



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS
Programa de Pós-Graduação em
Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente**

DAVID BRITO DE CERQUEIRA

**LEVANTAMENTO DO ESTOQUE DE CARBONO NA VEGETAÇÃO
COM BASE EM GEOTECNOLOGIAS**

FEIRA DE SANTANA

2007

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS
Programa de Pós-Graduação em
Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente**

DAVID BRITO DE CERQUEIRA

**LEVANTAMENTO DO ESTOQUE DE CARBONO NA VEGETAÇÃO
COM BASE EM GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito à obtenção de título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Washington Franca-Rocha.

FEIRA DE SANTANA

2007

C416 Cerqueira, David Brito de.

Levantamento do estoque de carbono na vegetação
com base em Geotecnologias / David Brito de Cerqueira. – 2007.
114 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, 2007.
Orientador Washington Franca-Rocha.

1. Sequestro de carbono 2. Vegetação
3. Processamento digital de imagens de satélite.
I. Universidade Estadual de Feira de Santana. Departamento de Ciências
Exatas. II. Título.

CDD 550

DAVID BRITO DE CERQUEIRA

**LEVANTAMENTO DO ESTOQUE DE CARBONO NA VEGETAÇÃO
COM BASE EM GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito à obtenção de título de Mestre.

Data de aprovação:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Washington Franca-Rocha – Orientador

Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

Prof. Dr. Iedo Bezerra Sá

AGRADECIMENTOS

A Deus, autor e mantenedor de minha vida.

À minha amada esposa, Kênia, pelo companheirismo.

À minha família, pelo apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Washington Franca-Rocha, pelo empenho e compromisso com o trabalho e pela amizade consolidada.

Ao Prof. Dr. Cássio van den Berg, pela paciência e disponibilidade.

Ao Prof. Dr. Ardemirio de Barros Silva, pelo prazer de ensinar.

À Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), através do Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, pelo apoio institucional.

*Filho meu, se aceitares as minhas palavras;
entesourares contigo os meus mandamentos,
para fazeres atento à sabedoria o teu ouvido,
e para inclinares o teu coração ao entendimento;
sim, se clamares por discernimento,
e por entendimento alçares a tua voz;
se o buscares como a prata,
e o procurares como a tesouros escondidos:
Então entenderás o temor do Senhor;
e acharás o conhecimento de DEUS.
Porque o Senhor dá a Sabedoria;
da sua boca procedem o conhecimento e o entendimento.*

Provérbios 5

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo estimar o estoque de carbono em vegetação, com base na calibração de índices de vegetação por inventário florestal com amostragem indireta da biomassa. Para alcançar este objetivo, definiu-se as dimensões territoriais das unidades vegetacionais constituintes da área de estudo, através do mapeamento da vegetação. A área de trabalho, compreendida entre as coordenadas UTM 167476 E, 8528819 N e 221504 E 8485678 N zona 24, localiza-se na região de Rio de Contas - BA, e está inserida no Bioma Caatinga. Por meio de inventário florístico, avaliou-se a variabilidade de espécies na área, bem como a determinação das melhores equações alométricas representativas das vegetações. Foi efetuada a calibração do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com base no conteúdo de C estimado a partir da aplicação das equações alométricas em parcelas georreferenciadas, resultando em uma imagem de conteúdo de carbono. A quantificação da biomassa e do *pool* de carbono foram efetuadas a partir da imagem de C. A validação consistiu na quantificação de carbono em parcelas aleatoriamente selecionadas em campo, utilizando-se de equações alométricas, e seu confronto com as estimativas obtidas no mesmo local pelo procedimento de calibração. Por fim, foi estabelecido o gradiente C através do cruzamento do mapa de vegetação com a imagem NDVI transformada para os diferentes tipos de vegetação existentes na área de estudo, a saber: caatinga, carrasco, cerrado e campo rupestre. Concluiu-se que o modelo proposto nesta pesquisa para quantificação do teor de carbono na vegetação: (i) apresentou um erro médio menor do que aqueles encontrados em procedimentos padrões de inventário de biomassa, diminuindo o efeito de discretização e aumentando a segurança dos mapeamentos do teor de carbono na vegetação; (ii) permitiu a quantificação do *pool* de carbono em vegetações não inventariadas presentes na área de estudo; (iii) permitiu estabelecer o Gradiente C para as diferentes vegetações presentes na área de estudo e localizar, dentro de um mesmo extrato de vegetação, as áreas onde ocorrem diferentes concentrações de carbono. Adicionalmente, os resultados obtidos apresentaram estimativas ampliadas de conteúdo de C em vegetação de Caatinga.

Palavras-Chave: Seqüestro de carbono. Vegetação. Processamento digital de imagens de satélite. Bioma Caatinga. Geotecnologias.

ABSTRACT

This study is aimed at estimating the stock of carbon in vegetation, based on the calibration of vegetation index by forest inventory with indirect biomass sampling. To achieve this goal it was defined the territorial dimensions of the vegetation units that compose the area of study through the vegetation mapping. The area of study is located between coordinates UTM 167476 E, 8528819 N 221504 and 8485678 N, zone 24, in the region of Rio de Contas-Ba, and inserted in Biome Caatinga. Through forest inventory, the variability of species in the area was assessed, as well as the determination of the best allometric equations representative of the vegetation. The calibration of the Normalized difference vegetation index (NDVI) was based on the content of C estimated from the application of the allometric equations in geo-referenced parcels, resulting in an image of carbon content. The quantification of biomass and carbon pool was made from the image of C. The validation was the quantification of carbon in randomly selected plots in the field, using allometric equations and its confrontation with the estimates obtained in the same location by the calibration procedure. Finally, the C gradient was established by crossing the map of vegetation with the NDVI image transformed for different types of vegetation in the areas of study, namely: "caatinga", "carrasco", "cerrado" (savannah) and "campo rupestre". It was concluded that the model proposed in this research to quantify the content of carbon in vegetation (i) showed an average deviation lower than those ones found in standard procedures for inventory of biomass, demonstrating that there was a decrease in the effect of discretization, improving the quality of mapping the carbon content in vegetation, (ii) enabled the quantification of the pool of carbon in vegetation not represented in the vegetation inventory of the area of study (iii) has set the C gradient for different vegetation in the area of study and find the areas where different concentrations of carbon occur within the same category of vegetation,. Additionally, the results showed expanded estimates of the content of C in the "caatinga" vegetation.

Key-words: Carbon Sequestration. Vegetation. Digital processing of satellite imagery. Biome Caatinga. Geotechnologies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1:	Depósitos de carbono em Gt.	21
Figura 1:	Ciclo global do carbono.	22
Quadro 2:	Estoque de carbono em Gt./ano.	23
Quadro 3:	Relação de entrada e saída de carbono na atmosfera em Gt./ano.	23
Gráfico 1:	Participação dos depósitos na retirada de CO ₂ da atmosfera.	24
Quadro 4:	Estimativas de biomassa seca para a floresta densa da Amazônia brasileira.	29
Figura 2:	Representação do espectro eletromagnético e suas subdivisões em relação aos comprimentos de onda.	33
Figura 3:	Representação da curva de reflectância.	34
Figura 4:	Localização da área de estudo.	39
Figura 5:	Mapa de uso e cobertura do solo.	42
Figura 6:	Fluxograma geral da pesquisa.	47
Quadro 5:	Aplicações das bandas do LANDSAT 7	51
Figura 7:	Fluxograma representando a metodologia utilizada para determinação do Gradiente C	63
Figura 8:	Fluxograma metodológico do PDI.	64
Quadro 6:	Biomassa das parcelas utilizadas para calibração do NDVI.	68
Figura 9:	Fluxograma dos procedimentos de calibração.	68
Figura 10:	Histograma da imagem NDVI	73

Figura 11:	Histograma da imagem NDVI reamostrada.	75
Quadro 7:	Características da imagem usada para os cálculos de biomassa.	75
Quadro 8:	Biomassa das parcelas inventariadas para calibração, ajustadas à área dos pixels.	76
Figura 12:	Esquema demonstrativo da seleção do pixel representante da parcela.	76
Quadro 9:	Pixels selecionados para a análise de correlação.	77
Quadro 10:	Resultado da análise de correlação.	77
Figura 13:	Gráfico de dispersão resultante da análise de correlação.	77
Figura 14:	Imagem resultante da regressão linear.	78
Figura 15:	Comparação dos histogramas das imagens NDVI e YPC.	79
Figura 16:	Distribuição espacial dos valores negativos observados no histograma da imagem YPC.	79
Quadro 11:	Número de indivíduos amostrados nas parcelas de validação.	82
Quadro 12:	Biomassa das parcelas utilizadas para validação.	82
Quadro 13:	Pixels selecionados para a análise de correlação.	83
Quadro 14:	Comparação dos valores de biomassa obtidos nas parcelas em campo com aqueles obtidos na imagem YPC.	83
Quadro 15:	Comparação dos valores de biomassa obtidos nas parcelas em campo com aqueles obtidos na imagem biomassa.	84
Quadro 16:	Comparação dos valores de biomassa obtidos nas parcelas em campo com aqueles obtidos através da média de biomassa por m^2 na área das parcelas.	84
Quadro 17:	Comparação dos valores de biomassa obtidos no pixel com aqueles obtidos através da média de biomassa por m^2 na área dos pixels.	85
Quadro 18:	Comparação dos valores de biomassa obtidos em 4 pixels com aqueles obtidos através da média de biomassa por m^2 na área dos pixels.	85

Quadro 19:	Comparação entre os desvios do modelo.	86
Quadro 20:	Comparação entre os desvios médios dos modelos.	87
Quadro 21:	Parâmetros globais de medidas de carbono na vegetação.	87
Quadro 22:	Comparação entre os valores médios de carbono na vegetação da área de estudo, com parâmetros globais de medidas de carbono na vegetação.	88
Quadro 23:	Dados utilizados na composição da equação de regressão para determinação do Gradiente C.	89
Quadro 24:	Resultado da análise de correlação para determinação do Gradiente C.	90
Figura 17:	Gráfico de dispersão resultante da análise de correlação para determinação do Gradiente C.	90
Figura 18:	Imagem resultante da regressão linear para GC.	91
Figura 19:	Imagem GC para a área de estudo.	91
Figura 20:	Mapa de uso e cobertura do solo.	92
Quadro 25:	Total de carbono por vegetação na área de estudo.	93
Figura 21:	Mapa do Gradiente C para a vegetação Cerrado.	94
Figura 22:	Mapa do Gradiente C para a vegetação Campo Limpo.	95
Figura 23:	Mapa do Gradiente C para a vegetação Carrasco.	96
Figura 24:	Mapa do Gradiente C para a vegetação Campo Rupestre.	97
Figura 25:	Mapa do Gradiente C para a vegetação Secundária.	98
Figura 26:	Mapa do Gradiente C para a vegetação Caatinga.	99
Quadro 26:	Total de carbono por vegetação na área de estudo.	102
Gráfico 2:	Curvas do Gradiente C para a vegetação da área de estudo	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CAP – circunferência à altura do peito (1,30m)
- CE – Comércio de Emissões
- CER – Certificados de Emissões Reduzidas
- CFCs – clorofluorcarbonos
- COP – Conferência das Partes
- CQNUMC – Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
- DAP – diâmetro à altura do peito (1,30m)
- DAS – diâmetro ao nível do solo
- FBMC – Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas
- GEE – Gases de Efeito Estufa
- GPS – Global Position System
- GtC – Gigatonelada de carbono
- IPCC – International Panel on Climate Change
- LULUCF – Land Use, Land Use Change and Forestry
- MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- NDVI – Índice de vegetação por diferença normalizada
- PQ – Protocolo de Quioto
- RAS – raio ano nível do solo
- SIG – Sistema de Informações Geográficas
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

LISTA DE SÍMBOLOS

C	–	carbono
CH ₄	-	gás metano
cm	–	centímetro
CO ₂	–	gás carbônico
g	–	grama
Gg	–	1 tonelada x 10 ⁹
Gt	–	Gigatonelada (1000 toneladas)
GtC	–	Gigatonelada de carbono
kg	–	quilograma
m	–	metro
Mg	–	Megagrama (mesmo que tonelada)
Mg Bm/m ²	–	megagramas de biomassa por metro quadrado
Mg ha ⁻¹	–	megagramas por hectare (mesmo que toneladas por hectare)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	19
2.1	GERAL	19
2.2	ESPECÍFICOS	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1	CICLO GLOBAL DO CARBONO	20
3.2	MEDIÇÕES DE CARBONO NA VEGETAÇÃO	26
3.2.1	O espectro eletromagnético e o comportamento espectral da vegetação	33
3.2.2	Índices de vegetação	36
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
4.1	CLIMA	40
4.2	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	41
4.3	VEGETAÇÃO	42
4.4	FLORESTA MONTANA	43
4.5	FORMAÇÕES FLORESTAIS DECÍDUAS	43
4.5.1	Carrasco	43
4.5.2	Caatinga	44
4.6	CAMPO RUPESTRE	45
4.7	CERRADO	45
5	METODOLOGIA	47
5.1	REFERENCIAL TEÓRICO- METODOLÓGICO	47
5.1.1	Processamento digital de imagem	48
5.1.2	Integração e análise de dados através de geoprocessamento	53
5.2	INVENTÁRIO	54
5.3	DEFINIÇÃO DE EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS	55
5.4	GRADIENTE C	57
5.4.1	Método para determinação do Gradiente C	63

5.5	TÉCNICAS	64
5.5.1	Mapeamento	64
5.5.2	Inventário	65
5.5.3	Atividades Laboratoriais	66
5.5.4	Biomassa e Teor de Carbono	66
5.5.5	Calibração do NDVI	68
5.5.5.1	Intersecção	69
5.5.5.2	Separação de Classes (classificação das Imagens Índice	69
5.5.5.3	Amostragem alométrica da vegetação	70
5.5.5.4	Modelo de Correlação	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
6.1	CALIBRAÇÃO DO NDVI	73
6.1.1	Reescalonamento e Reamostragem do NDVI	73
6.1.2	Ajuste dos valores de biomassa para a área do pixel re-amostrado	75
6.1.3	Análise de Correlação e Regressão	76
6.2	VALIDAÇÃO	80
6.2.1	Resultados da Amostragem de Campo	80
6.2.2	Nivelamento das medidas de biomassa	82
6.3	MÉTODO PROPOSTO X MÉTODO TRADICIONAL	83
6.4	GRADIENTE C: RESULTADOS DA QUANTIFICAÇÃO DO POOL DE CARBONO NAS TIPOLOGIAS VEGETAIS DA ÁREA DE ESTUDO	89
7	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	100
7.1	DIMINUIÇÃO DO EFEITO DE DISCRETIZAÇÃO E AUMENTO DA SEGURANÇA DOS MAPEAMENTOS DO TEOR DE CARBONO NA VEGETAÇÃO	100
7.2	QUANTIFICAÇÃO DO POOL DE CARBONO EM VEGETAÇÕES NÃO INVENTARIADAS PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO	101
7.3	GRADIENTE C PARA AS DIFERENTES VEGETAÇÕES PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO	102
7.4	RECOMENDAÇÕES	104
	REFERÊNCIAS	105

1 INTRODUÇÃO

A biosfera do planeta Terra vem sofrendo grandes alterações em decorrência das atividades industriais, resultando na quase duplicação da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera entre os anos de 1950 e 1998. (ROCHA, 2003).

De acordo com o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007), esse aumento poderá elevar as temperaturas globais de superfície ao intervalo entre 1,1 e 6,4 °C, entre 1990 e 2100. O aquecimento resultaria em extremos climáticos globais como recuo glacial, aumento no nível do mar e em padrões de precipitação, ocasionando outras alterações em efeito cascata, tais como, enchentes e secas, variações na disponibilidade agrícola, vazão reduzida em rios durante o verão, extinção de espécies e aumento em vetores de doenças. (IPCC, 2001b; ROCHA, 2003).

Visando prevenir tais transformações, foi estabelecida no ano de 1992, durante a Rio 92, a Convenção Quadro das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas. A convenção passou a vigorar em 1994, e atualmente possui mais de 180 partes (países) que se encontram em eventos periódicos denominados de Conferência das Partes (COP).

A COP, realizada em Quioto, no ano de 1997, é reconhecida mundialmente como sendo uma das mais importantes, por ter estabelecido um acordo de redução de emissões de GEE para os países do Anexo II (países desenvolvidos que pagam os custos para países em desenvolvimento), além de estabelecer critérios e diretrizes para os mecanismos de mercado.

Conhecido como Protocolo de Quioto, esse acordo estabeleceu que os países industrializados devem reduzir, no período de 2008 a 2012, as taxas de emissão de GEE em 5,2% dos valores observados em 1990. (UNFCCC, 2001).

Para atingir as metas de redução, o protocolo autorizou a criação de um mercado internacional para emissão de Certificados de Emissões Reduzidas (CER) para seqüestro de carbono, através do qual os países desenvolvidos podem comprar dos países em

desenvolvimento as suas quotas de redução de emissões e usá-las para atingir os seus limites de emissões; são os chamados Créditos de Carbono (Fórum Brasileiro..., 2002).

O CER é uma das estratégias contidas no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que por sua vez, propõe que para cada tonelada de CO₂ deixada de ser emitida ou retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento, será emitido um certificado ou título a ser negociado no mercado mundial.

No bojo do MDL foram estabelecidas estratégias de compensação ambiental que têm por finalidade conter e reverter o acúmulo de gás carbônico (CO₂) na atmosfera. Dentre essas estratégias, verifica-se a implementação de atividades de florestamento e reflorestamento, denominada de seqüestro de carbono pela vegetação.

O seqüestro de carbono, nesse contexto, é intimamente ligado às atividades de Uso da Terra, Mudanças de Usos da Terra e Floresta (do inglês, *Land Use, Land Use Change and Forestry* – LULUCF). O LULUCF ainda hoje é motivo de controvérsia entre os países integrantes do Protocolo de Quioto devido às divergências no que tange a utilização dessas atividades. (ROCHA, 2003).

Visando diminuir o impasse, a COP 7, realizada em Marrakesh, em 2001, acordou que os procedimentos de LULUCF deveriam atentar, dentre outros critérios, para: (a) as atividades de LULUCF devem se basear em conhecimento científico sólido; (b) metodologias consistentes utilizadas ao longo do tempo para determinação das estimativas do seqüestro de carbono e do monitoramento das atividades de LULUCF; (c) a implementação das atividades de LULUCF devem contribuir para a conservação da biodiversidade e para o uso sustentável dos recursos naturais (UNFCCC, 2001).

No âmbito desses critérios, várias iniciativas de LULUCF (seqüestro de carbono) podem ser citadas no Brasil, dentre as quais se pode destacar:

- Projeto Peugeot, no Mato Grosso, com investimentos em torno de US\$ 15 milhões em projetos de recuperação florestal. (YU, 2004);
- Projeto PLANTAR, em Curvelo-MG, onde 12% do carbono a ser fixado pelo Projeto (0,4m tC) foram negociados com o Fundo Protótipo de Carbono (PCF) do Banco

Mundial ao preço US\$ 12,8/t C, para financiar parte do reflorestamento, resultando num crédito de US\$5,25 milhões pelo Rabobank. (YU, 2004);

- CSW-Utilities, em Guaraqueçaba-PR, que investiu US\$ 5,4 milhões na preservação de 7.000 ha de Mata Atlântica. (YU, 2004);
- Manejo de Babaçuais – Carajás – Instituto Pró-Natura: visa difundir tecnologia para o manejo e enriquecimento de florestas nativas da palmeira babaçu, com intuito de seqüestrar carbono e produzir carvão. O Projeto prevê o seqüestro de 175.000 t/C/ano e pretende incorporar o CER, com valores em torno de US\$ 5,00/t C. (ROCHA, 2003).

Rocha (2003), investigando o modelo *Carbon Emission Reduction Trade* (CERT), conclui que o mercado de carbono já é uma realidade no Brasil, porém, encontra-se em estágio inicial. O autor estima que o mercado de carbono brasileiro poderá gerar um lucro de US\$ 327,6 milhões, em 2010.

Apesar de se apresentar como alternativa possível, sob os pontos de vista econômico e técnico, como demonstram os projetos já desenvolvidos no Brasil, são poucas as informações disponíveis sobre o estoque de carbono na vegetação. Essa realidade é uma limitação à captação de recursos internacionais para a preservação das vegetações brasileiras.

No Brasil, além da possibilidade de recebimento de recursos para preservação das florestas naturais existentes, é necessária uma política agressiva de seqüestro de carbono, pautada no compromisso de recuperação de áreas degradadas e no reflorestamento, uma vez que a experiência brasileira ainda é limitada, e os estudos relacionados ao aspecto do carbono da atmosfera estão restritos ao domínio das florestas (Amazônia, Mata Atlântica e, principalmente, a Araucária e florestas plantadas). (SILVA, 1989; SOUZA; JESUS, 1991; SCOLFORO; MELLO; LIMA, 1999; REIS et al, 1998).

A falta de informação em relação às demais tipologias vegetacionais brasileiras é um complicador para o avanço dos estudos em relação ao seqüestro de carbono. Nesse sentido, produzir informações concernentes aos estoques de carbono na vegetação se reveste de fundamental importância. Isso porque, somente através do conhecimento dos estoques, é que se pode avaliar a participação das tipologias vegetais brasileira no equilíbrio global do

carbono na atmosfera e planejar ações de políticas públicas voltadas para a preservação, pautadas na mitigação do excesso de dióxido de carbono da atmosfera.

