead to a complete virtual separation of the end-member fractions, once there is always mixtures of OASs present in any end-member pixel sensored over a natural water body. Relative proportion of each end-member was mapped and represented by the respective fractional abundance (*f*) band, for which the relationship with the actual concentration of a certain OAS was stronger according to the spectral dominance of the substance.

From the analysis carried out with a Hyperion image acquired on 23 September, 2005 and ground truth data, we were able to conclude that the reflectance of suspended inorganic matter (SIM) was dominant over all the others OASs in water, and the LSU showed the best potential to estimate the concentration (C) of SIM. However, the relationship obtained between f_{SIM} and C_{SIM} was a polynomial expression, evidencing a nonlinear behavior for the spectral mixture of OASs in inland waters. The increase of C_{SIM} caused reduction over f_{DOC}, in spite of having an effective variation of C_{DOC} in water, and for this reason the quantification of C_{DOC} spatial variation by means of the LSU mapping was not accomplished. Even though a well adjusted model was not reached with the mapping results of $f_{phytoplankton}$ and $C_{Chl\text{-}a}$, a significant positive correlation was observed and the $f_{phytoplankton}$ bands obtained showed important features over the image, capable of indicating the spatial distribution of Chl-*a* occurrence. Finally, the RMS error image showed considerably good results over areas of homogeneous water masses and increasingly large uncertainties over areas with intensive mixtures with high concentrations of OASs.

Three distinct general tendencies of water composition variation from high to falling flood periods were observed from the results of Linear Spectral Unmixing of two temporal Hyperion images: increase of suspended inorganic matter and phytoplankton concentrations, in *varzea* lakes; increase of phytoplankton concentration, in the Tapajós River; and decrease of suspended inorganic matter concentration in the Amazon River. Although, the results presented uncertainties derived from the nonlinear behavior of light interactions among the optically active substances in the multicomponental waters found in the study site, the linear spectral mixture analysis raised important evidences that improved the understanding of the spatial-temporal dynamics of this complex aquatic environment.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Conrado M. Rudorff thanks CAPES for the scholarship funding that was offered during two years of Remote Sensing Master Course at INPE, where the research that originated this article took place. The authors thank GEOMA-MCT program for financial support of this research. The authors also thank NASA/LBA-Ecology for image acquisition and field support.

6. REFERENCES

ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; JOHNSON, P. E. Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. **Journal of Geophysical Research**, St. Louis, v. 91, p. 8098-8112, 1986.

AMERICAM PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 ed. Washington: APHA, 1998.

ANALYTICAL IMAGING AND GEOPHYSICS. **ACORN user's guide**: stand alone version. Boulder, AIG, 2001. 64p.

ASPINALL, R. J.; MARCUS, W. A.; BOARDMAN, J. W. Considerations in collecting, processing, and analysing high spatial resolution hyperspectral data for environmental investigations. **Journal of Geographical Systems**, Berlin, v. 4, n. 1, p. 15-29, 2002.

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento Remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai / rio Amazonas**. 281f. 2005. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

BUKATA, R. P.; JEROME, J. H.; KONDRATYEV, K. Y. A.; POZDNYAKOV, D. V. **Optical properties and remote sensing of Inland and Coastal Waters**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. 362p.

DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing**. 222f. 1993. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - University of Amsterdam, Amsterdam, 1993.

GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, B.; CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 26, n. 1, p. 65-74, 1988.

HAN, T.; GOODENOUGH, D. G.; DYK, A.; LOVE, J. Detection and correction of abnormal pixels in hyperion images. In: IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2002, Toronto. **Proceedings…** Ontario: IEEE International, 2005. p. 1327-1330. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org>. Acesso em 21out. 2005.

JUNK, W. J. **The central Amazon floodplain**. Berlin: Springer, 1997. 525p.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: University Press, 1994. 525p.

KRUSE, F. A.; BOARDMAN, J. W.; HUNTINGTON, J. F. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 41, n. 6, p. 1388-1400, 2003.

KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J. et al. The spectral Image-Processing System (Sips): interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 44, n. 2/3, p. 145-163, 1993.

MAINVILLE, N.; WEBB, J.; LUCOTTE, M.; DAVIDSON, R.; BETANCOURT, O.; CUEVA, E. et al. Decrease of soil fertility and release of mercury following deforestation in the Andean Amazon, Napo River Valley, Ecuador. **Science of the Total Environment**, [S.l.], v. 368, n. 1, p. 88-98, 2006.

NOVO, E. M. L. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Spectral mixture analysis of inland tropical waters. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 6, p. 1351-1356, 1994.

NOVO, E. M. L. M.; STEFFEN, C. A.; BRAGA, C. Z. F. Results of a laboratory experiment relating spectral reflectance to total suspended solids. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 36, n. 1, p. 67-72, 1991.

NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; FREITAS, R. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; MELACK, J. M.; PEREIRA FILHO, W. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Limnology**, Springer, v. 7, n. 3, p. 153-161, 2006.

