

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**MODELOS ESTOCÁSTICOS DA DINÂMICA DA
PAISAGEM FLORESTAL E SIMULAÇÃO DE
CENÁRIOS PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO
SUL NO PERÍODO DE 1988 A 2020**

TESE DE DOUTORADO

Elvis Rabuske Hendges

**Santa Maria, RS, Brasil
Outubro de 2007**

**MODELOS ESTOCÁSTICOS DA DINÂMICA DA PAISAGEM
FLORESTAL E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA O ESTADO
DO RIO GRANDE DO SUL NO PERÍODO DE 1988 A 2020**

por

Elvis Rabuske Hendges

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em
Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira

**Santa Maria, RS, Brasil
Outubro de 2007**

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**MODELOS ESTOCÁSTICOS DA DINÂMICA DA PAISAGEM
FLORESTAL E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA O ESTADO DO
RIO GRANDE DO SUL NO PERÍODO DE 1988 A 2020**

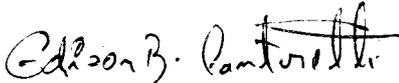
elaborada por
Elvis Rabuske Hendges

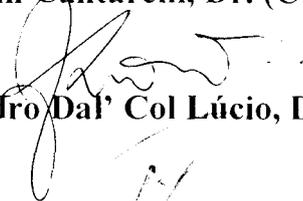
como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

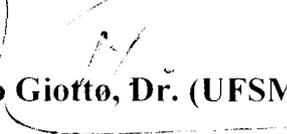
COMISSÃO EXAMINADORA:


Rudiney Soares Pereira, Dr.
(Presidente/Orientador)


Doádi Antonio Brena, Dr. (UFSM)

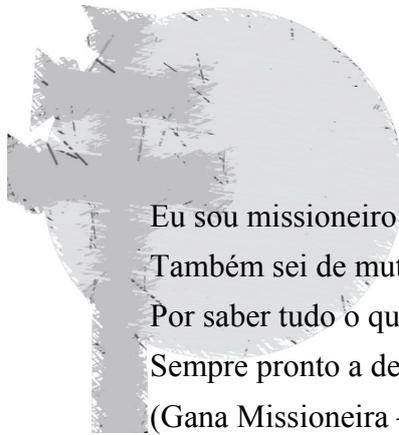

Edison Bisognin Cantarelli, Dr. (CESNORS/UFSM)


Alessandro Dal' Col Lúcio, Dr. (UFSM)


Enio Giotto, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 08 de outubro de 2007.

Minha vida de forma alguma poderia ser melhor,
por isso a meus pais dedico!



Eu sou missioneiro sei de bailes e potreadas
Também sei de mutirões no cabo liso da enxada
Por saber tudo o que sei me sinto bem a vontade
Sempre pronto a defender guerra honra e liberdade
(Gana Missioneira – Cenair Maicá)

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente à Universidade Federal de Santa Maria e seu Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade dada a mim para o alcance deste objetivo, pela infra-estrutura de apoio e conhecimento oferecidos, em especial aos professores: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger, Prof. Dr. Paulo Renato Schneider, Prof. Dr. Alessandro Dal'Col Lúcio, Prof. Dr. Doádi Antonio Brena, Prof. Dr. Solon Jonas Longhi, bem como a funcionária do PPGEF Cerlene da Silva Machado e demais professores que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Quero também expressar meu agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira, amigo de todas as horas, pela ajuda, paciência, seriedade, sinceridade e acima de tudo, pelo bom caráter e exemplos a mim passados.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa que tornou economicamente viável a minha qualificação profissional e a elaboração desta Tese.

A meus pais, Leoberto Hendges e Celíria Maria Rabuske Hendges, a quem não sei o que dizer, mas como bem sabem os homens de boa índole, sem raízes fortes nenhum tronco fica de pé, muito menos vira cerne.

Ao meu amor Daiana Rosa Kelling Santurion, para quem vão todos os beijos do mundo, não somente de agradecimento por ter me conduzido até aqui, mas também porque simplesmente a amo muito.

Às minhas amigas aparentadas Graciela Rabuske Hendges e Cedila Kelling Santurion: nem sei como agradecer as inúmeras horas de bem querer e mimo que tive junto a vocês.

A um homem que aprendi a respeitar e ouvir como a um pai, Edgar Santurion (*in memoriam*), pois se todos pudessem ser ao menos um pouco corretos e justos como ele foi, nossa pátria seria grandiosa.

Ao Sérgio Régis Squizani, um grande amigo que consegui juntamente com sua família Elsa Maria Santurion, Letícia Santurion Squizani e Thaísa Santurion Squizani.

Às pessoas que desta etapa de minha vida estiveram um pouco mais longe, porém não menos aquecidos em meu coração: minha irmã Mônica Rabuske Hendges e meu sobrinho Vinícius Hendges Salve; meus ternos amigos Alex Dalla Favera, Anderson Gretzler, Leandro Maziero e Lucas Kegler; e aos meus primos Rodrigo João Rabuske e Taimur Gibran Rabuske Kuntz, que considero irmãos de sangue .

Ainda quero agradecer a todos os colegas de laboratório, principalmente a Cícero Zorzi, Luciano Volenhaupt Pereira, Ana Caroline Benedetti, Ariane Lopes Macedo e Renata Ferrari que jamais tentaram em me prestar ajuda.

As pessoas ligadas ao Programa de Pós-Graduação em Geomática em especial ao professor Enio Giotto pelo auxílio e principalmente pela disponibilização das cartas topográficas 1:250.000 parte essencial na elaboração desta pesquisa.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram, auxiliando-me física ou mentalmente para a elaboração deste Estudo que tão compensador para mim.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

MODELOS ESTOCÁSTICOS DA DINÂMICA DA PAISAGEM FLORESTAL E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL NO PERÍODO DE 1988 A 2020

AUTOR: ELVIS RABUSKE HENDGES
ORIENTADOR: Dr. RUDINEY SOARES PEREIRA
DATA E LOCAL DE DEFESA: SANTA MARIA, 08 DE OUTUBRO DE 2007

Os padrões de uso da terra e a possível má utilização dos recursos naturais do nosso planeta motivam atualmente muitas pesquisas no campo da simulação de cenários em diversas regiões do mundo. Dentro desse contexto a presente pesquisa pretende simular o cenário florestal do Rio Grande do Sul a fim de localizar e quantificar em um mapa a evolução das florestas deste Estado para o ano de 2020. Desde 2003 o Rio Grande do Sul vem incentivando a prática do reflorestamento através do Programa Estadual de Florestamento, como uma nova alternativa econômica, porém a implantação desse programa trouxe também diversas discussões sobre um possível desequilíbrio ambiental e econômico causado pelo excesso de áreas reflorestadas. Por outro lado, dados levantados pelos Inventários Florestais já apontavam um aumento de florestas nativas e exóticas antes da implantação do programa e, com base nisso, a projeção futura buscada por esta pesquisa baseia-se na criação de um modelo estocástico de simulação do cenário florestal do Rio Grande do Sul sem levar em conta o acréscimo das áreas florestais incentivadas pelo programa de reflorestamento. Para tanto foram classificados os padrões de uso da terra em imagens dos satélites LANDSAT 5 e LANDSAT 7 referentes aos anos de 1988 e 1998 e do satélite TERRA do ano de 2007. A partir do cruzamento dos padrões ligados ao uso florestal (floresta nativa, capoeirão e reflorestamento de espécies exóticas) em relação às demais classes de uso da terra (lavoura, campo, água, dunas, afloramento rochoso e banhado) identificadas nas imagens foi gerado um novo mapa contendo a informação da evolução florestal do Estado do Rio Grande do Sul nos últimos 20 anos. Esse mapa responsável pela representação das mudanças de uso florestal foi cruzado com diversos mapas temáticos de informações ambientais, econômicas e sociais. O mapa de mudanças e o cruzamento deste com os mapas temáticos definiram respectivamente a matriz de transição Markov e os pesos de evidências, ambos requisitos na calibração do modelo estocástico. Como resultado a simulação da paisagem florestal do Rio Grande do Sul para o ano de 2020 apresentou um aumento de áreas em quase todas as regiões do Estado dos usos de capoeirão, floresta nativa e reflorestamento de espécies exóticas, sendo que os dois últimos cresceram em 5.113 km² e em 4.036 km² respectivamente. Desses aumentos o mais significativo é o das espécies exóticas, já que o acréscimo representa 72% em relação a 2007, mesmo sem que as áreas impulsionadas pelo Programa Estadual de Florestamento tenham sido contabilizadas e simuladas.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; uso da terra; sistema de informações geográficas.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

MODELOS ESTOCÁSTICOS DA DINÂMICA DA PAISAGEM FLORESTAL E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL NO PERÍODO DE 1988 A 2020 (STOCHASTIC MODELS OF THE FORESTED LANDSCAPE'S DYNAMICS AND SCENARIO SIMULATION FOR THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL, FROM 1988 TO 2020)

AUTHOR: ELVIS RABUSKE HENDGES
ADVISOR: Dr. RUDINEY SOARES PEREIRA
DATE AND PLACE OF DEFENSE: SANTA MARIA, OCTOBER 08, 2007

Land use patterns and the potential careless use of our planet's natural resources have recently called the attention of an increasing number of studies in the area of scenario simulation in several parts of the world. The present research aims at simulating the forest scenario of Rio Grande do Sul, Brazil, in order to identify and quantify in a map the forest's evolution in this state for the year 2020. Since 2003 Rio Grande do Sul has been encouraging forestation practices through its *State Forestation Program* as a new economic alternative; but the program's development has also raised controversies over the possibility of an environmental and economic unbalance caused by the excess of forested areas. On the other hand, data collected in Forest Inventories had already revealed an increase in native and exotic forest areas before the program was created and, in this sense, the projection proposed in this study is based on the development of a stochastic simulation model of Rio Grande do Sul's forest scenario without considering the forested areas that emerged from the forestation program. Land use patterns will be classified based on images from the LANDSAT 5 and LANDSAT 7 satellites referring to the years 1988 and 1998 as well as images from the TERRA satellite referring to the year 2007. Based on a cross-check of forest use patterns (native forest, bush land and reforestation with exotic species) against the other types of land use (cropped farmland, grassland, water, dune, rocky outcrop, wetland) identified in the images, a new map was generated showing the forest's evolution in Rio Grande do Sul over the last 20 years. This map was then cross-checked with several thematic maps containing environmental, economic and social information. The forest evolution map and its cross-check with the thematic maps defined the Markov transition matrix and the weights of evidence, respectively, both requirements for the calibration of the stochastic model. As a result, the simulation of Rio Grande do Sul's forest landscape for the year 2020 showed an increase in almost all regions of the state of the bush land, native forest and reforestation with exotic species areas, given that the latter two increased by 5,113 km² and 4.036 km² respectively. From this growth the most significant is the exotic species' one, which represents 72% in relation to 2007, even without taking into account and simulating those areas boosted by the *State Forestation Program*.

Key-words: remote sensing; land use; geographic information system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de Localização do Rio Grande do Sul.....	30
Figura 2 – Perfil Topográfico das diferentes altitudes encontradas no Planalto Meridional.....	33
Figura 3 – Mapa dos vales dos principais rios e o seu trabalho no recuo do Planalto.....	33
Figura 4 – Diferença dos perfis topográficos longitudinais do rio Jacuí.....	36
Figura 5 – Exemplo de representação Matricial e Vetorial dos elementos da paisagem.....	51
Figura 6 – Elementos e fases da aquisição de dados pelo Sensoriamento Remoto.....	54
Figura 7 – Exemplos de imagens com diferentes resoluções.....	56
Figura 8 – Erros e distorções comuns em dados de sensores remotos.....	57
Figura 9 – Exemplos de agrupamento por médias de algoritmos classificadores.....	60
Figura 10 – Representação da matriz de confusão. Elaboração.....	62
Figura 11 – Figuras representativas dos satélites LANDSAT 5 e LANDSAT 7.....	64
Figura 12 – Figura representativa das curvas de reflectância de alvos distintos.....	68
Figura 13 – Curvas de reflectância das folhas (morfologia e estrutura interna).....	70
Figura 14 – Figuras representativas dos satélites Terra e Aqua.....	73
Figura 15 – Exemplos de generalizações em dados de imagem e vetorial.....	78
Figura 16 – Exemplos das variáveis visuais mais usadas pela cartografia temática	79
Figura 17 – Exemplos das formas organizacionais dos elementos da unidade paisagística.....	86
Figura 18 – Esquema da entrada, manipulação e saída de dados no DINAMICA.....	100
Figura 19 – Página da Internet onde foram adquiridas as imagens LANDSAT.....	102
Figura 20 – Seleção de critérios e pedido das imagens.....	103
Figura 21 – Cenas do satélite LANDSAT 5, utilizadas para a classificação.....	104
Figura 22 – Melhora na identificação dos padrões de uso da terra (constraste).....	105
Figura 23 – Exemplo da digitalização das áreas de treinamento (classificação digital).....	107
Figura 24 – Cenas do satélite LANDSAT 7 e respectivas datas.....	109

Figura 25 – Site de busca e pedido de imagens MODIS.....	112
Figura 26 – Visualização prévia da área de cobertura da imagem MODIS selecionada.....	113
Figura 27 – Disposição das duas imagens MODIS usadas pela pesquisa.....	113
Figura 28 – Conversão de imagens MODIS através do MTR.....	114
Figura 29 – Exemplo de mapa temático de distâncias em função da drenagem.....	117
Figura 30 – Modelo genérico da decodificação de mapas em números.....	121
Figura 31 – Tela do aplicativo MINITAB, valores numéricos(mapas) em colunas.....	122
Figura 32 – Tela do aplicativo DINAMICA, importação dos mapas.....	123
Figura 33 – Etapas do DINAMIDA, definição da matriz de transição.....	124
Figura 34 – Terceiro passo, definição dos peso de evidências.....	125
Figura 35 – Definição do tempo (Years) e do tamanho das manchas (Hectares).....	125
Figura 36 – Distribuição em porcentagem das áreas das classes de uso da terra.....	127
Figura 37 – Cruzamento dos mapas de mudança de uso da terra com os mapas temáticos.....	157
Figura 38 – Distribuição das áreas das classes de uso da terra (mapas de simulação).....	159
Figura 39 – Localização das maiores áreas Florestais no norte do Rio Grande do Sul.....	168
Figura 40 – Concentração das áreas de maior evolução florestal no norte Gaúcho.....	169
Figura 41 – Aumento das áreas de capoeirão no nordeste gaúcho (simulação de 2020).....	171
Figura 42 – Aumento das áreas de capoeirão no nordeste gaúcho (simulação de 2020).....	172
Figura 43 – Simulação dos usos florestais da região oeste do Estado.....	173
Figura 44 – Acréscimo de floresta nativas no Escudo Rio-grandense (simulação 2020).....	175
Figura 45 – Baixo Índice de alteração dos reflorestamento no centro sul do Estado.....	176
Figura 46 – Acréscimo de floresta nativas no Escudo Rio-grandense (simulação 2020).....	177
Figura 47 – Mudanças de uso da terra no litoral gaúcho, simulação para o ano 2020.....	178
Figura 48 – Desmatamento de florestas na região noroeste do Estado (simulação 2020).....	180

LISTA DE CARTOGRAMAS

Cartograma 01 – Distribuição das áreas que viraram floresta nativa 1988-1998.....	129
Cartograma 02 – Distribuição das áreas que sofreram desflorestamento 1988-1998.....	133
Cartograma 03 – Distribuição das áreas que viraram capoeirão 1988-1998.....	135
Cartograma 04 – Distribuição das áreas que deixaram de ser capoeirão 1988-1998.....	137
Cartograma 05 – Distribuição das áreas novas de reflorestamento 1988-1998.....	139
Cartograma 06 – Distribuição das áreas que deixaram de ser reflorestamento 1988-1998.....	140
Cartograma 07 – Distribuição das áreas que viraram floresta nativa de 1998-2007.....	143
Cartograma 08 – Distribuição das áreas que sofreram desflorestamento de 1998-2007.....	145
Cartograma 09 – Distribuição das áreas que passaram a ser capoeirão de 1998-2007.....	147
Cartograma 10 – Distribuição das áreas que deixaram de ser capoeirão de 1998-2007.....	149
Cartograma 11 – Distribuição das áreas que viraram reflorestamento de 1998-2007.....	151
Cartograma 12 – Distribuição das áreas que deixaram de ser reflorestamento 1998-2007.....	153
Cartograma 13 – Distribuição das novas áreas de floresta nativa simuladas para 2020.....	160
Cartograma 14 – Distribuição das áreas de desflorestamento (simulação do ano de 2020).....	161
Cartograma 15 – Distribuição das novas áreas de reflorestamento simuladas para 2020.....	162
Cartograma 16 – Distribuição das áreas que deixaram de ser reflorestamento 2007-2020.....	164
Cartograma 17 – Distribuição das novas áreas de capoeirão simuladas para 2020.....	165
Cartograma 18 – Distribuição das áreas que deixaram de ser capoeirão 2007-2020.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Qualidade Da Classificação Segundo Intervalos Do Coeficiente <i>Kappa</i>	59
Tabela 2 - Áreas de uso da terra do Rio Grande do Sul em km ²	126
Tabela 3 – Classes de uso da terra (aumento das florestas, 1988-1998).....	128
Tabela 4 – Classes de uso da terra (diminuição das florestas nativas, 1988-1998).....	130
Tabela 5 – Classes de uso da terra (aumento de capoeirão, 1988-1998).....	134
Tabela 6 – Classes de uso da terra (diminuição de capoeirão, 1988-1998).....	136
Tabela 7 – Classes de uso da terra (aumento do reflorestamento, 1988-1998).....	138
Tabela 8 – Classes de uso da terra (diminuição do reflorestamento, 1988-1998).....	140
Tabela 9 – Classes de uso da terra (aumento das florestas nativas, 1998- 2007).....	142
Tabela 10 – Classes de uso da terra (diminuição das florestas nativas, 1998- 2007).....	145
Tabela 11 – Classes de uso da terra (aumento de capoeirão, 1998-2007).....	146
Tabela 12 – Classes de uso da terra (diminuição de capoeirão, 1998-2007).....	148
Tabela 13 – Classes de uso da terra (aumento do reflorestamento, 1998-2007).....	150
Tabela 14 – Classes de uso da terra (diminuição do reflorestamento, 1998-2007).....	152
Tabela 15 – Quantificação das áreas de uso da terra do Rio Grande do Sul em km ²	158
Tabela 16 – Classes de uso da terra (diminuição das áreas de florestas, 2020).....	161
Tabela 17 – Classes de uso da terra (diminuição do reflorestamento, 2020).....	163
Tabela 18 – Classes de uso da terra (diminuição do capoeirão, 2020).....	166

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 –	$eg = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ij}}{N}$	62
Equação 2 –	$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ij} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}$	63
Equação 3 –	$\prod(t+1) = P^n \cdot \prod(t)$	89
Equação 4 –	$\prod(t+1) = P[f(t)] \cdot \prod(t)$	91
Equação 5 –	$P\{R/S\} = \frac{P\{R \cap S\}}{P\{S\}}$	92
Equação 6 –	$P\{R/S\} = \frac{N\{R \cap S\}}{N\{S\}}$	92
Equação 7 –	$P\{S/R\} = \frac{N\{S \cap R\}}{N\{R\}}$	92
Equação 8 –	$P\{R/S\} = \frac{P\{R\} \cdot P\{S/R\}}{P\{S\}}$	92
Equação 9 –	$P\{R/\bar{S}\} = \frac{P\{R\} \cdot P\{\bar{S}/R\}}{P\{\bar{S}\}}$	93
Equação 10 –	$\frac{P\{R/S\}}{P\{\bar{R}/S\}} = \frac{P\{R\} \cdot P\{S/R\}}{P\{\bar{R}/S\} \cdot P\{S\}}$	93
Equação 11 –	$P\{\bar{R}/S\} = \frac{P\{\bar{R} \cap S\}}{P\{S\}} = \frac{P\{S/\bar{R}\} \cdot P\{\bar{R}\}}{P\{S\}}$	93
Equação 12 –	$\frac{P\{R/S\}}{P\{\bar{R}/S\}} = \frac{P\{R\} \cdot P\{S\} \cdot P\{S/R\}}{P\{\bar{R}\} \cdot P\{S\} \cdot P\{S/\bar{R}\}}$	93
Equação 13 –	$O\{R/S\} = O\{R\} \cdot \frac{P\{S/R\}}{P\{S/\bar{R}\}}$	94

Equação 14 –	$\log \{R/S\} = \log \{R\} + W^{\dagger}$94
Equação 15 –	$\hat{K} = \frac{(1696205 \times 1668911) - 446571683316}{(1696205)^2 - 446571683316} = \mathbf{0.9810}$109
Equação 16 –	$\hat{K} = \frac{(2035457 \times 2002693) - 643066520227}{(2035457)^2 - 643066520227} = \mathbf{0.9809}$110
Equação 17 –	$\hat{K} = \frac{(3448986 \times 3393452) - 1846353536962}{(3448986)^2 - 1846353536962} = \mathbf{0.9809}$115
Equação 18 –	Nº. Classes = $1 + 3,322 \cdot \text{Log } N$ Nº. Classes = $1 + 3,322 \cdot \text{Log } 496$ Nº. Classes = 9,954119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Chave de interpretação, classificação supervisionada de imagens.....	59
Quadro 2 – Características dos satélites do programa LANDSAT.....	65
Quadro 3 – Características dos sistemas sensores dos satélites LANDSAT.....	66
Quadro 4 – Características das bandas espectrais dos sensores TM e ETM+.....	67
Quadro 5 – Chave de interpretação.....	106
Quadro 6 – Matriz de confusão do algoritmo da máxima verossimilhança 1988.....	108
Quadro 7 – Matriz de confusão do algoritmo da máxima verossimilhança 1998.....	110
Quadro 8 – Matriz de confusão do algoritmo da máxima verossimilhança 2007.....	115
Quadro 9 – Relação dos mapas temáticos usados na simulação de cenários.....	120
Quadro 10 – Matriz de transição de Markov.....	154

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Mapa Macrounidades Geomorfológicas do RS.....	197
Anexo 2 – Mapa Vegetação Natural do RS.....	198
Anexo 3 – Mapa Unidades de Solo do RS.....	199
Anexo 4 – Mapas de Uso da Terra de 1988, 1998 e 2007.....	200
Anexo 5 – Mapa Temáticos (Distâncias).....	201
Anexo 6 – Mapa Temáticos (Aspectos Físicos).....	202
Anexo 7 – Mapa Temáticos (Aspectos Econômicos).....	203
Anexo 8 – Mapa Temáticos (Aspectos Populacionais).....	204
Anexo 9 – Mapa Temáticos (Aspectos Agrícolas).....	205
Anexo 10 – Mapa Temáticos (Produção Florestal).....	206
Anexo 11 – Mapas de Uso da Terra simulação 2007 e 2020.....	207
Anexo 12 – Mapa de distribuição das Classes de Uso Florestal em 2007.....	208
Anexo 13 – Mapa de distribuição das Classes de Uso Florestal em 2020.....	209

ÍNDICE

RESUMO.....	06
ABSTRACT.....	07
LISTA DE FIGURAS.....	08
LISTA DE CARTOGRAMAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE EQUAÇÕES.....	14
LISTA DE QUADROS.....	16
LISTA DE ANEXOS.....	17
ÍNDICE.....	18
CAPÍTULO 1	
<i>INTRODUÇÃO</i>	22
<i>1.1 – Contextualização do problema</i>	22
<i>1.2 – Objetivo principal</i>	26
<i>1.3 – Objetivos específicos</i>	26
<i>1.4 – Hipóteses de pesquisa</i>	27
<i>1.5 – Esquematização da Tese</i>	28
CAPÍTULO 2	
<i>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</i>	30
<i>2.1 – Localização da área de estudo</i>	30
<i>2.2 – Descrição geográfica do Rio Grande do Sul</i>	31
2.2.1 – Geomorfologia.....	31
2.2.2 – Clima.....	38
2.2.3 – Vegetação.....	41

2.2.4 – Solos.....	45
2.3 – Geoprocessamento e SIG.....	48
2.4 – Sistemas de informações geográficas.....	49
2.5 – Sensoriamento remoto.....	53
2.5.1 – Técnicas do sensorimanto remoto.....	57
2.5.1.1 – Correção geométrica.....	57
2.5.1.2 – Classificação de imagens.....	58
2.5.1.3 – Avaliação da classificação.....	59
2.5.2 – Plataformas orbitais.....	64
2.5.2.1 – Sistema LANDSAT.....	64
2.5.2.2 – Sensor MODIS.....	70
2.6 – Noções de cartografia.....	73
2.6.1 – Representações cartográficas.....	74
2.6.2 – Cartografia temática.....	78
2.7 – Estudo da paisagem.....	80
2.7.1 – Padrões da paisagem.....	82
2.7.1.1 – Mancha.....	83
2.7.1.2 – Corredor.....	85
2.7.1.3 – Matriz.....	85
2.8 – Simulações LUCC.....	86
2.8.1 – Modelo Estocástico.....	89
2.9 – Aplicativos computacionais.....	95
2.9.1 – SPRING.....	95
2.9.1 – MINITAB.....	98
2.9.2 – DINAMICA.....	99

CAPÍTULO 3

<i>PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS</i>	102
<i>3.1 – Classificação das imagens</i>	102
3.1.1 – Satélite LANDSAT.....	102
3.1.1.1 – Contraste.....	105
3.1.1.2 – Classificação supervisionada.....	106
3.1.2 – Sensor MODIS.....	111
<i>3.2 – Elaboração dos mapas temáticos</i>	116
3.2.1 – Mapa temáticos de distâncias.....	116
3.2.2 – Mapa temáticos com base na altimétricos do terreno.....	118
3.2.3 – Mapa temáticos com base em dados cadatrais.....	118
3.2.4 – Mapa temáticos dos aspectos físicos da paisagem.....	119
<i>3.3 – Correlação estatística no aplicativo MINITAB</i>	120
<i>3.4 – Simulação do modelo estocástico no aplicativo DINAMICA</i>	123

CAPÍTULO 4

<i>RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS</i>	126
<i>4.1 – Resultados do mapas de uso da terra</i>	126
4.1.1 – Mapeamento das áreas de uso florestal em 1988 – 1998.....	128
4.1.2 – Mapeamento das áreas de uso florestal em 1998 – 2007.....	141
<i>4.2 – Modelo de simulação estocástico</i>	153
4.2.1 – Matriz de transição de Markov.....	153
4.2.2 – Definição dos pesos de evidências.....	155
<i>4.3 – Simulação do uso de terra florestal de 2020</i>	157

CAPÍTULO 5

<i>ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MAPA DE SIMULAÇÃO</i>	167
---	-----

CAPÍTULO 6

<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</i>	181
---	-----

<i>6.1 – Os efeitos positivos e negativos do aumento da área florestal previsto para 2020</i>	181
--	-----

<i>6.2 – Fatores determinantes no aumento da área florestal no Rio Grande do Sul</i>	182
---	-----

<i>6.3 – O uso de imagens de baixa e média resolução em modelos de simulação</i>	182
---	-----

<i>6.4 – A contribuição desta pesquisa para o desenvolvimento da Ciência</i>	184
---	-----

<i>6.5 – Utilização do presente trabalho no zoneamento da silvicultura</i>	186
---	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
---	-----

ANEXOS	196
---------------------	-----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Contextualização do problema

A utilização de modelos de simulação da paisagem tornou-se com o passar dos anos uma excelente ferramenta na intensa busca por respostas que projetam as condições de sobrevivência da vida humana no nosso planeta. A maioria destes modelos, para gerar as respostas desejadas, utiliza como base de suas pesquisas a análise das condições de desenvolvimento humano pela qual a sociedade vem passando ao longo dos anos, bem como a forma pela qual esta explora e utiliza os recursos naturais disponíveis na natureza. Como resultados, estas pesquisas em geral apresentam simulações dos aspectos organizacionais da paisagem e da vida humana no futuro, integrando para isso diversos elementos econômicos, sociais e ambientais que em tempos atuais são os fatores mais determinantes nos diferentes padrões de uso da terra.