Outra limitação para a quantificação de carbono na vegetação é a metodologia utilizada no mapeamento. As metodologias utilizadas, em linhas gerais, seguem o seguinte protocolo (SCHLEGEL; GAYOSO; GUERRA, 2001 e MACDICKEN, 1997): 1. Amostragem, direta ou indireta; 2. Ajuste por funções de regressão com dados de medidas diretas ou através da composição de equações alométricas com base nos dados da composição florística; 3. Mapeamento da vegetação; 4. Extrapolação da amostragem para a tipologia vegetal ou área mapeada.

MacDicken (1997) e Schlegel, Gayoso e Guerra (2001) embasam seus trabalhos em duas premissas: o alto custo de monitoração e verificação do armazenamento do carbono, e nível da validade científica desejado. Ambos descrevem um sistema de métodos *cost-effective* para a monitoração e verificação, em base comercial, para três tipos de uso do solo: plantações de floresta, florestas naturais e agro-florestas controladas nos moldes de precisão especificados pelas agências financiadoras.

Nos dois trabalhos se pode identificar três fatores que determinam a acurácia da quantificação do estoque de carbono:

- O mapeamento da vegetação, uma vez que a quantificação é formulada em função da área ocupada por uma dada entidade vegetal;
- A escala do mapeamento. Este vem a ser o elemento primordial nesse enfoque, posto que, em função da escala é que serão determinados o tamanho e a quantidade de parcelas a serem inventariadas e a área de ocupação de uma determinada vegetação;
- Os procedimentos para a extrapolação, que consistem em ampliar para toda a área estudada os valores médios medidos dentro da área inventariada.

Para garantir a eficiência do mapeamento, devem ser adotadas metodologias que diminuam os erros resultantes do efeito escala e dos procedimentos de extrapolação.

Em ambos os manuais, observam-se algumas limitações no que tange a esses princípios. MacDicken (1997) utiliza imagens de satélite de alta resolução para identificar mudanças do

uso do solo e como mapas de fundo para um sistema de informação geográfica. Para extrapolação, ele sugere alguns modelos que deverão ser feitos com os dados oriundos das medidas de campo nas parcelas inventariadas. Schlegel, Gayoso e Guerra (2001) não descrevem em seu trabalho técnicas para extrapolação ou de delimitação das unidades de uso do solo. Ele se limita a apontar algumas metodologias para estimar o número de parcelas considerando o tamanho da área a ser estabelecida, o carbono total e o grau de confiança.

Em ambos os métodos descritos, há uma preocupação com o grau de confiança no resultado. Porém, nota-se uma limitação à medida que se verifica uma excessiva discretização da realidade por não considerar a variação espacial das condições edafoclimáticas dentro de um mesmo extrato vegetacional. Significa dizer que, mesmo utilizando imagens de alta resolução espacial, modelos de interpolação e cálculos eficientes na determinação do número de parcelas a serem amostradas, os resultados destes procedimentos podem mascarar a realidade, uma vez que esta variação impõe à vegetação diferenças no que diz respeito ao índice de estresse e, conseqüentemente, no estoque de carbono.

Isso ocorre porque a quantidade de carbono de uma planta varia em função de sua biomassa, que por sua vez é reflexo de sua saúde. Sendo assim, quanto mais sadio for o indivíduo, maior será a quantidade de biomassa e de carbono; e quanto mais estressado estiver, menor a quantidade de biomassa e carbono presente.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Estimar o estoque de carbono em vegetação com base na calibração de índices de vegetação por amostragem indireta da biomassa a partir de equações alométricas.

2.2 ESPECÍFICOS

- Quantificar o estoque de carbono em formações vegetais não-florestadas;
- Desenvolver uma metodologia com base na integração de sensoriamento remoto e trabalhos de medições de carbono em campo;
- Contribuir para a diminuição do efeito de discretização dos modelos convencionais, visando melhorar a confiabilidade dos resultados do mapeamento do estoque de carbono na vegetação;
- Oferecer uma alternativa para melhorar as estratégias de mapeamento dos estoques de carbono.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 CICLO GLOBAL DO CARBONO

O ciclo do carbono no planeta é alvo de estudo de diversos ramos da ciência, sendo motivo de preocupação de governos e da opinião pública, pelas conseqüências diretas e indiretas na sociedade e na economia mundial, uma vez que o aumento excessivo do Dióxido de Carbono (CO₂) tem contribuído consideravelmente para a alteração dos níveis de aquecimento global. A velocidade com que essa alteração tem ocorrido, de acordo com o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007), dentro de algumas décadas, caso não haja ações efetivas, levará a Terra a mudanças climáticas que podem ocasionar secas, inundações, desertificação, verões mais quentes e secos, tempestades violentas etc.

O aquecimento global é fundamental para a manutenção do Sistema Terra. O efeito estufa, causado por certos gases, particularmente o CO₂, expelido na atmosfera por diversas fontes, atualmente popularizado como um mal para o planeta, possui um papel fundamental para esse aquecimento. É através dele, dentre outros agentes, que o planeta mantém sua temperatura, permitindo as reações químicas e fotoquímicas e, conseqüentemente, a troca de energia entre as integrantes do Sistema Terra. O CO₂ resulta naturalmente da queima de matéria orgânica e da respiração dos animais e plantas, contribuindo para o efeito estufa.

As moléculas de CO₂ presentes na atmosfera são transparentes para a radiação de ondas curtas emitidas pelo Sol, e forte absorvedoras da radiação infravermelha oriunda da superfície terrestre. (SANTOS, 1999). É essa absorção que impede que algumas radiações emitidas pela Terra sejam perdidas para o espaço e, por conseguinte, ocorra o resfriamento do planeta.

Contudo, de acordo com o IPCC (2001), as emissões antropogênicas de gases como o CO₂, principalmente aquelas geradas pela utilização de combustíveis fósseis e de queimadas, têm alterado a naturalidade das emissões e provocado um desequilíbrio do sistema, elevando a temperatura do planeta a índices preocupantes.

Neftel et al (1985) afirmam que a quantidade de CO₂ aumentou cerca de 25% desde o início da Revolução Industrial. Para Martins (2004), o aumento do CO₂ na atmosfera terrestre está principalmente ligado às atividades humanas relacionadas com a indústria e agropecuária. De acordo com Molion (2006), a principal fonte antropogênica é resultante da queima de combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural e as queimadas.

No período pré-industrial o equilíbrio entre as emissões e a assimilação de CO₂ na atmosfera manteve sua concentração estável. (ANDRADE, 2002). No entanto, durante os últimos 200 anos, cerca de 170 gigatoneladas de carbono (GtC) foram libertadas para a atmosfera, sendo aproximadamente 70% consequência da queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e 30% pelas alterações no uso do solo, principalmente destruição das florestas. (ANDRADE, 2002).

Essas emissões se adicionaram às que ocorrem naturalmente e, por não serem compensadas totalmente pela assimilação fotossintética, levaram ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. O Quadro 1 representa as alterações da quantidade de carbono nos principais depósitos do Sistema Terra.

DEPÓSITO	ÉPOCA PRÉ-INDUSTRIAL (ANTES DE 1800)	ATUALMENTE
Atmosfera	580	750
Superfície do oceano	980	1020
Profundidades do oceano	3800	3800
Vida aquática	3	3
Solo	1600	1580
Vegetação	700	610

Quadro 1 - Depósitos de Carbono em Gt (ANDRADE, 2002).

O carbono do Sistema Terra se encontra essencialmente na forma de compostos orgânicos e carbonatos ou sob a forma de CO₂ na atmosfera. O ciclo do carbono consiste na transferência desse elemento (via queima, respiração, reações químicas) para a atmosfera ou para o mar e a sua reintegração na matéria orgânica via assimilação fotossintética. A Figura 1 representa o estoque inter-depósitos de CO₂ através de processos biogeoquímicos envolvendo a atmosfera, a litosfera e a hidrosfera.

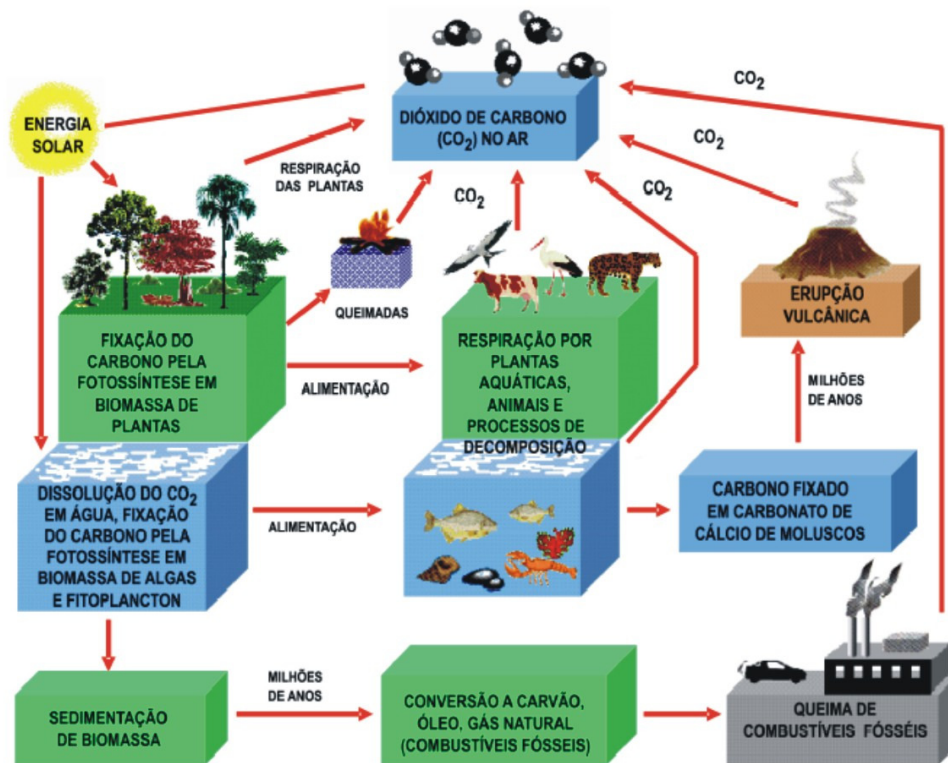


Figura 1 – Ciclo global do Carbono. (MARTINS et al, 2004).

Os passos mais importantes do ciclo do carbono são:

- O CO₂ na atmosfera é absorvido pela vegetação e convertido em açúcar, pelo processo de fotossíntese;
- Os animais se alimentam das plantas e, ao decomporem os açúcares, liberam carbono na atmosfera, oceanos e solo;
- Os organismos em decomposição lançam carbono na atmosfera;
- O carbono é trocado ainda entre a atmosfera e os oceanos. Isso acontece em ambos os sentidos na interação entre o ar e a água.

Outro aspecto a ser observado quando se estuda o carbono, é a relação dinâmica existente entre os depósitos. No Quadro 2 pode-se visualizar os valores de transferência anual entre esses.

EMISSOR – RECEPTOR DE CARBONO	VALOR ATUAL GT
vegetação - atmosfera	60
atmosfera - vegetação	61,4
mudança no uso do solo - atmosfera	1,6
atmosfera - mudança no uso do solo	0,5
superfície oceânica - atmosfera	90
atmosfera - superfície oceânica	92
biota marinho - superfície do oceano	40
superfície do oceano - biota marinho	50
oceano intermediário e profundo – superfície do oceano	100
superfície do oceano - oceano intermediário e profundo	91,6
queima de combustíveis fósseis - atmosfera	5,5

Quadro 2 – Estoque de carbono em Gt./ano. (modificada de ANDRADE, 2002).

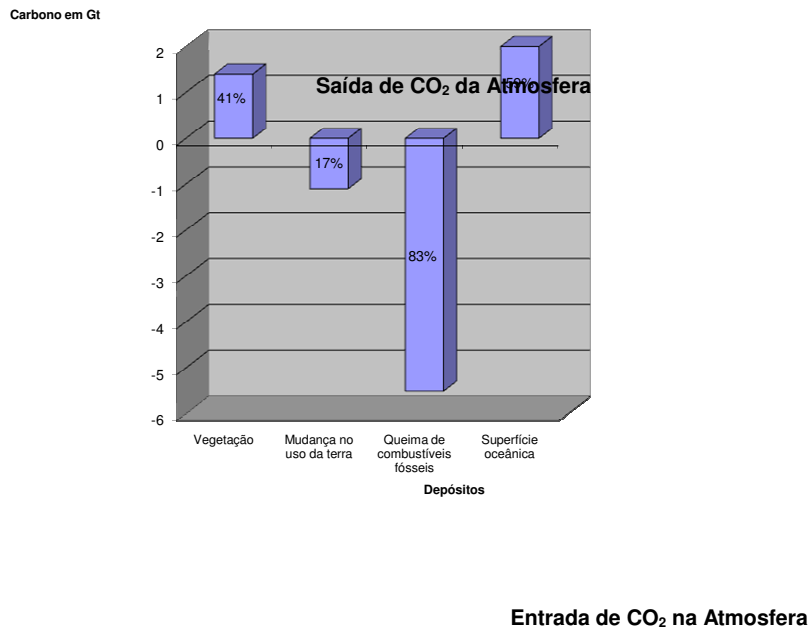
Ao observar os valores de entrada e saída de carbono na atmosfera na forma de CO₂ (Quadro 3), nota-se que a diferença entre a saída e a entrada é de 3,2 GtC/ano. Isto significa que a cada ano 3,2 GtC são liberadas para a atmosfera, o sistema está em desequilíbrio e a produção do CO₂ é maior que a capacidade de absorção pelo sistema.

ESTOQUE		TOTAL EM GT
vegetação	atmosfera	60,0
mudança no uso da terra	atmosfera	1,6
queima de combustíveis fósseis	atmosfera	5,5
superfície oceânica	atmosfera	90,0
TOTAL DE ENTRADAS NA ATMOSFERA		157,1
atmosfera	vegetação	61,4
atmosfera	mudança no uso da terra	0,5
atmosfera	superfície oceânica	92,0
TOTAL DE SAÍDA DA ATMOSFERA		153,9
DIFERENÇA DE SAÍDA E ENTRADA		3,2

Quadro 3 – Relação de entrada e saída de Carbono na atmosfera em Gt./ ano. (ANDRADE, 2002).

Considerando os valores do Quadro 3, pode-se perceber ainda que este *déficit* é dado basicamente pela queima de combustíveis fósseis, que é responsável por 5,5 Gt de lançamento de CO₂ na atmosfera. Outro fato importante é que a diferença de fixação e liberação entre vegetação/atmosfera e a superfície oceânica/atmosfera é de 1,4 e 2 GtC/ano, respectivamente,

podendo-se concluir que a vegetação contribui com 41% na fixação de CO₂. O Gráfico 1 representa a participação dos depósitos na retirada e fixação de carbono da atmosfera.



Fonte: Compilado de Andrade (2002)

Como demonstrado, as emissões de carbono são influenciadas por fatores de origem humana e natural. Nessa perspectiva, vale ressaltar que, apesar de alguns sistemas naturais constituírem grandes reservatórios de carbono, a dinâmica do seu ciclo é, sobretudo, controlada pelos sistemas que têm maior capacidade de trocas ativas com a atmosfera, como é o caso da vegetação e do solo.

A fotossíntese que ocorre nas plantas terrestres é responsável pela retenção de carbono atmosférico no material vegetal e, eventualmente, na matéria orgânica no solo. Assim, ecossistemas com grande biomassa e com o solo pouco perturbado, no que diz respeito a queimadas, uso de procedimentos inadequados na colheita, conversão em uso não florestal do solo etc retêm o carbono numa escala temporal na ordem de décadas e séculos. (HOSOKAWA; MOURA; CUNHA, 1998; MOURA-COSTA, 1998).

Nos últimos 140 anos, cerca de 20% das florestas, atualmente o principal tipo vegetacional analisado para fins de fixação de carbono, tem sido transformada em áreas agrícolas (CORREIA, 2007). A exploração intensiva de culturas agrícolas, que têm uma baixa taxa de retenção de carbono atrelada ao crescente uso de fertilizantes, são também responsáveis pelo aumento dos gases de estufa (CH_4 e NO_2) na atmosfera. (MARTINS et al, 2004).

Em contrapartida, as florestas têm sido consideradas como o reservatório de carbono mais importante da biosfera global. Isso porque, dentre as biomassas mais importantes na fixação de CO_2 , destacam-se as florestas, que possuem as maiores concentrações de material orgânico por unidade de área. (ANDRADE, 1978).

De acordo com o Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas (FBMC), as florestas são o maior reservatório de carbono, contendo cerca de 80% de todo o carbono estocado na vegetação terrestre e cerca de 40% do carbono presente nos solos. Ainda de acordo com o FBMC, grandes quantidades de carbono podem ser emitidas para a atmosfera durante a transição de um tipo de floresta para outro, caso a mortalidade libere carbono mais rapidamente que a regeneração e o crescimento o absorvam. Nesse aspecto, pode-se afirmar que a redução global da área desses ecossistemas naturais terá impactos negativos sobre a capacidade de sumidouro de CO_2 da biosfera. (FBMC, 2002 apud Renner, 2004).

O aumento das emissões de CO_2 e suas conseqüências sobre as alterações globais do clima são questões recentes que preocupam a sociedade. As incertezas quanto à modelagem do sistema climático, na definição de padrões de alteração no espaço e no tempo, a quantificação relativa de fixação de carbono entre os diversos tipos vegetacionais, entre outros, são fatores que inquietam a comunidade científica e contribuem para acentuar esse problema que afeta o Sistema Terra.

Tais incertezas têm propiciado divergências de opiniões entre os países, principalmente no que diz respeito à definição e adoção de estratégias de adaptação e mitigação. Esse fato é evidenciado quando da não adesão ao Protocolo de Quioto por partes de alguns países desenvolvidos, como é o caso dos Estados Unidos, Andorra, Vaticano, República da China, entre outros.

Aderir a Quioto significa modificar/ajustar os modos de produção e consumo. Países como os Estados Unidos têm utilizado dessas incertezas para justificar sua não participação no

protocolo. Esse discurso é fortalecido com a idéia de que a adesão prejudicaria gravemente a economia americana. Aceitar o documento obrigaria os Estados Unidos a reduzir em 7% suas emissões de gás carbônico e outras substâncias que aquecem a atmosfera e isso teria implicações diretas em sua economia.

Nesse contexto, o seqüestro de carbono, realizado a partir da preservação da vegetação ou mesmo do reflorestamento, torna-se uma alternativa viável, quando feito de maneira responsável, levando em consideração a necessidade do equilíbrio ecológico dos biomas a serem preservados, e, principalmente, aqueles que serão recuperados: as ações de preservação de florestas e de reflorestamento terão que respeitar outros princípios inerentes à qualidade ambiental como, por exemplo, manutenção dos recursos hídricos e da biodiversidade.

A introdução indiscriminada de espécies com alto poder de fixação de carbono numa dada vegetação não é uma solução para desequilíbrio do ciclo de CO₂ na atmosfera. Antes, constitui outro problema: o desequilíbrio ecológico nas áreas de introdução por consequência da chamada invasão biológica. Esse vem a ser um dos piores problemas ecológicos atuais e se constitui no estabelecimento de espécies animais ou vegetais, vindas de outras regiões, em ecossistemas naturais ou manejados pelo homem, e seu posterior alastramento, passando a dominar o ambiente e a causar danos às espécies originais e ao próprio funcionamento dos ecossistemas. (PIVELLO, 2007).

Desse modo, faz-se necessário um estudo aprofundado das variáveis que compõe esse sistema, bem como o comportamento de cada vegetação em relação ao estoque de carbono, além do comportamento das várias espécies de flora que interagem nesse contexto.

3.2 MEDIÇÕES DE CARBONO NA VEGETAÇÃO

O ciclo global de carbono é composto de vários ciclos menores e complexos. A fotossíntese, nesse contexto, vem a ser um dos ciclos mais importantes. Esse diz respeito à respiração e depende intimamente da presença de plantas, animais e bactérias. As plantas, aquáticas ou terrestres, absorvem gás carbônico e, usando água e luz solar, convertem o gás carbônico em tecido vivo liberando o oxigênio (O₂) para a atmosfera.

A produção de massas vegetais, num povoamento florestal, origina-se da fotossíntese, ou assimilação do CO₂ do índice de área foliar e do tipo de folha. A assimilação de CO₂, que está intimamente relacionada ao consumo de água (transpiração), acontece por meio da entrada passiva através dos estômatos, cuja abertura é regulada principalmente pela intensidade da luz e o regime hídrico interno da planta. Dessa maneira, o CO₂ é consumido predominantemente durante o dia e liberado durante os processos de respiração, formando-se um estoque de CO₂ na planta e em torno dela.

A quantidade de carbono a ser fixada varia em função da composição florística e da densidade populacional de cada estrato por comunidade vegetacional que compõe a biomassa. Nesse sentido, a quantificação das frações raiz, tronco e folha se revestem de grande importância e metodologias de amostragem e modelagem para sua inferência, tornam-se prioritárias para embasar a tomada de decisões. (MAESTRI, 2004). Inúmeros estudos do conteúdo de carbono em florestas vêm sendo desenvolvidos recentemente e a maioria se baseia em amostragem destrutiva da biomassa e ajuste de modelos alométricos para sua estimativa.