NUSH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. **Archiv für Hydrobiologie,** Beiheft, v. 14, p. 14-39, 1980.

PINHEIRO, M. C. N.; OIKAWA, T.; VIEIRA, J. L. F.; GOMES, M. S. V.; GUIMARAES, G. A.; CRESPO-LOPEZ, M. E. et al. Comparative study of human exposure to mercury in riverside communities in the Amazon region. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, Ribeirão Preto, v. 39, n. 3, p. 411-414, 2006.

TELMER, K.; COSTA, M.; SIMOES ANGELICA, R.; ARAUJO, E. S.; MAURICE, Y. The source and fate of sediment and mercury in the Tapajos River, Para, Brazilian Amazon: ground- and space-based evidence. **Journal of Environmental Management**, London, v. 81, n. 2, p. 101-113, 2006.

VITTORIO, E. B.; DEKKER, A. G. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and costal water quality. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Piscataway, v. 41, n. 6, p. 1378-1387, 2003.

WETZEL, R. G.; LIKENS, G. E. **Limnological analyses**. New York: Springer-Verlag, 1991. 391p.

ISSN = 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X
www.agro.unitau.br/ambi-agua
E-mail: ambi-agua@agro.unitau.br
Tel.: (12) 3625-4116

Avaliação do desempenho de diferentes classificadores (Isoseg, Bhattacharyya, Maxver e Maxver-ICM), utilizando imagens CCD/CBERS-1 e ETM$^+$/Landsat-7 fusionadas

(doi:10.4136/ambi-agua.14)

Camila Aguirre Góes[1]; Wilson Lins de Mello Filho[2]; Melissa Carvalho[3]

[1]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Sensoriamento Remoto. Av. dos Astronautas, 1758. Cep: 12.227-010. São José dos Campos/SP, Brasil. E-mail: camila@dsr.inpe.br.
[2]Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. Rua Kioto, 253. CEP: 23.890-000. Arraial do Cabo/RJ, Brasil. E-mail: linsdemello@ieapm.mar.mil.br.
[3]Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. Praça do Oceanográfico, 191. CEP: 05508-900. São Paulo/SP, Brasil. E-mail: melissa@io.usp.br

RESUMO

O objetivo deste estudo é comparar o desempenho de classificadores de imagens (Isoseg, Bhattacharyya, Maxver e Maxver-ICM) a partir da análise de acurácia (porcentagem de acertos, cálculo de área e estatística *Kappa*), utilizando como verdade terrestre um mapa temático previamente editado. Para alcançar este objetivo foram utilizadas técnicas de pré-processamento (correções atmosférica, geométrica e radiométrica), realce (fusão IHS e análise por componentes principais) e classificação das imagens CCD/CBERS-1 e ETM$^+$/Landsat-7. Dentre os classificadores testados, o Isoseg e o Bhattacharyya apresentaram melhor desempenho para a área de estudo e para as classes representadas. Espera-se que esses resultados sejam relevantes para a análise ambiental com base em imagens orbitais.

Palavras-chave: fusão IHS; coeficiente *Kappa;* classificação.

Performance evaluation of different classifiers (Isoseg, Bhattacharyya, Maxver e Maxver-ICM), using CCD/CBERS-1 and ETM$^+$/LANDSAT-7 fused images

ABSTRACT

The aim of this study was to compare the performance of image classifiers (Isoseg, Bhattacharyya, Maxver and Maxver-ICM) based on an accuracy analysis (set percentage, area determination and *Kappa* coefficient), using as ground truth an edited thematic map. For this, pre-processing techniques (atmospheric, geometric and radiometric corrections), contrast enhancement (IHS data fusion and principal component analysis) and classification of CCD/CBERS-1 and ETM$^+$/Landsat-7 images were done. Amongst all classifiers tested, Isoseg and Bhattacharyya presented best performance for the studied classes and the study area. It is anticipated that these results are relevant to environmental analyses based on orbital satellite data.

Keywords: IHS fusion; *Kappa* coefficient; classification.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto orbital tem fornecido informações acerca dos processos naturais e dos impactos antrópicos sobre o meio ambiente, proporcionando uma nova dimensão para o entendimento destes processos. Os dados obtidos por plataformas orbitais apresentam um enorme potencial de utilização para o manejo e monitoramento global (Barrett; Curtis, 1992). Para que os dados gerados por sensoriamento remoto sejam utilizados corretamente e com o máximo de aproveitamento, faz-se necessária a aplicação de um conjunto de ferramentas matemáticas e estatísticas digitais que possibilitem a observação e a garantia da correção das informações contidas nos seus produtos finais. As técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) existentes se propõem a suprir essa necessidade e são aplicadas em duas etapas: pré-processamento e processamento da imagem. A primeira objetiva preparar os dados adquiridos pelo sensor para serem corretamente utilizados, empregando-se técnicas para correção atmosférica e correção de distorções radiométricas e geométricas introduzidas pelo sensor. Na etapa seguinte, são efetuados procedimentos com o objetivo de, efetivamente, extrair informações da imagem. Maiores detalhes sobre as etapas apresentadas podem ser encontrados em Lillesand et al. (2004), Mather (2004), Richards e Jia (2006), entre outros.