Porém antes deste enfoque integrador, em meados do século XIX, as primeiras pesquisas referentes as projeções e as simulações de cenários tinham como metas o estudo da longevidade de algumas das novas fontes de energia e matérias-primas empregadas a partir da primeira fase da Revolução Industrial. Tais estudos eram geralmente de interesse público e visavam estipular a durabilidade e a escassez de recursos naturais como o carvão vegetal e o minério de ferro além de alguns outros derivados minerais empregados como insumos na expansão agrícola. Esta forma de prever e projetar os recursos da paisagem ganhou grande impulso na segunda fase da Revolução Industrial (a partir de 1850), quando o interesse privado das grandes indústrias teve de ampliar o seu mercado aumentando também consequentemente as suas fontes de energia e matéria-prima. É nessa fase que os estudos se voltaram principalmente às previsões de durabilidade das reservas de petróleo, juntamente com a projeção de minerais como o aço, o alumínio, o magnésio dentre outros.

A expansão do mercado provocada pela Revolução Industrial trouxe o conflito de interesses entre alguns países mais industrializados provocando a Primeira e a Segunda Guerra Mundial. E foi nos períodos pós-guerra que os primeiros modelos mais complexos de

simulação de cenários foram desenvolvidos com o intuito de atender novamente as necessidades públicas de projeções, sendo estes responsáveis pela reconstrução e restauração de alguns países arrasados pelas batalhas. Desta forma as bases de estudo de tais modelos estavam muito mais alavancadas aos aspectos econômicos de ocupação da terra, do que as até então projeções de recursos naturais, ou até mesmo projeções vinculadas aos princípios sociais e ambientais citados anteriormente. Com significativos resultados e satisfatórias projeções responsáveis pela rápida e eficiente reconstrução econômica dos países arrasados no pós-guerra, os modelos de projeção de cenários econômicos passaram a ser empregados então pelas iniciativas privadas em novas áreas de consumo até então inexploradas pelas atividades industriais. Tais estudos foram também impulsionados pela disputa econômica de poder realizada entre os sistemas capitalista e socialista.

Com o passar dos anos, a expansão do mercado e a centralização do poder previsto pelos modelos de simulação acima mencionados, deflagrou juntamente com a economia globalizada sérios problemas sociais. Estes problemas por sua vez passaram a ser os principais objetos de estudo em novos modelos de simulação voltados aos interesses públicos, a fim de encontrar soluções e estimativas de melhoras a médio e longo prazo. Entre os problemas sociais mais pesquisados por estes modelos estavam: a fome, que fez com que vários países planejassem novas estratégias em áreas destinadas a produção de alimentos; a marginalização de áreas urbanas onde diversas metrópoles replanejaram os fluxos de serviços centro-periferia; os índices como a violência e o analfabetismo combatidos por entidades internacionais que visavam cotas de melhorias e ser alcançadas por algumas regiões pobres. Muitos destes modelos voltados à simulação de parâmetros sociais e econômicos ainda estão em uso na projeção de diversos cenários mundiais.

Porém os sistemas econômicos capitalista e socialista não geraram apenas problemas sociais como também problemas ambientais que principalmente pelas alterações climáticas atribuídas ao aquecimento global foram percebidos por quase todas as populações de nosso planeta concedendo aos modelos de simulação uma nova perspectiva de estudo atrelando os recursos naturais não mais como fonte de energia industrial e sim a condição de manutenção de vida humana na Terra. De interesse público e também privado o emprego destes modelos está vinculado atualmente ao acompanhamento da evolução e na previsão de fatores climáticos como o aumento do nível do mar, o derretimento das calotas polares, o fluxo das correntes marinhas, os índices pluviométricos, diminuição da camada de ozônio, dentre outros. Assim, seguindo a lógica do exposto acima - que a maioria dos problemas ambientais

é oriunda da ação econômica que por sua vez busca o desenvolvimento humano fazendo com que estes problemas sejam justamente percebidos com maior vigor em locais de maior carência social - os novos modelos de simulação se viram obrigados a integrar os diferentes fatores econômicos, sociais e ambientais na busca pelo equilíbrio da vida em diferentes regiões de nosso Planeta.

Porém os cenários preocupantes simulados para os emergentes impactos ambientais impulsionaram uma série de pesquisas de acompanhamento dos padrões de uso e dos fatores determinantes nas mudanças de uso da terra denominadas de LUCC (Land Use and Land Cover Change). Essas pesquisas são voltadas especificamente à simulação de cenários e buscam a integração dos fatores que definem as formas de uso da terra no sentido de prever e diminuir impactos ambientais e sociais, buscando ainda um desenvolvimento econômico através de estudos passados dos padrões de uso da terra em diferentes escalas de observação e distintas áreas de projeção. Os estudos de LUCC foram impulsionados também pelas recentes ferramentas computacionais e o lançamento de satélites de observação da Terra sendo que ambos trouxeram muitas facilidades no desenvolvimento e no emprego de modelos de simulação, a primeira por permitir o rápido processamento de inúmeras informações de diferentes naturezas através dos SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) e dos aplicativos de geoprocessamento, o segundo por permitir o estudo de padrões de uso da terra em tempos passados e atuais através da periodicidade de seu acervo de imagens.

Desta forma um dos modelos de simulação mais empregados em estudos da paisagem é o modelo estocástico, também chamado de estocástico-probabilístico, que através de uma matriz de transição definida a partir de mudanças de uso da terra em datas passadas e a vinculação destas mudanças a certos critérios definidos por pesos de evidências é possível simular as áreas futuras mais susceptíveis a novas alterações de uso. Estes modelos no Brasil são muito encontrados em estudos de impacto ambiental e econômico causados pela ocupação da floresta Amazônica, onde a simulação do desflorestamento está basicamente ligada num primeiro momento à abertura de uma estrada principal e a posterior criação de caminhos vicinais dando a paisagem o padrão de uso conhecido como espinhaço de peixe. São também encontradas pesquisas de simulação estocástica em áreas do cerrado onde a previsão de queimadas em reservas naturais provocadas pelo avanço agrícola indiscriminado ajuda a definir no futuro as áreas mais susceptíveis aos incêndios, buscando assim, uma melhor manutenção deste ecossistema.

Dentro deste contexto de preocupações com os possíveis impactos ambientais está também o Estado do Rio Grande do Sul que vem passando por uma reestruturação de sua paisagem causada principalmente pela recente implantação de um Programa Florestal. Proposto em 2003 este programa busca incrementar uma maior produção florestal e o conseqüente adensamento industrial apresentando ainda ao Estado o cultivo silvícola como uma fonte de renda alternativa além da recuperação de solos degradados, de nascentes, dentre outros benefícios. Porém esta iniciativa trouxe também a discussão sobre um possível impacto ambiental e econômico que poderia ser gerado nas estruturas naturais da fauna e da flora com o excesso de florestas implantadas em áreas primeiramente ocupadas por campos naturais e por florestas. Nesse sentido o governo do Estado do Rio Grande do Sul e os órgãos responsáveis pela gestão ambiental se viram obrigados a propor um sistema de zoneamento ambiental mais rígido a fim de prevenir esse anunciado desequilíbrio ambiental. Mesmo sem possuir nenhuma pesquisa específica que projetasse a ocupação florestal no Rio Grande do Sul para os próximos anos, algumas informações trazidas pelos Inventários Florestais Contínuos realizados neste Estado já apontavam que antes da implantação do Programa Florestal o aumento das áreas de uso florestal ligadas principalmente às classes de florestas nativas, capoeirões e florestamento implantados no Rio Grande do Sul já vinha ocorrendo. Esse aumento da cobertura florestal no Estado está na contramão do que acontece nas outras regiões do Brasil como em áreas amazônicas e de cerrado e pode estar ligado a diversos fatores como o término da expansão de novas áreas agrícolas, ao aumento na rigidez das leis de proteção ambiental, a crise da agricultura e da pecuária, entre outros.

Seguindo as tendências de pesquisas mundiais anteriormente retratadas que empregam as técnicas LUCC para simular diferentes formas de ocupação em diversos estudos setorializados pelo planeta e o atual contexto de ocupação florestal pelo qual passa o Estado do Rio Grande do Sul, a justificativa da realização do presente estudo está alicerçada principalmente na criação de um modelo de simulação dos processos de transformação da paisagem ligados a ocupação histórica e a evolução das florestas nativas e plantadas no Rio Grande do Sul antes da implantação do Programa Florestal, gerando assim um mapa futuro com a localização e a quantificação de áreas com uma maior probabilidade natural de aumento ou diminuição de cobertura florestal. Desta forma a busca por iniciativas que previnam e amenizem a ocorrência dos impactos ambientais oriundos de futuras mudanças de uso da terra ligadas as classes florestais alcançando-se assim um maior equilíbrio entre a natureza e a sociedade em diferentes áreas do Estado.

1.2 – Objetivo principal

Em vista disso, o objetivo principal deste estudo é a criação de um modelo estocástico-probabilístico com a finalidade de simular o cenário florestal do Rio Grande do Sul referente ao ano de 2020, no que diz respeito a localização e quantificação das novas manchas de uso da terra classificadas como floresta nativa, capoeirão e florestas implantadas em detrimento da localização de diversos fatores físicos e humanos atuantes sobre as mudanças nos padrões de uso da terra pelas quais vem passando nos últimos 20 anos as diferentes paisagens deste Estado.

1.3 – Objetivos específicos

Para a obtenção do modelo estocástico proposto pelo objetivo principal deste estudo será preciso alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e quantificar os diferentes padrões de uso da terra encontrados nas imagens de satélite que cobrem a área do Rio Grande do Sul referentes aos períodos de 1988, 1998 e 2007;
- Verificar a veracidade e a compatibilidade das classificações conseguidas com as imagens dos satélites do programa LANDSAT (anos de 1988 e 1998) e do satélite TERRA (ano de 2007);
- Cruzar os mapas de uso da terra localizando as áreas de uso florestal (floresta nativa, capoeirão e floresta plantada) que sofreram mudanças de classe de uso ao longo dos períodos estudados;
- Criar diversos mapas temáticos com base na escala de 1:250.000 espacializando as principais características ambientais, sociais e econômicas predominantes no território do Rio Grande do Sul;

- Correlacionar através de processos estatísticos à relação existente entre a localização das áreas que sofreram mudanças de uso da terra e as diferentes classes de cada mapa temático;
- Definir a matriz de transição de Markov com os respectivos valores de transição pelas quais passaram as classes de uso florestal que sofreram mudança migrando de uso ao longo dos períodos classificados;
- Calcular o valor dos pesos de evidência requeridos pelo modelo estocástico e referentes às mudanças de uso da terra para cada classe temática que for estatisticamente correlacionada a esta;
- Calibrar o modelo estocástico e gerar o mapa da simulação referente ao ano de 2020, para o posterior cruzamento com o mapa de uso de 2007 para identificar as novas áreas florestais do Estado.

1.4 – Hipóteses de pesquisa

Com base no exposto anterior, as hipóteses que postulam o desenvolvimento da presente pesquisa são:

- a) Com a classificação dos padrões de uso da terra das imagens de satélite é possível constatar que mesmo antes da implantação do atual Programa Florestal as áreas florestais nativas e plantadas do Rio Grande do Sul já vinham aumentando ao longo dos últimos 20 anos?
- b) Se a primeira hipótese for confirmada, é possível espacializar através da geração de mapas temáticos os fatores naturais e humanos ligados às mudanças de uso da terra que acarretaram no aumento da área florestal?
- c) Sendo as duas postulações anteriores confirmadas, será possibilitada então a criação de um modelo estocástico de cenários que simule as áreas mais susceptíveis ao aumento de cobertura florestal, gerando assim uma projeção na contramão dos modelos empregados atualmente em simulações do desflorestamento que ocorre na floresta amazônica?

- d) Se as hipóteses anteriores todas forem plausíveis, é provável então que ao processar o modelo e gerar o mapa de simulação para o ano de 2020, será possível nele a identificação das áreas do estado do Rio Grande do Sul que seguindo a tendência natural dos últimos 20 anos apresentaram um maior ganho de florestas naturais, de capoeirões, de florestamento e de reflorestamento?
- e) A utilização de imagens do satélite TERRA é satisfatória sendo sua baixa resolução espacial (de 250 m para o píxel) compensada pela alta periodicidade de informações disponibilizadas, podendo então estas ser trabalhadas no acompanhamento da evolução florestal em informações gerada para a escala de 1:250.000?

1.5 – Esquematização da tese

A pesquisa apresentada pela presente estudo pretende descrever os processo de criação de um modelo estocástico de simulação da paisagem florestal para o Estado do Rio Grande do Sul. Desta forma para melhor atender a esta descrição os conteúdos foram estruturados em capítulos que trazem as etapas de elaboração desta pesquisa de uma forma seqüencial.

Capítulo 1: descreve primeiramente a contextualização do problema no qual se situa a justificativa da realização desta pesquisa além do objetivo principal e dos objetivos específicos que esta se propõe a alcançar ao longo do estudo. Após esta primeira parte introdutória, este capítulo traz ainda as hipóteses a serem respondidas pelos resultados obtidos quando finalizada esta pesquisa e também um breve resumo dos conteúdos apresentados ao longo do texto final da Tese;

Capítulo 2: traz a fundamentação teórica dos assuntos pertinentes à realização metodológica da presente pesquisa. Desta forma, neste capítulo serão revisados primeiramente as principais características da área de estudo correspondente a simulação pretendida e os conceitos mais relevantes para a descrição da paisagem e de seus padrões

organizacionais, também são vistas ainda as teorias das diferentes ciências empregadas na construção de um modelo estocástico de simulação como o Sensoriamento Remoto e a Cartografia bem como as ferramentas empregadas por estas na descrição dos diferentes aplicativos de geoprocessamento requeridos para tal construção;

Capítulo 3: apresenta a metodologia empregada para a obtenção dos dados necessários para calibrar o modelo estocástico de simulação. Assim, num primeiro momento o capítulo descreve o processo de importação e classificação das imagens de satélite, em seguida a seqüência de criação dos mapas temáticos oriundos de diversos elementos físicos e humanos determinantes nas formas de ocupação da paisagem. Este capítulo descreve ainda o processo de análise estatística que determina a relação existente entre as mudanças de uso da terra e os mapas temáticos além de uma breve explicação metodológica do uso do programa DINAMICA no qual será programado o modelo estocástico;

Capítulo 4: traz os resultados dos mapas de uso da terra quanto a localização das florestas nativas, das áreas de capoeirão e de florestas plantadas para os três períodos mapeados em imagens de satélite, 1988, 1998 e 2007, e também dos processos de evolução destes três padrões de uso da terra ao longo destes 20 anos através dos mapas cruzados que determinam as mudanças de uso ocorridas entre um período e outro. Este capítulo apresenta ainda a localização e a quantificação das áreas relacionadas à estas três classes de uso florestal no mapa simulado para o ano de 2020;

Capítulo 5: este capítulo é dedicado a apresentação específica das mudanças no padrão de uso da terra apresentado pelo mapa de 2020, dando foco aos locais onde ocorrerá uma maior alteração em áreas de florestas nativas, capoeirões e florestas plantadas cruzando esta informação com os dados originais representados pelo mapa de 2007;

Capítulo 6: descreve a conclusão relacionando os dados obtidos e aos objetivos propostos. Discute também as hipóteses levantadas no primeiro capítulo em função dos resultados obtidos bem como sugestões e recomendações quanto à metodologia e a possível realização de novos trabalhos que levem em conta a criação de um modelo estocástico de simulação.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – Localização da área de estudo

Cobrindo cerca de 282.000 km², o Estado do Rio Grande do Sul corresponde a 3,3% do território nacional ou ainda a 50% da área da região Sul do Brasil. Na situação global, o Rio Grande do Sul se localiza a Oeste do meridiano de Greenwich e ao Sul da linha do Equador e tem como limites extremos ao Norte a curva do Rio Uruguai, (27°04'49''S), ao Sul a Curva Arroio Chuí (33°44'42''S: ponto mais extremo também do sul do Brasil), a Leste a barra do Rio Mampituba (49°42'22''W) e a Oeste a Barra do Rio Quaraí (57°38'34''W), (Figura 1).

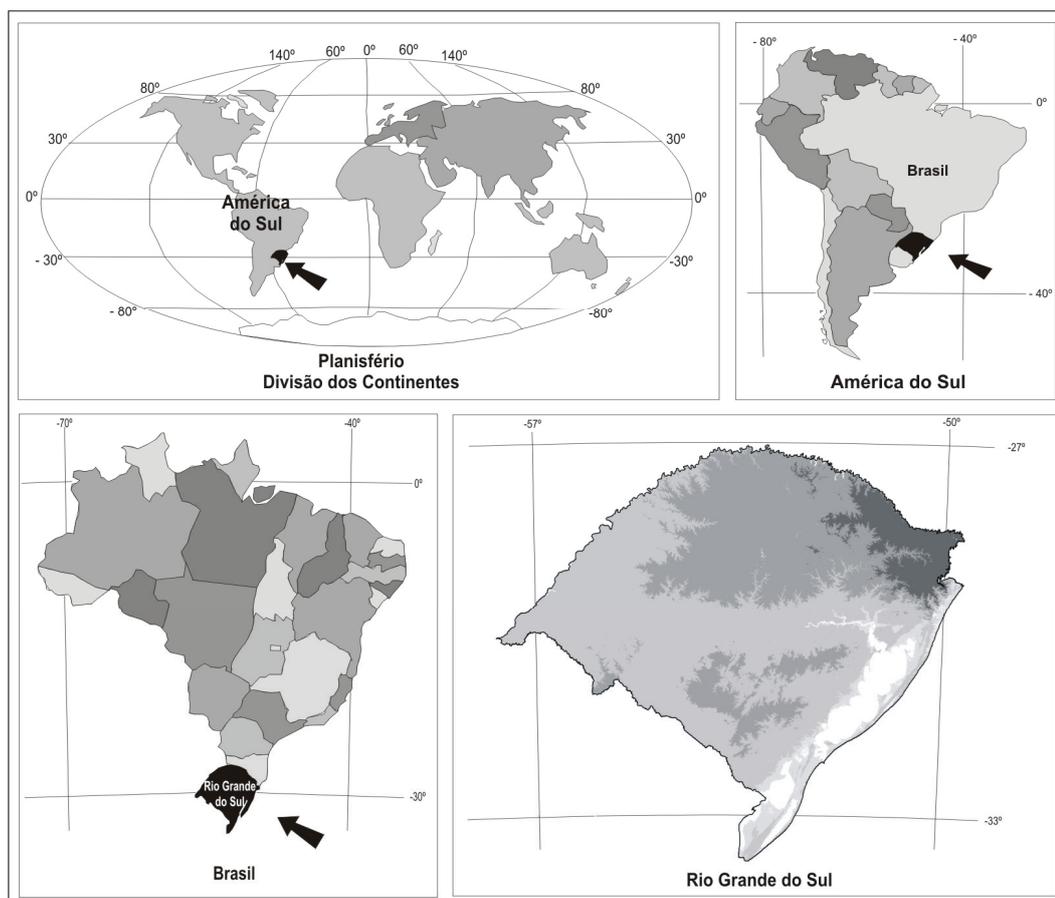


Figura 1 – Mapa de Localização do Rio Grande do Sul. Elaboração: HENDGES (2007).

Tendo praticamente toda face Leste voltada pra o Oceano Atlântico, o Rio Grande do Sul possui aproximadamente 670 km de litoral. Ao Sul e Sudoeste os limites do Estado se defrontam com terras Uruguaias, parte dessa fronteira internacional é definida por marcos naturais (drenagens), como é o caso do rio Jaguarão e rio Quaraí, porém outra parte é somente delimitada por marcos geográficos. A Oeste e Noroeste corre o rio Uruguai que divisa o Brasil da Argentina, já ao Norte e Nordeste o limite entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina é definido praticamente todo também por rios, sendo os principais o rio Uruguai e o rio Pelotas.

2.2 – Descrição geográfica

2.2.1 – Geomorfologia

Em uma síntese à estrutura geomorfológica do Rio Grande do Sul, Rambo (1942) criou designações expressivas que estabeleciam cinco regiões de estruturas físicas distintas: Litoral, Serra do Sudeste, Campanha do Sudoeste, Depressão Central e Planalto. Esse autor, entretanto, julga ainda a encosta do Planalto devido ao desenvolvimento de sua largura, principalmente na sua porção central em suas peculiaridades topográficas, sem mesmo considerar a grande importância desta para ocupação humana, como uma região que deva ser tratada à parte, adicionando assim às regiões acima citadas ainda a da Encosta.

Aprimorando esta classificação através de imagens aéreas o Projeto RADAMBRASIL¹ (1980) reclassificou as seis regiões mencionadas acima em nove estruturas geomorfológicas, sendo que mantiveram praticamente suas áreas as regiões do Litoral, da Serra do Sudeste, da Depressão Central e da Encosta que passaram a ser classificadas como Planície Lagunar, Planaltos Residuais Canguçu Caçapava, Depressão do Rio Jacuí e Serra Geral. Já as regiões da Campanha do Sudoeste e do Planalto foram subdivididas em Planalto de Uruguaiana, Depressão Rio Ibicuí - Rio Negro e Planalto Dissecado Rio Iguaçu - Rio

¹ Realizado no período de maio de 1980 a agosto de 1982 com imagens de radar na escala de 1:250.000 sendo compatibilizado por atividades de campo e pós adaptados e divulgados pelo IBGE.

Uruguai, Planalto de Santo Ângelo e Planalto dos Campos Gerais respectivamente. A localização das regiões geomorfológicas do Rio Grande do Sul classificadas pelo RADAMBRASIL pode ser conferida no Anexo 1.

Planalto Meridional

Ao caracterizar individualmente cada região, Bernardes (1997) diz que o Planalto é constituído pelos espessos lençóis de efusivas básicas pertencentes ao conjunto de derrames da Bacia do Paraná. Ao flanco e à borda extremamente recortada deste planalto é que correspondem o topônimo Serra Geral. Seguindo sua descrição o autor retrata as superfícies do Planalto como sendo regulares, porém de leve ondulação e com uma suave inclinação para sudoeste. Esta inclinação reflete por sua vez a estrutura geral da bacia paranaense, o que é muito bem evidenciado, lembra o autor, pela direção geral da hidrografia, onde os rios principais correm, a princípio, na direção Leste-Oeste, tomando depois o rumo Sul, ao descenderem do Planalto.

As maiores altitudes, junto à escarpa oriental, que está voltada para o litoral, atingem aproximadamente 1.200m, (Figura 2). Ao centro estas já se reduzem a 670m e mais a oeste, antes da ruptura do declive provocada pelo rio Uruguai, apresentam apenas uma média de 250m. Isso significa em algarismos um decréscimo de quase 1.000m dentro de uma extensão de 700 km, uma queda em relação à altitude e as ondulações no relevo provocadas pela dissecação das drenagens, (Figura 3).

Segundo Lima (1953), embora o Planalto se caracterize no seu conjunto por uma superfície ondulada, com suaves coxilhas se desdobrando em um verdadeiro mar, este é retalhado em vários pontos pelos numerosos rios que dele defluem. Ao Norte, o nível de base comum é o Uruguai que aprofunda cada vez mais estes vales a jusante, ou seja, a Oeste de sua nascente. Juntamente com esse aprofundamento seguem os encaixes da erosão no leito de seus afluentes o que causa ao longo do relevo do Planalto uma série de lóbulos interfluviais bastante visíveis. A Leste por sua vez, o Planalto termina por um verdadeiro paredão inóspito de quase mil metros. Mais ao Sul, sua cornija (seqüência de serras) é extremamente recortada e inúmeras vezes interrompida pelos rios que demandam o rio Guaíba.