Os trabalhos de mapeamento do estoque de carbono na vegetação demandam tempo, um alto investimento e resultam na eliminação de áreas de vegetação. Isso ocorre porque os métodos utilizados necessitam produzir a queima de um percentual da biomassa que compõe a unidade vegetacional estudada.

Em linhas gerais, as medições de carbono, tradicionalmente, seguem o seguinte protocolo: 1. Mapeamento da vegetação e delimitação da área a ser estudada; 2. Estratificação e amostragem, direta ou indireta; 3. Composição de equações alométricas com base nos dados da composição florística; 4. Extrapolação da amostragem para a tipologia vegetacional; 5. Estimativa do estoque de carbono, Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. (CQNUMC, 2006).

De acordo com a CQNUMC (2006), as áreas dos projetos de medições de carbono na vegetação são normalmente heterogêneas em termos de micro-clima, condição do solo e cobertura de vegetação, além de conterem diferentes espécies de árvores. Dessa forma, faz-se necessária a estratificação da área do projeto, o que pode aumentar a precisão das medições e do monitoramento de forma econômica, uma vez que,

[...] a estratificação ajuda a agrupar as parcelas, 'a serem inventariadas', no projeto, em unidades homogêneas de substratos e estratos 'facilitando o

inventário florestal e reduzindo tempo nos trabalhos de campo'. Os fatores que influenciam diretamente os reservatórios de carbono, tais como precipitação, tipo de solo, erosão, qualidade do local, tipo de espécie, estrutura da formação, uso da terra, regime de manejo, etc. podem ser úteis na estratificação da área do projeto. (CQNUMC, 2006, p. 47).

A estratificação também deve ser utilizada para descrever os limites da área do projeto e a composição das espécies.

No método de amostragem direto, determinam-se parcelas de área fixa e, em seguida, todas as árvores que ocorrem dentro dessas parcelas são derrubadas e pesadas. No indireto, a biomassa é estimada com base em dados de inventários florestais onde o volume da madeira é a principal variável considerada.

Os dois métodos geram muita polêmica por produzirem estimativas desencontradas, mesmo quando se usa o mesmo banco de dados. (FEARNSIDE; LEAL FILHO; FERNANDES, 1993; BROWN; GILLESPIE; LUGO, 1989; HIGUCHI et al., 2004; FOSTER BROWN et al., 1995).

No caso da amostragem direta, a limitação do método se deve ao fato de que as estimativas se baseiam em poucas parcelas, pequenas e arbitrariamente escolhidas. No método indireto é considerado o volume da madeira, e esse se apresenta de forma dinâmica, sofrendo variações inter-espécies, ao nível da composição florística, e intra-espécie, ao nível morfológico, uma vez que existem diferenças entre as diversas partes da planta (tronco, galhos, raiz, folhas etc.). A atribuição de pesos a essas variáveis gera resultados diferenciados, mesmo quando a análise é feita com a mesma base de dados para determinar a biomassa.

O Quadro 4 delinea essa diferença em termos de toneladas de carbono na Amazônia, e foi parcialmente reproduzido de Fearnside, Leal Filho e Fernandes (1993). São consideradas apenas a biomassa viva acima do nível do solo e as análises são feitas com base nos mesmos dados de inventário.

TIPO DE FLORESTA	BIOMASSA (MG/HA)	FONTE
Densa (RADAMBRASIL)	268	Brown & Lugo (1992 ^a) – cf. fonte*
Densa (FAO)	162	Brown & Lugo (1992 ^a) - cf. fonte*
Densa (RADAMBRASIL)	289	Brown & Lugo (1992b) - cf. fonte*
Densa (FAO)	227	Brown & Lugo (1992b) - cf. fonte*
Densa (presente)	142	Fearnside (1992 ^a) - cf. fonte*
Densa (presente)	320	Fearnside (unpub. 1993) - cf. fonte*

Quadro 4 - Estimativas de biomassa seca para a floresta densa da Amazônia brasileira. Mg = mega grama ou tonelada.

Fonte: Fearnside, Leal Filho e Fernandes (1993).

Nota-se que os autores apresentaram estimativas de biomassa diferentes. Essa variação pode ser fruto dos pesos atribuídos aos parâmetros que foram utilizados para o cálculo da biomassa (HIGUCHI et al, 2004). Como a biomassa é calculada com base em variáveis como diâmetro do tronco, altura das árvores, forma de dossel etc. a determinação de pesos a essas variáveis vai interferir diretamente nos resultados, uma vez que o conjunto dos dados pode sofrer variação maior ou menor para os referidos parâmetros.

A amostragem indireta se utiliza de equações alométricas e reflete a tentativa de melhor balancear os níveis de concentração de biomassa ao nível morfológico da espécie, através de funções que estimem a biomassa total com base no tamanho e dimensões das árvores e na composição florística. São desenvolvidas funções matemáticas baseadas em relações alométricas que ocorrem entre as partes de cada indivíduo. De acordo com Causton (1985 apud BARRA, 2002) ela se constitui uma ferramenta importante para construir modelos mecanicistas de crescimento florestal que têm resultados úteis para as medições de carbono na vegetação.

O mapeamento da vegetação no âmbito do protocolo das medições de carbono ganha ênfase à medida que a quantificação é formulada em função da área ocupada por uma dada entidade vegetacional. Nesse sentido, características como escolha das classes, metodologia e, principalmente, a escala do mapeamento, tornam-se vitais para a confiabilidade dos resultados da quantificação da biomassa e, conseqüentemente, do carbono.

A escolha das classes determina os tipos de vegetação que ocorrem numa área. É através dela que são determinadas as áreas de inventário e o tipo de metodologia a ser utilizada para a amostragem. A metodologia utilizada para a produção do mapa de vegetação dependerá, além

da legenda, de fatores como a característica morfológica da área, a acessibilidade, recursos financeiros etc. Uma metodologia inadequada pode produzir erros que levarão a equívocos nas medições de biomassa.

A escala do mapeamento é, sem dúvida, o elemento primordial nesse enfoque. É em função da escala que serão determinados o tamanho e a quantidade de parcelas a serem inventariadas. Ainda em função da escala, será conhecida a área de ocupação de uma determinada vegetação: quanto maior a escala, mais acurada será a determinação da área de ocorrência.

Os procedimentos para a extrapolação consistem em ampliar para toda a área estudada os valores médios alcançados dentro da área inventariada. As metodologias utilizadas para tanto devem variar em função da escala, da matriz de inventário, do grau de confiabilidade e nível de precisão. Contudo, é comum encontrar medições onde a extrapolação é feita através de um ajuste linear, multiplicando o conteúdo médio de C amostrado (em megagramas de carbono por hectare - Mg ha^{-1}) na área inventariada, pelo total da área de estudo.

Esse procedimento pode não oferecer um resultado satisfatório, tendo em vista que na maioria das vezes não se tem uma cartografia da vegetação com precisão que possibilite a extrapolação, com segurança estatística, dos teores de carbono estocado.

Uma outra limitação pode ser observada nesse contexto: a variação espacial das condições edafoclimáticas dentro de um mesmo extrato vegetacional. A área ocupada por um extrato de vegetação possui características de solo e disponibilidade hídrica bastante variadas. Essa variação impõe à vegetação uma diferença no que diz respeito ao índice de estresse. Nas regiões onde o solo possui maior quantidade de nutrientes, aliada a uma boa disponibilidade de água, a vegetação tende a ser mais sadia. Onde acontece o inverso, a vegetação tende a ser estressada e naturalmente ocorre uma diminuição da biomassa da planta. Sendo assim, mesmo que se tenha maior precisão cartográfica, e que se consiga um resultado acurado na separação de tipologias vegetacionais, a extrapolação ainda deve considerar essa variação. Algumas experiências anteriores utilizaram essa metodologia conforme descrito a seguir.

Rezende et al. (2006) apresentam um estudo que objetivou selecionar modelos para estimativa de volume, biomassa e estoque de carbono para o cerrado *sensu stricto* da Fazenda Água Limpa, em Brasília, DF. Nesse trabalho, foi utilizada a amostragem indireta e o mapa de vegetação derivou de técnicas de interpretação de imagem de satélite.

Foram selecionadas casualmente dez parcelas de 20x50m, em uma área de 63,54 ha, destinada ao estudo. Em cada parcela foram amostrados todos os indivíduos lenhosos com diâmetro ≥ 5 cm, tomado a 30cm do solo. Esses indivíduos foram distribuídos em classes de diâmetro com intervalos de 4cm e, em seguida, para o ajuste dos modelos alométricos, foram selecionados casualmente 25% de cada classe considerando troncos e galhos com diâmetro mínimo de 3 cm com casca. Cerca de 174 árvores foram derrubadas e pesadas. Vários modelos matemáticos lineares (aritméticos e logarítmicos) foram testados e a escolha do melhor modelo foi baseada no coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa e na análise gráfica dos resíduos.

Após a seleção do modelo foi estimado o valor, por hectare, das variáveis volume, biomassa lenhosa verde e seca e estoque de carbono para o cerrado *sensu stricto*, com base em dados provenientes de um inventário contínuo realizado a cada três anos na área de estudo. O resultado apontou um estoque de carbono de $4,93 \pm 0,54 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Martins (2004) apresenta uma proposta metodológica para efetuar uma análise do potencial de fixação de carbono na recomposição florestal em áreas de mata ciliar, visando à obtenção de créditos de carbono do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, como previsto no Protocolo de Quioto. A metodologia proposta é aplicada para uma microbacia da região do município de São Carlos, SP, Micro Bacia do Rio Jacaré-Guaçu. O estoque de carbono foi calculado utilizando dados sobre o tempo de desenvolvimento e diâmetro de cada espécie e equações alométricas de crescimento.

Neste trabalho, a metodologia aplicada à determinação da quantidade de carbono acumulada no reflorestamento é calculada seguindo as seguintes etapas:

1. [...] Instalar um número significativo de parcelas amostrais fixas nos remanescentes de mata ciliar da região de estudo. As amostras devem ser georreferenciadas com o auxílio de um GPS (*global positioning system*);
2. Dentro de cada amostra, todas as árvores com diâmetro a altura do peito (DAP) maior que 15 cm devem ser identificadas por espécie e classe de diâmetro e ter sua circunferência medida;
3. A partir desses dados é possível determinar, para cada amostra, o número médio de indivíduos e o DAP médio para cada espécie dentro de cada uma das categorias de diâmetro;
4. Esses dados devem ser combinados com uma equação alométrica adequada para a região de estudo [...]. (MARTINS, 2004, p. 60.)

Essa metodologia considerou a biomassa acima do solo e nas raízes, e determinou o valor de 88,4 Mg ha⁻¹. Em seguida, esse valor foi multiplicado pela área de ocorrência da mata ciliar, alvo do estudo.

Aguilar (2001), estudou 14 espécies de bosque nativo sempre-verde e 3 espécies de plantações exóticas no Chile para determinar funções de biomassa e coeficientes de expansão. Para tanto, foi utilizada a amostragem destrutiva de 540 árvores e extrações de 137 raízes, em 168 parcelas de 250x500 m².

Foram testadas diversas equações alométricas, ajustadas pelo DAP e a altura, para encontrar o valor de carbono de 1ha, para cada tipo de vegetação estudado. Em seguida, foi efetuada a extrapolação para o total da área representada por cada extrato vegetacional. O resultado demonstrou que o acúmulo por unidade de superfície é muito variado, segundo o tipo de vegetação. O autor destaca a vegetação sempre verde, que alcançou 606,8 Mg ha⁻¹.

Numa avaliação preliminar, pode-se concluir que os três trabalhos utilizaram o mesmo protocolo descrito no início deste capítulo. Nota-se também que em nenhum deles foi considerado as diferenças edafoclimáticas dentro de um mesmo extrato de vegetação. Isso significa que esses números podem sofrer alterações se for considerada essa variação.

As geotecnologias, sobretudo o sensoriamento remoto e o sistema de informações geográficas – SIG, têm sido um ferramental indispensável para o desenvolvimento de técnicas que auxiliem na redução desse problema. Inúmeros trabalhos envolvendo sensoriamento remoto e SIG têm sido desenvolvidos para tentar melhorar a confiabilidade dos levantamentos do estoque e do fluxo de carbono na vegetação, sendo grande parte deles dedicados à utilização de torres de fluxo para calibrar modelos desenvolvidos para o sensoriamento remoto.

A integração de sensoriamento remoto com os dados de CO₂ medidos através de torres de carbono poderiam prover uma modelagem mais eficiente e precisa de predição de fluxos de carbono na vegetação a níveis regionais. Contudo, seria necessária uma ampla rede de torres para assegurar uma robustez aos modelos. (CIHLAR et al., 2002; COHEN; JUSTICE, 1999; REICH et al., 1999; RUNNING et al., 1999). Nesse caso, a solução se torna um problema, na medida em que redes permanentes de torres de fluxo são caras para instalar, manter e operar.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende desenvolver um método de levantamento do estoque de carbono que aumente a confiabilidade dos resultados do mapeamento do estoque

de carbono na vegetação, oferecendo uma alternativa à utilização de torres de fluxo. A alternativa proposta consiste na calibração dos modelos através de medidas de campo com base em equações alométricas.

3.2.1 O espectro eletromagnético e o comportamento espectral da vegetação

O espectro eletromagnético (Fig. 2) é uma representação contínua de energia eletromagnética, ordenada segundo o comprimento de onda (ou frequência). Ele abrange o intervalo total do comprimento de onda da radiação eletromagnética que varia das ondas de rádio até os raios cósmicos com diversas subdivisões. (CRÓSTA, 2002).

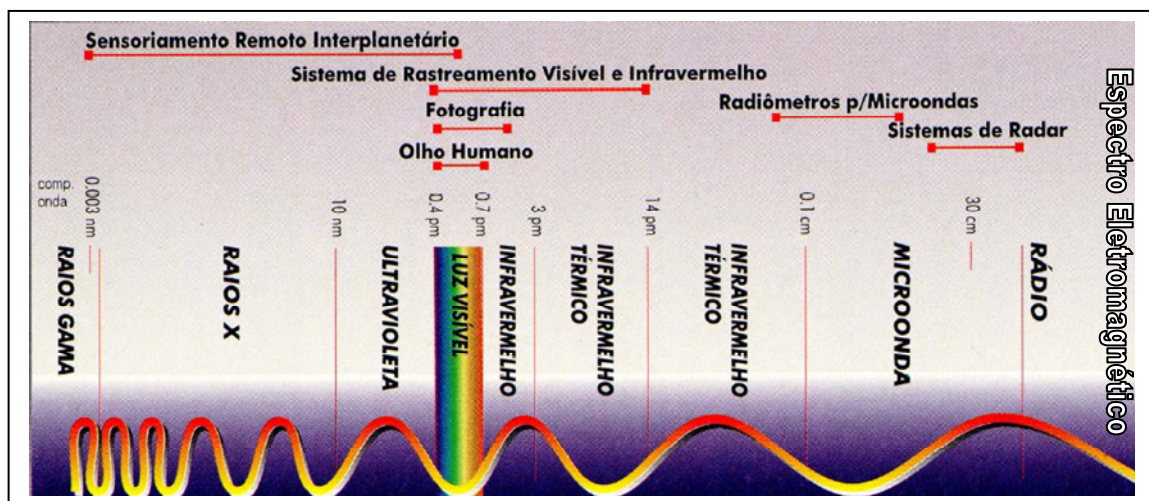


Figura 2 – Representação do espectro eletromagnético e suas subdivisões em relação aos comprimentos de onda.

As subdivisões do espectro eletromagnético dizem respeito às características que esse apresenta dentro de um determinado intervalo de comprimento de onda e seu relacionamento com os diferentes materiais que compõe a superfície da Terra.

Isso porque os materiais presentes na superfície da Terra interagem com a energia da luz solar exibindo comportamentos que variam em função do comprimento de onda. Tal variação é fruto da composição química e estrutura molecular desses elementos.

Dentre esses intervalos, as regiões do visível e do infravermelho têm sido amplamente utilizadas nos trabalhos de sensoriamento remoto.

O intervalo do visível (VIS) vai de 0,4 a 0,76 micrômetros, cujo símbolo representante é μm . Nesse intervalo podem ser encontradas as luzes violeta (0,4 - 0,46 μm), anil (0,46 - 0,475 μm), azul (0,475 - 0,490 μm), verde (0,490 - 0,565 μm), amarelo (0,565 - 0,575 μm), laranja (0,575 - 0,600 μm), vermelho (0,600 - 0,760 μm).

Já o intervalo do infravermelho (0,7 - 14 μm) na região óptica, pode ser subdividido em infravermelho próximo (NIR, 0,7 - 1,5 μm), infravermelho de ondas curtas (SWIR, 1,5 - 3 μm) e infravermelho termal (TIR, 3 - 14 μm).

O conhecimento do comportamento espectral dos elementos que compõe a superfície terrestre é de fundamental importância para as aplicações do sensoriamento remoto. Isso porque cada elemento possui uma resposta diferente para cada um desses intervalos que ora absorve ora reflete a energia da luz solar em função de sua composição química e estrutura molecular.

No caso da vegetação, seu comportamento espectral é amplamente estudado e, por tanto, sua curva de reflectância (Fig. 3) é conhecida e utilizada para diferentes fins no seu mapeamento.

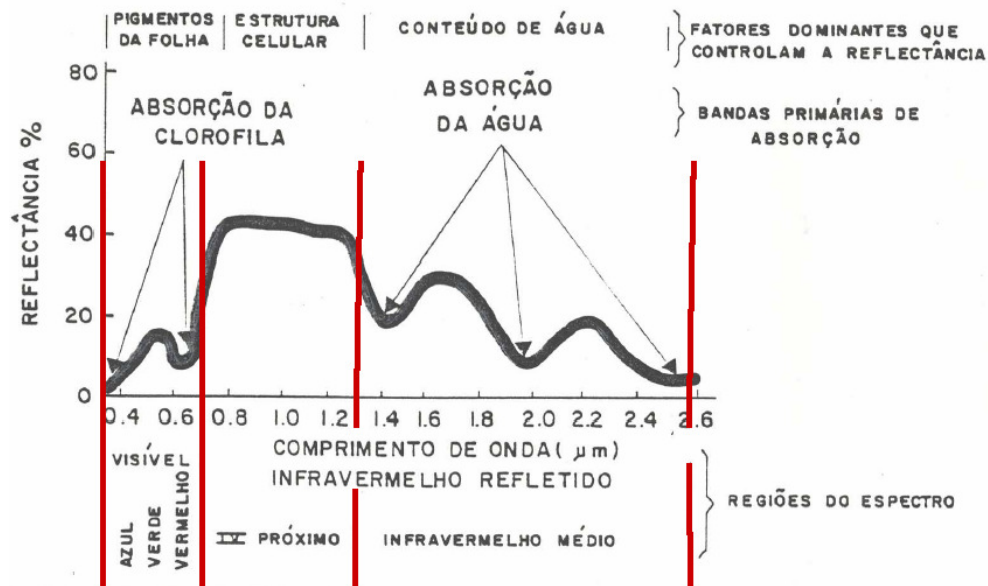


Figura 3 – Curva de reflectância.

Das características presentes na curva espectral da vegetação, duas têm sido amplamente utilizadas para seu mapeamento: a absorção da energia no intervalo do visível e a reflectância no infravermelho próximo.

A absorção da energia no VIS é dada, dentre outros fatores, pelos efeitos de (i) conteúdo de clorofila; (ii) da forma, área e número de folhas e; (iii) da estrutura de cela de celulose nas propriedades espectrais de plantas. (SOUZA FILHO et al, 2007).

A resposta espectral na vegetação é fruto dos pigmentos das folhas existentes nos cloroplastos, sendo 65% clorofila, 6% carotenóide e 29% xantofila. A clorofila é a grande responsável pela absorção da energia eletromagnética no visível, especialmente através da captura de fótons no azul e no vermelho. Em geral, a cor amarelada ou alaranjada dos carotenóides (carotenos e xantofilas) é mascarada pela reflectância da cor verde da clorofila, sendo que quando a clorofila é degradada predominam cores mais amarela a alaranjada. (FIORIO, 2005)

No infravermelho próximo, a cutícula e a epiderme de uma folha são praticamente transparentes a radiação. Ao chegar às células do mesófilo esponjoso e às cavidades existentes no interior das folhas, o NIR é espalhado e se submete às múltiplas reflexões e refração que ocorrem, devido a diferença dos índices de refração do ar e da paredes celulósicas hidratadas.

De acordo com a espécie da planta, a radiação eletromagnética pode ser refletida de 30 a 70% dos raios incidentes. E, atrelado ao fato de que nesse espectro os sistemas pigmentais perdem a capacidade de absorver fótons, a curva de reflectância da vegetação possui um pico acentuado de reflectância no NIR (NIR, 0,7 - 1,5 μm). (SCHOWENGERDT, 1997).