No presente estudo foram utilizadas técnicas de pré-processamento e processamento em imagens CCD/CBERS-1 e ETM$^+$/Landsat-7, com o objetivo de avaliar o desempenho de quatro classificadores (Isoseg, Bhattacharyya, Maxver, Maxver-ICM), analisando a acurácia da classificação a partir da porcentagem de acertos (matriz de erro), do cálculo de área e do coeficiente *Kappa*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A área de estudo se estende por 261,35 km² dentro do estado do Ceará, entre as latitudes 4º 31’S e 4º 38’S e longitudes 37º 48’W e 37º 38’W (Figura 4) e está inserida na bacia sedimentar Potiguar. A área escolhida apresenta uma grande diversidade de classes com comportamento espectral diferenciado, sendo apropriada para avaliar o desempenho dos classificadores em relação a cada classe. Neste estudo foram definidas seis classes temáticas, sendo três diferentes tipos de vegetação (Vegetação 1, Vegetação 2 e Manguezal), Água (incluindo lagoas, rios e oceano), Duna e Área Urbana.

2.2. Pré-processamento

Foram utilizadas imagens provenientes de dois sensores, CCD e ETM$^+$, a bordo dos satélites CBERS-1 e Landsat-7, respectivamente. Da imagem ETM$^+$ utilizou-se apenas a banda pancromática (0,52-0,90µm), pré-processada por Carvalho (2003) e as bandas 2 (0,52-0,59 µm), 3 (0,63-0,69 µm) e 4 (0,77-0,89 µm) da imagem CCD. As imagens foram processadas de acordo com os procedimentos resumidos na Figura 1, utilizando-se os programas *Restau* - Image Restoration 0.0.15 (Fedorov; Fonseca, 2002), SPRING 4.1 (Camara et al., 1996) e Idrisi Kilimanjaro.

Na imagem CCD, procedeu-se à correção atmosférica pelo método proposto por Chavez (1988). Posteriormente, foi realizado o ajuste de média e variância das bandas 2 e 3 a partir da banda 4. Finalmente, foi realizada a correção radiométrica e reamostragem dos pixels de 20 para 10 metros, utilizando-se o programa *Restau*. A banda pancromática (PAN) do sensor ETM$^+$/Landsat-7 foi previamente reamostrada de 15 para 5 metros, utilizando-se o mesmo programa *Restau*. Ao término dessa etapa, procedeu-se à correção geométrica, em que foi

efetuado o registro das bandas 2, 3 e 4 do CCD/CBERS-1 a partir da banda pancromática ETM+/Landsat-7. Dessa forma, permitiu-se que a exatidão cartográfica fosse mantida segundo o sistema de coordenadas UTM/SAD 69.

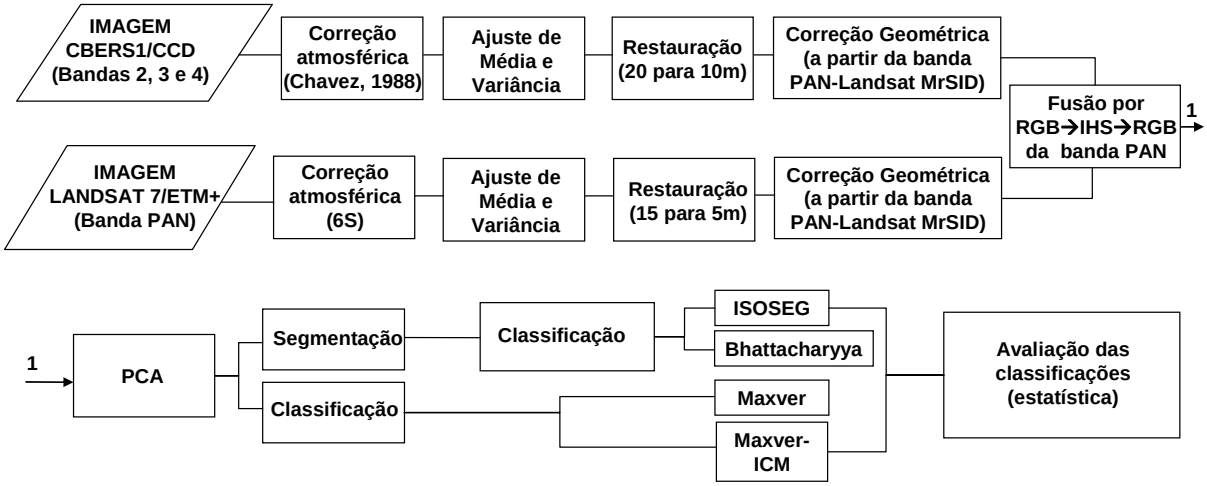


Figura 1. Seqüência metodológica utilizada para o processamento das duas imagens usadas no trabalho (CCD/CBERS-1 e ETM+/Landsat).