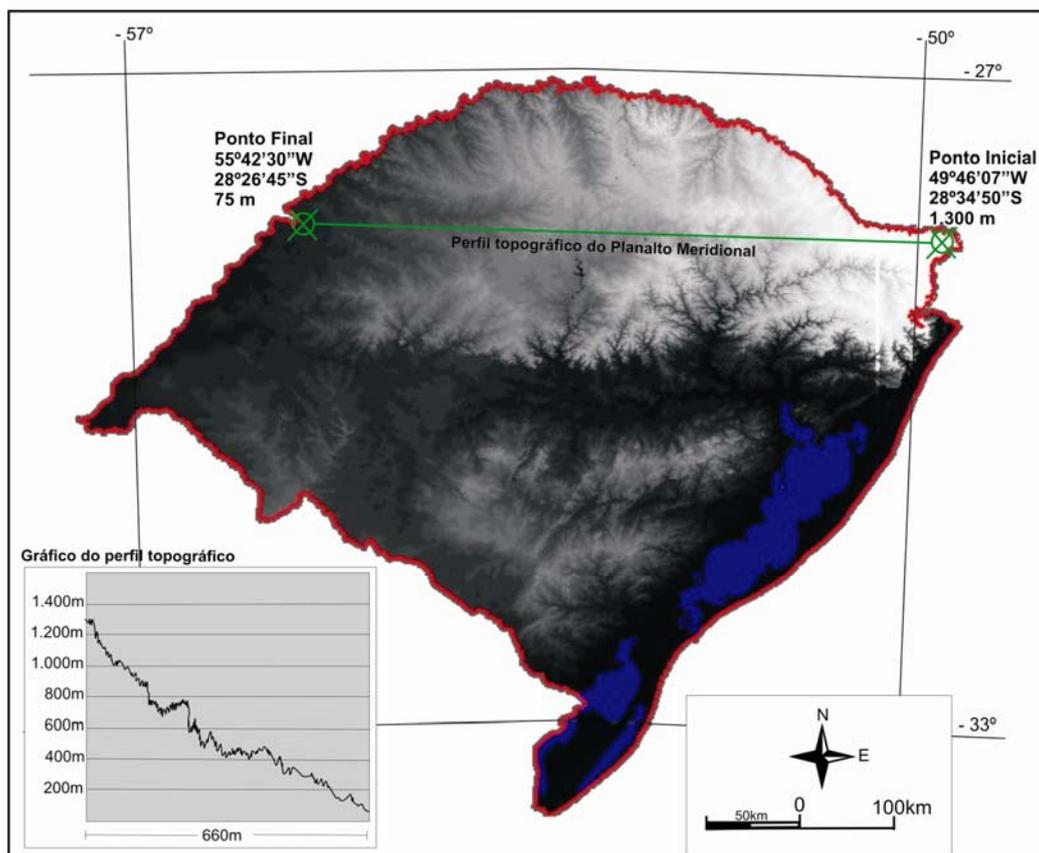


Figura 2 – Perfil Topográfico das diferentes altitudes do Planalto Meridional. Elaboração: HENDGES (2007).

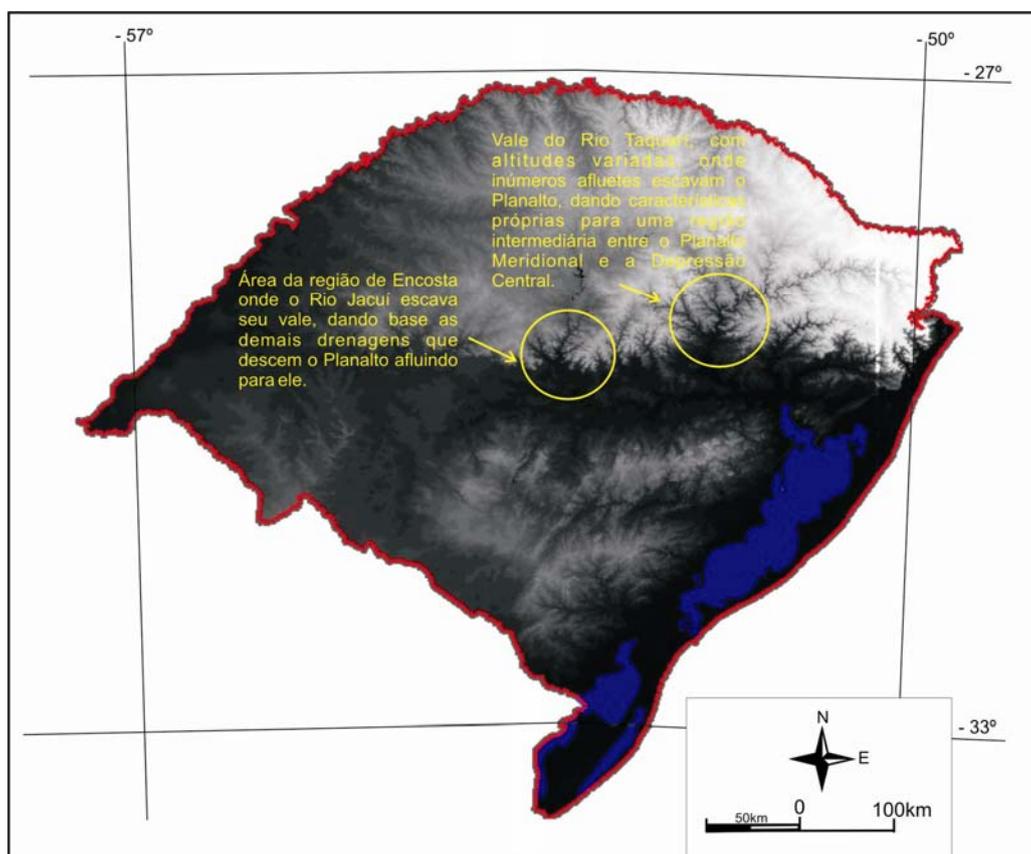


Figura 3 – Mapa dos vales dos principais rios e o seu recuo no Planalto. Elaboração: HENDGES (2007).

Encosta

Já a região da Encosta para Bernardes (1997) dispõe-se paralelamente ao importante alinhamento fluvial, constituído pelo Baixo Jacuí e pelo rio Ibicuí, que compõem o chamado eixo da Depressão Central. Para o autor é justamente o rio Jacuí que desempenha um importante papel como nível de base a partir do qual os numerosos rios que o demandam pela margem esquerda retalham profundamente a borda do Planalto. Nos seus altos cursos, estes rios seguem mansamente, coleando entre as ondulações da planura superior, mas a medida que se avolumam, vão encaixando seus meandros em vales em forma de “V”, progressivamente de forma mais acentuada. Dentre esses rios, o rio Taquari assume especial importância, como mostra a Figura 4, pois este é tão extenso quanto o Alto Jacuí, desce de uma zona cujas altitudes superiores são ainda bem elevadas e, além disso, atinge o vale principal em um ponto mais próximo do nível de base geral, representado pelo Guaíba.

Assim, o grande e profundo vale escavado pelo Taquari é responsável pelo mais expressivo recuo da borda do Planalto. A este vem somar-se os demais vales como o do Caí, do rio Pardo, por outro lado, também escavam o rebordo do planalto o Alto Jacuí e mais os da vertente do Uruguai (Ibicuí, Jaguarí e Toropi). Bernardes (1997) lembra que desta forma a Encosta é recortada de tal maneira que apenas em um sentido muito geral é que se pode aceitar o conceito de uma “Serra Contínua” que se estira retilineamente de leste a oeste. Como no Planalto, à medida que se progride para o oeste as altitudes máximas da Encosta decrescem, e naturalmente este perde cada vez mais a sua imponência, diminuindo também em largura.

Serras do Sudeste

Para Bernardes (1997, p. 24), “é difícil encontrarmos um termo morfológico para abranger em conjunto a região do sudeste rio-grandense”, complementando ainda que “o termo planalto não corresponde exatamente à configuração deste escudo, extremamente recortado. Também a expressão serras não parece muito feliz”. Concordando com Bernardes (Ibid.), Leinz (1946) explica que quanto às Serras do Sudeste se está longe de ali ter uma estrutura tão esquemática como a que apresenta o Planalto. Essa grande área atípica integra a região Turística das Guaritas – tem a forma triangular e no meio acadêmico corresponde ao também chamado “escudo cristalino”. Pelo efeito da antiga peneplanização, explica o autor, o

escudo foi se nivelando a uma superfície geral e transparece nos pequenos platôs da ordem de 400 metros de altitude, remanescentes ainda em suas bordas atuais. A hidrografia da região, aprofundando-se nos maciços, foi decompondo-os em platôs ou em imensas lombadas de perfil ligeiramente trapezoidal, sendo o rio Camaquã a principal drenagem que trabalhou erodindo esses blocos.

Depressão Central

Segundo Franco de Carvalho (1932), diferentemente do escudo cristalino, a Depressão Central compreende terrenos permo-carboníferos e triásicos subjacentes a uma possante capa de efusivas. Pela designação de Depressão Central, considera-se, no sentido amplo, toda região ao sopé do Planalto. Alguns autores como a Carta Geral do Estado do Rio Grande do Sul (1941), apresentam-na como sendo “uma grande calha que atravessa o Estado ao centro no sentido leste-oeste, escoando em direções opostas o rio Jacuí e o rio Ibicuí.” Assim o trecho mais característico da Depressão Central, contudo, é o que constitui a parte baixa da grande área entre a Encosta do Planalto e a Serra do Sudeste, cujo traço principal é o Baixo Jacuí que flui lentamente entre várzeas e baixas colinas. Assim ao entrar na região da Depressão, o rio Jacuí já está em altitudes bem baixas, e no ponto em que recebe o rio Vacacaí suas águas correm a cerca de somente 25 metros acima do nível do mar, (Figura 4).

Desta forma, o perfil suave do Jacuí mostra-se extremamente favorável à navegação fluvial. As planícies fluviais, que constituem em elemento muito comum na paisagem da Depressão Central, marginam o Baixo Jacuí e o curso inferior de seus afluentes, com solução de continuidade ganham novo sentido, norte-sul no trecho entre o rio Taquarí e o Guaíba. Deste ponto para Leste, a Depressão continua, ao pé da Encosta do Planalto, sem interrupção, até o litoral, com a mesma suavidade de formas.

Campanha do Sudoeste

Lima (1953) argumenta que, das regiões do Rio Grande do Sul a Campanha é a mais difícil de ser definida. Seus próprios limites são vagos, a Oeste em larga faixa marginal ao rio Uruguai, os terrenos basálticos do Planalto se estendem para o Sul e a transição entre as duas

regiões se faz suavemente. A única mudança sensível se verifica na queda de altitude. Os vales também se apontam de forma menos abrupta, diferenciando somente 100 metros entre o Planalto e a Coxilha. Igualmente, quando se passa da Depressão para a Campanha, contornando o escudo, não há alterações de estrutura que imprimam um traço peculiar à paisagem, portanto os terrenos sedimentares aparecem também naquela direção. Segundo Bernardes (1997, p.28), “ao contrário do que se passa nas demais regiões, a Campanha não apresenta unidade estrutural: a Leste, pequenas áreas de terrenos cristalinos rebaixados pela erosão que atuou nas bordas do escudo, a oeste as efusivas e afloramentos areníticos e ao centro os variados sedimentos das formações gonduânicas”. Assim, lembra o autor (Ibid.), ainda que no seu conjunto a Campanha apresente um complexo de fatores que lhe emprestam uma certa individualidade, do ponto de vista morfológico, porém, ela só é aceitável por um critério de exclusão.

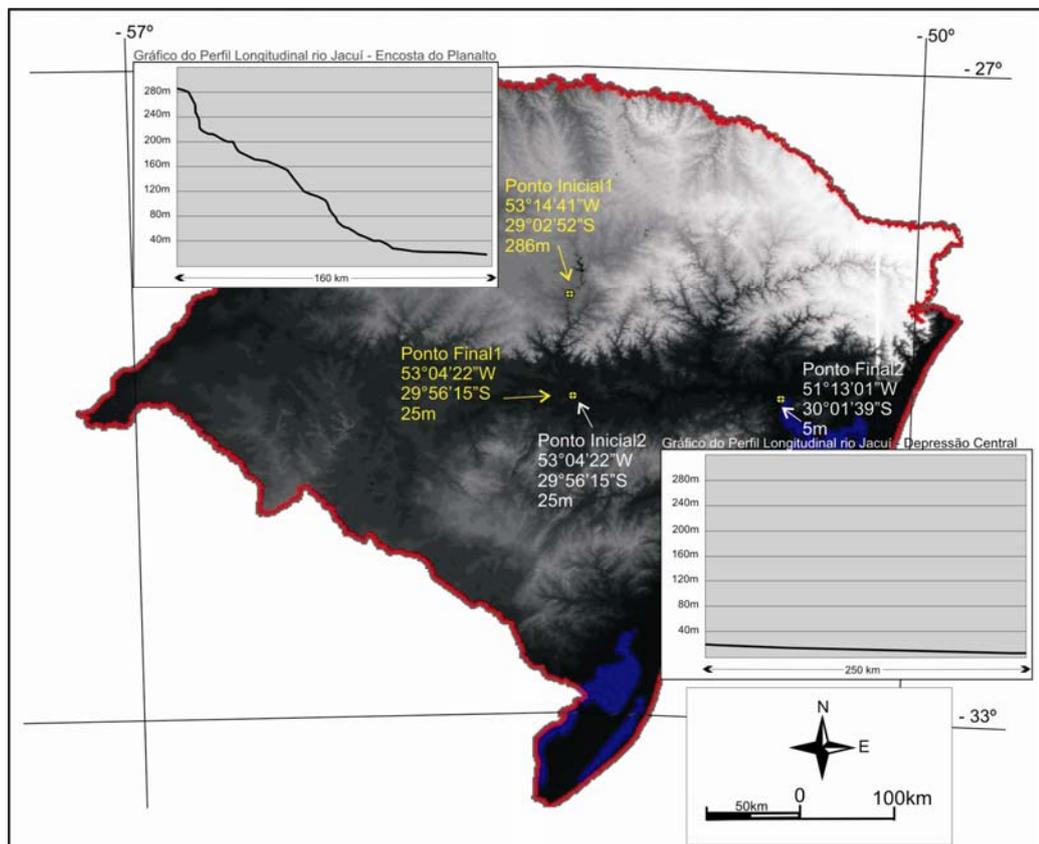


Figura 4 – Diferença dos perfis topográficos longitudinais do rio Jacuí. Elaboração: HENDGES (2007).

Estendendo-se para o sul do Estado, a região da Campanha vê-se envolvida pelos maciços das Serras do Sudeste, suas faixas sedimentares, portanto, são acompanhadas pelas características topográficas dessa região fisiográfica. Vez por outra ao longo de áreas

individualizadas da Campanha encontram-se terrenos cristalinos típicos do escudo, reduzidos a uma topografia suave como a da Campanha, que se caracterizam pelo aspecto salmourão e pela superfície pedregosa do terreno.

A Oeste por sua vez, a cobertura triásica que acompanha ainda em pontos isolados a região da Campanha apresenta suas maiores altitudes quase ao centro da mesma. Ali, o entalhamento erosivo produziu formas tabulares resultantes do seccionamento da cobertura mais resistente, de rochas basálticas ou de arenitos metamórficos. Ainda sobre a região da Campanha, Lima (1953, p. 54) diz que, “as altitudes são bem menores e a topografia assume formas muito suaves, apresentando o terreno, grandes extensões planas subhorizontais e perfis dissimétricos de verdadeiras coxilhas, intercalando vales amplos e chatos”.

Do mesmo modo como acontece ao Sul, onde ocorrem rochas cristalinas, também a Leste o solo comumente se apresenta pouco profundo. Com frequência o arenito e as efusivas afloram em lajes ou em mantos compridos e finos nos trechos planos, e sob a forma de blocos de tamanhos diversos. Muitas vezes nas fendas das lajes ou entre os blocos rochosos desenvolvem-se plantas rasteiras adaptadas à falta de água e as condições rígidas de sobrevivência, completando assim o tom áspero da paisagem. Assim, o solo raso ou “duro” que ocorre na Campanha, muito mais do que no Planalto e que é também pouco encontrado na Depressão, está intimamente ligado às diferenças de vegetação reveladas por essas regiões.

Litoral

O Litoral, região morfológica restante, é caracterizada por uma planície arenosa, de largura irregular que abrange toda extensão da costa. Esta planície é extremamente rasa, suas maiores elevações sendo constituídas por um complexo de dunas fixadas, que atingem cerca de 20 m acima do nível do mar. A parte central da planície acha-se geralmente consolidada, com solo compacto, mas arenoso, visível entre os claros do tapete de gramínea, por onde coleia uma hidrografia indecisa. Junto ao mar, porém, as praias e dunas são facilmente resolvidas pelos ventos oceânicos. Juntamente com a monotonia de tal paisagem, a feição característica do litoral do Rio Grande do Sul é a extrema regularidade da linha da costa, o que contrasta em certos pontos com as margens recortadas da lagoa dos Patos.

2.2.2 – Clima

Caracterizar e compreender a circulação atmosférica na escala regional é fundamental na individualização do clima de qualquer lugar e, portanto, indispensável na definição dos tipos de tempo, em sua sucessão habitual ou nos seus distúrbios de comportamento (SARTORI, 2003, p.28).

Sartori (2003), argumenta ainda que o clima de uma região é explicado pela sucessão dos fenômenos climáticos que são percebidos diariamente por uma população, assim as variações climáticas do tempo são definidas pelos tipos de ambiente atmosférico que acontecem continuamente em nosso cotidiano ao longo da semana, dos dias ou até mesmo das horas. Resultam da circulação atmosférica na escala zonal, regional e local, com influência, em maior ou menor grau, dos fatores geográficos como latitude, altitude, relevo, continentalidade e vegetação dentre outros.

Dentro deste contexto tem-se no Rio Grande do Sul a circulação de diferentes massas de ar ao longo do ano e a interação dessas massas de ar em maior ou menor intensidade provocam ao longo do ano quatro estações definidas com temperaturas e características próprias. Sobre isso Sartori (2003) comenta que os Sistemas Extratropicais controlam a circulação secundária regional em qualquer estação do ano e são representados pela Massa Polar Atlântica e Frente Polar Atlântica, esta última mais conhecida como Frente Fria. A participação dos Sistemas Intertropicais (origem tropical) é pequena, representados pela Massa Tropical Atlântica ou Massa Tropical Continental, Frente Quente de Nordeste e Instabilidades Tropicais, mais atuantes nas fases pré-frontais e por, no máximo, dois dias consecutivos, em qualquer época do ano. O controle dos tipos de tempo pelos sistemas de origem polar extratropical, portanto, se faz sentir em cerca de 90% dos dias do ano. Na primavera e no verão, a maior frequência é da Massa Polar Atlântica e, no outono e no inverno, é da Frente Polar Atlântica. Os 10% restantes são divididos entre os Sistemas Intertropicais com maior incidência no verão e na primavera.

Assim são características climáticas reconhecidas para o Rio Grande do Sul como normais pelas Normas Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) apud Sartori (2003):

- Nos invernos, a temperatura média do mês mais frio (julho) fica entre 10° e 15°C e a média das mínimas entre 6° e 10°C, provocadas pelas invasões periódicas das Frentes Frias;

- Nos verões, a temperatura média do mês mais quente (janeiro) é superior a 22°C, na maior parte do estado, e a média das máximas varia entre 28°C, no topo do Planalto Meridional e Planície Litorânea, e 32°C na Depressão Central, Campanha e Vale do Uruguai;

- As temperaturas médias anuais variam entre 14°C e 18°C, no topo do Planalto Meridional e Serra do Sudeste, e entre 18°C e 20°C na Depressão Central, Campanha, Vale do Uruguai e Planície Litorânea;

- As médias das máximas/ano variam entre 20°C e 28°C, enquanto as médias das mínimas/ano situam-se entre 9°C e 15°C. Essa amplitude térmica é significativa e reflete as variações de entrada de energia solar, bem como a atuação e características das massas de ar sobre a região. Por exemplo, em qualquer uma das estações do ano até mesmo no inverno, o superaquecimento da massa de ar dominante pode provocar temperaturas freqüentemente superiores a 30°C. Em contraponto, as invasões periódicas das Massas Polares determinam, na maioria dos casos, abaixamentos das temperaturas, com mínimas que podem chegar a valores negativos, responsáveis pelas geadas;

- As precipitações anuais variam entre 1.250mm no litoral e 2.250mm no Nordeste do Estado. Distribuem-se ao longo do ano, sem secas sazonais definidas. Porém, pela freqüência, novembro é o mês menos chuvoso e setembro/outubro os mais chuvosos na maior parte do estado. O número médio de dias de chuva por ano varia entre 75 e 130, distribuído eqüitativamente ao longo das estações do ano;

- A umidade relativa varia entre 70% e 85%, sendo, evidentemente, menor no verão e maior no inverno;

- Os ventos predominantes na maior parte do Rio Grande do Sul são de E e de SE, com velocidade média de 5 a 7 km/h, na Depressão Central, e de SE, no Planalto Meridional, com média de 7 a 14 km/hora. Os ventos mais fortes e quentes são do quadrante norte, com velocidades médias que oscilam de 10 a 28 km/h, (leves a moderados), no Planalto, e de 21 a 44 km/hora, (moderados a meio fortes), na Depressão, embora algumas rajadas possam atingir mais de 100 km/h em ocasiões esporádicas;

- Os ventos mais frios são os de S e SW, de leves a regulares em média, e ocorrem em situações de dominação já da frente Fria em sua trajetória mais continental, provocando o vento tipicamente regional conhecido pelos gaúchos como Minuano;

- Os nevoeiros ocorrem principalmente de maio a agosto, devido a maior umidade e são mais freqüentes na região central do Estado, com médias de 53 dias.

Quanto aos aspectos climáticos, o estado está numa zona temperada, subtropical, semi-úmida caracterizada por grandes variações térmicas. Um tipo de clima que facilita o desenvolvimento das atividades econômicas básicas do Rio Grande do Sul, a pecuária e a agricultura (MOREIRA & COSTA, 1995, p.29).

Tem-se ainda a classificação de clima de Köppen (apud SIMÕES, 1954), que classifica o clima do Rio Grande do Sul como mesotérmico de chuvas bem distribuídas, caracterizado por seus verões quentes e invernos frios na maior parte do Estado. Os invernos, porém, segundo esse autor, são mais rigorosos nas maiores altitudes encontradas na parte nordeste do Planalto, podendo apresentar médias de 9,8°C no inverno. Essa região vem a ser também a mais chuvosa com médias de até 2.000mm, fator que para Köppen (Ibid.) é explicado pelo encontro abrupto das maiores altitudes do estado com a plataforma litorânea.

Conforme Machado (1950), nas regiões mais a Oeste do Estado, as temperaturas elevam-se principalmente nas menores altitudes do Planalto Meridional, fator que, afirma o autor, é correlacionado com a maior continentalidade que provoca um aquecimento especialmente sensível no verão: “[s]e o verão é muito mais acentuado nestas áreas, o inverno não deixa de ser bastante frio, também em consequência da maior continentalidade e da facilidade de ingresso das massas frias pelo vale do Uruguai” (MACHADO, 1950, p.37).

Com menor diferenciação, também convém considerar-se aqui as outras regiões fisiográficas, onde o predomínio das chuvas de outono-inverno devidas às invasões polares, especialmente freqüentes nessa época do ano, torna-se mais acentuada nas regiões mais ao sul do Estado, principalmente nas Serras do Sudeste e no Litoral Sul. Machado (1950) lembra que “ao contrário do que se supõe, não é na Campanha e sim na região do escudo cristalino sul-rio-grandense que é menor a porcentagem de chuvas no verão e maior a sua concentração no inverno”.

A mesma abordagem é adotada por Setzer (1954), que lembra que a grande diferença entre o verão e o inverno na Campanha, que a indicação dos totais pluviométricos não revela, está muito nítida na curva da umidade relativa do ar. Na comparação entre a Campanha e as Serras do Sudeste, este autor aponta que “assim, embora se trate também de um clima de chuvas bem distribuídas, a Campanha se caracteriza por seus verões incontestavelmente mais secos, isso é devido a baixa umidade do ar presente ali” (SETZER, 1954, p.73).

2.2.3 – Vegetação

As condições climáticas assim como o relevo não parecem ter exercido influência direta sobre o povoamento e desenvolvimento de esta ou aquela região. Ainda que se observe a grande variedade de condições climáticas e se reconheça seus reflexos gerais de economia e ocupação, deve-se convir que não há uma correspondência entre as mesmas e os contrastes demográficos-sociais no Rio Grande do Sul. (BERNARDES, 1997, p.40).

Ao destacar as palavras de Bernardes acima mencionadas nota-se a grande importância da vegetação nos processos de colonização e desenvolvimento do Rio Grande do Sul. Sendo que para o Projeto RADAMBRASIL a vegetação deste Estado pode ser classificada em três grandes grupos: vegetação arbórea florestal, vegetação de estepes e formações pioneiras (ver Anexo 2). Ainda sobre a influência destes grupos de vegetação sobre a distribuição humana, Waibel (1949) comenta que:

(...) Mas, nota-se muito bem no Rio Grande do Sul, que não são as margens dos grandes rios, como ocorre no norte do Brasil, que exercem função aglutinadora da população. Nem mesmo as condições de relevo de fraca amplitude, facilitando o trabalho e permitindo a circulação desimpedida. Pelo contrário, neste Estado, as densidades maiores assinalaram-se em zonas de relevo aparentemente mais hostis. Também o clima não impôs seus padrões demográficos e econômicos correspondentes. As repentinas mudanças de paisagens culturais que se assinalam e coincidem, na verdade, com os limites das zonas de mata com o campo (WAIBEL, 1949, p.63).

Sendo para o RADAMBRASIL a zona da mata classificada como vegetação arbórea florestal e a zona de campo como vegetação de estepe, Bernardes (1997, p.42), em

consideração similar diz que “mata e campo apresentam uma distribuição tão irregular que, aparentemente, se torna difícil correlacioná-la com os outros fatores fisiográficos”. Bernardes (Ibid.) ressalta também que as duas grandes formações de vegetação citadas por Waibel, campo e floresta, por sua vez não são uniformes, e que estas apresentam características bióticas que seriam suficientes para provocar modalidades diversas da ocupação humana. Desta forma Bernardes explica que não basta estudar os dois grandes grupos de vegetação para se conhecer os aspectos sócio-econômicos que constituem o Rio Grande do Sul, pois tanto o campo quanto a mata possuem subdivisões em suas características, o que leva a diferentes formas de desenvolvimento humano.

Para Pauwels (1954), ainda não são bem conhecidos os fatores que se combinaram na determinação da distribuição atual dos tipos de vegetação no Sul do Brasil. Geralmente, segundo esse autor, os campos ocorrem onde a topografia suave corresponde a um relevo antigo. Já para as florestas, Pauwels (Ibid.) lembra que as formações florestais no Rio Grande do Sul apresentam-se sob duas formas bem distintas: as matas latifoliadas, que são florestas tropicais exclusivamente formadas por árvores de folhas laminares, e as matas de araucária, florestas em que o pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*) de folhas aciculares se encontra predominantemente associado às árvores perenes de folhas laminares, ou ainda constituindo formações quase puras com pequeno sub-bosque.