Em função dessas duas características, e com base nos conhecimentos da importância da clorofila para as plantas, pode-se dizer que, para a maioria das espécies vegetais, quanto mais sadio for o indivíduo, maior será a presença da clorofila e, sendo assim, maior será a absorção no VIS do azul e do vermelho; e maiores reflectância do verde e reflectância no NIR.

Em outras palavras, podemos dizer que quanto mais sadio for o indivíduo maior será a diferença entre a reflectância no NIR e a absorção do VIS (azul e vermelho).

Com base nessa afirmação, inúmeros trabalhos foram desenvolvidos tentando apontar uma equação que melhor represente essa diferença. Tais equações são conhecidas como Índices de Vegetação, e têm sido amplamente utilizadas para mapear a vegetação aos níveis local, regional e global.

3.2.2 Índices de Vegetação

Índices de vegetação são, genericamente, combinações de dados espectrais de duas ou mais faixas do espectro eletromagnético, normalmente do vermelho (V) e do infravermelho próximo (NIR), cuja operação matemática resulta em um valor adimensional e que reflete a distribuição de vegetação. (MOREIRA, 2000).

Esses índices possuem estreita relação com vários parâmetros biofísicos da vegetação. (MOREIRA, 2000). Através deles, podem-se estimar características como o índice de área foliar, biomassa vegetal, produtividade primária bruta e atividade fotossintética. (HUETE, 1988). Além dessas características, podem-se avaliar a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (EPIPHANIO; HUETE, 1995), e a porcentagem de cobertura verde. (ELVIDGE; CHEN, 1995).

Contudo, segundo Ponzoni (2001), o mapeamento da cobertura vegetal em determinado produto de sensoriamento remoto não é fruto somente das características intrínsecas a essa vegetação. Antes, é fruto de um processo complexo que envolve, além dos fatores ambientais, parâmetros como fonte de radiação, espalhamento atmosférico, interferência da reflectância do solo, sombra, entre outros.

Os índices espectrais procuram equacionar esses efeitos realçando o comportamento espectral da vegetação, correlacionando os parâmetros biofísicos da mesma com o comportamento espectral nos diferentes comprimentos de onda.

O NDVI é um dos índices de vegetação utilizados mundialmente para caracterizar a vegetação através da sua saúde e de sua produtividade. Isso é possível porque ele permite relacionar a grande absorção da radiação solar no intervalo de onda do visível (VIS) no processo da fotossíntese com a baixa absorção das folhas no infra-vermelho próximo (NIR). Ele expressa a diferença de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (660 nm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho próximo (800 nm). Proposto por Rouse et al (1973), com a finalidade de separar vegetação verde de solo exposto, é expresso pela fórmula:

$$NDVI = \frac{(R_{nir} - R_{red})}{(R_{nir} + R_{red})} \quad \dots (1)$$

Onde **R_{nir}** e **R_{red}** são, respectivamente, a reflectância nas bandas espectrais do infravermelho próximo e do vermelho.

Tal equação gera uma imagem com valores que variam entre -1 e +1, onde os níveis de cinza mais claro (mais próximos de +1) expressam valores que representam maior índice de vegetação, como no caso de vegetação com alta atividade fotossintética, e que o solo mais exposto, apresenta valores que tendem a níveis de cinza próximos a zero e áreas mais antigas de vegetação a níveis intermediários. Assim, quanto mais próximo de 1, maior é a densidade da vegetação; e quanto mais próximos de -1, menor quantidade de vegetação. (ROUSE et al, 1973).

Embora amplamente utilizado em análises da vegetação, a sensibilidade do NDVI para o solo visível abaixo do dossel e efeitos atmosféricos, a presença de sombra, entre outros, tem provocado interesse no desenvolvimento de novos índices que minimizem esses efeitos. Como exemplo, tem-se o *Transformed Vegetation Index* (TVI) e o *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI).

O TVI, proposto por Deering et. al., (1975), é uma transformação no NDVI. Ele é obtido pela raiz quadrada da soma do NDVI com a constante 0,5 (equação x). A soma e a transformação da raiz quadrada foram efetuadas para evitar resultados negativos.

$$TVI = \sqrt{((NIR - RED) / NIR + RED)) + 0,5} \quad \dots(2)$$

O efeito de *background* do solo sobre o NDVI é indesejável quando se quer conhecer apenas o grau de cobertura verde de uma área. Visando minimizar a influência do *background*, Huete (1988) desenvolveu o SAVI, pautado na premissa de que a relação entre as reflectâncias do infravermelho próximo e do vermelho, para solos variando de escuros a claros é, geralmente, linear. Sendo assim, o solo sempre cai ao longo de uma reta no plano cartesiano definido pelas reflectâncias dos intervalos do infravermelho próximo e do vermelho (NIR e V). Essa reta é denominada de linha de solo.

Quando um desses solos é coberto por uma dada vegetação, a linearidade deixa de acontecer e a posição do pixel se afasta perpendicularmente da linha do solo. Sendo assim, o SAVI é um índice de vegetação que mede ou aproxima a distância entre um pixel e a linha do solo, minimizando o efeito dos solos nos trabalhos de sensoriamento remoto.

O SAVI é dado pela equação:

$$\text{SAVI} = (1 + L) * (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + L) \quad \dots(3)$$

Onde:

NIR = reflectância na faixa do infravermelho próximo;

RED = reflectância na faixa do vermelho

L= constante de ajuste.

Segundo Huete (1988), o valor do coeficiente L escolhido deve ser inversamente proporcional à densidade da vegetação. Nesse sentido, o autor propõe como referência L = 1 para análises com vegetação de muito baixa densidade de cobertura; L = 0,5 para vegetação com densidade intermediária; L = 0,25 para altas densidades e, quando o SAVI é igual ao NDVI, a constante de ajuste L = 0.

Vale ressaltar que Huete (1988) considera L = 0,5 o melhor fator de ajuste para reduzir razoavelmente os efeitos de solos com diferentes valores de brilho.

A escolha do NDVI para o desenvolvimento do trabalho se baseou, sobretudo, em duas posições: a ampla utilização do mesmo em escala global e a fácil aplicação. O NDVI é conhecido e aplicado pela comunidade científica mundial e o seu resultado tem ampla aceitação para fins de mapeamento da qualidade da vegetação. Justamente por essas características, a grande maioria dos *softwares* de processamento digital de imagens já possui mecanismos de aplicação automatizada do NDVI. Além disso, ele também é produto automático de alguns sensores como é o caso do MODIS.

Para o caso do sensor ETM+, utilizado neste trabalho, o NDVI é obtido com base nas respostas espectrais das bandas 3 (0,63 - 0,69 micrômetros) e 4 (0,76 - 0,90 micrômetros) usando-se a seguinte equação:

$$\text{NDVI} = \frac{(B3 - B4)}{(B3 + bB4)} \quad \dots(4)$$

Onde B_i é o valor de reflectância em cada comprimento de onda de valor i

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido no bioma brasileiro menos conhecido: o Bioma Caatinga. Único bioma exclusivamente brasileiro e um dos mais ameaçados, devido ao uso inadequado e insustentável dos seus solos, dos recursos naturais e por ter apenas 1,6% de sua área protegida em unidades de conservação indireta (TABARELLI et al. 2000), possuindo uma extensão de 777.915,08 km². (IBGE, 1993).

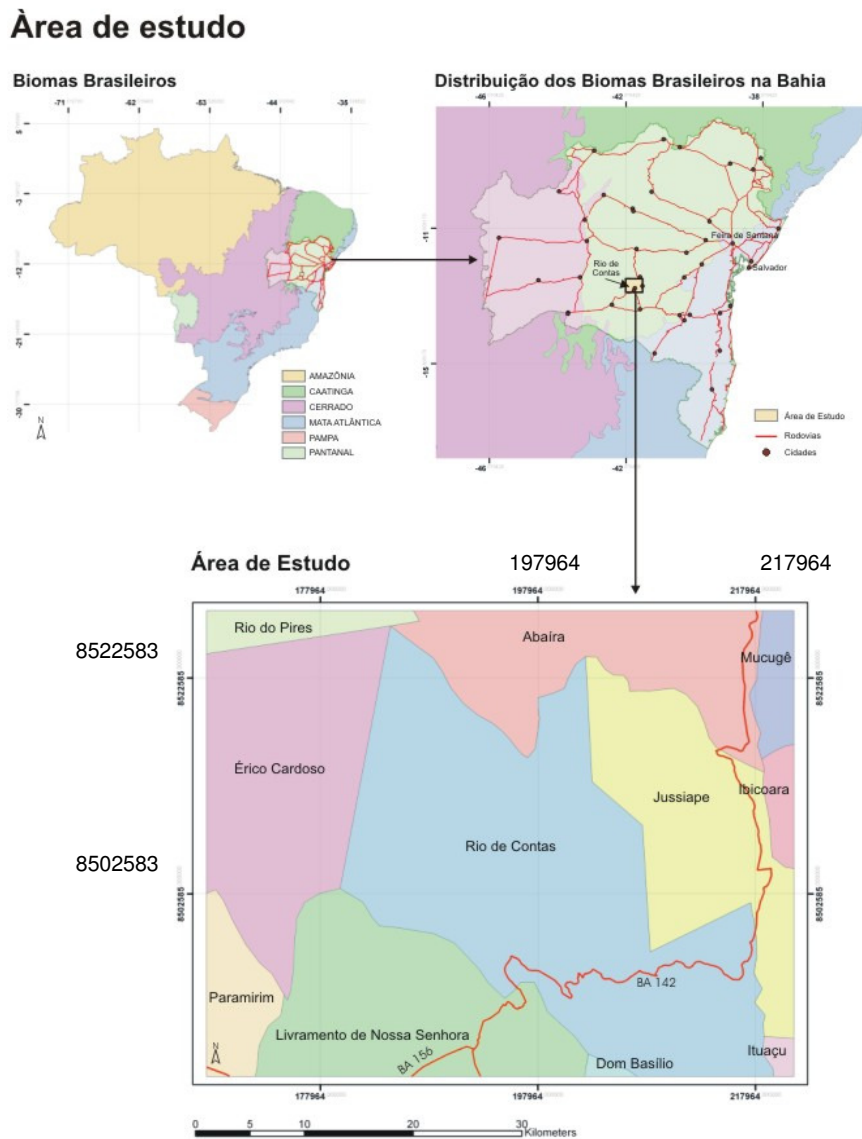


Figura 4 – Localização da área de estudo.

A área de trabalho, compreendida entre as coordenadas UTM 167476 E, 8528819 N e 221504 E 8485678 N, localiza-se na região do município de Rio de Contas – Ba, recobrando parte dos municípios de Rio do Pires a NW, Érico Cardoso a W, Abaíra a N, Mucugê a NE, Jussiapé e Ibicoara E, Ituaçu a SE, Livramento de Nossa Senhora a S e Paramirim a SW (Fig. 4).

Durante muito tempo, a região foi explorada pela atividade de mineração, iniciada no século XVII, com a extração aurífera. Atualmente, a ocupação humana está condicionada pela estrutura do relevo, que espacializa as atividades agrícolas aos fundos dos vales. Em se tratando dos aspectos ambientais, a área possui um potencial hídrico elevado, apresentando uma drenagem densa em virtude da permeabilidade e acamamentos das rochas que permitem a infiltração de água nas serras e formação de muitos olhos d'água e nascentes. (HAGGE et. al 2003).

4.1 CLIMA

Em relação ao clima, por estar posicionada na borda sul ocidental da região geomorfológica da Chapada Diamantina, a área de estudo possui uma zona de transição entre o “[...] domínio de depressões interplanálticas tropicais semi-áridas, cobertas de caatinga [...]” e o “[...] domínio de chapadões tropicais interiores com cerrados e florestas galerias [...]” onde predomina o clima tropical sub-quento a sub-úmido com floresta tropical. (BIGARELLA, 1994, p.56).

Essa região apresenta ainda um gradiente climático em sentido oeste-leste, segundo a classificação de Thornthaithe, (CEI, 1985 apud HAGGE et al., 2003). Nas áreas de serras mais elevadas, com altitudes superiores a 1600m, o tipo é úmido a sub-úmido com pluviosidade inferior a 900mm por ano; nas áreas do entorno com altitudes que alcançam 800m, o predomínio é do tipo sub-úmido a seco e a precipitação varia de 800 a 900mm ao ano; nas zonas de pedimentos e aplanamentos e baixas encostas dos vales afluentes o tipo é seco a semi-árido e a precipitação é de 700 a 800 mm por ano; e nas zonas de altitudes mais baixas, superfície de aplainamento que acompanha o vale do rio de Contas, o tipo é semi-árido com precipitações menores que 750 mm ao ano.

Segundo a classificação de Koppen, os climas da região são basicamente Aw e BSwH. O tipo Aw é o clima tropical úmido de savanas, que difere dos demais de classe A por apresentar

uma estação seca definida, coincidindo com o inverno; nesse clima a temperatura média do mês menos quente se mantém acima dos 18 °C e a precipitação média anual é superior a 750 mm/ano. Já o tipo BSwH ou tropical semi-árido apresenta chuvas escassas, inferiores a 750 mm que ocorrem nos meses de verão. (CEI, 1985 apud HAGGE et al., 2003).

4.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

Quanto à geologia, a área está inserida no domínio geotectônico do Sistema de Dobramentos do Espinhaço – Chapada Diamantina Ocidental, incluída no Craton do São Francisco. O embasamento do Supergrupo Espinhaço foi formado por processos de deposição de sedimentos, associados a atividades vulcano-sedimentares ocorridos à cerca de 1750 a 1400Ma. Por volta de 1750Ma, formou-se a bacia intracratônica ou Bacia do Espinhaço - São Francisco onde foram empilhadas as seqüências, da base para o topo: Grupo Rio dos Remédios, Paraguaçu e Chapada Diamantina. (GUIMARÃES, 2005).

O Grupo Rio dos Remédios apresenta espessos derrames vulcânicos ácidos e rochas piroclásticas, registradas na área da borda ocidental da Chapada Diamantina, recobertos com depósitos sedimentares siliclásticos marinhos e continentais intercalados, correspondentes aos grupos Paraguaçu e Chapada Diamantina (Formação Tombador).

A geomorfologia foi desenvolvida principalmente sobre os metarenitos, metassiltitos, metargilitos, quartzitos e lentes de conglomerado do Grupo Chapada Diamantina, configurando as elevações residuais correspondentes aos flancos de dobras antigas. Trata-se de um relevo estrutural, submetido ao longo tempo geológico à dissecação diferencial, condicionada pelos fatores tectônicos e litológicos que resultou em interflúvios com topos aguçados e encostas íngremes, morros e serras com vertentes irregulares ou apresentando vertentes convexo-côncavas contendo afloramentos rochosos e blocos caídos (HAGGE et al, 2003).

A compartimentação geomorfológica é constituída pelas entidades: a. Serras com Cristas e Picos que abrangem as maiores elevações onde se destacam o pico do Barbado, com 2033 m de altitude, o pico Itubira, com 1970 m, o pico das Almas, com 1836 m e o morro do Barro Vermelho, com 1771m; b. Planos de Erosão Inumados que correspondem aos trechos aplainados e desnudados, verificados ao norte da cidade de Rio de Contas, e no sinclinal de

Piatã e no topo da serra do Rio de Contas; c. Pediplano Oriental de Abaíra, que compreende o setor entre os pedimentos e as serras mais elevadas, que foi delimitado pelas cotas de 800 a 1000m, englobando a serra do Teixeira, os bordos das serras do Santana, do Pastinho, da Estiva, as encostas inferiores das serras da Tromba e do Atalho, e mais ao sul, as serras Furnas, serra do Caldeirão e serra Branca, como também o bordo oriental da serra do Rio de Contas; d. Pediplano do Rio de Contas, delimitado a partir da cota de 800 m até o rio de Contas, que drena todo o setor leste dos municípios de Abaíra e Rio de Contas, correndo no sentido norte-sul e servindo de limite com os municípios de Mecugê, Jussiape e Ibicoara. (HAGGE et al, 2003).

4.3 VEGETAÇÃO

A região de Rio de Contas possui uma heterogeneidade ambiental que proporciona formações de mata úmida montana, áreas de florestais decíduas, campo rupestre e vegetação de cerrado.

Cobertura Vegetal e Uso do Solo

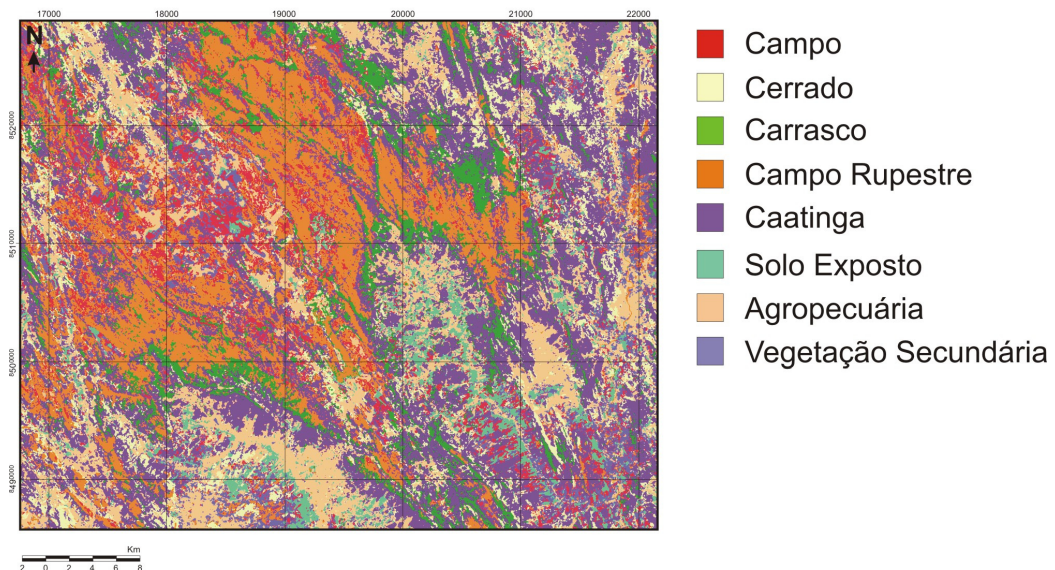


Figura 5 – Mapa de uso e cobertura do solo.
Fonte: Cerqueira (2006).

4.4 FLORESTA MONTANA

As Florestas Ombrófilas Denso-Montana do interior da Bahia sofreram uma redução drástica, devido à introdução e expansão de monoculturas nos últimos quatro séculos, a ocupação imobiliária e a exploração de produtos naturais e dos mananciais sem o manejo adequado, convertendo-as em uma paisagem antropizada e poucos fragmentos descontínuos.

Estas se localizam, sobretudo, em áreas da Chapada Diamantina. Sob a denominação de Floresta Denso-Montana, são incluídas as floresta de encosta (HARLEY; SIMMONS, 1986; HARLEY, 1995), matas plúvio-nebulares e as florestas de grotão. (GIULIETTI et al. 2000).

A vegetação da Chapada Diamantina é dominada principalmente pelo campo rupestre, que caracteriza grande parte da Cadeia do Espinhaço. Entretanto, ocorrem também formações florestais ao longo dos rios, nas encostas e nas fendas das serras (grotões), cerrados e caatinga. Tais florestas estão sofrendo acelerada degradação e desbaste, conseqüente das lavras diamantíferas do século passado, do uso intensivo do fogo para abrir pastagens, da extração de madeira para construção civil e da expansão da cafeicultura, no momento atual.

Poucos estudos foram realizados com a flora e a vegetação das Florestas Ombrófilas Densas no Estado da Bahia. Funch (1997) concluiu um estudo florístico de uma área de mata de encosta e outra área de mata ciliar na localidade de Lençóis. Harley e Simmons (1986) elaboraram a flora da região de Mucugê; e Stannard (1995) concluiu a flora do Pico das Almas. Destacou-se nesses trabalhos grande número de novas espécies e também de espécies endêmicas.

4.5 FORMAÇÕES FLORESTAIS DECÍDUAS

4.5.1 Carrasco

Do ponto de vista fisionômico e florístico, essa área é comumente denominada pela população local como “carrasco”. Trata-se de uma vegetação uniestratificada, constituída por um

conjunto de árvores pequenas e arbustos dispostos de modo extremamente denso, formando um emaranhado de galhos que tornam difícil a locomoção em seu interior. Embora esteja dentro da área do Bioma Caatinga, nessa vegetação não se verificam espécies espinhosas nem suculentas.

As espécies encontradas na área com maior abundância foram *Astrocasia jacobinensis* (Euphorbiaceae), *Pseudopiptadenia brenani* (Leguminosae - Mimosoideae) e *Psidium* sp. e uma outra espécie da família Myrtaceae. Muitas das espécies dessa área ocorrem em florestas estacionais. É o caso de *Astrocasia jacobinensis*, uma espécie do sub-bosque destas florestas, cuja área de distribuição se estende para leste até próximo de Feira de Santana. *Esenbeckia grandiflora* e *Pilocarpus spicatus* apresentam distribuição ainda mais ampla nestas florestas, a primeira alcançando áreas de restingas litorâneas. *Pseudopiptadenia brenani*, por sua vez, é uma espécie de distribuição mais restrita às florestas estacionais da Chapada Diamantina, estendendo-se para o sul até a região de Bom Jesus da Lapa e norte de Minas Gerais.