2.3. Realce de imagem

Após o pré-processamento foi realizada a fusão por transformação IHS, em que o componente *Intensity* (I) do sistema IHS foi substituído pela banda PAN (ETM+/Landsat-7). Desta forma, obteve-se uma imagem com resolução espacial de cinco metros com características espectrais originais.

Na imagem fusionada, aplicou-se a transformação por Componentes Principais. Essa técnica é utilizada para descorrelacionar as bandas espectrais, concentrando no Primeiro Componente (PC-1) a informação anteriormente diluída nas várias dimensões. Esse componente passa a reunir a informação de brilho associada às sombras de topografia e às grandes variações de reflectância espectral geral das três bandas e foi utilizada para ser segmentada e classificada.

2.4. Classificação de imagem

A imagem resultante do primeiro Componente Principal foi realçada e segmentada pela técnica de crescimento de regiões e, posteriormente, classificada a partir dos algoritmos Isoseg e Bhattacharyya. O primeiro algoritmo agrupa regiões a partir de uma medida de similaridade (distância de Mahalanobis), enquanto que o método Bhattacharyya trabalha com a distância denominada distância de Bhattacharyya, que é utilizada para medir a separabilidade estatística entre um par de classes espectrais, ou seja, mede a distância média entre as distribuições de probabilidades dessas classes (INPE, 2004; Mather, 2004). Dentre os limiares de segmentação testados o que se mostrou mais adequado para a área de estudo foi o de 95%.

A mesma imagem do primeiro Componente Principal foi utilizada para classificação "pixel a pixel" utilizando os algoritmos Maxver (Máxima Verossimilhança) e Maxver- ICM (*Interated Conditional Modes*). O algoritmo Maxver considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos na classificação, já o algoritmo utilizado pelo classificador Maxver-ICM funciona de forma semelhante ao do Maxver, porém considera ainda a dependência espacial entre as classes (INPE, 2004; Mather, 2004).

2.5. Análise comparativa dos produtos

Como não se dispunha de amostras coletadas em campo para validar o experimento, utilizou-se como verdade de campo o mapa de uso e cobertura do solo, produzido por Carvalho (2003). Esse mapa continha um número de classes maior do que as definidas neste estudo, sendo necessário o remapeamento das classes para efeitos comparativos.

A verificação da acurácia dos classificadores foi realizada a partir da porcentagem de acertos (matriz de erro) (Congalton et al., 1983), que expressa a concordância e discordância entre as categorias classificadas em um mapa de uso e cobertura do solo e a verdade terrestre (Rosenfield, 1986; Rosenfield; Fitzpatrick-Lins, 1986), do cálculo de área (em km²) e da estatística *Kappa*, utilizada por vários autores para avaliar a concordância entre a verdade terrestre e os resultados obtidos a partir das classificações (Cohen, 1960; Rosenfield; Fitzpatrick-Lins, 1986; Foody, 1992).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Pré-processamento

Cada procedimento de pré-processamento utilizado foi responsável por melhorar algum aspecto da imagem. O pré-processamento constou de correção atmosférica, promovendo uma maior nitidez dos alvos (Figura 2B). Posteriormente, foi realizado o ajuste de média e de variância das bandas 2 e 3 a partir da banda 4 (banda que retém maior quantidade de informação), proporcionando um melhor contraste da imagem (Figura 2C). E, finalmente, a reamostragem dos pixels de 20 para 10 metros, promovendo uma melhora da resolução espacial e recuperando a imagem degradada pela resolução efetiva do sensor (Figura 2D).