Segundo Rambo (1942), as matas ocupam mais comumente os trechos em que a erosão destruiu as formas onduladas do Planalto, assim as grandes florestas se alongam pela Encosta e pelo Planalto ao longo dos vales mais importantes. Contudo, ele ressalta que essa regra não é rígida e não encontramos mata somente em topografia acidentada. Ao viajar pelo Rio Grande do Sul, vê-se extravasar dos vales profundos e cobrir áreas contínuas de superfície ondulada. Isso é mais pontualmente visto nas regiões marginais do Alto Uruguai, Alto Jacuí e no Alto Ijuí.

A distribuição das araucárias, como lembra Waibel (1949), por sua vez, merece mais atenção, por estar estreitamente ligada às condições altimétricas, e conseqüentemente ao clima. Esse autor associou as faixas climato-botânicas do Brasil Meridional às faixas climáticas reconhecidas pelos espanhóis da América tropical. Assim, a mata latifoliada tropical, no Rio Grande do Sul, está em correspondência com o clima de *tierra templada* dos vales e patamares inferiores da Encosta, bem como os vales profundos que cortam o Planalto (rio Uruguai e baixos cursos de seus afluentes). As matas de araucárias correspondem à *tierra*

fría que abrange grande parte do planalto meridional do Brasil. Ainda segundo Waibel (Ibid.), a *tierra fría* fica acima de uma altitude de cerca de 300m no Rio Grande do Sul, 400m a 500m em Santa Catarina e 500m a 700m no Paraná. Bernardes (1997) crê, porém, que no Rio Grande do Sul esse limite pode ser acrescido ligeiramente, porque abaixo de 400m a araucária ocorre de uma forma somente muito esporádica. Ele afirma ainda que “a araucária não ocorre fora do Planalto senão sob a forma de indivíduos isolados, raquíticos e de espontaneidade duvidosa.” (BERNARDES, 1997, p.48).

Na região da Encosta bem a leste, conforme sobem os patamares é fácil perceber a mudança de uma zona da mata latifoliada para uma zona de mata de araucárias, porém já no Planalto rumando no sentido leste-oeste, em que as altitudes diminuem lentamente, não se encontra um ponto de referência na topografia para essa mudança. Na porção ocidental do Planalto, quando as altitudes geralmente são inferiores a 350m, desaparece então a floresta de predomínio da conífera e a mata latifoliada domina então em todas as áreas florestais do Planalto desde as margens do Ijuí até as margens do Rio Uruguai.

Quanto aos solos às florestas de araucárias “são considerados de qualidade agrícola inferior aos da mata latifoliada, especialmente nas regiões mais elevadas do planalto, quando os pinhais aparecem em formações mais puras, com menor frequência das madeiras de lei” (LIMA, 1953, p. 83). Continuando a descrever os solos, o autor diz que, quando começam os vales mais profundos, o solo passa de vermelho-escuro a castanho-escuro, os blocos rochosos tornam-se mais freqüentes e, muito comumente, esta diferença está ligada ao desaparecimento da araucária.

Em relação à formação de campos, Araújo (1942) diz que não existem neste Estado os campos cerrados, característicos de grande área do centro do Brasil, onde ocorre um clima de estação seca pronunciada. Para ele, o campo cerrado é a formação vegetal brasileira que em certos aspectos mais se assemelha à savana. É, portanto, errado referir-se displicentemente às “savanas Rio-grandenses”. O tipo de vegetação predominante no Estado do Rio Grande do Sul é o “campo limpo natural”, que se caracteriza pela ausência normal de árvores de qualquer espécie disseminadas pela formação. Essa ausência segundo Araújo (Ibid.), não implica, contudo, na existência de capões e matas ciliares à beira dos rios, dando um visual e colorido especial à paisagem dos campos limpos.

Em relação ao solo, os campos recobrem solos oriundos de rochas das mais variadas origens. Como lembra Lima (1953 p. 62), “aos diversos tipos de campo correspondem condições edafológicas diferentes, o que torna impossível, na realidade, referir-se a um solo de campo, no singular”. Dentre os solos mais comuns temos os de terra silicosa clara, campos de solo vermelho superficial, campos de terra roxa. Os tipos de campos, de qualquer modo que se queira distinguí-los não são igualmente apropriados para culturas e os que dão melhores pastagens não são necessariamente os que dão melhores condições agrárias. Um exemplo disso lembra Araújo (1942), são os “campos de terra roxa”, localizados no Oeste do Planalto, que são campos de segunda, porém apresentam uma fertilidade superior para o cultivo do que os “campos duros” ou de primeira.

Segundo Rambo (1942), nas Serras do Sudeste, em que a rocha frequentemente aflora nas encostas e nos altos platôs, o solo muitas vezes é quase inexistente, especialmente no alto das grandes lombadas, ocorre um tipo de campo muito diferente dos demais. A frequência de arbustos de diversas espécies resulta em paisagens que variam desde os “campos sujos” até as formações arbustivas compactas, em muitos trechos, tais arbustos crescem tanto, que podem facilmente ocultar uma rês ou um “homem d’a cavalo”. Desta forma, lembra o autor que as diversas condições de relevo dessa região, em que o solo é frequentemente rochoso nas encostas dos platôs, correspondem a uma gama muito variada de vegetação campestre, em áreas relativamente pequenas, o que não ocorre noutras partes do Estado.

No Rio Grande do Sul, ao contrário dos outros estados meridionais, os campos ocupam uma área bem maior do que as florestas. Ao sul da Depressão pode-se citar apenas duas grandes manchas florestais, localizadas ao longo da encosta das Serras do Sudeste, paralela a lagoa dos Patos. Afora esta ocorrência, existem apenas pequenos capões ou raras matas ciliares. Em certas regiões essas matas ciliares e esses capões são bastante frequentes e desenvolvidos, em casos isolados chegando a ocupar a mesma área proporcional aos campos. A essas áreas Waibel (1949) chamou de “vegetação mista de mata e campo”. Como principal área onde se encontra esta vegetação mista, pode-se citar a do território ocidental do Planalto, onde os campos são intercalados por matas interfluviais e pequenos bosques. Dentre essa vegetação são raras as araucárias e se alonga também pela região norte do Planalto.

Desta forma ao classificar as formações florestais e os diferentes tipos de estepes do Rio Grande do Sul Rambo (1942) afirma que mesmo quando os campos se apresentam em largas áreas contínuas, seja sob a forma de capões e matas ciliares, o limite original da mata e

do campo sempre é de uma nitidez extraordinária. Ainda segundo o autor, ao andar pelo Rio Grande não encontrar-se-á por via de regra uma área de transição, quer no porte, quer no espaçamento dos indivíduos arbóreos, mas sim à distância poder-se-á observar que a borda da mata denuncia-se pelo contraste súbito entre o verde escuro das árvores e o verde claro do campo, o que caracteriza a ausência de uma faixa de transição e a presença apenas de uma linha divisória (Ibid.).

2.2.4 – Solos

Segundo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos realizado pela EMBRAPA em 2006, as informações sobre a classificação dos tipos de solos atualmente disponíveis no Rio Grande do Sul, com exceção de algumas áreas restritas onde foram feitos levantamentos mais detalhados, restringem-se a relatórios de levantamentos feitos o nível de reconhecimento. Todavia, diz Ranzani (1969), esses levantamentos de solos são importantes para a realização de zoneamentos agroecológicos e previsões quanto à utilização e produtividade das terras de uma região sob determinadas condições de manejo.

A partir de um levantamento, Streck et al. (2002) afirmam que o Rio Grande do Sul apresenta uma grande variedade de tipos de solos como consequência da complexidade da formação geológica e da ação climática existente (ver o mapa dos tipos de solos no Anexo 3). Dentro da grande subdivisão destes tipos, os autores destacam:

- *Alissolos*: solos ácidos com altos teores de alumínio, baixa fertilidade química e elevada toxidez por alumínio, além de baixas reservas de nutrientes para as plantas. Ocorrem nas diversas formas de relevo, principalmente na Depressão Central, Campanha e na região da Encosta do Planalto Meridional.
- *Argissolos*: solos que possuem um horizonte subsuperficial argiloso e geralmente são profundos e bem drenados. Ocorrem em relevos suaves e ondulados na Depressão Central, Campanha e na Encosta do Planalto Meridional, e podem apresentar limitações químicas devido à baixa fertilidade natural, forte acidez e alta saturação por alumínio, sendo também de alta suscetibilidade à erosão e degradação. Podem ser usados com culturas anuais e campo nativo,

preferencialmente com plantio direto e em rotação de culturas com plantas protetoras e recuperadoras do solo durante o inverno.

- *Cambissolos*: solos rasos a profundos, em processo de transformação, e em geral ocorrem em áreas de maior altitude com baixas temperaturas. Apresentam opções para o uso com pastagem nativa e silvicultura, como na região dos Campos de Cima da Serra. São de forte acidez e baixa disponibilidade de nutrientes, requerendo práticas conservacionistas intensivas e aplicação de elevados níveis de corretivos e fertilizantes.
- *Chernossolos*: solos escuros no horizonte A, devido a presença de material orgânico. Possuem alta fertilidade química e podem ser rasos ou profundos. Podem ser aproveitados com maior intensidade dependendo do relevo a que estão associados. As várzeas dos rios, por exemplo, apresentam maior potencial para culturas anuais, especialmente o arroz irrigado. Ocorrem no vale do Rio Uruguai e na Encosta inferior do Planalto Meridional.
- *Gleissolos*: solos pouco profundos, mal drenados de cor acinzentada ou preta e ocorrem em depressões com baixa declividade. Podem ser utilizados para cultivo do arroz irrigado e, quando drenados, para culturas anuais como milho, soja, feijão e pastagens.
- *Latosolos*: solos profundos, bem drenados, ácidos e de baixa fertilidade, podendo apresentar toxidez por alumínio para as plantas. Entretanto, a profundidade do solo associada ao relevo suave os torna de boa aptidão agrícola, desde que corrigida a fertilidade química, podendo ser utilizados com culturas de inverno e de verão. Ocorrem, predominantemente, no norte do Estado na área do Planalto Meridional.
- *Luvissolos*: solos pouco profundos com acumulação subsuperficial de argila. Apesar da carência de fósforo, apresentam boa fertilidade natural dependendo da profundidade. Ocorrem com mais frequência na região da Campanha nos costados do Rio Uruguai.
- *Neossolos*: solos pouco desenvolvidos e normalmente rasos, de formação muito recente, encontrados nas mais diversas condições de relevo e drenagem. O uso está restrito ao relevo e a baixa profundidade, exigindo práticas conservacionistas

severas. Em geral as áreas de relevo suave ondulado e ondulado podem ser utilizadas para pastagens permanentes e nas regiões de relevo forte ondulado para reflorestamento e fruticultura. As áreas muito íngremes devem ser reservadas para preservação permanente.

- *Nitossolos*: solos profundos com aparência similar aos latossolos, diferindo destes por apresentar um horizonte B com uma estrutura mais desenvolvida com revestimento brilhante (cerosidade). São ácidos com predomínio de caulinita e óxidos de ferro na sua constituição. Em função da profundidade, boa drenagem, porosidade, estrutura e condições do relevo, possuem geralmente boa aptidão agrícola. Podem ser utilizados para cultivos de inverno e de verão.
- *Organossolos*: solos formados por material orgânico em grau variável de decomposição, acumulados em ambientes mal drenados, em depressões e nas proximidades das lagoas e lagunas. Em geral tem baixo uso agrícola, pois estão sujeitos a mudanças significativas em suas características, tendendo a desaparecer.
- *Planossolos*: solos localizados em áreas de relevo suave, ondulados ou planos e mal drenados. Normalmente aparecem nas margens dos rios e lagoas como na Depressão Central e junto a Planície Costeira. São solos aptos para o cultivo de arroz irrigado e, com sistemas de drenagem eficientes, também podem ser cultivados com milho, soja e pastagens.
- *Plintossolos*: solos de relevo plano ou pouco ondulado, com drenagem imperfeita e, por isso, apresentam limitações para cultivos perenes. Em períodos chuvosos ocorre elevação do lençol freático, saturando o solo e impedindo seu uso com cultivos anuais e pastagens cultivadas.
- *Vertissolos*: solos de áreas planas ou pouco onduladas, mal drenados e pouco profundos. Ocorrem na região da Campanha e seu uso é facilitado com a umidade, pois são solos muito duros quando secos. Apresentam boa fertilidade e são próprios para pastagem natural, podendo ser utilizados também com culturas de verão, desde que sem adensamento de uso.

Segundo Lepsch (1983), o solo gaúcho possui bons índices de fertilidade, apesar de ocorrer alguns problemas de acidez em áreas isoladas, um problema fácil de ser solucionado. Lepsch menciona ainda que a região das Serras do Sudeste é constituída por solos arqueanos muito antigos. Nesta parte do Estado, localizam-se as minas de cobre, estanho, ferro, chumbo e ouro. As jazidas de carvão localizam-se a oeste desta área e as abundantes jazidas de calcário que servem para a calagem do solo e para a fabricação de cimento e cal se localizam ao norte do escudo. Já por sua vez, no norte do Estado existem algumas fontes de água mineral, bem como pedras semi-preciosas.

2.3 – Geoprocessamento

O geoprocessamento não é considerado uma ciência e sim um conjunto de técnicas em prol desta. Portanto, o geoprocessamento é a tecnologia que abrange o conjunto de procedimentos de entrada, manipulação, armazenamento e análise de dados espacialmente referenciados². Em outras palavras, as técnicas de geoprocessamento compreendem atividades de aquisição, tratamento e análise de dados sobre a Terra em uma escala que seja possível unir um elevado número de informações. Para conseguir atingir um tratamento e análise de dados satisfatórios o geoprocessamento incorpora tecnologias de última geração, envolvendo desde satélites de observação da Terra, técnicas de mensuração por sistemas de posicionamento, até sofisticados sistemas e equipamentos de informática.

Para Silva (1999), quando trata de questões espaciais, existem três classes distintas de sistemas ou programas computacionais que são utilizados pelo geoprocessamento: Sistemas de processamento digital de imagens; Sistemas de Informações Geográficas (SIG) comum a várias informações; Sistemas Especialistas que utilizam técnicas de inteligência artificial. Para a realização deste trabalho foram usadas estas três classes, em etapas distintas de aquisição, manipulação e geração de informações, descritas no Capítulo 3, referente à metodologia.

² Conceito em “Sistemas de Informações Geográficas” Dicionário Ilustrado. Ver TEIXEIRA et al. (1997, p.121).

Segundo Câmara & Davis (2001), o geoprocessamento é uma

...disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (GIS³), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados geo-referenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos (CÂMARA & DAVIS., 2001, p. 01).

Segundo a classificação feita por Goodchild (1992), as aplicações do geoprocessamento envolvem dois grupos de dados espaciais: os geo-campos e os geo-objetos. Os geo-campos são variações espaciais contínuas usadas para representar dados distribuídos espacialmente (CÂMARA, 1995), tais como mapas de uso da terra, mapas de solo, mapas de dados meteorológicos espacializados. Os geo-campos não possuem identificação e nem podem ser individualizados, pois expressam atributos pertencentes a alguma classe identificadora. Assim, os geo-campos correspondem na prática a dados temáticos, imagens de Sensoriamento Remoto, modelos numéricos de terreno, etc. Já os geo-objetos são dados individualizáveis que descrevem objetos do mundo real em termos do seu posicionamento em relação a um sistema de coordenadas, de seus atributos e das relações topológicas existentes (CÂMARA, 1995), essa individualização é importante na definição de uma estrutura de relacionamentos espaciais (vizinhança, proximidade, pertinência) que podem se estabelecer entre os mais variados objetos geográficos. Os objetos geográficos podem estar associados a várias representações gráficas (polígonos, pontos etc.) e como alguns exemplos de geo-objetos pode-se mencionar municípios, propriedades rurais, talhões agrícolas dentre outros.

2.4 – Sistemas de informações geográficas

³ O autor empregou a sigla GIS (do inglês *Geographic Information System*) para se referir a SIG por julgar o uso consagrado deste jargão entre os pesquisadores desta área do conhecimento.

Os geo-objetos e os geo-campos mencionados anteriormente, são definidos e trabalhados em ferramentas computacionais utilizadas em geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) sem as quais a geração das informações e os mapas do geoprocessamento não seriam plausíveis. Um SIG é, portanto, um aplicativo especializado para aquisição, edição, armazenamento, integração, análise e saída de dados espacialmente distribuídos (BAILEY & GATRELL, 1995). Neste sentido, (CÂMARA & MEDEIROS, 1998) diz que além de promoverem a integração entre as mais diversas informações geográficas, os SIGs possuem a capacidade de analisar, de forma espacial, uma grande variedade de dados em amplas regiões geográficas, para a extração de novas informações pertinentes à tomada de decisões, permitindo que a ação de cada fator isolado e, em conjunto, seja avaliada rapidamente.

Segundo Star & Estes (1990), os cinco elementos essenciais que um SIG deve conter são:

- aquisição de dados: é o processo de identificação e coleta dos dados requeridos para a aplicação em questão, podendo ser através de imagens orbitais (satélite), fotos aéreas, mapas e outros.
- pré-processamento: envolve a manipulação dos dados de vários modos para que possam ser introduzidos no SIG. Duas das principais tarefas do pré-processamento envolvem a conversão de formato de dados e a identificação da localização de objetos nos dados originais de modo sistemático.
- administração de dados: as funções de administração de dados governam a criação e o acesso à base de dados. Estas funções produzem métodos consistentes para entrada, atualização, cancelamento e recuperação de dados.
- manipulação e análise: manipulação e análise são, muitas vezes, a parte do sistema que mais interessa ao usuário. Neste módulo do sistema estão os operadores analíticos que trabalham com o conteúdo da base de dados para derivar novas informações.
- geração de produto: é a fase final onde o produto de saída do SIG é criado. Este produto final pode ser: relatórios estatísticos, mapas, gráficos de vários tipos, dentre outros.

Em termos mais simples Aronoff (1989) coloca que um SIG descreve os objetos do mundo real em termos de dois componentes fundamentais: suas coordenadas e seus atributos. De acordo com Câmara (1995), estes atributos, chamados por este de informações geográficas, podem ser distinguidas nas categorias temática, numérica e imagem. A primeira compreende informações qualitativas referentes a um tema específico, a segunda compreende valores que descrevem aspectos do mundo real, segundo regras pré-estabelecidas, e a terceira consiste em representações da medida da radiação eletromagnética emitida/refletida por uma área da superfície terrestre, realizada por um sensor remoto.

Em um SIG, as informações geográficas são representadas pelos formatos matricial ou vetorial, de acordo com o mundo real permitindo através desta representação as mais diversas associações entre as componentes de localização espacial e atributos geográficos. (Figura 5).

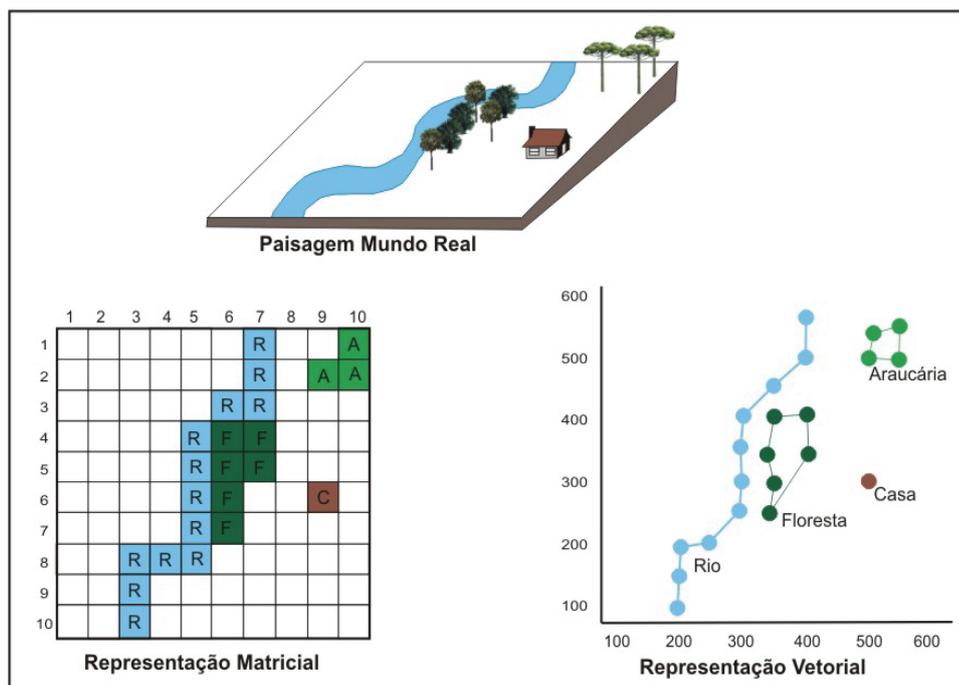


Figura 5 – Representação Matricial e Vetorial dos elementos a paisagem. Fonte: Aronoff (1989), adaptado por HENDGES (2007).

Na representação matricial, o espaço geográfico é tratado como uma superfície cartesiana plana, consistindo numa matriz de células, onde cada célula é referenciada por

números de linhas e colunas e contêm um valor representativo do atributo do objeto mapeado (C, R, F e A). A resolução ou escala da matriz é dada pela relação entre a dimensão de sua célula e sua dimensão na superfície do terreno. Já a representação vetorial permite representar um objeto de interesse ou uma área que mereça ser identificada, através das três entidades geográficas passíveis de edição, que são os pontos (casa), as linhas (rio) e os polígonos (floresta e araucária) que representam as superfícies de áreas. Estas entidades geralmente são associadas a atributos correspondentes aos objetos que estes representam no mundo real.

Conforme Aronoff (1989), quatro fatores determinam o sucesso na utilização de um SIG: o conjunto de informações selecionadas, a organização dos dados, o modelo conceitual elaborado e o critério de análise: o conjunto de dados utilizado em SIG consiste necessariamente de abstrações da realidade, sobre as quais se desenvolve o raciocínio de planejamento, devendo ser coletadas apenas as informações mais relevantes ao projeto; a organização da base de dados constitui um sistema simples que permite a entrada, a armazenagem e a recuperação dos dados; o modelo conceitual consiste em abstrações, generalizações e aproximações que representam um objeto ou fenômeno que existe no mundo real.

Segundo Burrough & Mcdonnell (1998), uma das principais vantagens do SIG é a facilidade que oferece ao estudo de dados que demandam interação entre análises estatísticas e mapeamento. Já para a possibilidade de caracterizar as mudanças da paisagem é importante a possibilidade de experimentar combinações com diferentes representações gráficas, além da facilidade na produção de mapas e sua atualização e correção, devido os dados estarem armazenados em formato digital. Já para Maguire et al. (1991), o geoprocessamento tem o propósito de:

A integração de informações geográficas em SIG consiste em agrupar e/ou transformar a informação espacializada proveniente de diversas fontes por meio da álgebra de mapas, ou seja, na utilização de um conjunto de operadores para manipular dados de geo-campo. Desta maneira, as informações geográficas são reunidas para que se possa: 1) determinar quais os tipos de feições que ocorrem num dado local; 2) procurar feições que possuam determinadas características; 3) monitorar as feições que variam com o tempo (MAGUIRE et al., 1991, p. 47).

Para a localização e a determinação dos tipos e das características, bem como o acompanhamento das eventuais mudanças das feições acima mencionadas o principal método é o processamento de imagens digitais (representação matricial) de sensores remotos, assim

Crosta (1993, p. 18) diz que “as imagens do Sensoriamento Remoto são uma das principais fontes de dados para o SIG.”

2.5 – Sensoriamento Remoto

A limitação da visão humana aliada às dificuldades de localização e registro do observador em relação ao objeto estudado fez o homem desenvolver equipamentos artificiais que possam receber, quantificar e fornecer informações sobre os objetos de estudo. O Sensoriamento Remoto é, portanto, a ciência que planeja e projeta esses equipamentos, com o objetivo de identificar alvos presentes no ambiente terrestre por meio do estudo entre a relação da radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em suas diversas manifestações.

Assim, Novo (1989) define Sensoriamento Remoto como sendo a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, etc., com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações, sem o contato físico direto. De acordo com Steffen et al. (apud FRANZONI, 1993), Sensoriamento Remoto é um conjunto de atividades onde o objetivo é caracterizar as propriedades de alvos naturais, através da detecção, registro e análise do fluxo de energia radiante, por eles refletido ou emitido. Assim, o Sensoriamento Remoto é a ciência e o estudo que desenvolvem as tecnologias que permitem a aquisição de informações sobre objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico com eles.

A cada dia as técnicas de Sensoriamento Remoto ficam mais sofisticadas, ampliando sua aplicabilidade a uma grande gama de problemas ecológicos, tecnológicos, urbanos e de recursos naturais, tornando-se uma das mais importantes técnicas de aquisição de informações para o geoprocessamento (CARVALHO et al., 1993).

Lillesand & Kiefer (1994) definem a importância do Sensoriamento Remoto, o que vem a justificar na plenitude o seu uso pela presente pesquisa, como uma ferramenta do geoprocessamento. Então, segundo Lillesand & Kiefer (1994), o Sensoriamento Remoto além de facilitar a observação de um objeto, sem que necessariamente se precise estar em contato com este, apresenta a vantagem de facilitar a observação de processos dinâmicos pela repetitividade própria dos sistemas orbitais, constituindo-se desta maneira numa ferramenta importante nas tarefas de levantamento e monitoramento de recursos naturais do meio físico. Merece consideração também, a existência de um acervo de dados coletados no passado, o que possibilita a realização de pesquisas de acontecimentos passados. Estudos de mudança no uso do solo e cobertura vegetal são clássicos com o auxílio desta ferramenta, a qual tem se mostrado particularmente útil e acurada nestas aplicações.

A Figura 6 apresenta as fases de aquisição de informações através do Sensoriamento Remoto, exemplificando os passos que esta informação normalmente transcorre até se transformar num mapa, onde: A) fonte de radiação; B) atmosfera; C) alvo; D) sensor; E) transmissão e recepção; F) Preprocessamento e disponibilização; G) tratamento, interpretação e geração de mapa temático.

