

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**UMA ARQUITETURA DE SISTEMAS ESPECIALISTAS
NEBULOSOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE
IMAGENS UTILIZANDO OPERADORES DA
MORFOLOGIA MATEMÁTICA**

Ronei Marcos de Moraes

**Tese de Doutorado em Computação Aplicada,
orientada pelo Dr. Gerald Jean Francis Banon e pela
Dra. Sandra Aparecida Sandri, aprovada em
fevereiro de 1998.**

INPE
São José dos Campos - SP
Fevereiro de 1998

RESUMO

Neste trabalho propomos uma arquitetura de sistemas especialistas nebulosos para classificação de imagens. Nestes sistemas, as regras são construídas através de operadores da Morfologia Matemática invariantes a translação. A tradução das regras em seqüências de operadores da Morfologia Matemática é mostrada detalhadamente. Um sistema especialista com essa arquitetura é aplicado a uma área na Floresta Nacional do Tapajós, no estado brasileiro do Pará. Os resultados da classificação são comparados com uma imagem classificada visualmente.

A FUZZY EXPERT SYSTEMS ARCHITETURE FOR IMAGE CLASSIFICATION USING MATHEMATICAL MORPHOLOGY OPERATORS

ABSTRACT

In this work, we propose a fuzzy expert system architetur for image classification. In these expert systems, the rules are constructed through translation invariant Mathematical Morphology operators. The rule translation into Mathematical Morphology operators sequences is shown in details. An expert system constructed with this architetur is applied to area of Tapajós National Florest, in the Brazilian state of Pará. The classification results are compared with a visually classified image.

Sumário

	pág
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
2 Aspectos Gerais	3
2.1 Teoria dos Conjuntos Nebulosos ("Fuzzy Sets").....	3
2.1.1 O que são "Fuzzy Sets"	3
2.1.2 Operações com Conjuntos Nebulosos	5
2.2 Sistemas Especialistas	8
2.3 Conceitos da Morfologia Matemática	14
2.3.1 A Função Distância	18
2.3.2 A Limiarização	20
2.3.3 A Abertura por Reconstrução	21
2.3.4 O Sup-gerador	21
2.4 O Sistema Khoros	21
2.5 Os Tipos de Classificação de Imagens	22
2.5.1 A Classificação Visual de Imagens	23
2.5.2 Classificação Assistida por Sistema Especialista	24
3 Sistemas especialistas para classificação de imagens	27
3.1 O Sistema de Interpretação de Imagens ICARE	28
3.2 Considerações Sobre o Sistema ICARE	38
4 Proposta de Um Sistema Especialista para Classificação de Imagens	41
4.1 A Arquitetura do Sistema	42
4.2 Considerações para a Implementação Usando Morfologia Matemática	49
4.2.1 A Modelagem das Regras	50
5 Utilização da Arquitetura Proposta	57
5.1 A Floresta Nacional do Tapajós	57
5.2 A Classificação Visual da Área	60
5.3 As Tabelas de Conhecimento	60
5.4 A Implementação das Regras	64
5.4.1 Isolando Atributos da Imagem	64
5.4.2 As Áreas Classificadas	87
6 Comparação com um mapa de referência	89
6.1 Os coeficientes de comparação	89
6.1.1 O Coeficiente de Exatidão Global	92
6.1.2 O Coeficiente Kappa	92

6.1.3 O Coeficiente Tau	93
6.2 Resultados	94
7 Conclusões Finais e Sugestões	97
7.1 Conclusões Finais	97
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	99
Referências Bibliográficas	101
Apêndice A - As Bandas do Satélite Landsat	109
Apêndice B - As Imagens Utilizadas	113

Lista de Figuras

	pág
2.1 Raciocínio nebuloso simplificado com uma regra e com implicação $\nabla = \sim A \vee B$ e $\nabla = \min$, e com exemplo de 3 fatos precisos $x^* = x_i$	12
2.2 Agregação com $\diamond = \max$ para a função de implicação $\nabla = \min$	13
2.3 Transformação sobre imagens	15
2.4 Exemplos de operadores morfológicos elementares	16
2.5 Exemplos de alguns operadores morfológicos de dupla função	17
2.6 Aplicação da função distância a uma imagem binária com três círculos no Khoros 1.0.5	19
2.7 A função distância em termos de operadores morfológicos	20
3.1 Diagrama geral de um sistema de interpretação de imagens	29
3.2 As três fases do sistema ICARE	39
3.3 Diagrama de cálculo de $\text{appar}(x,y)$	40
4.1 Raciocínio nebuloso quando a implicação é $A \wedge B$ e a agregação é dada pelo \max	45
4.2 Seqüência de operações no Khoros representando um sistema especialista, com $\nabla = \min$ e $\diamond = \max$	46
4.3 Seqüência de operações no Khoros 1.0.5 sobre uma imagem	48
5.1 Localização do Parque Nacional do Tapajós no Pará (fonte: Projeto RADAMBRASIL, 1983)	58
5.2 Composição colorida RGB da imagem da Floresta Nacional do Tapajós sobre a cidade de Aveiro	59
5.3 Resultado da classificação visual	61
5.4 Legenda da classificação da figura 5.3	61
5.5 “Workspace” que gera a classificação para uma imagem com quatro bandas	65
5.6 “Workspace” que extrai o atributo Rio da imagem	69
5.7 “Workspace” que obtém a componente Direita do Rio	69
5.8 “Workspace” que extrai o atributo Margem Direita do Rio	70
5.9 “Workspace” que extrai o atributo Área Antropizada	72
5.10 “Workspace” que extrai o atributo Cidade de Aveiro	74
5.11 “Workspace” que extrai o sub-atributo Floresta Ombrófila Densa Submontana	75
5.12 “Workspace” que extrai o atributo Drenagem Densa (regras R_8 e R_9) .	77
5.13 “Workspace” que implementa a segmentação no Khoros 2.1	78
5.14 Operadores que compõem a “caixinha” Componentes Conexas	79
5.15 “Workspace” que isola o atributo Floresta Aluvial	82
5.16 “Workspace” que isola o atributo Área de Contato de formações pioneiras com floresta	84

5.17 “Workspace” que isola o atributo Áreas de Mistura	86
6.1 Resultado final da classificação	90
6.2 Legendas da classificação da figura 6.1	91
6.3 Localização espacial dos erros de classificação	91
A.1 O satélite LANDSAT	109

Lista de Tabelas

	pág
2.1 T-norams e T-conorams duais	6
2.2 Operadores de implicação	7
3.1 Exemplo de conhecimento sobre uma determinada zona ecoflorística por dados ecológicos e florísticos	30
3.2 Exemplo de conhecimento sobre uma determinada zona ecoflorística por dados de vegetação	31
5.1 Conhecimento do especialista sobre uma determinada classe, por dados de vegetação, localização e teledetecção	62
6.1 Matriz de erros da imagem classificada em relação à imagem de referência	94
6.2 Coeficiente de exatidão para as classes na imagem classificada	94
6.3 Valores percentuais dos coeficientes e respectivas variâncias por coeficiente	95
A.1 Características das bandas espectrais do satélite Landsat 5 e suas aplicações	110