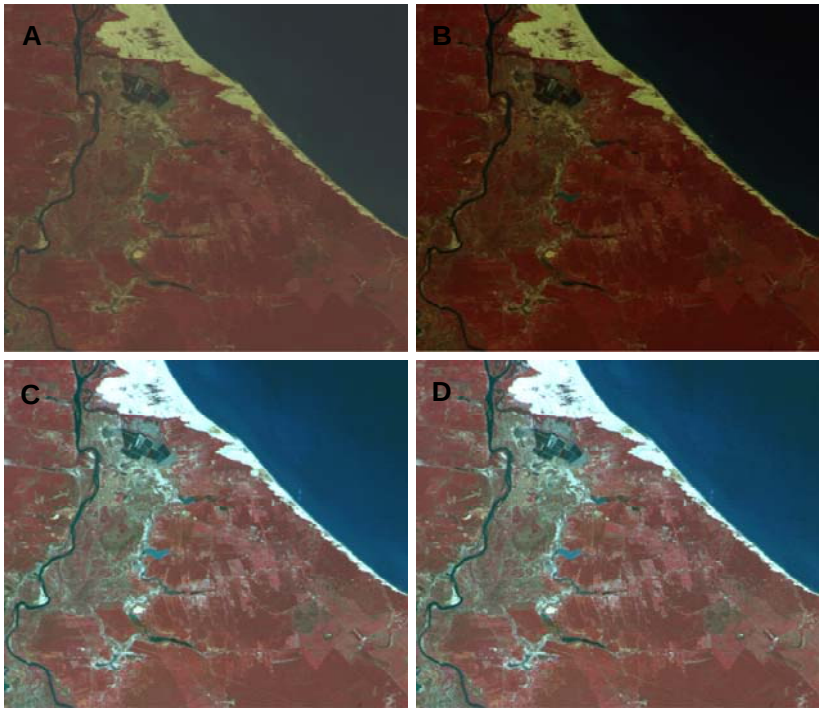


Figura 2. Imagens CCD/CBERS-1 em composição colorida (432). (A) imagem original; (B) imagem com correção atmosférica; (C) imagem após ajuste de média e variância; (D) imagem reamostrada.

3.2. Realce de Imagem

Após a reamostragem dos pixels foi realizado o procedimento de fusão por IHS das bandas, que resultou em um aumento da nitidez e do detalhamento da imagem fusionada em comparação com a imagem reamostrada, representando um ganho de informação. Assim, a imagem que, anteriormente (Figura 3A), apresentava uma resolução espacial de 20 metros passou a apresentar uma resolução espacial equivalente a 5 metros (Figura 3B).

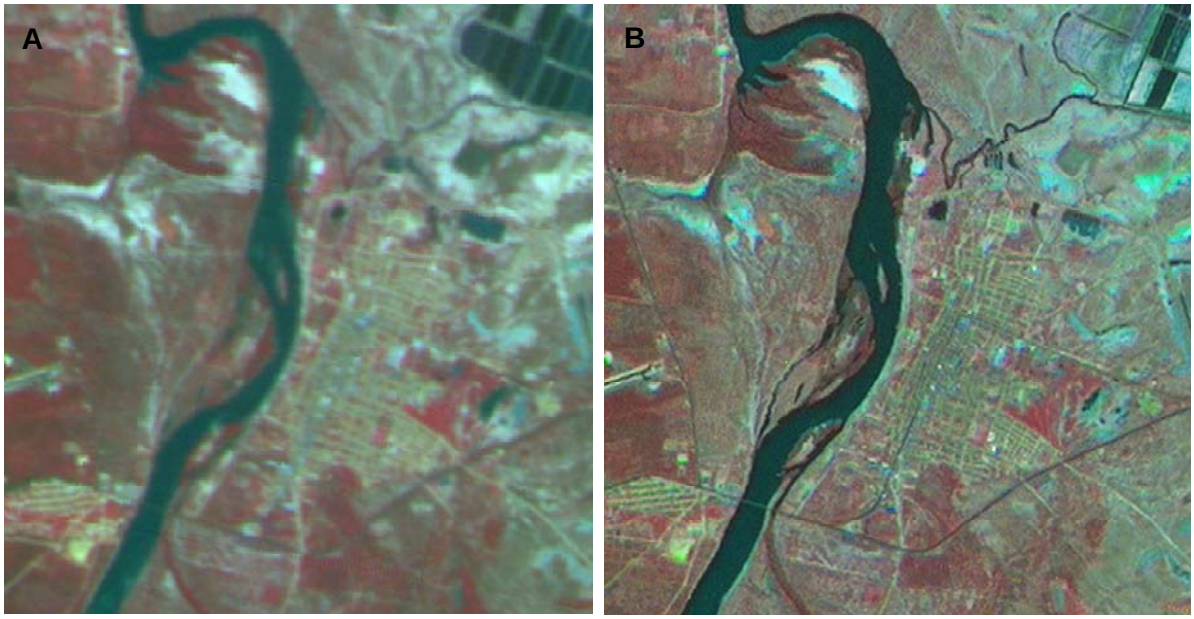


Figura 3. Imagens CCD/CBERS-1 em composição colorida (432) (recorte da área de estudo). (A) reamostrada; (B) resultado da fusão IHS das bandas 2, 3 e 4 com a banda pancromática ETM+/Landsat-7.

Na imagem fusionada foi realizada a análise por Componentes Principais. O primeiro componente (PC-1) agrupou o maior número de informações (Tabela 1). Desta forma a segmentação e as classificações "pixel a pixel" foram realizadas a partir da imagem correspondente ao Primeiro Componente Principal (PC-1). Para realizar a segmentação da imagem foram feitos diversos testes, determinando-se os limiares de similaridade de 15 e área de 300.

Tabela 1. Média, variância e contribuição de cada um dos Componentes Principais.