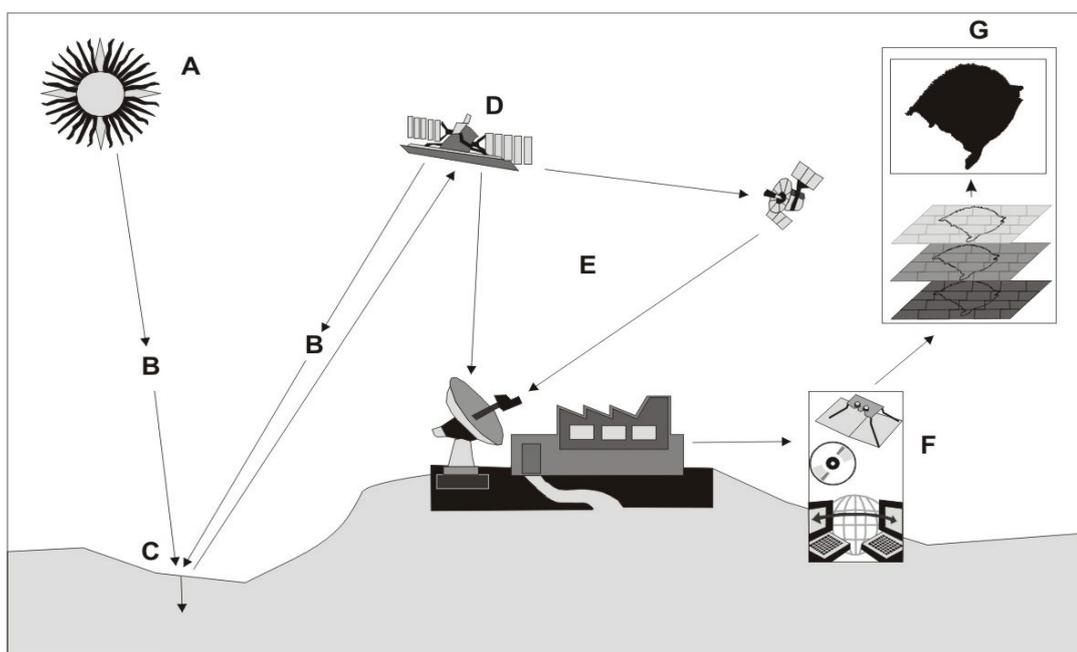


Figura 6 – Fases da aquisição de dados pelo Sensoriamento Remoto. Fonte: Novo (1989), adaptado por HENDGES (2007).

Com o desenvolvimento tecnológico, as bandas espectrais (que permitem ao sensor registrar a refletância do alvo em diferentes comprimentos de onda), puderam ser ampliadas, sendo possível assim à sofisticação dos equipamentos (SILVA, 1995), dentre os quais o principal é o sensor. Segundo Novo (1989), sensor pode ser definido como qualquer equipamento capaz de transformar alguma forma de energia, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações. Os diferentes sistemas sensores são caracterizados por sua resolução, definida como a medida da habilidade que o sensor possui em discriminar entre respostas espectralmente semelhantes e espacialmente próximas.

Existem basicamente dois tipos de sensores, os chamados passivos, que necessitam da fonte de energia solar para conseguir obter a informação do alvo, e os sensores ativos (geralmente com tecnologia de radar), que não necessitam do sol para o imageamento do alvo. Estes sensores na sua grande maioria estão a bordo de plataformas orbitais, porém também podem ser aerotransportados por aviões, helicópteros, aeromodelos, etc. Quanto às capacidades imageadoras, os sensores são classificados conforme as resoluções que estes apresentam. São exemplos de tipos de resolução que definem um sensor: - *a resolução espacial*, que mede a menor separação linear ou angular entre dois objetos da superfície terrestre; - *a resolução espectral* define a medida da largura do comprimento de onda e o número de bandas espectrais, nas quais o sensor opera; - *a resolução temporal*, que se refere ao intervalo de tempo entre a aquisição de duas imagens de uma mesma área (NOVO, 1989). A Figura 11 mostra as diferenças quanto a resolução radiométrica e espacial dos sensores remotos.

Em outras palavras, Moreira (2003) define que os sensores remotos são sistemas fotográficos ou óptico-eletrônicos capazes de detectar e registrar, sob a forma de imagens ou não, o fluxo de energia radiante refletido ou emitido por objetos distantes. Mas todos os materiais e fenômenos naturais absorvem, transmitem, refletem e emitem seletivamente radiação eletromagnética. O desenvolvimento atual dos sensores permite medir com razoável precisão e remotamente, as propriedades espectrais destes materiais e fenômenos.

A metodologia do Sensoriamento Remoto pode ser dividida em duas fases: aquisição e análise. A fase de aquisição está relacionada com o processo de detecção e registro da informação sendo assim de responsabilidade quase que exclusiva da calibração do sensor que

fará o registro da informação captada do alvo. A segunda fase, que é a da análise desta informação, é constituída do tratamento e da interpretação dos dados obtidos.

Segundo Novo (1989), para extrair informações a partir de dados de Sensoriamento Remoto, é fundamental o conhecimento de técnicas de processamento digital de imagens que trata justamente das técnicas utilizadas para corrigir, identificar, extrair, condensar e realçar a informação de interesse para determinados fins, a partir de uma enorme quantidade de dados que usualmente compõem essas imagens. A seguir serão descritas duas das principais técnicas de processamento digital de imagens (PDI) que serão utilizadas no tratamento das imagens de satélite desta presente pesquisa.

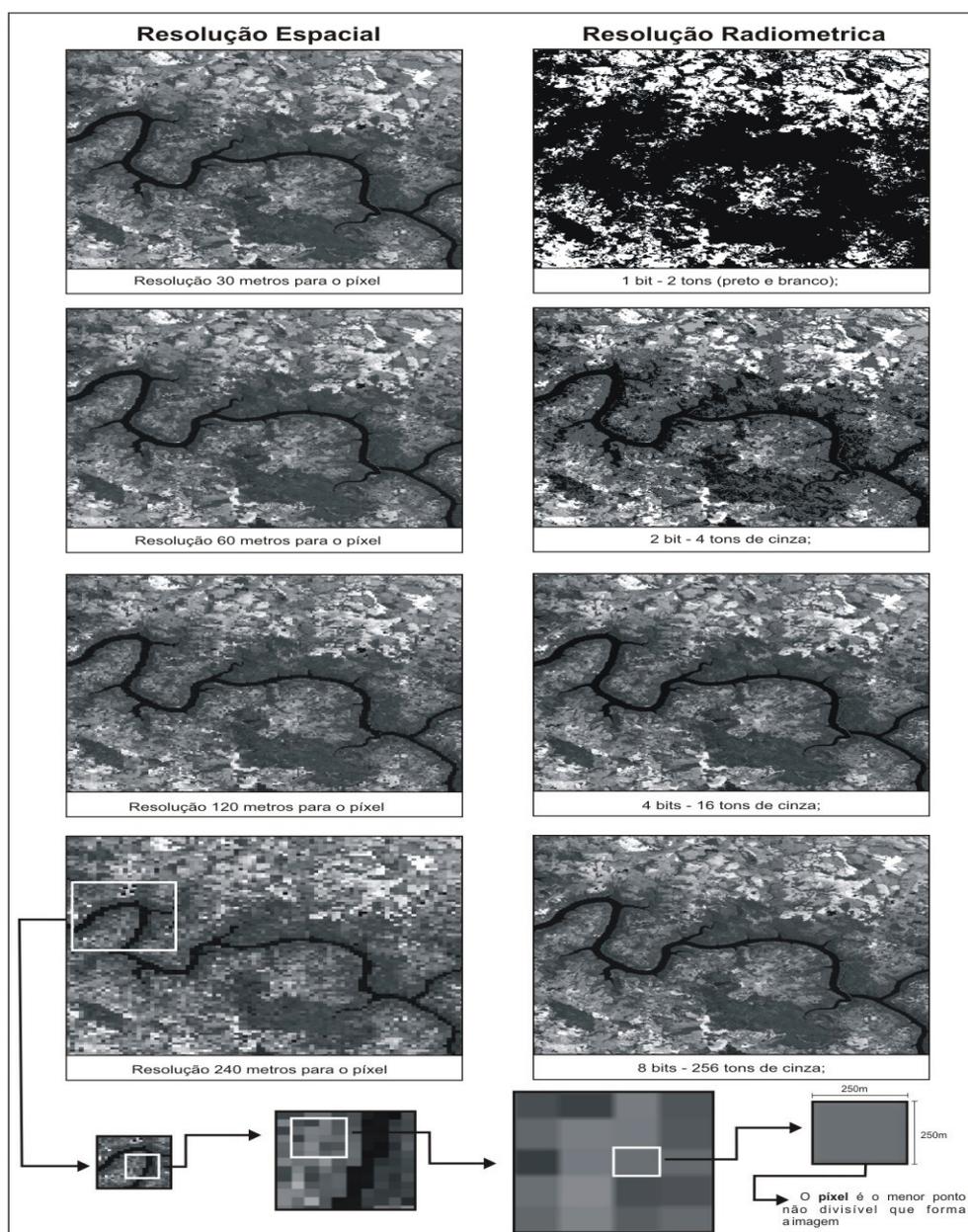


Figura 7 – Exemplos de imagens com diferentes resoluções. Elaboração: HENDGES (2007).

2.5.1 – Técnicas do Sensoriamento Remoto

2.5.1.1 – Correção geométrica

A correção geométrica que é feita nas imagens de Sensoriamento Remoto devido ao efeito da posição e erros de atitude do sistema sensor por ocasião da aquisição da imagem (Figura 8).

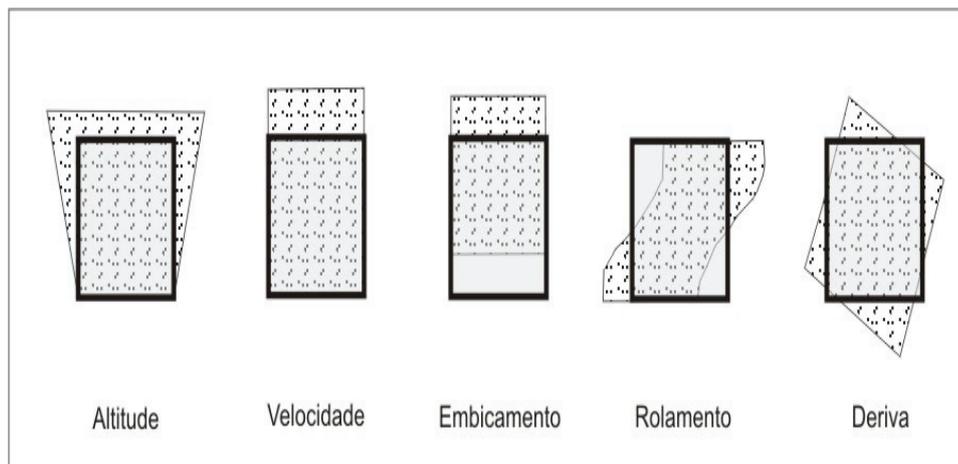


Figura 8 – Erros e distorções comuns em dados de sensores remotos elevados, cena sem correção (linha fina) e a cena corrigida (linha grossa). Fonte: RICHARDS (1986), adaptado por HENDGES (2007).

Segundo Richards (1986), as fontes de distorções geométricas podem ser relacionadas a diversos fatores sendo que os três principais são: rotação da terra durante o período de imageamento, variações na altitude e velocidade de deslocamento do sensor e grande campo de visada de alguns sensores (principalmente orbitais).

De acordo com Eastman (1998), a função dos programas de correção geométrica é reorganizar os "pixels" da imagem em relação a um determinado sistema de projeção cartográfica. Esta técnica pode também ser aplicada quando há interesse de trabalhar com imagens de datas diferentes ou com produtos originados de sensores diferentes. Para propósitos de mapeamento é essencial que as imagens de Sensoriamento Remoto sejam georreferenciadas com exatidão ao mapa proposto como base. Isso é necessário para que as informações extraídas das imagens possam ser integradas juntamente com outros dados georreferenciados relativos à área em estudo.

2.5.1.2 – Classificação de imagens

Para Schowengerdt (1997) classificação é o processo de extração de informação a partir de padrões encontrados nas imagens com características semelhantes de objetos homogêneos. A identificação desses padrões é possível devido aos diferentes objetos da superfície terrestre apresentarem um comportamento espectral específico, podendo assim ser agrupados em classes temáticas e posteriormente quantificados. As classes temáticas são agrupamentos de padrões e objetos homogêneos, segundo os atributos de interesse da classificação. As técnicas de classificação digital implicam na implementação de um processo de decisão para que o computador possa atribuir certo conjunto de pontos da imagem (objetos) a uma determinada classe.

Os processos de classificação são fundamentais para quaisquer projetos de mapeamento, pois a classificação temática reduz o número de objetos que deverão ser, posteriormente, manipulados, pois estes estarão agrupados em classes de análise (CONGALTON & GREEN, 1999). Para Moreira (2003) o sucesso da classificação supervisionada depende da interpretação da imagem que definirá o número de classes que agruparão os diferentes objetos imageados. Assim o autor diz que diz que:

a interpretação de imagens orbitais ou foto-interpretação depende do conhecimento do analista ou foto-intérprete e consiste em extrair informações de alvos da superfície terrestre, com base nas suas respostas espectrais para realizar a interpretação de imagens são necessários alguns elementos, tais como: textura, forma, tamanho, tonalidade ou cor etc., que servem de auxílio para distinguir um objeto dos demais dentro de uma cena específica. Além dos elementos de interpretação de imagens e dos dados relacionados ao sensor utilizado, o intérprete de imagens deve empregar dados auxiliares como mapas temáticos, sensores, fotografias para apurar ao máximo os resultados da interpretação da imagem (MOREIRA, 2003, p. 32).

Para realizar uma boa interpretação e posterior classificação de imagens é necessário conhecer o objeto que se quer agrupar e de como estes aparecem na imagem. Alguns elementos norteiam esse conhecimento como o padrão, a tonalidade ou cor, a forma, o tamanho, a textura e localização no contexto das feições. Estes elementos organizados formam a chamada “chave de interpretação”. Estas chaves de interpretação são importantes para se distinguir quais feições na imagem pertencem a esta ou aquela classe, bem como quais

classes existem em um local específico. O Quadro 1 agrupa os principais elementos indicados em uma chave de interpretação.

Padrão	Refere-se ao arranjo espacial de determinados objetos em uma superfície. Dessa maneira, uma área de reflorestamento pode ser distinguida de uma área de floresta nativa pelo espaçamento e distribuição das árvores na superfície.
Tonalidade e Cor	Numa foto ou numa imagem de satélite, as diferentes quantidades de energia refletidas pelos alvos são associadas a diferentes tonalidades, ou seja, quando o objeto reflete muita energia, a quantidade recebida pelo sensor é grande, diferenciando-o da tonalidade do objeto que absorve muita energia.
Forma	Pode-se considerar a forma como uma expressão topográfica ou de contornos e é tão importante que alguns objetos são identificados apenas por este elemento. As áreas de cultivo florestal por vezes se diferenciam pelas suas formas geométricas, mesmo que as espécies correspondam as mesmas da floresta nativa.
Tamanho	Em interpretação de imagens é comum utilizar o tamanho dos alvos como critério de identificação. Um exemplo prático ocorre na diferenciação de matas de galeria (disposição tênue e comprida) das demais florestas (áreas avolumadas).
Textura	Embora com muitas limitações, a textura é definida como grosseira, fina, áspera, aveludada, etc. Em muitos casos a textura está associada ao Padrão, primeiro item citado.
Localização	Diz respeito ao local específico onde uma feição está situada e seu relacionamento com os demais. Este atributo pode ser utilizado para identificar um tipo específico de bioma em uma determinada localização geográfica.

Quadro 1 – Chave de interpretação, ferramenta essencial para a classificação supervisionada de padrões de imagens. Fonte: Florenzano (2002), adaptado por HENDGES (2007).

Segundo Novo (1989), os métodos de classificação estão basicamente divididos em três conjuntos: a classificação supervisionada, a não-supervisionada e a híbrida. A classificação supervisionada, que será utilizada nesta pesquisa para agrupar os padrões de imagens semelhantes em classes de uso da terra, o classificador orienta sua busca de classes a partir de amostras de treinamento feitas anteriormente com as classes de interesse da cena. Na classificação não supervisionada, o classificador separa classes espectralmente semelhantes pertinentes à cena. A híbrida é a classificação em que o analista utiliza uma classificação não

supervisionada como base para a seleção de elementos amostrais de treinamento para realizar a classificação supervisionada.

Os algoritmos classificadores do método de classificação supervisionada, em nível de pixel, mais utilizados são os denominados de mínima distância e máxima verossimilhança. Estes associam sempre os pixels a determinada categoria por meio do grau de associação Booleano (0 ou 1). No entanto, estes classificadores apresentam valores intermediários entre 0 e 1, que permite flexibilidade à classificação, ou seja, observar as incertezas. Tais incertezas residem, por exemplo, nos níveis de cinza inerentes aos pixels das imagens, porém levam em conta os níveis de cinza dos pixels adjacentes que por mais que estes se diferenciem, podem pertencer a uma mesma feição no terreno. Logo, o agrupamento de pixels adjacentes permite a determinação de parâmetros de forma e textura e conseqüentemente, relaciona os objetos as respectivas feições do terreno (BAATZ & SCHÄPE , 2001).

Nesse sentido ainda, Baatz & Schäpe (2001), exemplificam dizendo que a regra dos algoritmos de mínima distância e máxima verossimilhança representa o agrupamento por meio da relação entre os valores estipulados pelas áreas de treinamento e os valores de média espectral do objeto (valor do pixel mais o valor de seus vizinhos). Veja a Figura 9.

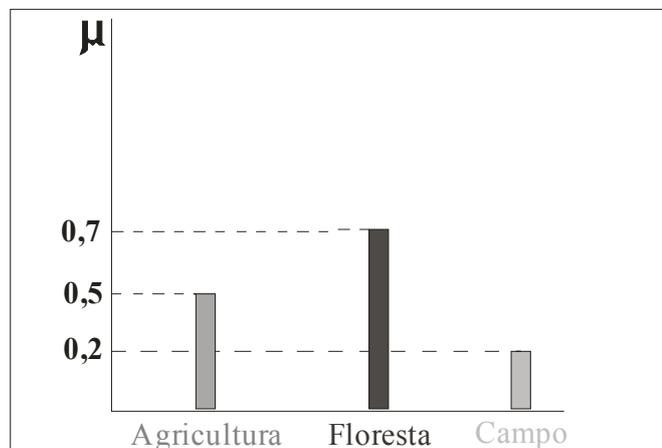


Figura 9 – Exemplos de graus de pertinência no agrupamento por médias de algoritmos classificadores supervisionados. Fonte Baatz & Schäpe (2001), adaptado por HENDGES (2007).

A Figura 13 exemplifica que um objeto pode estar associado a várias classes com diferentes graus de pertinência. O grau de pertinência $\mu_{(floresta)} = 0,7$, exprime a maior possibilidade do objeto pertencer à classe solo exposto, logo a decisão adequada pelo classificador será o de enquadrar o objeto (pixel) como membro da classe solo_exposto,

embora existam evidências menores a favor de outras classes como agricultura (0,5) e campo (0,2).

2.5.1.3 – Avaliação da classificação

Segundo Congalton & Green. (1999) normalmente o resultado de uma classificação supervisionada é avaliado por uma matriz de confusão ou de erros, sobre as médias obtidas na correlação e diferenciação entre as diferentes áreas de treinamento e as médias de pixels da imagem. Essa matriz serve para verificar estatisticamente a qualidade das amostras e dos dados contidos no mapa classificado. Normalmente, as amostras de treinamento são selecionadas a partir do conhecimento prévio que o analista tem da cena. Para Novo (1989) esse conhecimento pode ser teórico (conhecimento do comportamento espectral dos alvos) ou prático (adquirido em visitas ao campo, em análises de imagens orbitais). Novo conclui que é importante na seleção dos elementos amostrais que seu tamanho seja grande o suficiente para permitir a estimativa das características espectrais da classe a ser mapeada.

Magalhães & Lima (2004), afirmam que a seleção da amostra tenta fornecer um subconjunto de valores o mais parecido possível com a população que lhe deu origem. A amostragem mais usada é a amostra casual simples, em que selecionamos ao acaso, os itens que farão parte da amostra. Eventualmente, se tiver informações adicionais a respeito da população de interesse, podem-se utilizar outros esquemas de amostragem mais sofisticados. Quanto mais complexa for a amostragem maiores serão os cuidados nas análises estatísticas utilizadas, em contrapartida, o uso de esquemas de amostragem mais elaborados pode diminuir o tamanho da amostra necessário para uma boa precisão.

A matriz de confusão compara informações de locais de referência com informações no mapa por um número de elementos amostrais da área. Nessa matriz usualmente as colunas são tomadas por corretas e representam os dados de referência, já as linhas representam geralmente as informações dos pixels classificados na imagem. Matematicamente a matriz confusão é representada pela Figura 10.

As k classes são amostradas de forma independente. Na matriz as linhas representam os objetos classificados e nas colunas os objetos de referência, $n(+i)$ denota o número de

amostras classificadas na categoria i ($i= 1,2,3..k$) na classificação da imagem e na categoria $n(i+)$ ($i= 1,2,3..k$) dos dados de referência.

n_{11}	n_{12}	n_{1k}	n_{i+}
n_{21}	n_{22}	n_{2k}	n_{2+}
n_{k1}	n_{k2}	n_{kk}	n_{k+}
n_{+i}	n_{+2}	n_{+k}	N

i = linhas; j = colunas; n_{+i} = total de linhas
 N $i+$ = total colunas N = Somatório da diagonal

Figura 10 – Representação da matriz de confusão. Fonte: Baatz & Schäpe. (2001), adaptado por HENDGES (2007).

Para Congalton & Green (1999) a matriz de erro é uma representação da acurácia do mapa porque permite correlacionar a imagem classificada com dados que são tidos por verdade terrestre. Assim, uma das estimativas de acurácia da classificação é adquirida pelo cálculo da exatidão global (eg) que é a razão entre a soma de todos os elementos amostrais classificados corretamente pelo número total de elementos. Esta medida é calculada pela seguinte equação:

$$eg = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \quad (1)$$

Onde: x_{ii} = Elementos da diagonal principal; r = Número de classes; N = Número total de elementos amostrais

Segundo Congalton & Green (1999), porém a *exatidão global* não é o cálculo mais utilizado para a análise da confiança na classificação, esta é geralmente avaliada pelo cálculo do *índice Kappa*. Este coeficiente segundo o autor é baseado na diferença entre concordância

observada (diagonal principal da matriz de confusão com a concordância entre a classificação e os dados de referência) e a chance de concordância entre os dados de referência e uma classificação aleatória (produto entre os totais marginais da matriz). A equação que fornece o valor de *Kappa* é apresentada pela equação a seguir:

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ij} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \quad (2)$$

Onde: r = Número de classes; x_{ii} = Número de elementos classificados corretamente; x_{i+} = Total de elementos classificados para uma categoria i ; x_{+i} = Total de elementos de referência amostrados para uma categoria i ; N = Número total de amostras.

Landis et al. (apud ESTEVAM, 2006) propõem uma escala de avaliação da qualidade da classificação para a análise do coeficiente *Kappa*. (Tabela 1).

Tabela 1 - Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente *Kappa*.

Valor Kappa	Qualidade da Classificação
< 0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito Boa
0,80 – 1,0	Excelente

Fonte: Landis et al. (apud ESTEVAM, 2006, p. 52).

Uma das vantagens alegadas pelos autores para o uso do *índice Kappa* é que ele incorpora a informação dos pixels mal classificados, e não apenas dos pixels bem classificados como a *exatidão global*. Para Estevam (2006, p. 52) “de forma simplificada, a

exatidão global é um índice que superestima a confiabilidade da classificação, e o *Kappa* é uma avaliação mais adequada.”

2.5.2 – Plataformas orbitais

2.5.2.1 – Sistema LANDSAT

A série LANDSAT foi iniciada no final da década de 60, a partir de um projeto desenvolvido pela Agência Espacial Americana dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. O primeiro satélite da série começou a operar em 1972 e a última atualização ocorreu em 1999 com o lançamento do LANDSAT-7.

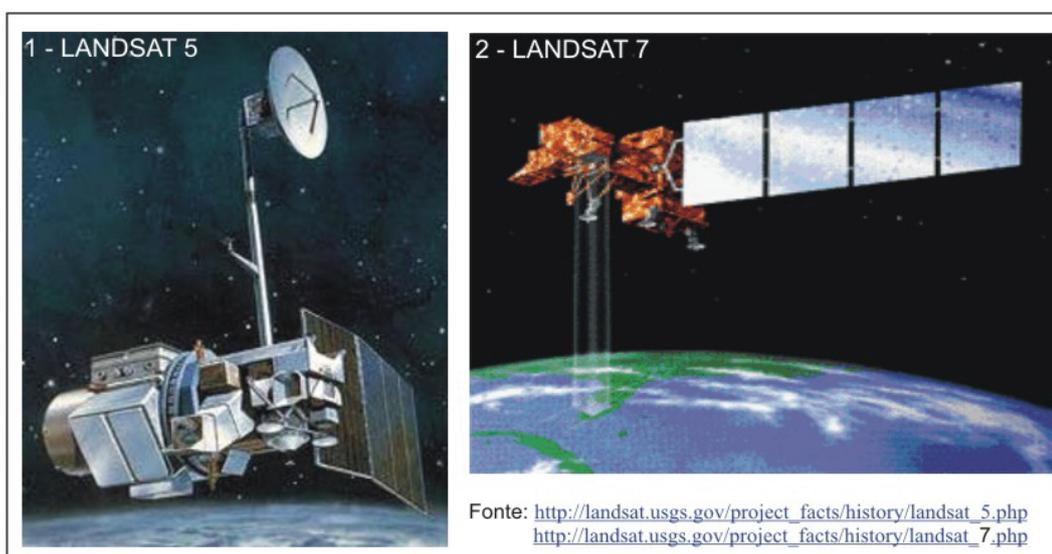


Figura 11 – Figuras representativas dos satélites LANDSAT 5 e LANDSAT 7. Elaboração: HENDGES (2007).

A história do sensoriamento remoto no Brasil está interligada com o desenvolvimento dos satélites LANDSAT, segundo o INPE,

[o] Brasil iniciou os investimentos na capacitação de profissionais e no desenvolvimento de infraestrutura que viabilizasse a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto ao final da década de 1960, com a implantação do Projeto Sensoriamento Remoto no Instituto de Pesquisas Espaciais. No início dos anos 70, todas as atividades concentraram-se na recepção e na utilização de imagens orbitais MSS dos satélites da série LANDSAT. Contudo, o conhecimento disponível naquela época restringia-se à viabilização da identificação de feições específicas existentes na superfície terrestre que, por sua vez, possibilitou a elaboração de mapas temáticos variados (INPE, 2001, p. 3).