Muitos dos táxons observados nessa área não são frequentemente observados na caatinga, como as famílias Burmanniaceae, Cyperaceae, Ebenaceae, Eriocaulaceae, Humiriaceae, Primulaceae e Xyridaceae, e os gêneros *Xylopia* (Annonaceae), *Astrocasia*, *Pera* (Euphorbiaceae), *Swartzia* (Leguminosae - Papilionoideae), *Clidemia* (Melastomataceae), *Coccocypselum* (Rubiaceae), *Esenbeckia* (Rutaceae) e *Guazuma* (Sterculiaceae).

4.5.2 Caatinga

De acordo com Sampaio et al. (2002), a caatinga é um tipo de vegetação que recobre a maior parte do semi-árido da região Nordeste do Brasil, composta por espécies que apresentam características relacionadas a adaptações à deficiência hídrica (caducifólia, herbáceas anuais, suculência, acúleos e espinhos, predominância de arbustos e árvores de pequeno porte). Veloso et al. (1991) classificam a Caatinga como Savana-Estépica, apontando para essa quatro fisionomias distintas: a Savana-Estépica Florestada, caracterizada por micro e/ou nanofanerófitos, com altura média de 5 m, com troncos e engalhamento bastante ramificado, em geral provido de espinhos e/ou acúleos; a Savana-Estépica Arborizada, que possui as mesmas características da fisionomia anterior se diferenciando apenas no porte, uma vez que possui estatura inferior a 5m; Savana-Estépica Parque, é composta por nanofanerófitos de um

mesmo ecótipo bastante espaçados. A distribuição de seus indivíduos possui uma pseudo-ordenação, aparentando uma plantação de plantas lenhosas raquílicas sobre um extenso tapete gramíneo-lenhoso; Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa, também conhecida como campo espinhoso, caracterizado por um extenso tapete graminoso salpicado de plantas lenhosas anãs espinhosas.

Neste trabalho, a referência a caatinga significa a junção das fisionomias Savana-Estépica Florestada e Savana-Estépica Arborizada.

4.6 CAMPO RUPESTRE

É uma vegetação altamente especializada que ocorre no topo das montanhas das Regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste (Bahia), normalmente acima dos 1200 m de altitude e sobre solos muito rasos ou afloramentos rochosos. (HARLEY et al, 1995). Seus indivíduos apresentam adaptações para sobreviver a variações de temperatura e disponibilidade de água. A variação de temperatura é ocasionada pela grande amplitude térmica, fruto da altitude elevada, morfologia íngreme e os afloramentos rochosos. Devido à presença de grandes áreas com afloramentos rochoso e às fortes declividades, as precipitações são seguidas de enxurradas e curtos períodos de excesso hídrico. Entre as precipitações, ocorrem períodos mais longos de forte déficit de água. Além desses rigores, o campo rupestre sofre os impactos de incêndios ocasionais. (OLIVEIRA-FILHO et al., 1994). É caracterizado ainda pela abundância de arbustos, particularmente os da família *Velloziaceae*, que crescem nas fendas das rochas e por um leito herbáceo. É comum se encontrarem espécies endêmicas, o que torna esse tipo de vegetação merecedora de grande atenção.

4.7 CERRADO

O cerrado é um bioma que ocorre em uma área extensa no país, especialmente na região Centro-Oeste. Ocorre em áreas de solos predominantemente ácidos e oligotróficos em que o alumínio solúvel apresenta toxicidade elevada para outras vegetações. Esse extrato vegetal é caracterizado por árvores e arbustos com troncos normalmente retorcidos e espécies adaptadas a essas condições. Estudos demonstram que ocorrem uma série de adaptações anatômicas nas

espécies de cerrado que facilitam a captação e armazenamento de água, tais como ocorrência de xilopódios subterrâneos, folhas rígidas e cutícula coberta por uma camada extensa de cera. Dentre as espécies mais típicas de cerrado cabe destacar *Caryocar brasiliense* (Caryocaraceae; Piqui), *Stryphnodendron* sp. (Mimosaceae; Barbatimão) *Vochysia thyrsoidea* (Vochysiaceae), *Calliandra dysantha* (Mimosaceae), entre outras.

A ocorrência da vegetação de cerrado está associada a fatores ambientais como clima sazonal com estação seca bem definida, solos de baixa fertilidade, ácidos, profundos e bem drenados em que o alumínio solúvel apresenta toxicidade elevada para outras vegetações e ocorrência de incêndios mais ou menos regulares. (OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 1995).

5 METODOLOGIA

5.1 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

O fluxograma (Fig. 6) apresenta, em linhas gerais, o fluxo metodológico utilizado nesta pesquisa:

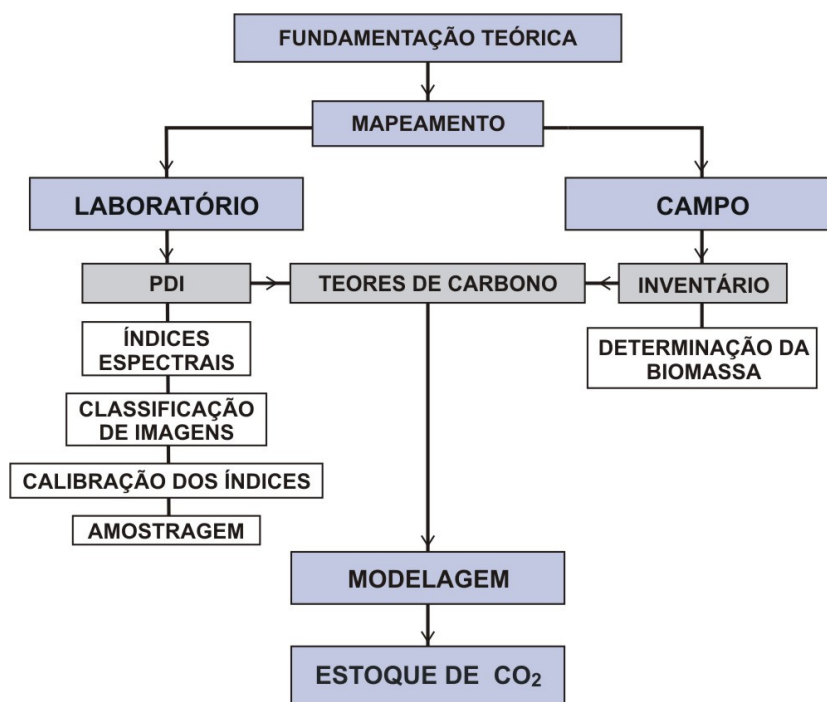


Figura 6 – Fluxograma geral da pesquisa

Na fundamentação teórica, buscou-se descrever o ciclo do carbono, bem como as metodologias utilizadas para quantificar o *pool* de carbono na vegetação. Com o mapeamento da vegetação, definiu-se as dimensões territoriais das unidades vegetacionais constituintes da área de estudo. Com o inventário florístico, avaliou-se a variabilidade de espécies na área, e a determinação das melhores equações alométricas representativas das vegetações. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi calibrado com base no conteúdo de C, estimado a partir da aplicação das equações alométricas em parcelas georreferenciadas. A quantificação da biomassa e do *pool* de carbono foi efetuada através do cruzamento do mapa

de vegetação com a imagem NDVI transformada em imagem carbono. A validação foi efetuada por meio da quantificação de carbono em campo, utilizando-se das equações alométricas. E, por fim, foi estabelecido o gradiente C para os diferentes tipos de vegetação existentes na área de estudo, a saber: caatinga, carrasco, cerrado e campo rupestre.

Em síntese, o método adotado neste trabalho seguiu as seguintes etapas: 1. Fundamentação teórica; 2. Processamento digital de imagens de satélite; 3. Inventário florestal; 4. Definição de equações alométricas; 5. Calibração do NDVI; 6. Quantificação da biomassa e de carbono; 7. Validação; 8. Estabelecimento do gradiente C para as tipologias vegetacionais da região de Rio de Contas-Ba.

5.1.1 Processamento digital de imagem

O Processamento Digital de Imagens (PDI) é entendido como a manipulação por sistema de computação de uma imagem bruta, de maneira que a saída do processo sejam imagens representando informações específicas. (CRÓSTA, 1992). O objetivo de se usar processamento digital de imagens é melhorar o aspecto visual de certas feições texturais para possibilitar ao analista humano uma interpretação consistente no que tange a discriminação dessas feições, gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a interpretações.

O PDI pode ser dividido em três fases: o Pré-processamento, o Processamento e o Pós-processamento.

O objetivo do Pré-processamento é melhorar a imagem de forma a aumentar as chances para o sucesso dos processos subsequentes. Sendo assim, refere-se ao processamento inicial dos dados brutos tais como calibração radiométrica da imagem, correção de distorções geométricas, remoção de ruído etc. A etapa de processamento é aquela onde são aplicados procedimentos específicos para alcançar os objetivos propostos no trabalho de sensoriamento remoto, como aplicação de índices espectrais, técnicas de classificação etc. E o Pós-Processamento pode ser descrito como a etapa de organização e apresentação dos resultados.

São elementos que compõem o Pré-processamento: 1. Análise Estatística; 2. Aumento de Contraste; e 3. Seleção de bandas para Composição Colorida. Essas técnicas podem ser encontradas em maior detalhe em Crósta (1992).

O processamento digital, embora muito eficaz nas análises espaciais, tende a discretizar a complexidade real do espaço. Essa simplificação é fruto, dentre outras causas, da resolução radiométrica, da resolução espacial e da resolução espectral. (CRÓSTA, 1992). Nesse sentido, a etapa da análise estatística da imagem é fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, pois as imagens utilizadas nesta pesquisa possuem um número elevado de dados, o que se por um lado é fundamental para melhor representar o mundo real, por outro, dificulta a análise devido à quantidade de variáveis envolvidas nos processamentos.

Em PDI, os dados são visualizados através dos valores de cinza atribuídos aos pixels de uma imagem e o histograma é a maneira simplificada e possivelmente a mais utilizada para representar a distribuição dos níveis de cinza de uma imagem.

A análise do histograma de uma imagem revela as características estatísticas importantes para implementação das técnicas de PDI e o seu entendimento é fundamental para se aplicar as funções de realce e aumento de contraste.

A forma do histograma fornece informações sobre a intensidade média de espalhamento dos valores dos números digitais (DN), que por sua vez expõe a medida do contraste de uma imagem.

A maioria das imagens de sensoriamento remoto são registradas com uma resolução radiométrica de 8 bits. Tal resolução produz uma variação de 256 valores ou níveis de cinza. Entretanto, as imagens multiespectrais normalmente contêm, em cada banda, uma pequena faixa desses valores que podem ser modificadas com a presença de bruma atmosférica e a geometria de iluminação da cena. (SCHOWENGERDT, 1997).

O sistema visual humano só consegue discriminar aproximadamente 30 tons de cinza, isso quando estão bastante espalhados em relação ao intervalo de 0 a 255. Nesse sentido, o tratamento das imagens pelo método do aumento do contraste se torna uma técnica extremamente útil para extrair informações não identificadas a princípio pelo intérprete.

O contraste de uma imagem é uma medida do espalhamento dos níveis de cinza que nela ocorrem. Sendo assim, aplicar um contraste em uma imagem significa distribuir ao longo do intervalo de níveis de cinza 0 – 255 todos os pixels que a compõem. Significa dizer, ainda, que um aumento de contraste será ideal se todos os possíveis 256 níveis de cinza forem igualmente utilizados. Dessa forma, todas as barras verticais que compõem o histograma da

imagem seriam de mesma altura. (CRÓSTA, 1992). Essa situação, entretanto, não acontece na prática uma vez que os dados digitais de uma imagem de sensoriamento remoto são de natureza discreta.

O aumento de contraste pode ser realizado de diversas formas, sendo o mais comum o aumento de contraste interativo. Esse procedimento permite que o usuário escolha interativamente um intervalo de valores de nível de cinza que realce os alvos a serem mapeados. Isso acontece porque o controle do histograma é aplicado em uma imagem aberta no *display*, permitindo ao operador visualizar as alterações que ocorrem na imagem em tempo real.

Dentre os métodos utilizados para aplicar o aumento de contraste interativo, foram testados: aumento de contraste linear, o aumento de contraste gaussiano e a equalização de histograma – maiores detalhes dessas técnicas podem ser encontrados em Schowengerdt (1997).

A seleção de bandas espectrais em trabalhos de sensoriamento remoto recebe importância fundamental, uma vez que uma boa escolha pode facilitar a interpretação e até mesmo promover uma maior agilidade nos processamentos computacionais. Tal escolha deve ser feita com base no objetivo para o qual o trabalho será desenvolvido e nas características espectrais das bandas do sensor que se pretende utilizar. Neste trabalho foi utilizada imagem do sensor LANDSAT 7 *Thematic Mapper*.

O Quadro 5 demonstra algumas aplicações potenciais para imagens *Thematic Mapper*.

BANDA	ESPECTRO	COMPRIMENTO DE ONDA	APLICAÇÕES
TM1	azul (VIS)	0,45 – 0,52	<ul style="list-style-type: none"> Boa penetração na água(mapeamento do litoral). Distinção solo/vegetação.
TM2	verde (VIS)	0,52 – 0,60	<ul style="list-style-type: none"> Reflexão máxima do espectro verde. Determinação da vitalidade da vegetação.
TM3	vermelho (VIS)	0,63 – 0,69	<ul style="list-style-type: none"> Absorção alta de clorofila; Distinção solo/vegetação;
TM4	NIR	0,76 – 0,90	<ul style="list-style-type: none"> Reflexão alta da vegetação; Determinação da massa orgânica; Distinção terra/água.
TM5	MIR	1,55 – 1,75	<ul style="list-style-type: none"> Absorção mínima da água; Determinação do conteúdo de água no solo e na vegetação; Distinção nuvem/neve; Aplicações geológicas.
TM6	TIR	10,2 – 12,5	<ul style="list-style-type: none"> Determinação de temperatura e umidade das superfícies terrestres; Análise de “stress” da vegetação; Distinção cidade/campo.
TM7	MIR	2,08 – 2,35	<ul style="list-style-type: none"> Aplicações geológicas; Diferença entre minerais e rochas; Determinação do conteúdo de água no solo e na vegetação.

Quadro 5 – Aplicações das bandas do LANDSAT 7 (LILLESAND & KIEFER, 1979 apud SCHOWENGERDT, 1997)

Como pode ser observado no quadro acima, o número de bandas que compõem a imagem TM (07 bandas) permite uma elevada quantidade de combinações para uma composição colorida com três canais.

O Quadro 5 demonstra ainda que, para o desenvolvimento do índice espectral NDVI (apresentados a seguir), as bandas a serem utilizadas devem ser as bandas 3 e 4, uma vez que essas são as que representam os intervalos de comprimento de onda necessário para o cálculo.

A etapa de processamento digital desenvolvida neste trabalho consistiu da aplicação do NDVI (detalhes desse procedimento pode ser encontrado em Rouse et al (1973)), na classificação de imagem para composição do mapa de vegetação e da aplicação da equação de regressão pelo método dos mínimos quadrados entre a imagem NDVI e as medidas de biomassa e carbono de campo.

As técnicas de classificação de imagens consistem basicamente em separar feições espaciais de acordo com características comuns colocando-as em grupos previamente definidos. Os critérios de classificação se baseiam em atributos capazes de serem entendidos por sistemas

computacionais e por isso, em classificadores automáticos. Esses atributos precisam ser representados numericamente. No processamento de imagem, atributos relacionados à intensidade dos pixels são naturalmente escolhidos para representarem objetos ou regiões das imagens em um classificador.

Em sensoriamento remoto, classificação automática de imagens multiespectrais diz respeito a associar cada pixel da imagem a um rótulo descrevendo um objeto real (CRÓSTA, 1992). Essa associação considera os valores de reflectância dos materiais que compõem os pixels da imagem e os organiza em classes denominadas de temas que representam o mundo real. Dessa forma quando se aplica este procedimento para uma determinada área, o produto é um mapa temático demonstrando a distribuição geográfica de um tema tal como vegetação, solos ou estoque de carbono.

A classificação automática pode ser dividida em duas categorias: não-supervisionada e supervisionada. No método de classificação não supervisionado a separabilidade entre as classes espectrais é dada pela distância euclidiana no espaço multiespectral, sendo caracterizado pelo pouco controle que o analista tem sobre a separação das classes espectrais e pelo fato de que as amostras iniciais não precisam ser necessariamente homogêneas.

A classificação supervisionada utiliza pixels de identidade previamente conhecida. Para identificação dessas áreas são utilizados tanto dados de campo quanto outros tipos de dados georreferenciados (mapas topográficos, mapas da vegetação, informações sobre o uso etc.). A principal vantagem da classificação supervisionada sobre a não-supervisionada é a de que classes específicas para o propósito do trabalho podem ser atribuídas pelo analista. Neste trabalho, as classes representarão os diferentes tipos de vegetação, além dos diferentes tipos de uso e cobertura de solo que compõem a área de estudo.

Foram testados vários métodos para a separação de classes espectrais, entre eles o de fatiamento e o da máxima verossimilhança. Esse último leva em consideração a variância e a covariância da resposta espectral das classes assumindo que a resposta espectral no espaço formado por n bandas de uma amostra de treinamento segue uma distribuição normal. Sob essa prerrogativa a distribuição da resposta espectral de uma dada classe pode ser representada através do vetor média e da matriz de covariância. (CRÓSTA, 1992). A classificação de um dado pixel se faz através do cálculo da probabilidade desse pixel

pertencer a cada uma das classes identificadas. Após essa análise de probabilidade, ele é incorporado à classe para a qual ele apresentou maior probabilidade de pertencer.

5.1.2 Integração e análise de dados através de geoprocessamento

Em trabalhos de geoprocessamento, é de fundamental importância que os mapas a serem trabalhados possuam um controle de qualidade eficiente, de maneira que as análises deles oriundas possam representar com maior acurácia a realidade. Mapas com diferentes resoluções espaciais, imprecisos quanto às informações neles contidas ou ainda com níveis de complexidade extremamente diferentes, podem causar distorções nos resultados das análises subsequentes.

Os produtos gerados pelo Processamento Digital de Imagem de Satélite (PDIS) possuem características que devem ser observadas para evitar esse tipo de problema. Uma delas é a complexidade das informações nela contida. O mapa imagem resultante do NDVI, por exemplo, apresenta uma matriz que varia entre -1 e +1, com até 256 valores nesse intervalo. Se aplicarmos o método de tabulação cruzada entre esse e um mapa de vegetação com 10 classes, por exemplo, o resultado será de difícil compreensão, uma vez que teremos uma tabela com 256 linhas e 10 colunas, ou vice versa. Para evitar esses problemas, os produtos oriundos do PDIS serão reclassificados e filtrados.

A função de reclassificação é desenvolvida de acordo com os interesses do operador, que deve se valer de procedimentos estatísticos coerentes com os objetivos do trabalho. Ela permite a utilização otimizada dos dados espaciais contidos num banco de dados. (SILVA, 1999). A reclassificação foi aplicada no mapa imagem do estoque de carbono e os intervalos das frequências de classe foram definidos automaticamente através da análise de agrupamento.

A análise de agrupamento consiste em identificar no universo amostral dos DN's os conjuntos de pixels que se encontram num determinado intervalo. Esse intervalo é definido a partir da análise modal.

A técnica de filtragem foi aplicada nos mapas imagem de vegetação e estoque de carbono gerados a partir da classificação. Ela é utilizada para eliminar os pixels isolados e, neste trabalho, foi utilizado o filtro de moda.

A técnica de filtragem é uma transformação pixel a pixel, com base na análise de vizinhança. Ao se aplicar o filtro de moda, a análise de vizinhança é feita se utilizando uma matriz, onde o número de colunas e linhas sejam iguais e ímpares (3x3, 5x5, 7x7), visando determinar qual a moda dessa matriz; em seguida, o valor do pixel central dessa matriz é substituído pela moda.

Uma base cartográfica pode ser composta por mapas observacionais (aqueles que descrevem o mundo real com um mínimo de interpretação, como os geológico, geoquímico, pedológico etc.) e analíticos (aqueles oriundos de processamento digital, tais como mapas de aspecto, imagens de falsa cor, etc.) (SILVA 1999). Neste trabalho, os mapas utilizados foram: Observacionais - geologia, solo, vegetação e imagem Landsat 7 ETM+; e analíticos - Modelo Digital de Terreno (MDT), mapa imagem de vegetação e mapa imagem do estoque de CO₂.

Integração de mapas corresponde ao processo pelo qual os mapas são associados através de modelos lógicos como simultaneidade *booleana*, possibilidade *fuzzy*, probabilidade *bayesiana*, (SILVA, 1999), análise de correspondência (CARVALHO, 1992) etc. Foi aplicada neste trabalho a análise de correspondência. Esta é a uma técnica estatística descritivo-exploratória, projetada para análise de tabelas simples de duas vias ou também multivias, com certo grau de correspondência. Dentre os diversos métodos para se aplicar a análise de correspondência, foi escolhida a tabulação cruzada, uma vez que esta permite calcular a área de intersecções entre duas matrizes, ou seja, dois mapas (EASTMAN, 1998).