PC	Média	Variância	Auto-valor	Porcentagem
PC-1	123,15	3391,75	3428,77	69,05
PC-2	127,15	1462,73	1426,35	28,73
PC-3	127,00	110,89	110,26	2,22

3.3. Avaliação das classificações

3.3.1. Porcentagem de acertos

Considerando os algoritmos de classificação que necessitam de uma imagem segmentada, Isoseg e Bhattacharyya, observa-se que apesar do algoritmo Bhattacharyya ser um classificador supervisionado necessitando de amostras de treinamento e o Isoseg não

necessitar desta etapa, os dois obtiveram resultados idênticos, coerentes com o tipo de informação presente na área de estudo (Figura 4A/B).

A matriz de erros obtida a partir desses classificadores revela que todas as classes representadas neste estudo foram subestimadas (erros de omissão), com exceção da classe Vegetação 2 e Duna que agruparam um número maior de classes que deveriam (erros de inclusão). Os classificadores não conseguiram identificar as classes Área Urbana e Manguezal (Tabela 2).

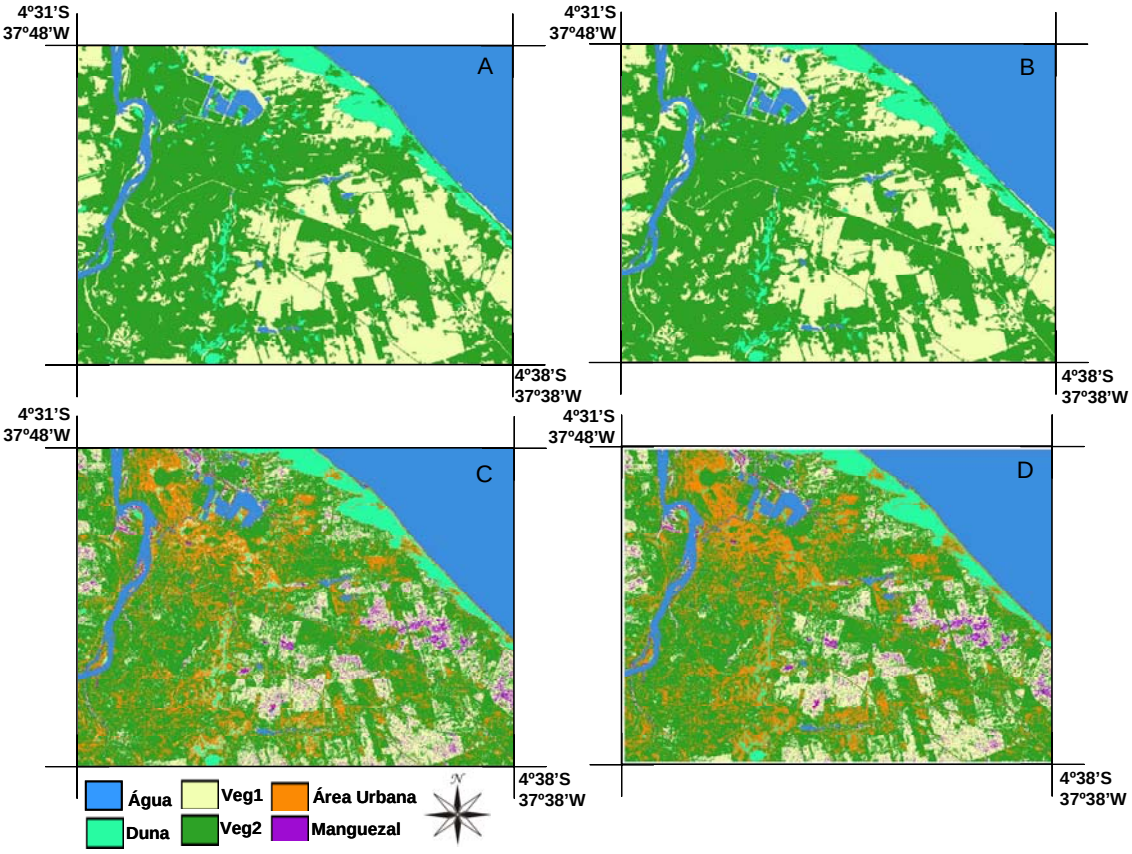


Figura 4. Classificação final das imagens CCD/CBERS-1 e ETM+/Landsat-7 a partir dos classificadores Isoseg (A), Bhattacharyya (B), Maxver (C) e Maxver-ICM (D).

Tabela 2. Matriz de erros (em porcentagem) dos classificadores Isoseg e Bhattacharyya.