Assim, INPE (2001) afirma que em meados da década de 80, com o lançamento do sensor Thematic Mapper (TM) a bordo do satélite Landsat 4 e posteriormente do Landsat 5, a resolução espacial mais rebuscada e o maior número de faixas espectrais exploradas pelas bandas deste sensor em relação a seu antecessor MSS, abriram novas possibilidades da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, incluindo não só os mapeamentos temáticos como também os estudos visando à quantificação de parâmetros biofísicos (por exemplo: biomassa florestal) mediante o uso dos dados radiométricos derivados das imagens geradas. Já o LANDSAT-7 iniciou suas atividades em abril de 1999 e encerrou em 2003, utilizando o sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Este instrumento por sua vez, possibilitou a ampliação das possibilidades de uso dos produtos LANDSAT, porque manteve a alta resolução espectral (característica importante desse sistema) e conseguiu aumentar a resolução espacial pelo método da inserção da banda pancromática e permitir assim geração de composições coloridas com 15 metros de resolução. A seguir, o Quadro 2 apresenta as principais informações dos satélites lançados pelo programa LANDSAT.

Missão	Land Remote Sensing Satellite (Landsat)						
Responsável	NASA (National Aeronautics and Space Administration)						
País/Região	Estados Unidos						
Satélite	LANDSAT 1	LANDSAT 2	LANDSAT 3	LANDSAT 4	LANDSAT 5	LANDSAT 6	LANDSAT 7
Lançamento	27/7/1972	22/1/1975	5/3/1978	16/7/1982	1/3/1984	5/10/1993	15/4/1999
Situação	Inativo (1978)	Inativo (1982)	Inativo (1983)	Inativo (1993)	em atividade	Inativo (1993)	Inativo (2003)
Altitude	917 km	917 km	917 km	705 km	705 km	s.d.	705 km
Passagem	9:15 A.M	9:15 A.M	9:15 A.M.	9:45 A.M	9:45 A.M	s.d	10:00 A.M
Período de Revisita	18 dias	18 dias	18 dias	16 dias	16 dias	s.d	16 dias
Instrumentos Sensores	RBV e MSS	RBV e MSS	RBV e MSS	MSS e TM	MSS e TM	ETM	ETM+

Quadro 2 – Características dos satélites do programa LANDSAT. Fonte: Schowengerdt (1997, p. 356).

Atualmente o único satélite em operação é o LANDSAT-5, que leva a bordo o sensor TM que ainda contribui para o mapeamento temático da superfície terrestre. O Quadro 3, mostra as características, dos sensores transportados pelas plataformas orbitais do programa LANDSAT.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Faixa Imageada
SS	4	0,5 - 0,6 μm	80 m	18 dias	185 km
	5	0,6 - 0,7 μm			
	6	0,7 - 0,8 μm			
	7	0,8 - 1,1 μm			
	8 (somente para o Landsat 3)	10,4 - 12,6 μm	120 m		
TM	1	0,45 - 0,52 μm	30 m	16 dias	185 km
	2	0,50 - 0,60 μm			
	3	0,63 - 0,69 μm			
	4	0,76 - 0,90 μm			
	5	1,55 - 1,75 μm			
	6	10,4 - 12,5 μm	120 m		
	7	2,08 - 2,35 μm	30 m		
ETM+	1	0,45 - 0,52 μm	30 m	16 dias	185 km
	2	0,50 - 0,60 μm			
	3	0,63 - 0,69 μm			
	4	0,76 - 0,90 μm			
	5	1,55 - 1,75 μm			
	6	10,4 - 12,5 μm	60 m		
	7	2,08 - 2,35 μm	30 m		
	8	0,50 - 0,90 μm	15 m		

Quadro 3 – Características dos sistemas sensores dos satélites LANDSAT. Fonte: Schowengerdt (1997, p. 356).

Por sua vez, o Quadro 4 exemplifica as características dos sistemas sensores TM e ETM+ em relação aos respectivos comprimentos de ondas discriminados por suas bandas espectrais específicas, quando da captura/registro da radiação eletromagnética emitida pelo alvo.

Banda	Intervalo espectral (μm)	Principais características e aplicações das bandas <i>TM</i> e <i>ETM+</i> do satélite Landsat-5 e Landsat 7
1	(0,45 - 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	(0,52 - 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	(0,63 - 0,69)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	(0,76 - 0,90)	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com <i>pinus</i> e <i>eucalipto</i> . Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	(1,55 - 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	(10,4 - 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades térmicas de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 - 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Quadro 4 – Características das bandas espectrais dos sensores TM e ETM+. Fonte: INPE (2005).

Segundo o INPE (2001), em estudos de uso da terra com imagens de satélites, os recursos naturais são separados em grandes grupos para uma melhor diferenciação da resposta espectral dos alvos em imagens, esses grupos são compostos por elementos que competem a vegetação, ao solo e a água. Assim para estudar como um objeto se comporta espectralmente, fica mais fácil definir as características deste quando o mesmo é interpretado por um dos grupos acima, pois tanto os elementos naturais formadores da vegetação, do solo e da água possuem um mesmo comportamento espectral padronizado quanto às características de reflexão, transmissão e absorção de energia eletromagnética. Na Figura 16 podemos notar a grande diferença existente nas curvas de reflectância principalmente quando estas representam alvos de natureza distinta. O leitor poderá notar que principalmente na região do espectro conhecida como do infravermelho próximo (comprimento de onda de 0,7 a 0,9 μm), os alvos apresentam boa diferenciação entre grandes grupos e semelhanças para os alvos formadores destes, atente para as curvas de solo arenoso, cascalho e campo sem cultura.

As curvas de reflectância na Figura 12 são, segundo Novo (1989), curvas médias que somente ilustram as formas típicas de reflectância dos alvos. Assim sendo, servem somente de base para formar uma idéia da reflexão prevista para a aparência dos alvos nas imagens de Sensoriamento Remoto, tais imagens orbitais e/ou fotografias aéreas expressam essa aparência em tonalidades (clara ou escura) assumida pelos alvos e dependendo do tipo de produto, ela ainda pode ser expressa pela cor e pela textura.

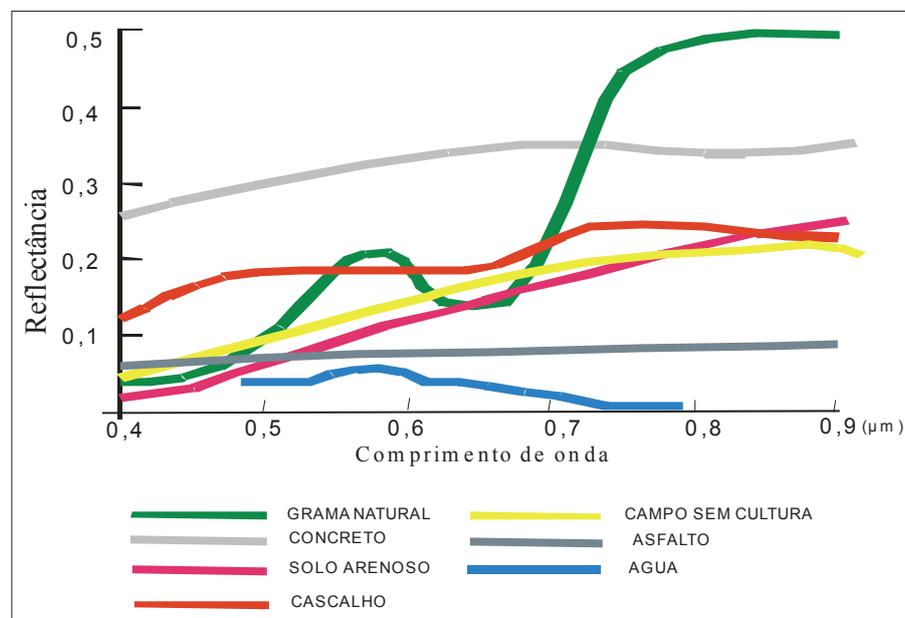


Figura 12 – Figura representativa das curvas de reflectância de alvos distintos. Fonte: INPE (2001).

Uma estratégia geralmente adotada por pesquisadores na área do Sensoriamento Remoto, para a classificação de um objeto de estudo é identificar as diferenças e as semelhanças que este objeto tem em relação a outros alvos. Estes alvos principalmente estudados quando da aplicação das técnicas de Sensoriamento Remoto no estudo dos recursos naturais são: solos, rochas, culturas agrícolas, vegetação natural, água. A distinção entre “culturas agrícolas” e “vegetação natural” e que ambas têm como matéria de estudo as plantas que revestem a superfície terrestre o que serve de base para tal distinção é o fato de que ao impor um padrão de organização às culturas agrícolas o homem altera o seu comportamento espectral. Assim os alvos compostos pelas culturas agrícolas refletem um complexo arranjo de plantas.

Segundo o INPE (2001), ao se estudar mais a fundo a reflectância da vegetação, há de se considerar que um dossel é constituído por muitos elementos da própria vegetação, como folhas, galhos, frutos, flores, assim sendo o fluxo de radiação incidente sobre qualquer um destes elementos estará sujeito a dois processos: espalhamento e absorção de energia radiante. O processo de espalhamento, por sua vez, pode ser dividido em dois sub-processos: reflexão e transmissão através do elemento. Porém dentre todos os elementos constituintes da vegetação, a folha constitui o principal deles quando se considera o processo de interação descrito. Ainda segundo a consulta bibliográfica acima, o comportamento espectral de uma folha é função de sua composição, morfologia e estrutura interna. A Figura 17 demonstra o comportamento da curva de reflectância das folhas e as diferentes regiões do espectro afetadas pela sua respectiva composição. Note que na região do visível os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. Os valores destes pigmentos podem variar grandemente de espécie para espécie. Nesta região ainda, a energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento.

Já a região do infravermelho próximo se caracteriza por ter uma reflectância espectral quase constante dentre as variadas espécies. Porém, segundo Gates (apud INPE, 2001, p. 55), de maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e conseqüentemente, maior será também a reflectância. O autor lembra também que para os comprimentos de onda da região do infravermelho médio a reflectância das folhas se caracteriza pela presença de líquidos na estrutura interna.

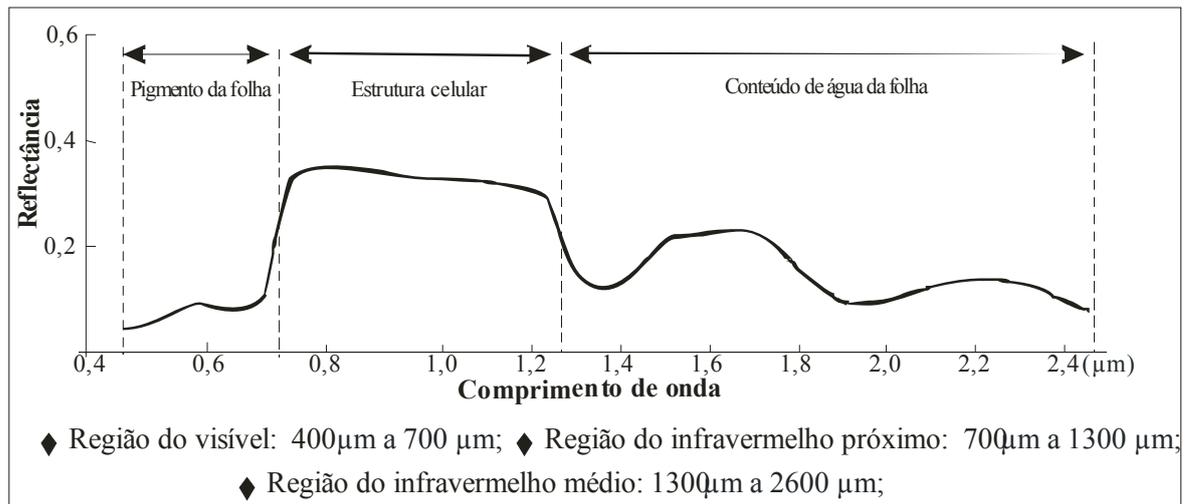


Figura 13 – Curvas de reflectância das folhas. Fonte: INPE (2001).

Para o Sensoriamento Remoto, quando o pesquisador estuda a resposta espectral dos alvos da vegetação, não basta porém, verificar a reflectância da estrutura interna da folha. Fatores como a distribuição espacial dos elementos da vegetação, suas densidades e orientações, definem a arquitetura da vegetação. A distribuição espacial depende de como foi ordenada a forma de plantio, do tipo de vegetação existente e ainda do estágio de desenvolvimento das plantas. Estes parâmetros afetam qualitativamente a reflectância da vegetação, dando a estas particularidades passíveis de distinção na hora da classificação e no mapeamento do uso da terra em detrimento aos demais elementos da paisagem.

2.5.2.2 – Sensor MODIS

Os produtos de sensoriamento remoto apresentam constantes aperfeiçoamentos, como melhoria nas resoluções espacial, temporal e radiométrica e inclusão de novas faixas do espectro eletromagnético. Um exemplo característico desta melhoria é o número de bandas espectrais (36) do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) do Programa Earth Observing System (EOS), comparado com a de outros sensores orbitais que apresentam, no máximo, dez bandas (Guimarães, 2000, p.20).

O sensor MODIS é um dos instrumentos ligados ao Sensoriamento Remoto que estão a bordo do satélite TERRA e AQUA e que foram lançados pela National Aerospace and Space Administration (NASA), como partes integrante de um programa de observação e de

coleta de dados sobre o planeta Terra conhecido no mundo como Earth Observing System (EOS). Segundo Silva (2004), o EOS foi idealizado desde 1992 e conta com dados referentes aos satélites Terra e Aqua, o primeiro lançado em 18 de dezembro de 1999 e que passou a operar em fevereiro de 2000 e o segundo lançado em maio de 2002. O satélite Terra realiza uma trajetória de órbita circular do Norte-Sul, tem seu horário de passagem pela linha do Equador às 10:30 horas, o que lhe confere a denominação de EOS-AM. Já o satélite Aqua possui órbita do Sul-Norte passando pela linha do Equador as 13:30 horas sendo assim chamado de EOS-PM (SILVA, 2004).

As plataformas orbitais Terra e Aqua monitoram toda a superfície da Terra em um período de um a dois dias, adquirindo dados em 36 faixas distintas de comprimentos de onda. Esses dois satélites representam um avanço no que diz respeito às tecnologias de monitoramento da superfície terrestre, principalmente no que se refere ao acompanhamento de mudanças ambientais nos continentes, nos oceanos e na atmosfera. Além do MODIS, os satélites do sistema EOS trazem os sensores:

- Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): mede o fluxo radiante no topo da atmosfera para monitorar o balanço de energia;
- Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT): mede o grau de poluição da Terra (monóxido de carbono e metano);
- Multangle Imaging Spectroradiometer (MISR): destinado ao mapeamento da vegetação, áreas desertas e cobertas por gelo, coleta dados sobre nuvens e aerossóis atmosféricos;
- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): disponibiliza vários dados simultâneos da superfície terrestre, como: imagens sobre a vegetação, a temperatura, os tipos de rochas e vulcões.
- Atmospheric Infrared Souder (AIRS): fornece dados sobre temperatura e umidade para previsões climáticas;

- Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU): integrado ao AIRS, atua na medição de temperatura em camadas superiores da atmosfera, especialmente estratosfera;
- Humidity Souder for Brazil (HSB): capta umidade atmosférica em regiões com muitas nuvens.

Segundo Latorre (2003) o sensor MODIS foi projetado para satisfazer as necessidades de três campos de estudos: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espectral e espacial distintas selecionadas, para um destes objetivos e com uma cobertura global quase diária. Assim, operando com 36 bandas espectrais, distribuídas nas faixas do espectro eletromagnético que vão de 0,407 μm a 14,385 μm . O sensor MODIS possui campo de visada de 100°, assim a faixa de cobertura espacial abrange 2.330 km de largura e coleta dados a 705 km de altitude, em variadas resoluções espaciais (250 m, 500 m e 1000 m), realizando o imageamento global a cada dois dias, ciclo de repetição 16 dias e nenhum custo para obtenção das imagens.

Assim, o sensor MODIS apresenta um número muito superior de bandas se comparado as oito bandas do sensor ETM+ do LANDSAT 7. Numa comparação mais direta entre as bandas do MODIS e do ETM+ as semelhanças ficam nas faixas que representam a região do vermelho e do infra-vermelho próximo no espectro eletromagnético, porém para o MODIS com uma resolução espacial máxima de 250 m para o pixel. Desta forma a baixa resolução e sendo as imagens do MODIS voltadas aos estudos globais, estas são caracterizadas com agrupar informações de grandes áreas, dificultando seu trato cartográfico. Devido a este motivo, os produtos MODIS são ordenados em uma estrutura de grade, sendo os dados obtidos reprojatados em uma estrutura de quadros com tamanho e área fixa, facilitando a correlação entre os dados e a sua projeção cartográfica na Terra. Cada quadro possui uma área de 1200 km x 1200 km, sendo necessários 460 quadros para cobrir todo globo terrestre. (LATORRE, 2003).

Rosendo (2005), diz que as imagens do sensor MODIS são originalmente projetadas na projeção sinusoidal (SIN) e no formato Hierarquical Data Format (HDF), e que estas podem ser reprojatados para uma projeção de interesse do usuário por meio do Modis

Reprojection Tool ou HEGTOOLS (aplicativos desenvolvidos pelo Centro de Distribuição de Dados EDC/DAAC). Desta forma, os produtos MODIS são disponibilizados ao usuário georreferenciados e, de acordo com Silva (2004), apresentam alto grau de credibilidade, uma vez que já foram realizados testes de validação. A correção atmosférica, que elimina pixels com a influência de nuvens, aerossóis, vapor d' água e/ou poluentes, é uma outra vantagem da utilização desses produtos.

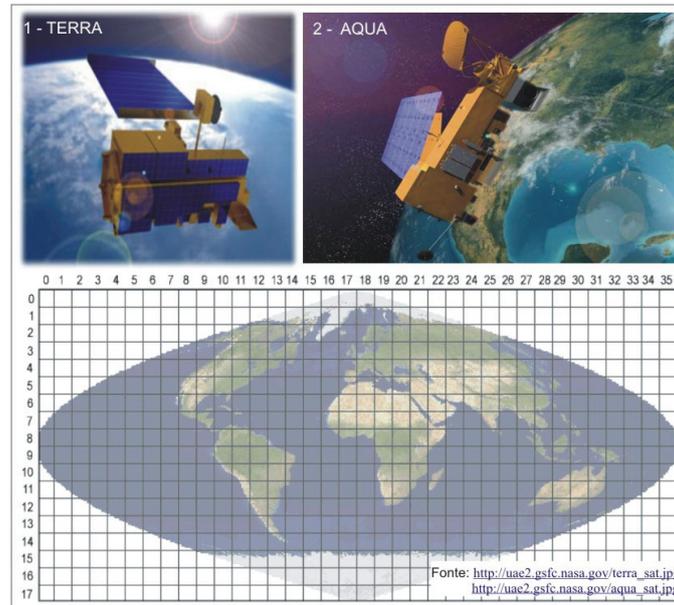


Figura 14 – Figuras representativas dos satélites Terra e Aqua. Elaboração: HENDGES (2007).

2.6 – Noções de Cartografia

A ciência cartográfica foi instituída a partir da necessidade de agrupar e ordenar um dos instrumentos básicos e imprescindível para a sobrevivência humana, o mapa. Das muitas definições propostas pela literatura, o conceito adotado pela Associação Cartográfica Internacional (ACI): “[c]artografia é o conjunto dos estudos e operações científicas, técnicas e artísticas que intervêm na elaboração dos mapas a partir dos resultados das observações diretas ou da exploração da documentação, bem como da sua utilização”.⁴

⁴ Definição encontrada na enciclopédia virtual “Wikipédia”, no site <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cartografia>, acessado em 10 de janeiro de 2007.

Em uma definição mais acadêmica, pode-se conceituar Cartografia como a ciência que “tenta há muito dominar o processo de representação da realidade através de mapas, sendo advento da necessidade do homem em compreender o universo que o cerca exigindo desta ciência também a arte de conceber, levantar, redigir e divulgar mapas” (JOLY, 1990, p. 7).

Segundo Oliveira (1988) a relação existente entre o espaço e a sua representação gráfica pode ser definida por:

Um símbolo cartográfico (...) não pode abdicar, inteiramente, do seu caráter figurativo associativo, em favor do símbolo geométrico puro. Um mapa não é - não se pode permitir que seja - um diagrama meramente geométrico, em que as distâncias e as relações horizontais estejam corretas; deve, até certo ponto, sugerir a aparência do assunto (OLIVEIRA, 1988, p.109).

2.6.1 – Representações cartográficas

De forma geral as representações cartográficas, segundo o traço são divididas em Globo, Mapa, Carta e Planta, sendo que o mapa e a carta são representações usadas para alcançar os objetivos desta pesquisa e podem ser definidas como:

Mapa:

É a representação no plano, normalmente em escala pequena, dos aspectos geográficos, naturais, culturais e artificiais de uma área tomada na superfície de uma figura planetária, delimitada por elementos físicos, político-administrativos, destinada aos mais variados usos, temáticos, culturais e ilustrativos (OLIVEIRA, 1988).

Carta:

É a representação no plano, em escala média ou grande, dos aspectos artificiais e naturais de uma área tomada de uma superfície planetária, subdividida em folhas delimitadas por linhas convencionais - paralelos e meridianos - com a finalidade de possibilitar a avaliação de pormenores, com grau de precisão compatível com a escala (OLIVEIRA, 1988).

Para Banker (1965), os mapas e as cartas podem ser divididos segundo três categorias quanto a natureza de sua representação: geral, temática e especial.

Quando uma carta ou um mapa é considerado de *representação geral*, estes são então, documentos cartográficos elaborados sem um fim específico, possuindo a finalidade principal de fornecer ao usuário uma base cartográfica com possibilidades de aplicações generalizadas, de acordo com a precisão geométrica e tolerâncias permitidas pela escala. Apresentam os acidentes naturais e artificiais e servem, também, de base para os demais tipos de cartas e mapas, podendo ser subdivididos em:

- Cadastral: Mapas em escalas grandes, geralmente planimétricos e com maior nível de detalhamento, apresentando assim grande precisão geométrica. Normalmente são utilizados para representar cidades e regiões metropolitanas, nas quais a densidade de edificações e arruamentos são grandes;
- Topográfica: Cartas elaboradas a partir de levantamentos aerofotogramétricos. Incluem os acidentes naturais e artificiais, e sua utilização varia conforme a escala. Quando em escala 1:25.000 representam cartograficamente áreas específicas, fornecendo elementos e bases para anteprojetos de engenharia; já em escala de 1:50.000 retratam cartograficamente zonas densamente povoadas, sendo adequada ao planejamento socioeconômico; e em escala inferior a 1:250.000 subsidiam o planejamento regional, além da elaboração de estudos e projetos que envolvam ou modifiquem o meio ambiente;
- Geográfica: Mapas em que os detalhes planimétricos e altimétricos são generalizados, os quais oferecem uma precisão de acordo com a escala de publicação. A representação planimétrica é feita através de símbolos que ampliam muito os objetos correspondentes, alguns dos quais muitas vezes têm que ser deslocados.

Quanto a representação temática, as cartas e mapas podem ter qualquer escala, pois os mesmos são destinados a um tema específico, necessário às pesquisas socioeconômicas, de recursos naturais e estudos ambientais. Com base no mapeamento topográfico ou de unidades territoriais, os mapas temáticos são elaborados sempre associando elementos relacionados às estruturas territoriais, à geografia, à estatística, aos recursos naturais e estudos ambientais.

A representação especial, refere-se as cartas e mapas destinados a grandes grupos de usuários muito distintos entre si. Cada um deles é concebido para atender a uma determinada faixa técnica ou científica. São geralmente documentos muito específicos e extremamente técnicos que se destinam à representação de fatos, dados ou fenômenos particulares, restringindo-se rigidamente aos métodos e objetivos do assunto ou atividade a que está ligado.

Segundo Banker (1965), estes detalhes da paisagem representados em um mapa podem ser detalhes naturais que são os elementos existentes na natureza como os rios, mares, lagos, montanhas, serras, dentre outros, e os detalhes artificiais que são os elementos criados pelo homem como as represas, estradas, pontes, edificações, etc. O autor lembra ainda que uma carta ou mapa, dependendo de seus objetivos, só estarão completos se os mesmos trouxerem esses elementos devidamente representados. Assim, a representação correta dos elementos naturais e artificiais, geram a necessidade de reduzir as proporções dos detalhes à localizar, a fim de tornar possível a representação dos mesmos em um espaço limitado. Essa proporção nos termos da cartografia é chamada de escala. Porém, de acordo com Banker (Ibid.), determinados acidentes, dependendo da escala, não permitem uma redução acentuada, pois tornar-se-iam imperceptíveis, no entanto são acidentes que por sua importância devem ser representados nos documentos cartográficos através da utilização de símbolos cartográficos.

Viadana (1993), diz que no processo convencional da Cartografia a escolha da escala passa pela generalização cartográfica, que o autor define como sendo um processo dependente que inclui seleção, simplificação e síntese dos elementos e objetos que devem compor um certo mapa. É um processo claramente voltado à visualização ou à comunicação eficiente daquilo que está representado neste. Como regra geral entende-se então que a complexidade de um mapa deve diminuir com a escala do mapa.

Em outras palavras, a generalização pode ser entendida como o processo de universalização do conteúdo de uma base de dados espaciais, tendo como um de seus principais objetivos a redução da complexidade, quer seja para fins de visualização, entendimento, ou ainda o armazenamento na base de dados apenas de informações realmente relevantes. Porém, na redução da complexidade deve levar em conta certa lógica que não comprometa a precisão de posicionamento e a exatidão de atributos dos dados.

Quando se trabalha os conceitos de escala em uma cartografia digital, ou seja, em um SIG, a resolução espacial da base de dados parece ser uma dimensão mais relevante que a escala, de modo que se pode dizer que a resolução espacial é tal e qual a escala o é no domínio analógico, sendo assim também a resolução um dos elementos de controle para a generalização. Pode-se dizer assim que a modelagem em níveis de abstração diferentes depende da resolução espacial. Na verdade, a escala também se torna um elemento de controle quando há preocupação com visualização dos dados digitais na tela do computador (D'ALGE, 1999).