5.2 INVENTÁRIO

O Inventário florestal é a base para a caracterização de uma determinada área e o conhecimento quantitativo e qualitativo das espécies que a compõe. Os objetivos do Inventário são estabelecidos de acordo com a pretensão de utilização da área, que pode ser reserva florestal, área de manutenção da vida silvestre, áreas de reflorestamento comercial, entre outros.

Neste estudo, inventário florestal visa estimar variáveis como peso, área basal, volume, qualidade do fuste, classe de copa e potencial de crescimento da espécie florestal.

No que tange ao detalhamento, os inventários podem ser classificados como: Florestais de Reconhecimento, Florestais de Semi-detelhe e Florestal de Pré-exploração Florestal. (FINGER,

1992). Neste trabalho, será aplicado o Inventário Florestal de Semi-detalle, uma vez que esse tipo de levantamento é realizado a fim de fornecer estimativas mais precisas relacionadas aos parâmetros da população florestal.

Quanto à abrangência, podem ser classificados como Inventário Florestal Nacional, Regional e de Áreas Restritas. Esse último é aplicado pela maioria dos inventários realizados por empresas florestais, e geralmente visa determinar o potencial florestal para utilização imediata ou embasar a elaboração de planos de manejo e tomada de decisões. (FINGER, 1992). Geralmente, é utilizado em grandes populações, especialmente quando os resultados devem ser obtidos no menor intervalo de tempo, pelo menor custo e com a precisão desejada.

5.3 DEFINIÇÃO DE EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS

Por alometria se entende a função de potência que relaciona características diferentes dentro de um conjunto de análise. (HAEMIG, 2007). Uma relação é dita alométrica quando uma dada característica física ou fisiológica varia com o tamanho do organismo, apresentando grande importância nos estudos de comparação e da história de vida das espécies. (BEGON; HARPER; TOWNSEND, 1986). Para Niklas (1994), a alometria pode ser considerada como o estudo do crescimento de uma parte do organismo em relação ao todo.

As leis de alometria são amplamente utilizadas em ecologia de paisagem. A lei de Fenchel, por exemplo, explica como o crescimento populacional exponencial é relacionado ao tamanho (massa) do corpo. Ela relaciona tamanho corporal (TC) com índices de crescimento populacional (ICP), propondo que espécies com maior TC têm menores ICPs. Ou seja, o índice máximo de reprodução cai com o tamanho do corpo a uma potência de aproximadamente 1/4 da massa corporal. (FENCHEL, 1974).

Outro exemplo pode ser encontrado na lei de Calder. Ele descreve a relação entre os períodos de oscilação nas populações de mamíferos herbívoros com o tamanho do corpo (massa) e propõe que as espécies com maior tamanho corporal geralmente têm ciclos populacionais mais longos. (CALDER, 1983).

A possibilidade de relacionar variáveis distintas dentro de um determinado conjunto é a principal utilidade da alometria dentro das metodologias de mensuração do teor de carbono na

vegetação. Isso porque a relação alométrica entre o diâmetro do tronco e a altura total da árvore permite, através da medida do tronco, estabelecer a quantidade de biomassa presente nas folhas, galhos, tronco e raiz, desde que se conheça a relação potencial entre elas.

Com base nessa relação, foram propostos vários modelos que procuram explicar como se combinam as forças em um caule, de modo que ele se mantenha de pé e sustente uma copa (SPOSITO, 1994). Esses modelos vêm sendo utilizados para se comparar grandes grupos taxonômicos (NIKLAS, 1993 apud MARTINS, 2004), plantas com diferentes alturas (KING, 1995), plantas pioneiras com plantas de estádios *sucessionais* mais avançados (RICH et al., 1986 apud MARTINS, 2004) e diferentes espécies de árvores em uma área (KING, 1995).

Este fato pode ser observado na determinação do IPCC que diz:

[...] A média do estoque de carbono da biomassa acima do solo e da biomassa abaixo do solo por área unitária é estimada com base nas medições de campo nas parcelas permanentes. Essa estimativa pode ser feita com o uso de dois métodos: o dos Fatores de Expansão da Biomassa (BEF) e o das Equações Alométricas. (IPCC, 2007).

Para o IPCC, as etapas da aplicação das equações alométricas são (i) medir o diâmetro, preferencialmente à altura do peito, de todas as árvores acima de um diâmetro mínimo; (ii) escolher ou estabelecer equações alométricas adequadas; (iii) estimar o estoque de carbono na biomassa acima do solo, usando-se uma seleção de equações alométricas aplicadas às medições das árvores da etapa (i).

[...] Nesta perspectiva as equações alométricas são, preferencialmente, derivadas localmente e específicas para a espécie. Quando são usadas equações alométricas desenvolvidas a partir de uma base de dados ampla em biomas é preciso verificar, destruindo-se por meio de corte, dentro da área do projeto mas fora das parcelas amostrais, algumas árvores de diferentes tamanhos, estimar sua biomassa e comparar a estimativa com a de uma equação selecionada. Se a biomassa estimada a partir das árvores cortadas estiver dentro de $\pm 10\%$ daquela prevista pela equação, então se pode supor que a equação selecionada é adequada para o projeto. Se esse não for o caso, recomenda-se desenvolver equações alométricas locais para uso do projeto. Para tanto, uma amostra de árvores, representando diferentes classes de tamanho, é cortada e o total de biomassa é determinado. O número de árvores a serem cortadas e medidas depende da faixa de classes de tamanho e do número de espécies – quanto maior a heterogeneidade, mais árvores serão necessárias. Se os recursos permitirem, o teor de carbono pode ser determinado em laboratório. Por fim, as equações alométricas são construídas, relacionando-se a biomassa com os valores de variáveis facilmente medidas, tais como o diâmetro do tronco e a altura total. (IPCC, 2007).

Diversos trabalhos de quantificação de carbono na vegetação são encontrados utilizando essa metodologia. Balbinot (2004) utilizou equações alométricas para estimar biomassa e carbono

para as plantações florestais de pinus em diferentes compartimentos das plantas. Martins (2004) aplicou equações alométricas para desenvolver uma proposta metodológica com objetivo de efetuar uma análise do potencial de fixação de carbono na recomposição florestal em áreas de mata ciliar, visando à obtenção de créditos de carbono do mecanismo de Desenvolvimento Limpo, como previsto no Protocolo de Quioto.

San José; Bracho; Nikonova (1998) determinaram o estoque de carbono na biomassa aérea em savanas da Venezuela, com dados coletados por inventários florestais e convertidos por equações alométricas, aliados a coletas destrutivas. Aguilar (2001), com base em equações alométricas, estudou 14 espécies de bosques nativos sempre-verde no Chile e três espécies de plantas exóticas. As funções de biomassa e coeficiente de expansão foram determinados com base em ensaios destrutivos de 540 árvores e extração de 137 raízes, em 168 parcelas com tamanhos que variavam entre 250 a 500m².

5.4 GRADIENTE C

Será introduzido nesta seção o conceito de Gradiente C, estabelecido com o propósito de corrigir a estimativa do estoque de carbono em razão do erro devido à homogeneidade de unidades de mapeamento.

Como exposto na seção 1, a quantidade de carbono a ser fixada varia em função de fatores que compõem a biomassa, tais como a composição florística e a densidade populacional de cada estrato por comunidade vegetacional.

Por sua vez, esses fatores resultam de condições edafoclimáticas responsáveis pelo estabelecimento do nicho ecológico de cada espécie, dentro de um dado ecossistema.

Para entender essa relação, faz-se necessário a compreensão dos conceitos de ecossistema, população e nicho ecológico.

O conceito de ecossistema surgiu em 1935, com os trabalhos do botânico inglês Arthur Tansley. Ele definiu ecossistema como sendo um sistema onde há interdependência de seus componentes, existência de um ciclo de matéria e de mecanismo de auto-regulação. (TROPMAIR, 2000).

Castri (1994) conceitua ecossistema como uma entidade definida no espaço e no tempo, compreendendo todos os organismos que a habitam, as condições físicas do clima e do solo e todas as interações entre os diferentes organismos e entre estes e as condições físicas. Esse conceito sofre influência da teoria geral dos sistemas (FRANCO, 2002), que propõe o todo como sendo superior à soma das partes, e aponta como elemento principal a interação dos elementos que o compõem.

A concepção de nicho considera toda a gama de condições sob as quais o indivíduo (ou população) vive e substitui a si mesmo. A percepção formal do nicho o pressupõe como sendo os limites de tolerância de “n” variáveis ambientais num mesmo espaço geográfico. Essa definição de nicho é encontrada em Hutchinson (1957). Segundo Odum (1988), o nicho inclui o espaço ocupado por um organismo, seu papel funcional na comunidade e sua posição em gradientes ambientais.

Uma população pode ser definida como um conjunto de indivíduos que compartilham uma determinada área geográfica, com uma alta probabilidade de cruzamentos entre si, em comparação com a probabilidade de cruzamentos com indivíduos de uma outra população. Geralmente, são descritas por parâmetros quantitativos, obtidos por medidas estatísticas, como médias, variâncias, taxas de mortalidade e natalidade, entre outros. Sendo assim, constitui um grupo de indivíduos da mesma categoria taxonômica com adaptação semelhante, que ocupa o mesmo nicho e *habitat*.

Analisando esses conceitos pode-se perceber uma íntima relação entre eles, uma vez que a população é o conjunto de indivíduos que compartilham uma determinada área geográfica. Essa área deve possuir características biofísicas que possibilitem o suprimento das necessidades ambientais desta população (nichos). Por sua vez, o nicho é fruto do conjunto formado por todos os fatores bióticos (populações de animais, plantas e bactérias entre outros), e abióticos (a água, o sol e o solo, entre outros) que atuam simultaneamente sobre uma região (ecossistema).

De posse dessa relação, pode-se reescrever a afirmação feita no início desta seção: a quantidade de carbono a ser fixada varia em função da composição florística e da densidade populacional, portanto, das características populacionais, de cada estrato por comunidade vegetacional, determinado pelo nicho ecológico, que compõe a biomassa de um dado ecossistema.

Essa observação é um complicador para os trabalhos de estimativa da quantidade de biomassa e carbono numa vegetação. Isso porque os métodos utilizados se baseiam em generalizações derivadas de análises estatísticas, através de equações alométricas ou parâmetros arbitrados, considerando de forma homogênea a densidade populacional e o índice valor de importância das espécies que ocorrem em uma dada vegetação, e são, portanto, imprecisos na quantificação da biomassa e do estoque de carbono associado.

A heterogeneidade da paisagem contém informações intrínsecas que podem ser indicadoras da composição e riqueza de espécies. (VAN RENSBURG; CHOW; GASTON, 2002). Esta heterogeneidade pode ser observada em diferentes escalas. Numa escala regional, pode-se verificar a presença de diferentes biomas, como é o caso da região Nordeste do Brasil, que possui áreas cobertas pelos biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica (IBGE, 2006). Dentro de um bioma, pode-se também verificar diferentes tipos de vegetações. No caso do bioma Caatinga, observa-se a Caatinga Arbórea, a Caatinga Parque, o Caatinga Arbustiva. (FRANCA-ROCHA, 2007). Dentro de uma vegetação específica, pode-se encontrar áreas com diferentes concentrações de espécies, fruto da disposição geográfica de recursos nutricionais necessários para sua manutenção.

A explicação para essa variação, tanto em escala regional quanto em escala local, é a mesma: combinação de características como solo, clima, formas de relevo, entre outras (BRUNCKHORST, 2000).

Ximenes; Ribeiro; Amaral (2007), através de mapas auto-organizáveis e parâmetros geofísicos, caracterizaram a heterogeneidade de paisagens na Amazônia Legal. Utilizando o conceito de ecorregiões, os autores representaram diferentes unidades que tiveram seus limites estabelecidos por diversos fatores como efeitos de distância geográfica, solo, chuva, inundação e, principalmente, rios como barreiras à troca gênica para fauna. Segundo os autores algumas espécies podem ocupar um nicho estreito apresentando uma sensibilidade à variações de gradientes ambientais muito sutis, e assim ter sua distribuição determinada por esses fatores.

Santana; Souto (2006) estudaram a variação fitossociológica do extrato arbóreo-arbustivo da caatinga da Estação Ecológica do Seridó no Rio Grande do Norte. O autores concluíram que o índice de diversidade e o de riqueza taxonômica foram baixos, e indicam que isso pode ser consequência do forte antropismo presente na região, como das condições edafoclimáticas da

área, ou seja, em relação a outras áreas de ocorrência da caatinga as condições do solo, disponibilidade hídrica, geomorfologia etc. podem não propiciar um ambiente ideal para as espécies ali presentes.

Protil (2006) avaliou a contribuição de espécies arbóreas ao ciclo biogeoquímico em três tipologias florestais (Inicial, Média e Avançada) da Floresta Atlântica, na Planície Litorânea do estado do Paraná. As três tipologias florestais se encontram sobre Espodossolos e se distinguem pela idade, diversidade florística e estrutura fitossociológica. O autor conclui que as diferentes espécies, presentes nas diferentes tipologias florestais, cumprem importante papel e contribuem de maneira distinta à ciclagem de nutrientes no ecossistema.

Essa variação espacial influencia diretamente os trabalhos de quantificação do carbono na vegetação. Schneider et al (2005) estimaram o estoque de carbono em povoamentos equiâneos de *Acácia mearnsii* De Wild., no Rio Grande do Sul. Os autores afirmam que na determinação da densidade de carbono na vegetação, com base em parcelas de investigação, podem ocorrer influência nos resultados, por causa da fertilidade, grau de antropismo, e outros fatores naturais e biológicos, o que, numa larga variação da densidade de carbono, pode resultar numa superestimativa do estoque de carbono. Para tentar superar esse problema, os autores utilizaram o método da derivação do volume da biomassa e carbono, efetuando uma amostragem por sítio e idade.

Rezende et al. (2006) compararam modelos matemáticos, baseados em relações alométricas, para estimar o volume, a biomassa e o estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto*, em Brasília-DF. Os autores afirmam que as estimativas de carbono para o cerrado são escassas, principalmente devido à grande diversidade de espécies, à alta variabilidade existente entre indivíduos de uma mesma espécie, além da grande variação na forma do tronco e copa dos indivíduos.

Aduan (2003) mensurou os principais estoques e fluxos da ciclagem interna do carbono em duas fitofisionomias de Cerrado nativo, com diferentes graus de importância do componente arbóreo (Cerrado denso e Cerrado *stricto sensu*), e de uma pastagem plantada com *Brachiaria brizantha*, com o intuito de produzir uma síntese dos estoques e fluxos de carbono nesses ecossistemas. Nesse trabalho, o autor afirma que há uma grande disparidade nos valores de carbono na biomassa aérea encontrados na literatura e que, provavelmente, deve-se à

heterogeneidade fitofisionômica da vegetação, às diferentes metodologias de amostragem e aos diferentes regimes de queima nas áreas estudadas.

Embora os autores considerem a dificuldade de quantificar o estoque de carbono por conta da heterogeneidade espacial dos caracteres ambientais das vegetações, eles acabam por considerar, em escalas maior ou menor, a vegetação de forma homogênea. Isso porque as metodologias apresentadas na literatura tendem a considerar a vegetação de forma homogênea. Os limites de concentrações são iguais para toda a área de ocorrência da vegetação.

Nessa perspectiva, é preciso desenvolver metodologias que considerem as variações edafoclimáticas da vegetação. E nesse sentido, visando minimizar o problema da homogeneidade, formulou-se neste trabalho o conceito de Gradiente C.

O gradiente de carbono, ou Gradiente C, é aqui conceituado como a variação espacial das concentrações de carbono num mesmo extrato vegetal.

Esse conceito se reveste de importância na medida em que através dele pode-se identificar com maior acurácia as áreas onde se localizam as maiores concentrações de carbono numa determinada vegetação, ou mesmo estabelecer com segurança estatística o total de carbono para aquela vegetação.

Isso se torna possível graças a combinação de duas variáveis: as imagens de satélite e o princípio do gradiente.

Segundo Crósta (1992), as imagens coletadas por sensores remotos, como é o caso da imagens de satélite, possuem algumas características que as diferenciam das demais imagens digitais: a estrutura e a resolução por exemplo.

Quanto a estrutura, uma imagem de satélite pode ser definida como uma matriz de células uniformes quanto à geometria (área e formato), e heterogêneas quanto aos valores atribuídos a cada célula. As células dessa matriz, também conhecidas como pixel, possuem três atributos: x, y e z, longitude, latitude e nível de cinza, respectivamente.

O atributo z representa a intensidade média da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor para uma dada área da superfície terrestre representada pelo tamanho do

pixel (CRÓSTA, 1992). Essa matriz pode ser composta por milhares de pixels com atributo z definido, justificando o elevado número de dados presentes em uma única imagem.

Muitos materiais presentes na superfície terrestre interagem com a energia da luz do Sol exibindo comportamentos que variam em função dos comprimentos de onda ao longo do espectro eletromagnético. (CRÓSTA apud CHAVES; FRANCA-ROCHA, 2006). Esse comportamento é representado pelo atributo z das imagens de satélite.

A vegetação, como os outros materiais da superfície terrestre, interage com essa energia e, em função dessa interação, podem-se avaliar, através de métodos computacionais, características como o tipo, a estrutura e a saúde da vegetação. Com base nesses fatos, diversos estudos foram desenvolvidos.

Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Teillet; Staenz; Williams (1997), que estudaram a resposta espectral de espécies florestais; de Richardson; Everitt; Gausman (1983), Reed; Yang (1997), que acompanharam variações sazonais em vegetação nativa, Goodin; Henebry (1997), que efetuaram o monitoramento ecológico de mudanças por processos naturais ou antrópicos ocorridos em gramíneas. Esses, e grande parte dos trabalhos desenvolvidos, têm utilizado índices de vegetação como técnica de análise.

Um gradiente é a razão segundo a qual uma quantidade variável aumenta ou diminui; esse conceito é muito comum na física (FEYNMAN, 2007). O gradiente de tensão, por exemplo, é a tensão por unidade de comprimento ao longo de um circuito por unidade de tempo, podendo ser positivo ou negativo.

Outra característica dos gradientes é que eles permitem aferir medidas mais precisas dentro de um sistema. Isso porque ele divide uma medida em intervalos menores e relativamente contínuos.

O Gradiente C conserva todas essas características e as espacializa. Sendo assim, ao dividir a área de uma vegetação em unidades localizadas menores e uniformes (pixels), e determinar a concentração de carbono nestas unidades, baseando-se em parâmetros empíricos, pode-se ter clareza do comportamento da vegetação em relação à fixação de carbono.

Combinando imagens de satélite e o princípio do gradiente, podem-se mapear diferenças sutis que ocorrem dentro de um mesmo extrato vegetal, no que tange à concentração de carbono.

5.4.1 Método para determinação do Gradiente C

O método utilizado para o estabelecimento do Gradiente C é composto de três etapas: 1. Processamento Digital de Imagens de satélite (PDI); 2. Trabalhos de Campo para levantamento de parâmetros para a quantificação do carbono; e 3. Análise estatística.

A Figura 7 apresenta o fluxograma do método proposto.

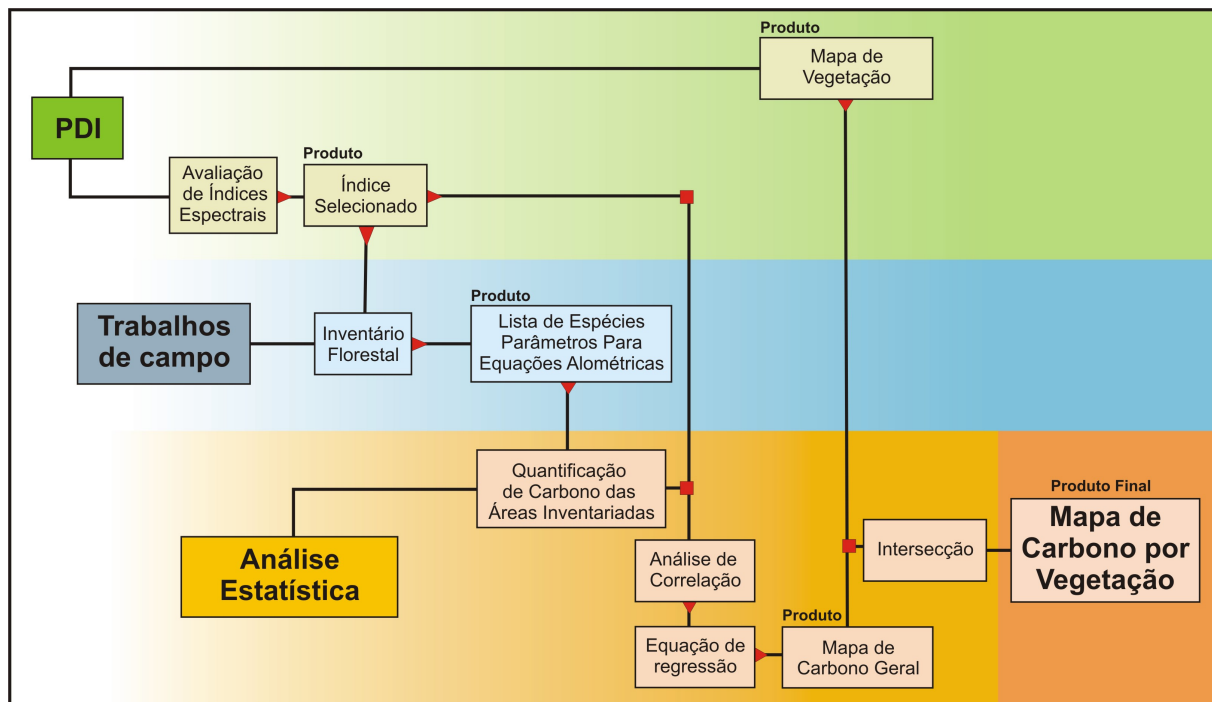


Figura 7 – Fluxograma representando a metodologia utilizada para determinação do Gradiente C

No PDI são testados diversos índices espectrais de vegetação, a fim de alcançar aquele que melhor represente a área de estudo, e desenvolvido o mapa de vegetação apoiado em dados de campo e material cartográfico preexistente.