	Água	**Veg. 1**	**Veg. 2**	**Área urbana**	**Manguezal**	**Duna**	**Total**
Água	14,68	1,08	1,95	0	0	0,27	**18,00**
Vegetação 1	0,10	22,79	21,08	0	0	0,42	**44,40**
Vegetação 2	0,28	3,70	26,33	0	0	1,07	**31,38**
Área urbana	0,09	0,04	1,41	0	0	0,01	**1,54**
Manguezal	0,19	0,52	0,25	0	0	0,01	**0,97**
Duna	0,00	0,16	0,52	0	0	3,03	**3,72**
Total	**15,35**	**28,30**	**51,54**	**0**	**0**	**4,80**	**100,0**

A partir dos resultados obtidos pelos classificadores "pixel a pixel" (Maxver e Maxver-ICM), podemos constatar que, visualmente, não houve grande diferença entre os dois métodos

utilizados (Figura 4C/D). Esse resultado pode ser confirmado pela matriz de erros (Tabelas 3 e 4), em que se observa que esses dois algoritmos de classificação subestimaram as áreas ocupadas pelas classes Água e Vegetação 1 e superestimaram as demais classes.

Tabela 3. Matriz de erros (em porcentagem) do classificador Maxver.

	Água	**Veg. 1**	**Veg. 2**	**Área urbana**	**Manguezal**	**Duna**	**Total**
Água	14,84	0,49	1,49	0,69	0,27	0,22	**18,00**
Vegetação 1	0,20	12,65	24,13	4,89	2,15	0,39	**44,40**
Vegetação 2	0,37	1,90	20,04	8,11	0,24	0,72	**31,38**
Área urbana	0,09	0,06	0,85	0,51	0,01	0,02	**1,54**
Manguezal	0,26	0,23	0,26	0,07	0,15	0,01	**0,97**
Duna	0,01	0,18	0,32	0,32	0,01	2,86	**3,72**
Total	**15,76**	**15,52**	**47,10**	**14,59**	**2,82**	**4,21**	**100,0**

Tabela 4. Matriz de erros (em porcentagem) do classificador Maxver-ICM.

	Água	**Veg. 1**	**Veg. 2**	**Área urbana**	**Manguezal**	**Duna**	**Total**
Água	14,86	0,35	1,48	0,81	0,26	0,23	**18,00**
Vegetação 1	0,19	12,63	24,16	5,18	1,81	0,42	**44,40**
Vegetação 2	0,37	1,12	20,15	8,72	0,22	0,81	**31,38**
Área urbana	0,09	0,02	0,85	0,55	0,01	0,02	**1,54**
Manguezal	0,26	0,22	0,26	0,07	0,15	0,01	**0,97**
Duna	0,01	0,06	0,3	0,44	0,01	2,88	**3,72**
Total	**15,79**	**14,4**	**47,20**	**15,78**	**2,47**	**4,36**	**100,0**

3.3.2. Cálculo de área

As áreas correspondentes a cada classe foram comparadas com as áreas das classes do mapa temático utilizado como verdade de campo. Todos os classificadores subestimaram as classes Água e Vegetação 1 e superestimaram a classe Vegetação 2. Os classificadores Isoseg e Bhattacharyya não conseguiram classificar a classe Área Urbana e Manguezal e os classificadores Maxver e Maxver-ICM superestimaram a área dessas duas classes. A classe Dunas foi superestimada por todos os classificadores utilizados (Tabela 5).

3.3.3. Coeficiente *Kappa*

Com base no coeficiente *Kappa* calculado, percebe-se que dentre todas as classes, a classe Duna foi melhor classificada por Isoseg e Bhattacharyya e a classe Água por Maxver e Maxver-ICM. As demais classes não obtiveram uma classificação muito boa, variando de 66 a 0% de acurácia (Tabela 6). Essas duas classes (Duna e Água) apresentam um comportamento espectral bastante distinto das demais, sendo facilmente diferenciadas e classificadas. Apesar das três classes de vegetação também apresentarem um comportamento espectral diferenciado, houve confusão na sua classificação, o que resultou num baixo coeficiente *Kappa*. Da mesma forma, as classes Área Urbana e Manguezal foram mal classificadas, obtendo-se um baixo índice *Kappa*.

Tabela 5. Matriz da área de cada classe (km²).

Classes\Classificador	Verdade de campo	Isoseg	Bhattacharyya	Maxver	Maxver- ICM
Água	47,03	40,11	40,12	41,195	41,27
Vegetação 1	116,03	73,97	73,971	40,55	37,63
Vegetação 2	82,01	134,70	134,70	123,09	123,36
Área urbana	4,03	0	0	38,14	41,24
Manguezal	2,53	0	0	7,38	6,44
Duna	9,71	12,55	12,55	11,00	11,41
Total	**261,35**	**261,35**	**261,35**	**261,35**	**261,35**

Tabela 6. Coeficiente *Kappa* de concordância entre a imagem classificada e a verdade de campo.