Uma maneira mais prática de entender generalização em um SIG é conceituá-la como a seleção e representação simplificada de objetos através de transformações espaciais de atributos. A generalização afeta diretamente os elementos constituintes da base de dados, e em um SIG esta derivação geralmente é feita também para propiciar uma otimização computacional nos processos de construção e cruzamento de mapas.

A generalização é um processo cartográfico intimamente ligado ao planejamento das representações trazidas pelos mapas e cartas, e ao conhecimento prévio do espaço. Neste contexto, passa a ser necessária alguma forma de visualização da região da superfície física do planeta, onde desejamos desenvolver nossa atividade (SILVA et al., 2004, p. 65).

Segundo D'Alge (1999), a base de dados que é afetada pela definição da resolução espacial. A escolha correta da resolução deve contemplar também as representações dos mapas temáticos passíveis de serem elaborados a partir do mapa base. Do mesmo modo os mapas temáticos, e os demais produtos da cartografia temática, podem ser apresentados em qualquer escala quando estas são destinadas a um tema específico, porém esta escala deve suprir por completo as necessidades propostas pelos demais dados encontrados no mapa base.

A Figura 15 a seguir demonstra a redução da escala através da generalização de dados. No primeiro caso, na generalização da resolução espacial do pixel de uma imagem matricial, nela pode-se perceber nitidamente a redução da precisão nos limites entre as diferentes manchas que definem o tipo de uso da terra. No segundo exemplo, em uma generalização de um mapa temático, é perceptível a perda da precisão na localização espacial,

quando da redução do número pontos que definem a linha do vetor limítrofe entre os tipos de solo.

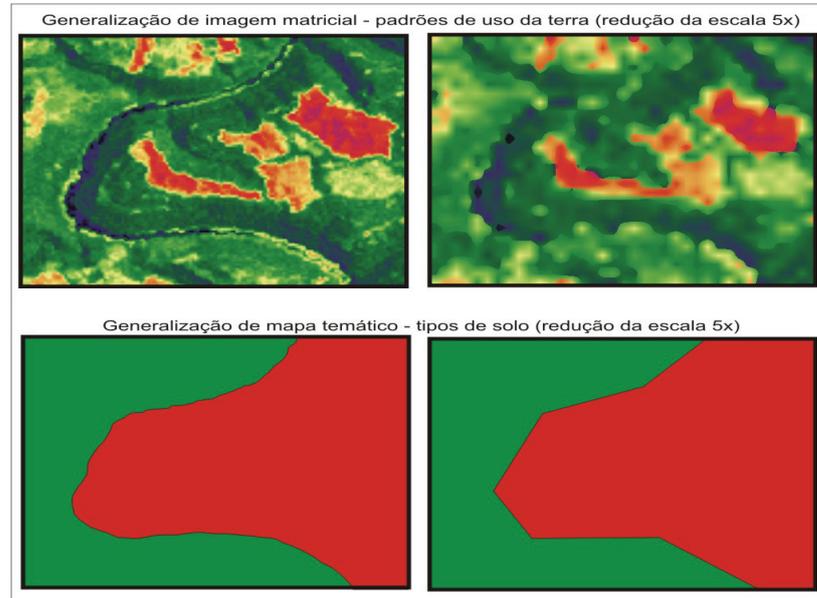


Figura 15 – Exemplos de generalizações em dados de imagem e vetor. Elaboração: HENDGES (2007)

2.6.2 – Cartografia temática

Como visto acima, o conceito atribuído à cartografia temática, muito antes da utilização de SIG's, estava respaldado no fato de que não se pode expressar todos os fenômenos num mesmo mapa e que a solução é, portanto, multiplicá-los, em diversos mapas postos sobre a mesma base de dados. Assim, um dos principais objetivos dos mapas temáticos é o de fornecer, com o auxílio de símbolos qualitativos e/ou quantitativos dispostos sobre uma base de referência, geralmente extraída dos mapas e cartas topográficas, as informações referentes a um determinado tema ou fenômeno que está presente ou age no território mapeado (SILVA et al., 2004).

Para Martinelli (1999) o gráfico de um SIG resulta da superposição de níveis de informações que ocupam um mesmo espaço, na íntegra ou parcialmente, agregando-se um peso ou um significado, frutos do pensamento e das escolhas do pesquisador. Nesse sentido, o autor comenta a importância dos mapas temáticos nos cruzamentos de informações de um SIG, pois para ele, a Cartografia é chamada temática quando traz significados além da trilogia

latitude, longitude, altitude. Essa temática representa dados diferentes com ou sem expressão física no espaço. Idéias abstratas podem ser representadas por meio de mapas, por exemplo, as áreas de influência de cidades, a densidade populacional, a produtividade de uma cultura, dentre outros temas.

Porém, Martinelli lembra que a folha de papel apresenta limitações. O espaço real, tridimensional por natureza, é representado nas duas dimensões do plano da folha de papel. A posição cartesiana dos elementos geográficos, localizada por meio de latitude e longitude, é representada na largura e no comprimento do plano. O tema é traduzido por símbolos chamados, em semiologia gráfica ou simplesmente variáveis visuais. Bertin (1967) reconheceu seis variáveis visuais: tamanho, cor, forma, tonalidade (valor), orientação e granulação. Todavia, apenas as três primeiras são utilizadas com maior freqüência. Essas variáveis visuais podem ser utilizadas em pontos, linhas ou áreas (zonas).

A determinação da variável visual para uma determinada informação depende da própria informação. Assim, uma cidade é representada por um ponto ou uma área, dependendo da escala de sua representação. Rios, limites e vias são representados por linhas e informações que ocupam algum tipo de área é representada no modo de implantação zonal. Em síntese as representações disponíveis para traduzir as relações de significado de qualquer informação são: - as duas dimensões do plano, mobilizadas pelo mapa base; - as três variáveis visuais: tamanho, cor e forma, determinadas pela relação de significado entre os dados; - os três modos de implantação: pontual, linear ou zonal, ver Figura 16.

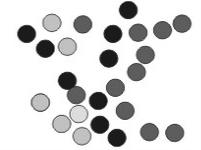
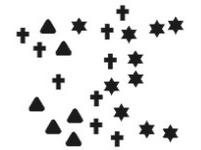
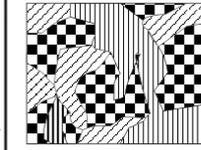
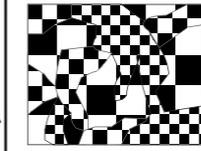
Variáveis Visuais	Pontual	Linear	Zonal
Cor			
Forma			
Tamanho			

Figura 16 – Exemplos das variáveis visuais mais usadas pela cartografia temática e os seus modos de implantação. Fonte: Bertin (1967).

2.7 – Estudo da paisagem

Paisagem é o que vemos diante de nós. É uma realidade visível. É uma visão de conjunto percebida a partir do espaço circundante. Não tem, assim, uma existência própria, em si. Ela existe a partir do sujeito que a apreende: Cada pessoa a vê diferentemente de outra, não só em função do direcionamento de sua observação, como também em termos de seus interesses individuais (BERTRAND apud PEDROTTI & MARTINELLI, 2001, p. 40).

Concordando com as palavras de Bertrand, Santos (1982), acrescenta que a paisagem é também a forma espacial do presente, porém testemunho de formas passadas que ainda persistem ou não. Sendo a paisagem resultante de um dinamismo uma vez comprovado a evolução estrutural do processo espacial, demonstrando fases que poderão ser de estabilidade, de reformulação parcial ou de completa remodelação. Ainda, nesse sentido, Ross (1995) afirma que embora externe com muita propriedade seu conteúdo social, a paisagem envolve sempre desde o homem primitivo, de forma incisiva um enquadramento natural, especialmente aquele dado pela vegetação que completa seu significado. São expressões coletivas como a floresta, o campo ou a savana, que designam o conjunto, ou seja, para compreender a vida de um oásis é necessário encaixá-lo na imensidão do deserto que o encerra.

Bertrand (1977, p. 70), define paisagem como:

(...) uma porção de espaço caracterizada por um tipo de combinação dinâmica, portanto instável, de elementos geográficos diferenciados - físicos, biológicos e antrópicos - que ao atuar dialeticamente entre si, fazem da paisagem um conjunto geográfico indissociável, que evolui em bloco, tanto sob os efeitos das interações entre os elementos que o constituem, como sob o efeito da dinâmica própria de cada um dos seus elementos considerados separadamente.

Para Pedrotti & Martinelli (2001), a paisagem visível, tida como o que vemos à nossa frente produz-se normalmente a partir de visão horizontal. Este tipo de campo de percepção varia bastante conforme a posição do observador e as características morfoesculturais do terreno. Em sua maioria as silhuetas da sucessão dos planos em profundidade, se organizam numa seqüência de escalas que vão diminuindo em direção ao horizonte, ao mesmo tempo em

que se interpõem enquadramentos que podem encobrir parte dela, escondida por detrás. Este fato, explica tendência espontânea de qualquer observador é galgar uma posição elevada para obter maior amplitude na sua abrangência visual. Deixando o nível do chão, o olho ganha um campo maior, porém perde a riqueza das visões possíveis ao levar em conta o ponto de vista, a profundidade do campo com o arranjo dos planos verticais dos volumes. Ao atingir a visão quase vertical, a paisagem torna-se praticamente a imagem fornecida por uma fotografia aérea. Apesar de perder as particularidades, essa visão ganha em termos de conjunto na percepção sinótica. Foi ela que motivou a representação da paisagem em mapa, dando-lhe cientificidade (LACOSTE, 1977).

Porém a questão metodológica fundamental para o discernimento das paisagens pela Cartografia é a das escalas espaço-temporais. Sua adequação tem a ver com a categoria de estudo, no caso da presente pesquisa o da paisagem, compatível com a resolução dos fenômenos nela enquadrados, os quais por sua vez demandam certa seqüência de tempo para a sua organização, e com as devidas manifestações espaciais características. Porém, esses fenômenos não acontecem apenas de forma sucessiva, mas também de maneira simultânea. Portanto, a categoria espacial e, concomitantemente, temporal (tempo de duração envolvendo sucessões e coexistências para sua organização) de interesse estaria inserida numa seqüência hierarquizada de escalas temporo-espaciais, a qual escalonaria as ordens de grandeza, os respectivos relacionamentos ou contradições de natureza física, biológica ou social, cada uma correspondendo à sugestão de uma escala cartográfica para a representação de sua materialidade (JOLY, 1990).

Para Mcgarigal & Marks (1995) a paisagem sofre variações de alguns quilômetros quadrados de diâmetro até áreas territoriais muito pequenas, considerando-se que o conceito de padrão espacial de manchas leva em consideração o organismo para qual ele está centrado. Desta forma, níveis de observação diferentes geram diferentes padrões de mosaicos. Segundo Soares Filho (1998), a definição acima se encaixa perfeitamente para trabalhos em geoprocessamento, pois é através do mapeamento desses diversos padrões em imagens de Sensoriamento Remoto, que analisa as relações espaciais, obtidas pelos mapas armazenados em um SIG, ganhou mais força, buscando a maior caracterização das distintas paisagens, como também no desvendamento dos processos dos quais estas resultam.

2.7.1 – Padrões da paisagem

Para Zonneveld (1979) ao estudar os padrões da paisagem definiu o sítio como sendo a menor unidade possível da paisagem que ainda pode ser considerada uma unidade holística de estudo. Ainda segundo o autor, o sítio, representa a mancha da paisagem com uma ordem de grandeza de até alguns metros quadrados.

Nesta pesquisa, porém a paisagem será analisada segundo a definição de Sotchava (1977), para unidade de paisagem, que representa um estágio intermediário de padrão paisagístico em um nível hierárquico que vai do sítio a sistema de paisagem. A unidade de paisagem, que é composta por diversos sítios, possui uma grandeza variada de algumas centenas de milhares de metros quadrados, cuja determinação baseia-se predominantemente em forma de relevo comum. Já para Zonneveld (1979), o estudo da unidade de paisagem, analisa os atributos mais óbvios em termos de mapeamento que são o relevo, o solo e vegetação, incluindo ainda a ação antrópica exercida sobre estes. Desta forma o estudo das unidades de paisagem se torna muito significativo, pois estas representam uma interação dos aspectos físicos da paisagem como também dos aspectos socioeconômico atuantes na mesma, representando assim as relações da distribuição espacial entre seus elementos constituintes de cobertura e uso da terra, acrescidos dos parâmetros de tamanho, forma, proporção e continuidade.

Como citado anteriormente, os sistemas de paisagem, constituem um nível hierárquico superior. Estes sistemas por sua vez sugerem um padrão geograficamente associado de feições geomorfológicas recorrentes, sendo que os seus limites coincidem com as feições geomorfológicas conhecidas. Seu estudo envolve a maior extensão territorial da paisagem a ser analisada, com áreas variando entre dez e cem quilômetros quadrados (SOARES FILHO, 1998).

Voltando a caracterização das unidades paisagísticas, o agrupamento das mesmas define um padrão estrutural particular de cada paisagem. Esta estrutura segundo Soares Filho (1998), é o resultado da organização espacial dos elementos da paisagem que geram um determinado padrão, que se expressa por um arranjo repetitivo, formado pelo mosaico de manchas e seus corredores dispostos em uma matriz de fundo.

2.7.1.1 – Mancha

Normalmente as manchas em uma paisagem representam ecossistemas compostos por comunidades de plantas e animais, porém algumas manchas podem não conter vida nenhuma ou apenas na forma de microorganismos, como no caso de serem formadas pela presença proeminente de rocha, solo, pavimentos ou edificações. Quatro categorias de manchas podem ser reconhecidas em uma paisagem baseadas nas suas origens ou mecanismos causais, a saber: manchas de perturbação, manchas remanescentes, manchas de regeneração e as manchas antrópicas:

- manchas de perturbação: se caracterizam por um evento que causa uma mudança significativa no padrão normal de uma paisagem. As origens das perturbações podem ter diversas causas, como no exemplo de distúrbios naturais, tais como fogo, escorregamento de lama, avalanches, tempestade de vento e gelo, ataques de insetos dentre outras;
- manchas remanescentes: podem restar em meio a um mar de perturbações, como no exemplo de manchas de vegetação, poupadas pelo fogo florestal e que posteriormente passarão a servir como pequenas ilhas fontes de sementes necessárias ao processo de regeneração vegetal;
- manchas de regeneração: ocorrem quando um local, dentro de uma área de perturbação crônica, fica livre, permitindo o desenvolvimento do processo de sucessão vegetal. Portanto, em uma paisagem rural a dinâmica das manchas agrícolas depende largamente das atividades de manutenção. Interrompendo-se esta atividade, a mancha será invadida por espécies da matriz florestal, dando lugar ao processo de sucessão e o seu conseqüente desaparecimento;
- manchas antrópicas: são as áreas resultantes da ação humana. As manchas antrópicas tornam-se cada vez mais comuns nas paisagens terrestres e como exemplos posso citar os agrupamentos urbanos, lavouras implantadas, sistemas de irrigação dentre outros.

Para fins de modelagem em Geoprocessamento, uma mancha, qualquer que seja seu tipo ou origem, se faz representar por uma entidade em um mapa, formada por um único polígono (no caso da representação vetorial), ou mesmo corresponder a uma singular área, definida por um conjunto de pixels contíguos de igual rótulo ou valor (representação matricial), equivalentes, por exemplo, a um tema obtido pela classificação espectral de uma imagem de satélite. Nesses termos cartográficos, as manchas vão possuir ainda atributos nominais definidos pelos tipos de elementos de paisagem que as compõem como as estradas, florestas, campos agrícolas e etc (BAKER apud SOARES FILHO, 1998, p.36).

Assim, é através deste mapeamento e posterior representação cartográfica das manchas, que pode o pesquisador analisar a estrutura organizacional de uma paisagem, usando um conjunto de parâmetros ou descritores que, segundo Burgess & Scharpe (1981) são, dentre outros: o tamanho, forma, número, conectividade e distâncias entre manchas.

Quando se estuda uma mancha na paisagem, o tamanho é o aspecto de maior notoriedade, pois este define principalmente a questão de centralidade de uma determinada região, dado que o tamanho da mancha atinge de modo inversamente proporcional a razão da área de borda ou a sua área limítrofe. No caso das florestas esse fator é visível, pois as bordas das grandes manchas florestais são ocupadas por espécies de árvores pioneiras de baixa longevidade e que se apresentam em uma cobertura mais densa em contraponto ao centro destas manchas que é ocupado por árvores de maior tamanho fornecendo um ambiente mais protegido para biodiversidade dependente deste. Logo, se a mancha tiver um tamanho reduzido, ou seja, muita área de limite, as espécies ali existentes também serão reduzidas e de maior fragilidade.

Quanto à forma uma mancha é definida pelo contato existente entre o interior desta e os agentes exteriores. Manchas em forma de círculo ou de quadrado possuem uma área interior mais protegida, ao contrário de um retângulo que mesmo de mesma área tem maior relação borda – centro. Nesse sentido, pode-se ainda lembrar que uma mancha estreita e comprida ainda que de mesma área as figuras geométricas anteriores, pode ser totalmente dominada pela influência externa. Formas côncavas e convexas também indicam se o elemento da paisagem está se contraindo ou se expandindo em relação e influência externa.

Quando estudado o número, a conectividade e as distâncias entre as manchas, a paisagem é analisada quanto ao padrão de habitats que estas manchas proporcionam, através da conectividade de uma rede de barreiras e passagens, conhecidas como corredores.

2.7.1.2 – Corredor

A faixas ou manchas de ligação entre os diferentes elementos perceptíveis de uma paisagem e pertencentes a uma mesma classe, estabelecem um fator de conectividade em forma de redes interligadas. Os corredores permitem assim o deslocamento e o intercâmbio entre animais e plantas. O estudo de corredores que interligam as diferentes manchas da paisagem tem sido o principal estudo de pesquisadores na área de paisagem e conservação da biodiversidade de nosso planeta.

2.7.1.3 – Matriz:

A matriz pode ser caracterizada como a área na qual a mancha está sobreposta. Por este elemento ter uma maior conectividade, o mesmo também possui o controle preponderante no fluxo de energia e da dinâmica da paisagem. Assim, tentando analisar esse controle, as medidas a serem vistas de uma matriz são o grau de porosidade e conectividade. A porosidade consiste na medida de densidade de manchas numa paisagem. Já a conectividade estabelece o grau de ligação em uma paisagem, ou seja, a complexidade da rede que liga as manchas e que impede o fluxo da matriz.

A Figura 17, representa as diferentes formas de padrões organizacionais entre as manchas, os corredores e a matriz, uma área hipoteticamente 50% florestada representada pelos “píxel’s” escuros, estes “píxel’s” por sua vez, representam as manchas distribuídas aleatoriamente ou conforme algum padrão pré-estabelecido. Já os “píxel’s” claros, formam a matriz por onde as manchas se espalham, formando ou não corredores. Como dito anteriormente a matriz é sempre o elemento predominante em uma paisagem, e a escolha dos “píxel’s” escuros, já que a área é dividida ao meio. Ainda cabe aqui ressaltar, que se nenhum tipo de elemento de paisagem for predominante, o maior grau de conectividade indicará qual elemento corresponde à matriz. Ainda, se nenhum destes critérios for observável, o papel dominante na dinâmica da paisagem determinará a matriz.

Fugindo um pouco da classificação da paisagem acima, que estuda a mesma através de seu mosaico organizacional, Suarez (1999), apresenta a seguinte classificação: - paisagem em que o homem não interveio; - paisagem em que a intervenção do homem criou, há muito,

um equilíbrio estável dos fatores ecológicos; - paisagem em que a intervenção do homem resulta em desequilíbrio permanente.

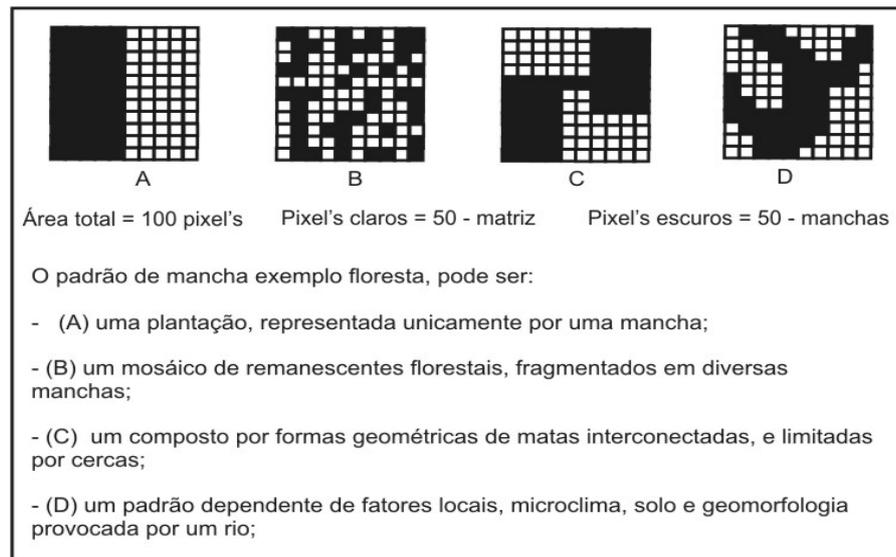


Figura 17 – Exemplos das formas organizacionais dos elementos da unidade paisagística (mancha, corredor e matriz). Fonte: Lagro (apud SOARES FILHO, 1998).

O estudo das características estruturais da paisagem visa desvendar as origens ou os mecanismos causais das texturas ou padrões, para com isso desenvolver os modelos que regem as transformações desta. Para alcançar este objetivo, os pesquisadores viram-se obrigados a desenvolver métodos quantitativos que liguem os padrões espaciais aos processos naturais e antrópicos em diversas escalas temporais e espaciais. Nesse sentido, diversos pesquisadores dos elementos da paisagem desenvolveram diversos métodos e índices para a descrição da configuração espacial da paisagem.

2.8 – Simulações LUCC

Para Soares Filho (1998), uma paisagem se encontra em perpétua evolução, podendo a sua estrutura e composição mudar drasticamente através do tempo. Da necessidade de se investigar essas mudanças, surgiram os estudos da dinâmica da paisagem. Conjuntamente a

evolução do conceito de paisagem levou ao desenvolvimento de novas maneiras ou tendências de se realizar estudos ambientais. Este desenvolvimento, em conjunto com a ampla disponibilidade de dados de Sensoriamento Remoto e com o desenvolvimento dos SIG's, abriu uma grande avenida para a pesquisa de modelagem de processos ambientais e de mudanças na paisagem.

A arte de se construir modelos é conhecida como modelagem, termo que se refere ao processo de pesquisa que leva à geração do modelo (representação) de um sistema. Este processo se desenvolve, então, através da definição de um conjunto de hipóteses ou predições, que poderão ser comparadas com medidas do mundo real. Dependendo da concordância entre o observado e o resultado gerado, o modelo será aceito, rejeitado ou modificado de alguma maneira, para novamente ser testado (SOARES FILHO, 1998, p.55).

Os modelos de paisagem conceituados acima, são classificados em três grandes grupos: modelo de escala, modelo conceitual e modelo matemático. O modelo de escala é, em geral, um modelo que reproduz uma redução simplória do sistema original. O modelo conceitual descreve o processo através da construção de organogramas que mostram o sistema principal e os processos e inter-relações entre os subsistemas formadores deste. Já o modelo matemático que será o desenvolvido e analisado por esta pesquisa, utiliza-se de sistemas de equações na construção deste, sendo que os modelos matemáticos podem ser classificados em dois grupos distintos: determinísticos ou estocástico-probabilísticos (STEYAERT, 1993).

Como os modelos da paisagem estão intimamente ligados aos padrões de uso da terra que definem o arranjo dos diferentes elementos da paisagem, a definição de terra de Stewart (apud ALMEIDA, 2003) no contexto científico é de que o termo terra é usado em um sentido compreensivo, integrador, referindo-se a um vasto espectro de atributos de recursos naturais em um perfil que vai desde a atmosfera até alguns metros abaixo da superfície da terra. Seus principais atributos são: clima, relevo, solo, vegetação, fauna e recursos hídricos. Ampliando a conceituação de Stewart, Almeida (Ibid.) diz que as qualidades da terra incluem, adicionalmente, atributos como propriedades topográficas, estruturais, agrícolas e minerais do sítio; o clima; a disponibilidade de ar e água; e finalmente, uma gama de características ambientais subliminares tais como tranquilidade, privacidade, aparência estética, harmonia organizacional.

O termo uso da terra está ligado à ação antrópica, ou seja, a destinação que o homem dá à terra. Nesse sentido, Skole (1994) afirma que o uso do solo é o emprego humano de certa cobertura da terra, o meio pelo qual a atividade humana se apropria dos resultados da produção primária líquida, conforme determinado por um complexo de fatores sócio-econômicos. Já o termo ‘mudança de uso da terra’ para Briassoulis (2000) significa transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de um dado tipo de uso do solo. Segundo esse autor, a mudança de uso pode envolver a conversão de um uso em outro, ou ainda a modificação de certo tipo de uso no seu padrão de desenvolvimento do mesmo uso. Assim o uso da terra pode modificar num sistema formador da paisagem, em vista disto os modelos de simulação procuram descrever os processos de uso da terra passados para então prever os cenários futuros.

Os modelos matemáticos têm sido há tempos criados para fins de estudos principalmente das paisagens urbanas, visando esclarecer processos de mudanças nas dinâmicas econômicas dos grandes centros metropolitanos. Uma das mais antigas contribuições neste sentido é a teoria de anéis concêntricos de 1826, elaborada por Von Thünen. Este estudioso das dinâmicas concebeu um modelo urbano-econômico muito simples, consistindo de uma cidade e umas regiões concêntricas à mesma. De acordo com este modelo, a partir de certa distância do centro, uma dada cultura irá suplantar as demais; em uma segunda área, uma outra cultura irá prevalecer sobre as restantes, e assim por diante. Neste caso, o uso mais intenso da terra será próximo ao centro, e o preço do aluguel e da terra decresce na periferia.

O modelo de Von Thünen serviu de inspiração para a criação de Cristaller, que desenvolveu os modelos da hierarquia de hexágonos, que por sua vez enfocam o conceito de atração de regiões centrais e funcionais (GARNER apud SOARES FILHO, 1998). Sua explicação baseia-se na tendência do ser humano em se aglomerar para obter vantagens de uma economia de escala, concentrando suas atividades em um lugar comum. Essas aglomerações surgem de uma força centrípeta atuando numa paisagem econômica. Os nós, nos seus vários tamanhos, se repetem numa hierarquia a partir de diferentes regiões focais, gerando uma partição do espaço na forma de redes regulares na figura de hexágonos agrupados.