Nos trabalhos de campo é efetuada a amostragem da vegetação e a localização de todas as parcelas inventariadas. Neste trabalho, a amostragem foi realizada por meio de equações alométricas; e a localização, através do sistema de posicionamento global (GPS). O número e o tamanho das parcelas a serem inventariadas são definidos com base no tamanho da área de ocorrência da vegetação inventariada.

Nas análises estatísticas, primeiramente é estabelecida a correlação entre as imagens índice de vegetação e os teores de carbono levantados com a amostragem da vegetação em campo.

Depois de confirmada a correlação, é estabelecida uma equação de regressão e, em seguida, esta equação é aplicada à imagem índice, o que transforma os valores dos números digitais em quantidade de carbono, gerando um mapa de carbono para a área de estudo. Esse mapa de carbono é intersectado pelo mapa de vegetação. Isso permite imprimir em cada extrato de vegetação os valores de carbono correspondente. Em cada extrato de vegetação é determinado o intervalo e quantidade de classes de teor de carbono, através da regra de Sturges.

Esses procedimentos estão detalhados na próxima seção, quando da descrição das técnicas utilizadas neste trabalho.

5.5 TÉCNICAS

Ainda em relação ao método desenvolvido nesta pesquisa serão descritas as técnicas utilizadas para sua implementação. A saber: 1. mapeamento; 2. inventário; 3. atividades laboratoriais; 4. determinação da biomassa e do carbono; 5. calibração do NDVI.

5.5.1 Mapeamento

O mapeamento neste trabalho foi efetuado através das técnicas de geoprocessamento, Processamento Digital de Imagem (PDI) e campo.

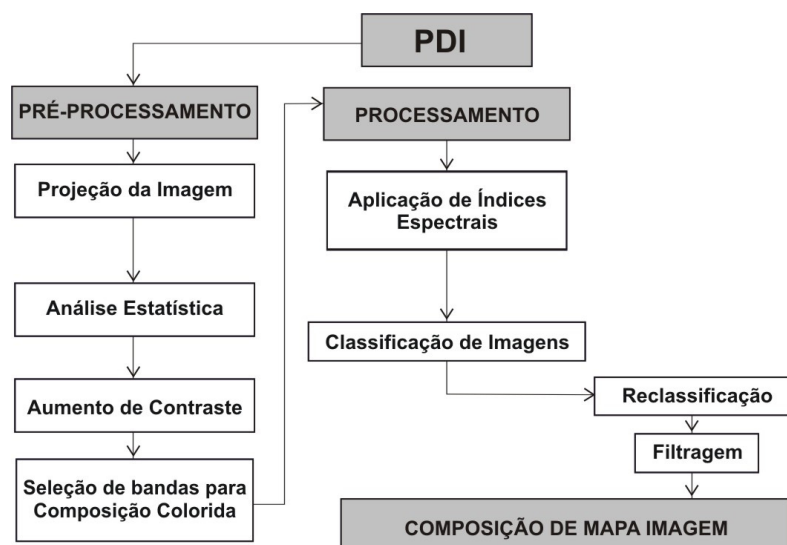


Figura 8 – Fluxograma metodológico do PDI.

O fluxograma (Fig.8) apresenta as etapas de desenvolvimento das atividades de PDI: 1. Projeção da Imagem; 2. Análise Estatística; 3. Aumento de Contraste; 4. Seleção de bandas para Composição Colorida; 5. Aplicação de Índices Espectrais; 6. Determinação de Índices espectrais; 7. Classificação das imagens geradas a partir dos índices e Classificação Supervisionada para Composição do Mapa de Vegetação. Os detalhamentos das técnicas apresentadas foram feitos no item 4 - Revisão da Literatura.

Em campo, foram constituídos pontos de controle estabelecidos como área de treinamento para a classificação das imagens, realização do inventário e efetuadas medidas de biomassa em campo.

5.5.2 Inventário

Neste trabalho, o inventário florestal visou estimar variáveis como peso, área basal, volume, qualidade do fuste, classe de copa e potencial de crescimento da espécie florestal.

Os dados do inventário foram obtidos através de amostragem. Nesta, observam-se apenas uma parte da população e se obtém uma estimativa dos seus parâmetros.

Para analisar a composição florística e a estrutura fitossociológica das áreas de Cerrado e Carrasco (etapas 1 e 2) foi realizado o método de parcelas circulares. Neste, amostraram-se 6 parcelas com raio de 20m (3 no Cerrado e 3 no Carrasco), seguindo a metodologia proposta por McDicken (1997). Cada parcela foi georreferenciada e subdividida em raios de 1, 4, 7, 14 e 20m. A contagem seguiu os parâmetros descritos abaixo:

- No raio de 1m - indivíduos com caules inferiores a 1cm de diâmetro;
- No raio de 4m - indivíduos com caules acima de 1cm de diâmetro;
- No raio de 7m - indivíduos com caules acima de 5 cm de diâmetro;
- No raio de 14m - indivíduos com caules acima de 7cm de diâmetros;
- No raio de 20m - indivíduos com caules acima de 10cm de diâmetro.

5.5.3 Atividades laboratoriais

Em laboratório, foram desenvolvidas as atividades de quantificação da biomassa com base nos dados do inventário; a calibração dos índices espectrais, com base nos resultados da quantificação da biomassa; e a determinação do estoque de carbono para a área de estudo por unidade fitofisiográfica de vegetação.

5.5.4 Biomassa e teor de carbono

Os dados referentes às medidas de biomassa e teor de Carbono foram levantados com base na metodologia proposta por Acosta-Mireles et al (2006) que desenvolveram modelos alométricos para estimar a biomassa aérea total, a partir da variável DAP (diâmetro a altura do peito), para seis espécies arbóreas dominantes nos bosques mesófilos de montanha na Serra Norte de Oaxaca (México).

Para levantar a biomassa com base na variável DAP, os autores utilizaram metodologia semelhante à descrita por Espinosa-Bancalari; Perry (1987), que consiste em dividir a árvore em seções com base na relação tamanho-DAP para o tronco e para a copa e encaminhar para laboratório onde foram secadas a 75°C para estimar o peso seco de cada seção. A soma do peso seco de cada seção do tronco e da copa constitui a biomassa aérea total.

O modelo de relação alométrica utilizado foi o proposto por Ter-Mikaelian; Korzukhin (1997), dado pela equação:

$$y = bx^k \quad \dots(5)$$

Onde y é a biomassa aérea total em kg, X o DAP em Cm, b e k são parâmetros estimados por mínimos quadrados, e representam a ordenada para a origem e a declinação do modelo de regressão.

As equações alométricas utilizadas nesta pesquisa são frutos do trabalho desenvolvido por Souza et al. (2007). Neste, foram ajustadas equações para quantificar a biomassa das folhas, galhos finos, galhos grossos, tronco e raiz. Para tanto, os autores consideraram o coeficiente de variação, o coeficiente de determinação, o quadrado médio da regressão/quadrado médio do resíduo, a massa seca, o raio ao nível do solo (RAS) e o resíduo.

Foram testados modelos para estimar a biomassa total das comunidades vegetais. A totalização se refere a uma equação alométrica que estime a biomassa em função do RAS, considerando a participação das folhas, galhos, tronco e raízes de sustentação até 1m de profundidade. As seguintes equações se mostraram adequadas:

Para o Cerrado, a equação para indivíduos com até 5 cm de RAS:

$$MS \text{ total} = 0,374001+(0,0222097*4R^2*H) \quad \dots(6)$$

E indivíduos com RAS maior que 5 cm:

$$MS \text{ total} = 3,3822+(0,00586259*4R^2H^2) \quad \dots(7)$$

Para o Carrasco, indivíduos com até 5 cm de RAS:

$$MS \text{ total} = 0,028594+(0,112611*4R^2*H)+(-0,0086220*4R^2*H^2) \quad \dots(8)$$

E indivíduos com RAS maior que 5 cm: MS total =

$$MS = 0,27643*(4,539*R^{2,18239}) \quad \dots(9)$$

Onde MS total = massa seca total, R = Raio ao nível do solo, H = altura.

Essas equações foram utilizadas para medir a biomassa total das 6 parcelas inventariadas. Em seguida, o resultado foi utilizado na equação de regressão. Os resultados podem ser observados no quadro abaixo:

PARCELA	VEGETAÇÃO	BIOMASSA EM T
S1	Cerrado	2.43
S2	Cerrado	2.48
S3	Cerrado	2.17
Total Cerrado		7.08
C1	Carrasco	9.70
C2	Carrasco	7.85
C3	Carrasco	10.20
Total Carrasco		27.75

Quadro 6 – Biomassa das parcelas utilizadas para calibração do NDVI.
Fonte: Compilado de Souza et al (2007)

5.5.5 Calibração do NDVI

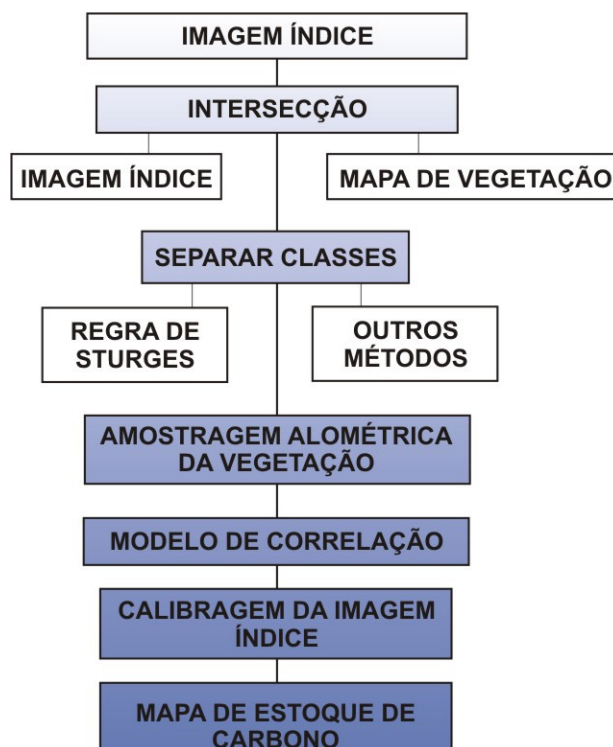


Figura 9 – Fluxograma dos procedimentos de calibração

A calibração do NDVI foi feita com base na amostragem de campo. O fluxograma acima (Fig. 9) apresenta as etapas desenvolvidas.

5.5.5.1 Intersecção

Entenda-se por intersecção o processo pelo qual as informações de uma mapa são sobrepostas a outro, com base em um atributo predeterminado. A intersecção será utilizada para atribuir às imagens índice as informações advindas do mapa de vegetação. A imagem resultante desse processo é a separação na imagem índice das classes de vegetação. Com isso, pode-se observar como se comporta espacialmente a distribuição dos índices espectrais dentro das unidades fitofisiográficas.

5.5.5.2 Separação de Classes (classificação das Imagens Índice)

As imagens índices foram classificadas de acordo com a regra de Sturges (1926), onde as classes foram calculadas separadamente para cada entidade fitofisiográfica da vegetação.

Como já enunciado anteriormente, os procedimentos em sensoriamento remoto produzem imagens com um número muito grande de dados se tornando difícil analisar o conjunto de valores através de uma variável discreta. Na análise desses conjuntos complexos de dados, é comum dividí-los em classes ou categorias e averiguar o número de indivíduos pertencentes a cada classe. Para tanto, os valores são agrupados em diversos intervalos para obter uma idéia geral da realidade estudada.

Contudo, se por uma lado o agrupamento de valores de uma variável em classes oferece simplicidade a análise, por outro ocasiona a perda de detalhes. Sendo assim, a escolha do procedimento estatístico para separar esses intervalos de classes se torna de fundamental importância para o alcance de um bom resultado.

A principal preocupação na construção de uma distribuição de frequência é a determinação dos elementos: 1. número de classe (descrito com mais detalhes a seguir); 2. amplitude do intervalo de classe (a medida do intervalo que define a classe); 3. limites de classe (os extremos de cada classe).

Para se determinar o número de classe não existe uma regra fixa. Para minimizar as dificuldades existentes pode-se utilizar a regra de Sturges, que possibilita a determinação empírica do número de classes em função da população analisada, de acordo com a equação:

$$K = 1 + 3,322 \times \log n \quad \dots(10)$$

Onde K é o número de classes e n o número total de dados.

A amplitude de um intervalo de classe pode ser encontrado com a equação abaixo:

$$H = \frac{AT}{K} = \frac{AA}{K} \quad \dots(11)$$

Onde:

AT = **Amplitude total da distribuição:** diferença entre o limite superior da última classe e o limite inferior da primeira classe (AT = L_k-L_i)

AA = **Amplitude amostral:** diferença entre os valores máximo e mínimo da amostra (AA = X_{max} - X_{mini})

5.5.5.3 Amostragem alométrica da vegetação

A amostragem alométrica foi feita nas seguintes classes de vegetação: cerrado e caatinga. Após a separação de classes, foram plotadas três parcelas com raio de 20m nessas unidades fitofisiográficas, extraídas do mapa de vegetação. Nessas parcelas, foi realizado o inventário e aplicada a equação alométrica, determinada anteriormente. Os resultados dessas equações são expressos em kC/m² (quilograma de carbono por metro quadrado).

5.5.5.4 Modelo de Correlação

Após amostragem, foi composta uma matriz x, y, z onde o x e y representam um par de coordenada e z representa o valor de carbono em KgC/m². Em seguida foi efetuada a análise de correlação entre esta matriz e as imagens índice.

A covariância é um parâmetro estatístico através do qual se mede o grau de associação “linear” entre duas variáveis aleatórias A e B. Para este trabalho, a variável A corresponde ao valor do pixel na imagem índice e a variável B ao valor do z na matriz resultante da amostragem.

Apesar de a covariância ser um parâmetro estatístico adequado para medir relação linear entre duas variáveis, ela é complicada para comparar graus de relação entre variáveis, m razão de poder ser influenciada pelas unidades de medida de cada variável, que pode ser metros, quilômetro, quilogramas etc.

Para evitar a influência da ordem de grandeza e unidades de cada variável, a covariância é dividida pelo desvio padrão de A e de B. Esse procedimento está proposto na formulação Karl Pearson (1984), que desenvolveu a fórmula matemática utilizada comumente para calcular o coeficiente de correlação.

O coeficiente de correlação de Pearson detecta relações lineares entre pares de variáveis e quando a relação não é linear, pode-se fazer uso de transformações que linearizam a relação ou métodos de regressão não linear.

A investigação do grau de correlação entre a matriz resultante da amostragem e as imagens índice foi necessária para calibrar as imagens índices com as medidas de campo e inferir o total de carbono presente na área de estudo.

Como exposto anteriormente, um índice espectral é a medida da quantidade total do elemento investigado por unidade de área na superfície terrestre. Para o caso do NDVI, ele representa a medida da quantidade total de vegetação verde (sadia). Ou seja, o valor de NDVI para cada pixel é a medida de vegetação sadia no pixel. Se existir uma correlação entre o valor do NDVI e as medidas de carbono oriundas da amostragem, pode-se transformar através de uma curva de calibração a imagem do NDVI em uma imagem que represente as quantidades de carbono para a área de estudo.

Uma metodologia semelhante foi utilizada por Veroustraete; Patyn; Myneni (1996) que assumiram uma relação linear entre o valor de NDVI no pixel, N, e a quantidade de vegetação visível em cada pixel (para o instrumento *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR)), determinando a massa de carbono sazonal em cada pixel mediante a equação:

$$CS = Mc * A \left(\frac{N - No}{N_{\max} - No} \right) \quad \dots(12)$$

Onde CS é o Carbono Sazonal; Mc é a massa de carbono por unidade de área na vegetação sazonal; A é a área de um pixel; N o valor do NDVI no Pixel; No o valor de NDVI mínimo e Nmax o valor de NDVI Máximo.

O total de carbono sazonal, em sua proposição, em cada imagem NDVI, é obtido pela somatória de carbono em todos os pixels da imagem, de forma que essa fórmula pode ser reescrita como:

$$CS = I * Mc * \left(\frac{A}{N_{\max} - No} \right) \quad \dots(13)$$

Onde I é a densidade integrada (somatória de N-No para todos os pixels da imagem).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa serão apresentados em quatro tópicos: 1. Calibração do NDVI; 2. Validação; 3. Comparação entre o modelo tradicional de quantificação de carbono na vegetação e o proposto neste trabalho; 4. Aplicação do Gradiente C.

6.1 CALIBRAÇÃO DO NDVI

A calibração da imagem NDVI para imagem de biomassa envolveu as seguintes etapas: (a) re-escalamento do NDVI; (b) reamostragem do pixel da imagem NDVI de 30X30m para 40X40m; (c) ajuste dos valores de biomassa para a área do pixel re-amostrado; (d) análise de correlação regressão.

6.1.1 Reescalamento e Reamostragem do NDVI

O cálculo do índice espectral NDVI foi efetuado conforme descrito na seção 5. O NDVI gera uma imagem cujos valores são expressos em um intervalo que varia de -1 a 1. Quanto maior for o valor do índice, maior será a abundância de biomassa. Para a área de estudo, os resultados obtidos estão situados entre -0.684 e 0.577. A média de valores de NDVI é 0.064 e o desvio padrão é 0.155.

O intervalo -0.68 a 0.10 representa áreas de solo exposto, afloramento rochoso e massas d'água. De acordo com a análise do histograma (Fig. 10), pode-se observar que os valores mais freqüentes de NDVI estão situados no intervalo -0.171 e 0.318. Nota-se ainda a presença de uma queda abrupta na parte central do histograma, localizada entre -0.008 e 0.006. Esses valores

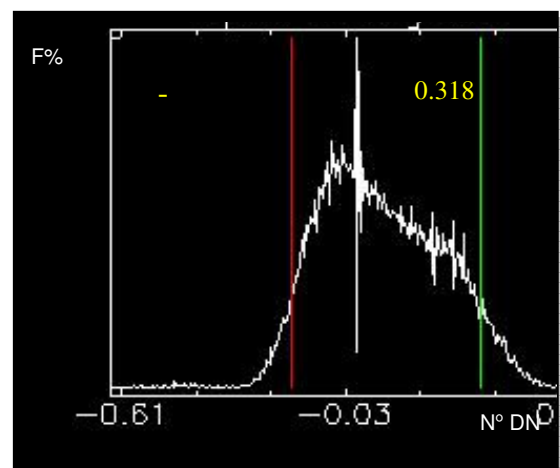


Figura 10 – Histograma da imagem NDVI

representam áreas sombreadas na imagem, não sendo possível relacioná-las com qualquer classe. Os valores menores que 0.10 também foram atribuídos à ausência de vegetação.

Como os dados do NDVI serão utilizados numa equação de regressão, fez-se necessário o re-escalamento desses valores. Esse procedimento visa transformar os valores negativos em positivos, de maneira a facilitar os cálculos para transformação dos valores de NDVI em biomassa. Essa operação foi feita se adicionando 1 a cada pixel da imagem NDVI. Tal procedimento modifica o intervalo e altera parcialmente as características estatísticas. O intervalo passou a ser de 0.315 a 1.577, a média 1.063 e o desvio padrão permaneceu 0.155. Ainda se fez necessária a re-amostragem do tamanho do pixel da imagem NDVI para 40mx40m. Essa necessidade é consequência da diferença entre o tamanho da célula de amostragem de biomassa em campo e a área dos pixels da imagem.

A metodologia adotada para levantamentos de campo utilizou parcelas circulares com raio de 20m e área de 1.256m² e, para validação, 10m de raio e área de 314m². Como a imagem LANDSAT utilizada para o cálculo do NDVI possui pixel com 900m² de área (30mx30m), seria necessário adequar às áreas de análise. Como o número de parcelas utilizadas na amostragem foi pequeno, optou-se por aumentar o tamanho do pixel para 1600m² (40mx40m) e calcular o valor de biomassa para essa unidade fundamental. A re-amostragem foi efetuada pelo método vizinho mais próximo.

A operação de re-amostragem não modificou estatisticamente a imagem NDVI conforme se observa no histograma (Fig.11). Os parâmetros estatísticos da imagem usada para os cálculos de biomassa estão dispostas no quadro abaixo:

CARACTERES	VALOR DE DN	HISTOGRAMA
Valor Mínimo	0.377	
Valor Máximo	1.578	
Média	1.064	
Desvio Padrão	0.155	
Intervalos sem Vegetação	0.370 - 0.840	
Área do pixel	1.600m ²	

Figura 11 – Histograma da imagem NDVI re-amostrada.