Classes\Classificador	Isoseg (95%)	Bhattacharyya (95%)	Maxver (95%)	Maxver-ICM (95%)
Água	0,7826	0,7826	0,7917	0,7932
Vegetação1	0,3213	0,3213	0,1537	0,1641
Vegetação2	0,6677	0,6677	0,3169	0,3220
Área urbana	0,0000	0,0000	0,2201	0,2375
Manguezal	0,0000	0,0000	0,1257	0,1290
Duna	0,8065	0,8065	0,7598	0,7655
Total	**0,5146 (reg.)**	**0,5146**	**0,3481 (ruim)**	**0,3541**

Dentre os quatro classificadores testados, os que apresentaram melhores resultados foram os que utilizam uma imagem segmentada para realizar a classificação (Isoseg e Bhattacharyya). O delineamento prévio das classes espectrais semelhantes a partir da segmentação mostrou ser bastante apropriado para se obter uma boa classificação e, apesar do algoritmo utilizado pelo classificador Bhattacharyya necessitar de amostras de treinamento para realizar a classificação, o resultado foi idêntico ao obtido pelo classificador Isoseg, que não necessita de amostras de treinamento. Dessa forma, o classificador Isoseg pode ser utilizado com maior facilidade, dispensando o conhecimento prévio da área de estudo.

As baixas concordâncias obtidas pelos diferentes métodos de avaliação utilizados neste estudo refletem a confusão entre as diferentes classes, que pode ter ocorrido devido ao desempenho dos classificadores, mas que foi influenciada principalmente pela qualidade da imagem, que apesar de ter passado por um procedimento de pré-processamento não apresentou condições satisfatórias para distinguir as classes analisadas.

Apesar da reamostragem dos pixels ter melhorado a resolução espacial da imagem, definindo melhor os alvos de interesse, a resolução espectral pode ter sido comprometida tanto na aquisição da imagem quanto no seu processamento, resultando nos baixos índices de concordância encontrados.

Deve ser levado em consideração que, apesar da área não apresentar um dinamismo muito alto, as datas das imagens não são coincidentes e houve uma edição matricial do mapa temático que foi utilizado como verdade de campo, o que pode ter afetado o resultado comparativo do experimento.

4. CONCLUSÕES

Os classificadores que apresentaram o melhor desempenho para a área de estudo, discriminando os diferentes tipos de alvos, foram aqueles que utilizam uma imagem segmentada (Isoseg e Bhattacharyya). Dentre esses dois classificadores, o Isoseg pode ser considerado como o mais eficiente, por apresentar uma classificação coerente com a verdade de campo e dispensar o conhecimento prévio da área de estudo, não necessitando de amostras de treinamento. A dificuldade encontrada nesse tipo de classificação é a obtenção da imagem segmentada, uma vez que devem ser testados diversos limiares de segmentação até se obter uma segmentação satisfatória, e esse processo influenciará diretamente a qualidade final da classificação.

A avaliação das classificações deve ser realizada por diferentes métodos e recomenda-se que sempre seja apresentada a matriz de porcentagem de acertos (matriz de erros) em cada mapa de uso e cobertura do solo produzido, dessa forma o usuário tem a possibilidade de selecionar a melhor classificação de acordo com a sua necessidade, levando em consideração a importância relativa das classes de interesse. Neste estudo, além da porcentagem de acertos, foram utilizados outros dois procedimentos de análise dos resultados: cálculo de área e índice *Kappa*. O primeiro possibilitou observações quantitativas sobre as classificações e o segundo permitiu analisar o grau de concordância entre as imagens classificadas e a verdade terrestre. Dessa forma, a escolha desses três procedimentos de análise foram complementares, permitindo uma avaliação mais precisa e completa dos mapas temáticos produzidos.

O procedimento de fusão da imagem pela transformação IHS possibilitou uma melhora na resolução espacial, auxiliando na distinção dos diferentes alvos e garantindo uma boa classificação, porém a informação espectral das imagens é imprescindível para garantir a completa qualidade da classificação.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRETT, E. C.; CURTIS, L. F. **Introduction to environmental remote sensing**. 3 ed. London: Chapman and Hall, 1992. 426 p.

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, [S.l.], v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

CARVALHO, M. **Mapeamento da sensibilidade ao impacto por óleo de um segmento da costa entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará utilizando imagens ETM+/Landsat-7 e geoprocessamento**. 279f. 2003. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

CHAVEZ JR., P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 24, p. 459-479, 1988.

COHEN, J. A. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, Thousand Oaks, v. 20, n. 1, p.37-46, 1960.

CONGALTON, R. G.; ODERWALD, R. O.; MEAD, R. A. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 49, n. 12, p.1671-1678, 1983.

FEDOROV, D.; FONSECA, L. M. G. **Restau**: image restoration 0.0.15. São José dos Campos: INPE, Divisão de Processamento de Imagens, 2002

FOODY, G. M. On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 58, n. 10, p.1459-1460,1992

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **SPRING**: sistema de processamento de informações georreferenciadas: manual de ajuda. São José dos Campos: INPE, 2004.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN J. W. **Remote sensing and image interpretation**. 5 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 763 p.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 3 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 324 p.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis**: an introduction. 4 ed. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 439 p.

ROSENFIELD, G. H. Analysis of thematic map classification error matrices. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 52, n. 5, p. 681-686, 1986.

ROSENFIELD, G. H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 52, n. 2, p. 223-227, 1986.