De acordo com Soares Filho (1998), uma outra categoria de modelos, os modelos demográficos têm sido também muito usados na criação de padrões de uso da paisagem, a fim

de prever o desenvolvimento urbano, mudança na distribuição de idades, difusão de epidemias e localização de assentamentos. Estes modelos estabelecem que, no progresso do tempo de t para $t+n$, um segmento de uma população, dentro de uma célula de uma grade, morrerá (fluxo negativo), nascerá (fluxo positivo), difundirá ou se aglomerará (fluxo negativo e positivo). Conseqüentemente, os estudos da paisagem pelo geoprocessamento têm dado bastante atenção aos processos ou modelos de difusão. Um processo de difusão tem dois significados distintos na literatura, a difusão por expansão é o processo pelo qual, uma informação de estudo, se espalha de uma região para outra, aumentando assim conseqüentemente a sua área de predomínio; já em um processo de difusão por realocação, a informação estudada que está sendo difundida deixa as áreas originais e se move para as novas regiões.

Muitos destes modelos desenvolvidos a partir da preocupação dos grandes aglomerados urbanos são atualmente adaptados para estudos da paisagem de uma forma mais geral, tentando-se entender a paisagem como um sistema vivo completo, com todas as inter-relações já explicadas anteriormente. Destes modelos matemáticos vistos, o de cunho estocástico que leva em conta as diferentes probabilidades que a paisagem venha a ser ocupada por este ou aquele uso da terra é o que será desenvolvido por esta pesquisa.

2.8.1 – Modelo Estocástico

Modelos de estudo da paisagem, classificados como estocásticos ou probabilísticos de mudanças de uso do solo foram adaptados e projetados tendo como base as teorias e conceitos das cadeias de Markov. O processo básico de Markov segundo HOBBS apud SOARES FILHO (1998) pode ser expresso por:

$$\mathbf{\Pi}(t + 1) = \mathbf{P}^n \cdot \mathbf{\Pi}(t) \quad (3)$$

Onde $\Pi(t)$ é um vetor coluna, com n elementos, representando a condição do sistema em um tempo t particular (por exemplo, frações de terra em cada n_i tipo de uso do solo), $\Pi(t+1)$ é o vetor de ocupação nos n estados após o intervalo de tempo $t+1$ e P^n é a matriz de probabilidades de transição. Desta forma, todos os estados possíveis de aparecer usualmente são definidos como 1,2,3... n . Assim, para as cadeias de Markov de primeira ordem, P equivale a uma matriz de transição $n \times n$, cujo os elementos P_{ij} nas linhas representam a probabilidade de um determinado estado i permanecer no mesmo estado ou mudar para o estado j durante o intervalo de tempo de $t \rightarrow t+1$.

O processo analisado pela matriz de Markov simula a mudança de uso do solo de uma maneira multi-direcional, ou seja, parcelas de terra podem teoricamente mudar de uma categoria de uso de solo mutuamente exclusiva para uma outra em um tempo qualquer. Portanto, três categorias de uso do solo geram nove possibilidades diferentes de mudança, as quais são dispostas na seguinte matriz:

$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{vmatrix}$$

A simulação da paisagem baseada na matriz de Markov requer apenas que seja especificado um número finito de estados e que sejam conhecidas as probabilidades de transição, nas quais as variáveis mudam de um estado para outro em um intervalo de tempo discreto. Apesar da aparente simplicidade, Almeida (2003, p. 165), alerta que:

...várias limitações e suposições estão associadas com o emprego de modelos Markovianos para se simular mudanças de uso do solo. Uma importante limitação da cadeia de Markov reside na suposição de que a probabilidade de um conjunto particular de saídas depende unicamente da distribuição atual entre os estados e das probabilidades de transição. Portanto, a cadeia de Markov é um processo de primeira ordem. Porém, também é possível definirem-se cadeias cuja relação de dependência envolva mais de um estado precedente. Uma cadeia de dupla dependência, por exemplo, é dependente de dois estados precedentes. Se esses dois estados forem os dois imediatamente precedentes, a cadeia é de segunda ordem. No entanto, neste caso, a projeção de um comportamento futuro seria muito mais difícil.

De acordo com Baker (1989, p. 156), a falta de continuísmo dos modelos markovianos ao simular o uso da terra pode ser compensada quando estes são cruzados com outras informações relevantes para o aumento ou a diminuição das probabilidades de mudanças.

as cadeias de Markov, mostram-se extremamente úteis na simulação de cenários, uma vez que mesmo se as transições forem não-estacionárias na realidade, a estacionariedade pode ser assumida como um dispositivo heurístico, ou seja, cadeias de Markov podem ser ajustadas para incorporar efeitos de mais alta ordem, como a influência de variáveis endógenas e exógenas.

A contribuição de variáveis endógenas e exógenas para as transições de uso do solo, estacionárias ou não-estacionárias, pode ser modelada usando-se a seguinte equação abaixo:

$$\Pi(t+1) = P [f(t)] \cdot \Pi(t) \quad (4)$$

Onde P é uma matriz com elementos P_{ij} , com $P_{ij} = b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$ e $b_1 \dots b_n$ são os parâmetros que relacionam P_{ij} às variáveis X_1, X_2, \dots, X_n . Seguindo essa linha de pensamento, X_1, \dots, X_n podem representar variáveis endógenas e exógenas. No caso da modelagem de mudanças do uso da terra, variáveis endógenas correspondem, por exemplo, as condições geomorfológicas do relevo, da vegetação, do solo. Já as variáveis exógenas referem-se às condições impostas como, leis de uso e manejo do solo, disponibilidade econômica, formas e necessidades de ocupação humana, além de alterações nas condições climáticas vigentes sobre a paisagem a ser modelada.

Para definir as variáveis que influenciam as probabilidades de mudanças de uso expressas pelas cadeias de Markov, os pesquisadores da dinâmica da paisagem criaram o Método de Pesos de Evidências, que por sua vez é baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes (CARTER apud ALMEIDA, 2003). Para a autora, o teorema de Bayes define que a mudança de um uso I para J ocorre devido a uma evidência X , também definida como variável explicativa. Assim a fórmula para se definir a ocorrência de um uso I , em relação à presença de uma evidência X é definida por:

$$P \{R/S\} = \frac{P \{R \cap S\}}{P \{S\}} \quad (5)$$

Sendo R o evento que representa a variável de transição de um uso *I* para *J*. E o S a variável explicativa. P {R ∩ S} então representa a probabilidade condicional de ocorrência da transição R, dada a presença da variável S. Sendo N a contagem total de pixels dos mapas (área de um evento ou uma evidência), a fórmula anterior pode ser reescrita para:

$$P \{R/S\} = \frac{N \{R \cap S\}}{N \{S\}} \quad (6)$$

Como o Método de Pesos e Evidências relacionam variáveis através de probabilidades de ocorrência, a probabilidade a posteriori de transição *I* para *J* (evento R) é definida pela relação da probabilidade a priori de transição já definida e relacionada a probabilidade condicional de estar ou não na área da evidência S, ou seja, pela fórmula:

$$P \{S/R\} = \frac{N \{S \cap R\}}{N \{R\}} \quad (7)$$

Como P {S ∩ R} é o mesmo que P {R ∩ S}, as Equações anteriores podem ser combinadas para determinar P {R / S}:

$$P \{R/S\} = \frac{P \{R\} \cdot P \{S/R\}}{P \{S\}} \quad (8)$$

Porém, não basta para o modelo estocástico calcular o peso da probabilidade de ocorrência de uma transição de uso da terra a posteriori em relação a presença de uma

variável evidência S. Logo tem-se que calcular também a probabilidade de ocorrência da transição dada a ausência da variável S.

$$P \{R/\bar{S}\} = \frac{P \{R\} \cdot P \{\bar{S}/R\}}{P \{\bar{S}\}} \quad (9)$$

As equações anteriormente apresentadas podem ser expressas sob a forma de odds. Odds são definidos como a razão da probabilidade de que um evento irá ocorrer pela probabilidade de que ele não irá ocorrer. O Método de Pesos de Evidência usa os logaritmos naturais dos odds, conhecidos por log odds ou logits. Para se clarificar essa abordagem, as equações anteriores serão convertidas para odds. Para tanto, basta dividirem-se os dois lados da equação por $P \{R/\bar{S}\}$:

$$\frac{P \{R/S\}}{P \{\bar{R}/S\}} = \frac{P \{R\} \cdot P \{S/R\}}{P \{\bar{R}/S\} \cdot P \{S\}} \quad (10)$$

Se levar em conta as definições de probabilidade condicional e as equações anteriores, tem-se que:

$$P \{\bar{R}/S\} = \frac{P \{\bar{R} \cap S\}}{P \{S\}} = \frac{P \{S/\bar{R}\} \cdot P \{\bar{R}\}}{P \{S\}} \quad (11)$$

Substituindo-se as equações anteriores, chega-se à seguinte fórmula:

$$\frac{P \{R/S\}}{P \{\bar{R}/S\}} = \frac{P \{R\} \cdot P \{S\} \cdot P \{S/R\}}{P \{\bar{R}\} \cdot P \{S\} \cdot P \{S/\bar{R}\}} \quad (12)$$

Substituindo-se odds nas probabilidades de ocorrência pela presença e ausência de transição, tem-se que:

$$O \{R/S\} = O \{R\} \cdot \frac{P \{S/R\}}{P \{S/\bar{R}\}} \quad (13)$$

Onde $O \{R/S\}$ é o odds condicional (a posteriori) de R dado S; $O \{R\}$ é o odds a priori de R; e sendo que $P \{S/R\} / P \{S/\bar{R}\}$ é conhecido nos modelos de modelagem como razão de suficiência (LS). No Método de Pesos de Evidência, calcula-se o logaritmo natural de ambos os lados da equação anterior, e o log de LS é denominado peso positivo de evidência W^+ , por ocorrer devido a presença desta. Assim tem-se a fórmula que postula o valor do peso para uma transição em decorrência de uma variável endógena ou exógena, que influencia de certa forma a mudança do uso da terra:

$$\log \{R/S\} = \log \{R\} + W^+ \quad (14)$$

Uma vez visto como se extrai para o modelo de simulação o valor de um peso de transição entre dois tipos de uso da terra em relação a uma determinada variável física ou humana atuante sobre a paisagem, Carter descreve as principais vantagens do modelo de Bayes:

A possibilidade de combinação de múltiplos mapas de evidências em um modelo de fácil adaptação a linguagens computacionais; - a incorporação ao modelo de mapas de entrada com dados incompletos; - a possibilidade de aplicação de mapas multiclasse, onde cada fatia é tratada como uma evidência presente (ou razão de probabilidade); - a modelagem de incertezas devido a variações nos pesos e dados incompletos (CARTER apud ALMEIDA, 2003, p.140).

Finalizando, Almeida (2003), diz ainda que, embora a determinação de parâmetros no Método de Pesos de Evidência seja feita individualmente para cada variável, a fórmula de probabilidade agrega toda a informação relacionada a cada uma dessas variáveis. Os pesos de

evidência podem, portanto ser considerados como um método onde o modelador monitora todo o processo de determinação de parâmetros. Desta forma o autor considera ainda que este método mereça preferência na aplicação de simulação em vista de sua transparência e simplicidade operacional, o que contribui para uma calibração do modelo mais rápida e consistente.

2.9 – Aplicativos computacionais

Para o desenvolvimento desta pesquisa, serão utilizados basicamente três aplicativos computacionais, O primeiro a ser descrito é o SPRING, um programa voltado para o geoprocessamento, no que tange a criação e desenvolvimento de mapas com as mais variadas informações referentes ao Estado do Rio Grande do Sul. O segundo programa, em ordem de utilização será um pacote estatístico chamado de MINITAB para as definições das variáveis, das matrizes e dos pesos que irão compor o modelo de simulação. Na terceira etapa computacional desta pesquisa, será utilizado o programa DINAMICA, que é por sua vez um aplicativo destinado a simulação de cenários.

2.9.1 – SPRING

Segundo o próprio conceito dos criadores do programa, o produto SPRING (Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas) é um banco de dados geográfico de 2º geração, desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para ambientes UNIX e Windows com as seguintes características:

- Opera como um banco de dados geográfico sem fronteiras e suporta grande volume de dados (sem limitações de escala, projeção e fuso), mantendo a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo banco;

- Administra tanto dados vetoriais como dados matriciais (“raster”), e realiza a integração de dados de Sensoriamento Remoto num SIG;
- Possui um ambiente de trabalho amigável e poderoso, através da combinação de menus e janelas com uma linguagem espacial facilmente programável pelo usuário (LEGAL - Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra);
- Consegue escalonabilidade completa, isto é, ser capaz de operar com toda sua funcionalidade em ambientes que variem desde micro-computadores a estações de trabalho RISC de alto desempenho.

Para alcançar estes objetivos, ainda segundo seus criadores, o SPRING é baseado num modelo de dados orientado a objetos, do qual são derivadas sua interface de menus e a linguagem espacial LEGAL. Algoritmos inovadores, como os utilizados para indexação espacial, segmentação de imagens e geração de grades triangulares, garantem o desempenho adequado para as mais variadas aplicações. Outra característica, considerada extremamente importante, é que a base de dados é única, isto é, a estrutura de dados é a mesma quando o usuário trabalha em um micro computador (IBM-PC) e em uma máquina RISC (Estações de Trabalho UNIX), não havendo necessidade alguma de conversão de dados. O mesmo ocorre com a interface, a qual é exatamente a mesma, de maneira que não existe diferença no modo de operar o produto SPRING.

No SPRING um conjunto de objetos componentes de um mapa, tem como características básicas o fato de serem tratados como um plano de informação (PI). Em um projeto que serve para definir a projeção cartográfica e delimitar a área de estudo, cada PI está associado a uma categoria e conseqüentemente refere-se a um único modelo de dados (temático, numérico, imagem, cadastral ou rede). As representações de um PI são diferenciadas em função do modelo de dados ao qual pertencem; por exemplo, um PI de categoria numérica poderá ter como representações: amostras (pontos e linhas), grade regular, grade triangular (TIN) ou isolinhas. Veja a seguir as diferentes formas de classificação de objeto da paisagem ao ser incorporado em um banco de dados no SPRING.

- Temático: podem ser: - Pontos, apresentação de todos os pontos 2D; Linhas, apresentação de todas as linhas que definem ou não polígonos; Matriz, formato matricial dos vetores; Classes, apresentação de pontos/linhas/polígonos que estão associados às classes, com seus respectivos visuais; Texto, toponímia gerada automaticamente ou editada.
- Numérico: podem ser: Amostras, pontos cotados e isolinhas importadas ou editadas; Grade, grade retangular; TIN, grade triangular; Isolinhas, isolinhas geradas a partir de grade; Imagem, imagem em níveis de cinza da grade; Texto, toponímia gerada automaticamente ou editada.
- Imagem: podem ser representadas por: M, canal monocromático; R, canal vermelho; G, canal verde, B, canal azul; Texto, toponímia editada sobre a imagem; Sintética, codificação de três bandas em uma única imagem; Classificada, imagem criada por processos de classificação; Rotulada, linhas criadas pela segmentação de imagens.
- Rede: representadas por: Linhas, apresentação de todas as linhas; Objetos, apresentação das linhas/nós que estão associados a objetos, com seus respectivos visuais; Texto, toponímia gerada automaticamente ou editada.
- Cadastral: podem ser: Pontos, apresentação de todos os pontos 2D; Linhas, apresentação de todas as linhas que definem ou não polígonos; Objetos, apresentação de pontos/linhas/polígonos que estão associados aos objetos, com seus respectivos visuais; Texto, toponímia gerada automaticamente ou editada.

Desta forma, com o uso de algoritmos pré-programados do aplicativo SPRING é possível a classificação do uso da terra nas datas previstas nos objetivos desta pesquisa, através das imagens de satélite, como também a confecção dos demais mapas temáticos referentes aos diversos elementos formadores das paisagens gaúchas. O SPRING possui ainda um amplo conjunto de possibilidades para os formatos de exportação de dados, facilitando assim o uso dos diferentes aplicativos requeridos para elaboração dos mapas finais de simulação de cenários pelo modelo estocástico.

2.9.1 – MINITAB

O programa estatístico MINITAB teve seu início em 1972 idealizado por uma equipe de professores da Universidade da Pensilvânia para utilização no ensino da Estatística. Segundo Moore & McCABE'S (2003), atualmente este programa é usado por mais de 4000 faculdades e universidades em todo o mundo e é referenciado por aproximadamente 450 livros texto. Os autores lembram ainda que o aplicativo MINITAB oferece ao seu público as mais diversas opções de entrada de dados, além de portar um grande número destes, também o programa disponibiliza grande variedade de escalas de trabalho e de nota e representações possíveis na saída dos gráficos e tabelas.

A grande variedade de ferramentas estatísticas que o MINITAB põe a disposição, além de menu, ou barra de ferramentas facilita os processo de análise estatística cruzada entre os diferentes pares de informações. O processo de análise de variáveis que irão compor o modelo de simulação será realizado através do algoritmo estatístico de stepwise, onde o modelo de regressão vai incorporando variáveis independentes que influenciam a variável dependente. Como o objetivo de qualquer modelo estatístico de regressão é selecionar o mínimo, e ao mesmo tempo, o melhor conjunto de variáveis de entrada para explicar certo fenômeno a meta para o modelo estocástico é extrair o conjunto de mapas mais influente nos tipos de uso da terra.

Ainda para Gazola (2002), o procedimento stepwise presume um único conjunto ótimo de variáveis independentes. Desta forma, para identificá-lo, as equações de regressão são computadas pelas ferramentas estatísticas que adicionam ou excluem uma variável independente a cada etapa, sem a intervenção do usuário. A rotina desse procedimento permite que uma variável independente, trazida para dentro do modelo em um estágio anterior, seja removida subsequentemente se ela não ajudar na conjunção com as variáveis adicionadas nos últimos estágios.

Com este propósito, Almeida (2003) comenta que o método backward stepwise é adotado para a seleção do conjunto final de variáveis independentes. Assim o modelo inicial inclui todas as variáveis e exclui a variável menos significante a cada passo. A significância foi avaliada com base na influência das variáveis independentes sobre o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajd}), no modelo de regressão final. Em termos percentuais, R^2_{ajd}

indica o quanto o modelo de regressão criado a partir das variáveis explica melhor que a média da variável dependente, ou seja, se $R^2_{ajd} = 0$, a média seria a melhor medida para explicar o comportamento de uso da terra (nenhuma das informações seria relevante). Se $R^2_{ajd} > 0$, indica que as variáveis independentes influenciaram no modelo. Sabe-se que a literatura dos testes estatísticos exemplifica que quanto mais próximo de 1 o valor do R^2_{ajd} melhor é ajustado o modelo para explicar as variáveis, porém para esta pesquisa, se o coeficiente de determinação ajustado apresentar valor acima de 0 para qualquer uma das variáveis representadas pelos mapas, esta será mantida no modelo, pois pode influenciar a mudança do uso da solo, por menor que seja a sua significância.

2.9.2 – DINAMICA

O programa computacional, como dito anteriormente, para a aplicação do modelo de simulação estocástico usado por esta pesquisa será o DINAMICA, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR – UFMG). O programa DINAMICA foi escrito em linguagem C++ orientada a objetos, e sua versão atual roda em sistema Windows © 32 bits (SOARES FILHO et al., 2002).

Sendo o DINAMICA um aplicativo que visa a entrada de informações na forma de mapas raster, de uso da terra e de variáveis temáticas, a fim de rodar modelos de simulação de cenários baseado em modelos estocásticos. Para Almeida (2003), operar o programa, são necessários um mapa inicial de uso do solo e dois conjuntos de dados correspondentes às variáveis de entrada estáticas e dinâmicas. Todos esses mapas em conjunto com os parâmetros obtidos tanto pelo método de pesos de evidência como também a matriz de probabilidades de Markov serão usados para o cálculo das possibilidades de transição das células, ver Figura 18.

Para Soares Filho (1998), as variáveis estáticas referem-se a mapas referentes as diferentes características humanas e físicas da paisagem. Assim as variáveis dinâmicas referem-se a mapas de distância a certos tipos de uso do solo. Essas variáveis por sua vez sofrem alterações a cada iteração do programa, que são continuamente atualizadas de modo a influenciar o cálculo das probabilidades de transição na próxima iteração. Portanto, a cada iteração do programa, ocorrem mudanças no estado (uso do solo) das células, mudando assim a distribuição dos usos que novamente são recalculados para novas etapas da simulação.

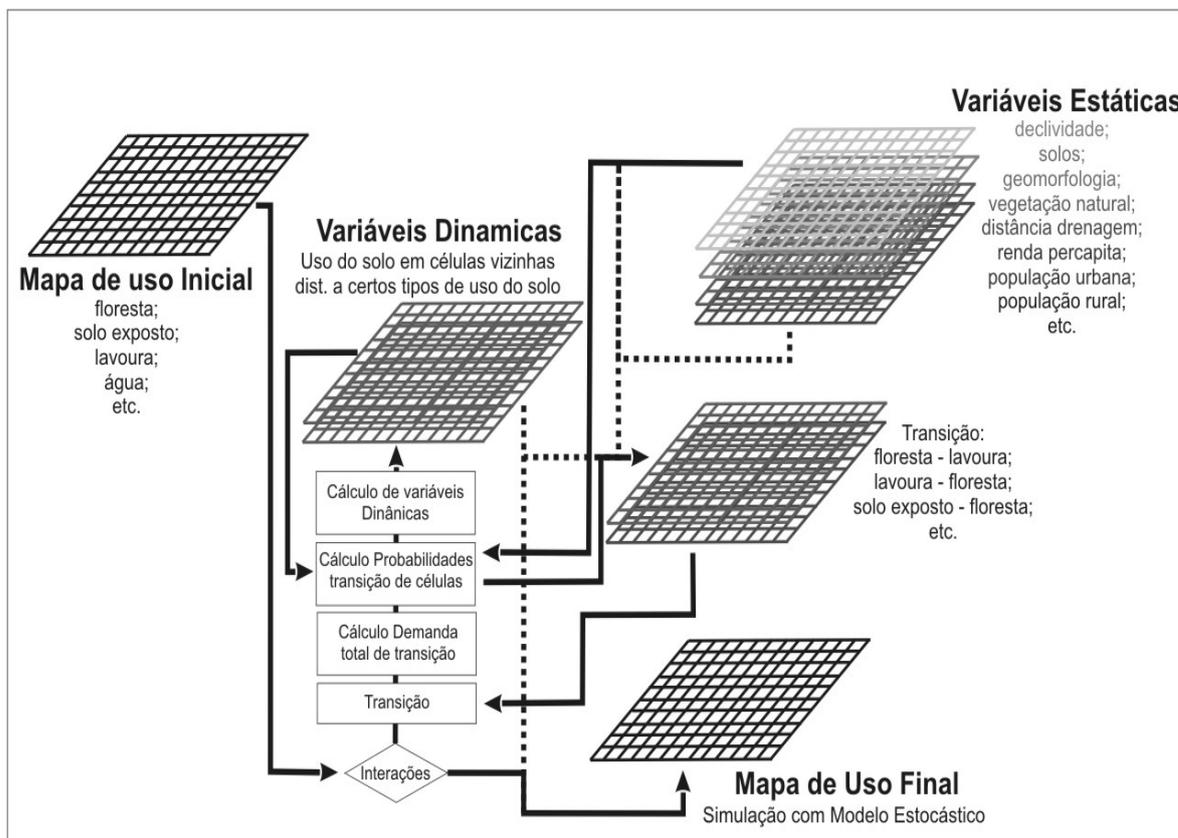


Figura 18 – Esquema da entrada, manipulação e saída de dados no aplicativo DINAMICA. Fonte: Soares Filho (1998), adaptado por HENDGES (2007).

Dentre as principais informações que são incorporadas no processo de modelagem estocástica do DINAMICA pode-se citar:

- um arquivo contendo os valores dos pesos positivos de evidência (W+);
- as probabilidades globais de transição para cada mudança de uso do solo identificada no período de simulação considerado (cadeia de Markov);
- o tamanho e a variância de manchas para cada transição;
- a proporção dos algoritmos de transição ou alocação (função expander e função patcher) também considerando cada transição;
- o número total de iterações.

Segundo Soares Filho et al. (2002), o DINAMICA apresenta dois algoritmos de transição do uso do solo (ou de alocação do uso do solo): as funções *expand* e *patcher*. A função *expand* responde pela expansão de manchas previamente existentes de certa classe de uso do solo. A função *patcher*, por sua vez, destina-se a gerar novas manchas através de um mecanismo de constituição de sementes. Em suma, a função *expand* executa transições de um estado I para um estado J apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado J. E a função *patcher* realiza transições de um estado I para um estado J apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado diferente de J. E no caso de a função *expand* não executar a quantidade de transições desejadas após um número fixo de iterações, ela transfere à função *patcher* um número residual de transições, de modo que o número total de transições sempre alcance um valor esperado.

Para Almeida (2003, p. 183):

Ambos os algoritmos de transição do aplicativo DINAMICA adotam um mecanismo estocástico de seleção. O algoritmo aplicado consiste no escaneamento do mapa de uso do solo inicial para identificar as células com valores de probabilidade mais elevados, e dispô-las em um vetor de dados. Seguindo este procedimento, as células desse vetor são selecionadas aleatoriamente em sentido descendente (o mecanismo estocástico de seleção interna pode ser suavizado ou realçado, dependendo do grau de aleatoriedade desejada). Em um estágio final, o mapa de uso do solo é novamente escaneado para se executar as transições selecionadas.

Ainda segundo a autora, as funções *expand* e *patcher*, conforme anteriormente mencionado, incorporam um dispositivo de alocação que é responsável pela identificação de células com as maiores probabilidades para cada transição IJ. Neste processo, cada célula recém-selecionada formará o núcleo de uma nova mancha ou franja de expansão, que ainda necessita ser consolidada usando-se um dos dois algoritmos de transição. Os tamanhos das novas manchas e franjas de expansão são definidos de acordo com uma distribuição de probabilidade, cujos parâmetros são determinados em função do tamanho médio e variância de cada tipo de mancha e franja de expansão a ser gerada.