Quadro 7 – Características da imagem usada para os cálculos de biomassa.

6.1.2 Ajuste dos valores de biomassa para a área do pixel re-amostrado

Como expresso anteriormente, os dados utilizados neste trabalho possuíam diferentes unidades de análise. Tais diferenças poderiam acarretar erros significativos no desenvolvimento dos testes de correlação, da análise de regressão e, conseqüentemente, na quantificação da biomassa.

Após a adequação das unidades de análise, ajustou-se o total de biomassa das parcelas para os pixels re-amostrados correspondentes a essas parcelas. Para essa operação foi utilizada a equação abaixo:

$$BP = \frac{Ap \times Bm}{Aa} \quad \dots(14)$$

Onde:

BP = Biomassa do pixel Bm = Biomassa medida em Mg

Ap = Área do pixel Aa = Área amostrada

Os resultados desta equação estão sintetizados no quadro a seguir.

PARCELA	VEGETAÇÃO	BIOMASSA DA PARCELA (MG)	BIOMASSA DO PIXEL (MG)
S1	Cerrado	2.43	3.10
S2	Cerrado	2.48	3.15
S3	Cerrado	2.17	2.77
Total Cerrado		7.08	9.02
C1	Carrasco	9.70	12.36
C2	Carrasco	7.85	10.00
C3	Carrasco	10.20	12.99
Total Carrasco		27.75	35.35

Quadro 8 - Biomassa das parcelas inventariada para a calibração, ajustada à área dos pixels.

6.1.3 Análise de correlação e regressão

De posse dos dados oriundos da quantificação da biomassa, para a área dos pixels, foi efetuada a análise de correlação entre as medidas de campo e a imagem NDVI. Foram coletados os valores médios dos 4 pixels da imagem NDVI, cujos centros fossem mais próximos ao centro da parcela, com base na distância euclidiana (Fig.12). Este procedimento foi efetuado porque os pontos referentes às parcelas, quando lançados na imagem, foram posicionados no limite entre dois ou mais pixels.

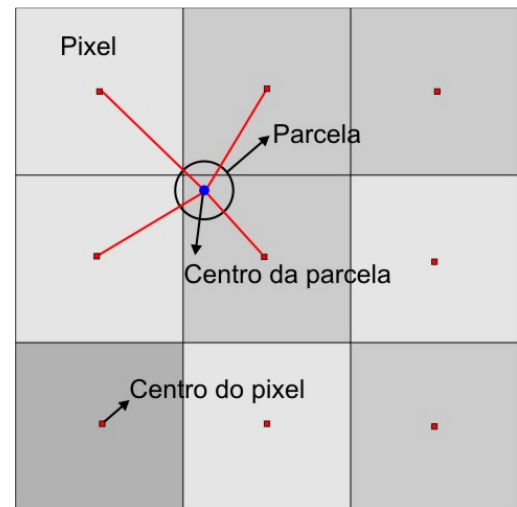


Figura 12 - Esquema demonstrativo da seleção do pixel representante da parcela

Esses dados foram tabulados e a análise de correlação implementada no pacote estatístico R. Foram aplicados: (a) o teste de Fila de Spearman; (b) o Índice Kendall e (c) Módulo de Pearson. Os valores utilizados para a análise se encontram no quadro abaixo:

PARCELAS	NDVI				Média Px	Bm Px Médio (Mg)
	Px1	Px2	Px3	Px4		
S3	1.075	1.052	1.085	1.076	1.075	2.768
S1	1.122	1.106	1.131	1.104	1.114	3.098
S2	1.129	1.076	1.116	1.090	1.103	3.155
C2	1.240	1.242	1.368	1.265	1.253	10.005
C1	1.318	1.293	1.328	1.328	1.323	12.362
C3	1.354	1.374	1.389	1.349	1.364	12.991

Quadro 9 - Pixels selecionados para a análise de correlação. S = Parcela de calibração no cerrado; C = Parcela de calibração na Caatinga; px = Pixel; Bm = Biomassa

Os testes demonstraram uma forte correlação entre os dados. O Quadro 10 apresenta o resultado da análise de correlação efetuada no trabalho, e a Figura 13 apresenta o gráfico de dispersão.

MÉTODO	PARCELA DE CALIBRAÇÃO
Spearman	0.99
Kendall	0.86
Pearson	0.99

Quadro 10 - Resultado da análise de correlação

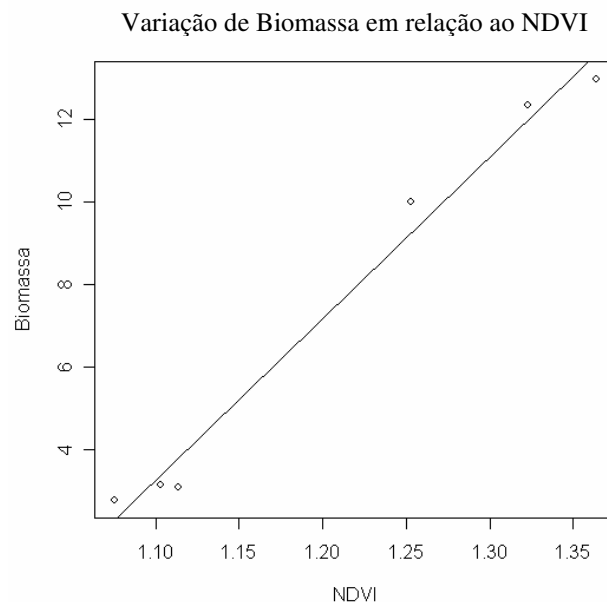


Figura 13 - Gráfico de dispersão resultante da análise de correlação

Depois de constatada a forte correlação entre os dados, realizou-se o ajuste, também com auxílio do pacote estatístico R, de forma a encontrar a equação de regressão que determina a biomassa em função do NDVI. Como segue:

$$ypc = (39.223 * x) - 39. \quad \dots(15)$$

Onde ypc = biomassa do pixel com parcela de calibração, e x = NDVI.

A equação de regressão linear foi aplicada na imagem NDVI usando o *software Envi* com auxílio do módulo *Band Math*. (Fig.14).

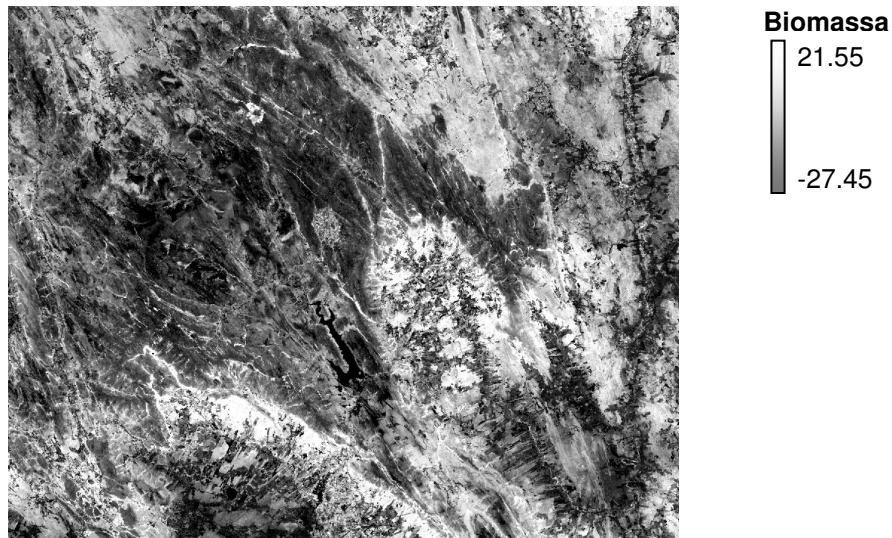


Figura 14: Imagem resultante da regressão linear

Conforme se pode observar na Figura 15, o histograma da imagem resultante é semelhante ao da imagem de entrada (NDVI), quanto à estrutura. Isso porque a correlação encontrada entre as duas variáveis foi positiva e alta. A análise do histograma da imagem resultante revelou que os valores que representam as áreas de solo exposto, massas d'água e afloramento rochosos, resultaram em valores negativos. Isso já era esperado, uma vez que a biomassa nesses locais é muito próxima a zero.

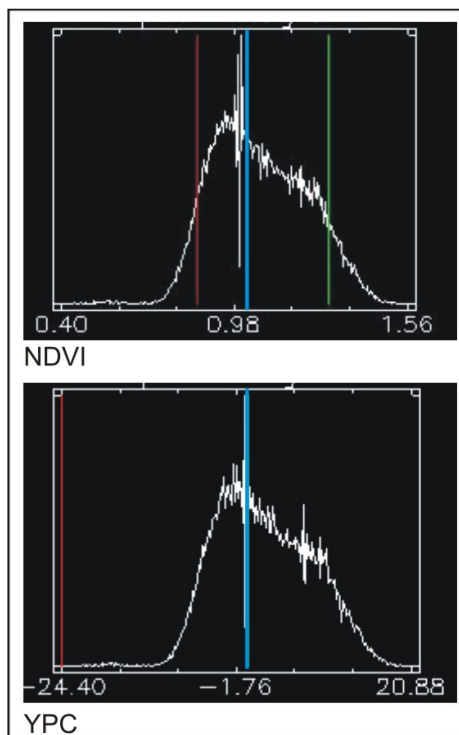


Figura 15 - Comparação dos histogramas das imagens NDVI e YPC

Excluindo da imagem de biomassa os valores superiores ao limiar de 0.006, pode-se observar a distribuição espacial dos valores negativos observados no histograma. A Figura 16 demonstra o experimento.

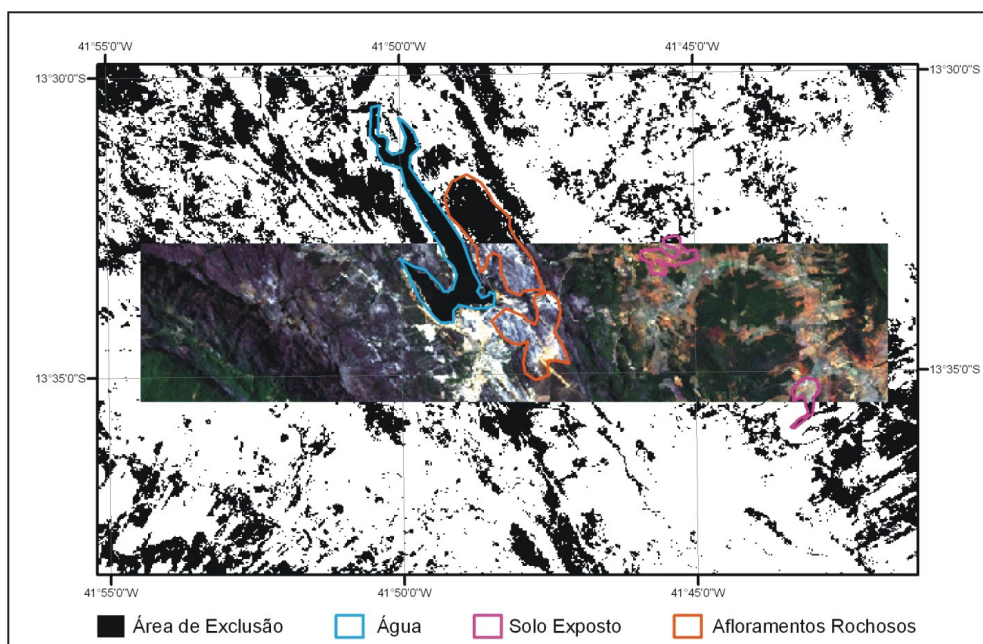


Figura 16 - Distribuição espacial dos valores negativos observados no histograma da imagem YPC

6.2 VALIDAÇÃO

A validação foi realizada com o objetivo de avaliar a metodologia utilizada nesta pesquisa. Para tanto, foram utilizados como parâmetros os dados de campo obtidos através de inventário florestal em três áreas de vegetação cerrado. O procedimento seguiu a seguinte ordem: (a) trabalho de campo (inventário florestal); (b) uniformização das unidades de medidas; (c) comparação entre os valores de biomassa obtidos com os dados de campo e os valores de biomassa obtidos com a calibração da imagem NDVI.

6.2.1 Resultados da amostragem de campo

A amostragem de campo foi desenvolvida com o objetivo de coletar dados para aplicar as equações alométricas, possibilitando a estimativa da biomassa.

Na medição e quantificação do potencial da área de estudo para a estimação da biomassa foi utilizada uma abordagem integrada. Regionalmente, foram considerados o meio físico e suas paisagens, os tipos vegetacionais incluídos na paisagem, a composição florística e a estrutura fitossociológica. Pontualmente, foi avaliada a contribuição de cada espécie constituinte dos extratos vegetais para a formação da biomassa existente.

Conforme descrito na seção de métodos e técnicas, o inventário foi realizado pelo método de parcelas circulares (MACDICKEN, 1997), e a quantificação da biomassa foi realizada com base nas equações alométricas de Souza Filho et al. (2007), seguindo as seguintes etapas: 1. Detecção das espécies mais abundantes em cada tipo vegetacional; 2. Inventário com base no RAS (raio a altura do solo) Medições de biomassa espécie a espécie; 3. Aplicação das equações alométricas para estimar a repartição de carbono por tipologia vegetacional.

Na etapa 1, buscou-se identificar na área de estudo as espécies utilizadas na composição da equação alométrica proposta por Souza Filho et al. (2007), com o propósito de avaliar se as equações poderiam ser utilizadas. Verificou-se a presença das espécies consideradas na formulação das equações alométricas, o que permitiu a utilização dessas equações.

A vegetação selecionada para a validação foi o cerrado. O inventário e posterior quantificação da biomassa foram feitos com base em: (1) parcelas circulares com raio de 10m, e (2) foram considerados todos os indivíduos com RAS superior a 7cm.

A escolha do cerrado, o tamanho da amostra e a linha de corte do RAS (7cm) foram definidos em função do tempo disponível para a execução do projeto e as características das áreas amostradas.

Embora as parcelas de validação sejam menores que as parcelas de calibração, a quantificação e comparação da biomassa não foram prejudicadas. Isso porque no método das parcelas circulares utilizado na calibração, a contagem e medição dos indivíduos são feitas de forma hierárquica quanto ao DAS, de maneira a facilitar o inventário florestal sem comprometer a qualidade estatística. Nele, quanto menor for o diâmetro do indivíduo menor será sua área de contagem, menor o esforço amostral.

Isso significa que, de acordo com a escala de medida utilizada, no raio de 1m (3.14 m^2) foram considerados todos os indivíduos com caules inferiores a 1 cm de diâmetro e, em seguida, o valor encontrado nessa área foi extrapolado para a área total da parcela: no raio de 4m (50.24 m^2) foram considerados os indivíduos com caules acima de 1cm de diâmetro e os valores oriundos dessa quantificação foram extrapolados para a área da parcela.

Os indivíduos com DAS acima de 7 cm foram considerados numa parcela de 14 m de raio (615 m^2) e, em seguida, extrapolados para a área total da parcela. Isso aconteceu com todos os extratos descritos anteriormente. O resultado total da quantificação da parcela foi extrapolado para a área do pixel da imagem NDVI (1600 m^2).

Como os valores encontrados nas parcelas de validação, embora com 10 m de raio, também foram extrapolados para a área do pixel e, nas parcelas de calibração, os indivíduos com DAS menor do que 7 cm não foram considerados. A diferença do tamanho da parcela não comprometeu a análise estatística.

Para evitar medidas tendenciosas, foram lançados 5 polígonos sobre a área de Cerrado. A localização desses polígonos considerou a acessibilidade e a variação espacial dos valores de NDVI, de maneira a cobrir diferentes intervalos. Em cada polígono foram lançadas 8 parcelas georreferenciadas com raio de 10 m. Em seguida foi sorteado um polígono e, neste, 3 parcelas a serem inventariadas.

Em cada parcela foram tomadas a altura e o RAS de todos os indivíduos com diâmetro acima de 7 cm. O número de indivíduos encontrados em cada parcela pode ser visualizado no Quadro 11.

DIÂMETRO (CM)	Nº DE INDIVÍDUOS DE P1	Nº DE INDIVÍDUOS DE P2	Nº DE INDIVÍDUOS DE P3
7	44	12	5
7 - 10	54	36	25
>10	73	59	70
Total de Indivíduos	171	107	100

Quadro 11 - Número de indivíduos amostrados nas parcelas de validação. P = Parcela.

Em seguida, foi aplicada sobre essas medidas a equação alométrica gerada para o Cerrado da área de estudo como segue:

$$MS \text{ total} = 3,3822 + (0,00586259 * 4R^2H^2) \quad \dots(16)$$

Onde MS total = massa seca total, R = Raio ao nível do solo, H = altura.

Finalmente, foi calculada a biomassa total de cada parcela. Os resultados quantitativos estão sintetizados no quadro abaixo:

PARCELA	VEGETAÇÃO	BIOMASSA EM MG
Pv1	Cerrado	1.335
Pv2	Cerrado	1.510
Pv3	Cerrado	1.009
Total		3.854

Quadro 12 - Biomassa das parcelas utilizadas para validação

6.2.2 Nivelamento das medidas de biomassa

Os valores de biomassa obtidos com os dados de campo foram ajustados para a área do pixel re-amostrado através da equação 14. Para determinar os valores de biomassa dos pixels representantes das parcelas, foi utilizado o método descrito no ponto 6.1.3. O quadro a seguir apresenta o resultado dessa operação.

Parcelas	NDVI				Média Px	Bm Px Médio (Mg)
	Px1	Px2	Px3	Px4		
PS3	1.175	1.099	1.139	1.106	1.123	5.141
PS1	1.135	1.119	1.097	1.080	1.108	6.803
PS2	1.133	1.116	1.111	1.133	1.124	7.694

Quadro 13 - Pixels selecionados para a análise de correlação. PS: Parcela de validação no Serrado; Bm = Biomassa.

A comparação foi implementada com base no desvio encontrado entre as medidas de campo e de laboratório, através da regressão. Foi examinado o desvio total e o desvio percentual (Quadro 14).

Parcelas	Bm medida Px (Mg)	Bm (Mg) Px estimada	Desvio (Mg)	Desvio %
PS3	5.14	4.42	0.72	14
PS1	6.8	3.56	3.24	48
PS2	7.69	4.17	3.52	46
Total	19.63	12.15	7.48	38

Quadro 14 - Comparação dos valores de biomassa obtidos nas parcelas em campo com aqueles obtidos na imagem YPC. PS = parcelas de validação no cerrado; Bm = Biomassa, (Mg) = megagrama; Px = Pixel.

Como se observa no quadro acima, o desvio variou de 14 a 48 % para menos. Isso talvez signifique que o método proposto neste trabalho apresenta valores mais conservadores da quantidade de biomassa presente numa dada vegetação. Este desvio demonstra ainda a necessidade de ampliar o número de parcelas amostradas tanto para calibração do modelo, quanto para validação. Isso porque se tem uma amplitude de desvio de 32% e um total percentual de 38% para a soma das três parcelas inventariadas. Contudo, embora elevado, este resultado é menos prejudicial à quantificação do que aqueles apresentados pelo método tradicional, como será apresentado a seguir.

6.3 MÉTODO PROPOSTO X MÉTODO TRADICIONAL

Para avaliar a influência da metodologia proposta sobre os trabalhos de quantificação da biomassa na vegetação e, conseqüentemente, na determinação da quantidade de carbono,

aplicou-se o método tradicional de medida de biomassa nas áreas adjacentes às parcelas inventariadas.

Para tanto, foram identificadas as parcelas de campo na imagem biomassa e calculada a média de biomassa dos 4 pixels adjacentes, e comparado com os valores obtidos em campo para as parcelas inventariadas no cerrado. O quadro a seguir apresenta esses valores.

Parcelas	Bm medida Px (Mg)	Bm (Mg) Px estimada	Desvio (Mg)	Desvio %
S3	2,76	1,50	-1,26	-45,65
S1	3,09	3,87	-0,77	-24,92
S2	3,15	3,36	-0,2	-6,35
PS3	5,14	4,42	0,71	13,81
PS1	6,80	3,56	3,23	47,50
PS2	7,69	4,17	3,52	45,77

Quadro 15 - Comparação dos valores de biomassa obtidos nas parcelas em campo com aqueles obtidos na imagem biomassa, Bm = Biomassa, (Mg) = megagrama, Px = Pixel; S = Parcela de calibração; PS = Parcela de validação.

Posteriormente, esses valores foram transformados em megagramas de biomassa por metro quadrado ($Mg\ Bm/m^2$) para o modelo tradicional, através da média das parcelas inventariadas. Depois, foram convertidos para o total em m^2 das parcelas e dos pixels correspondentes. E, por fim, foram comparados com a biomassa do pixel medida em campo. Os resultados podem ser observados nos quadros 16 e 17.

Parcelas	(A) Área m^2	(B) Biomassa Medida (Mg)	(C) MT - Bm (Mg) nas parcelas inventariadas
S3	1256	2,17	2,36
S1	1256	2,43	2,36
S2	1256	2,48	2,36
Total	3768	7,08	7,08
PS3	314	1,01	1,28
PS1	314	1,34	1,28
PS2	314	1,51	1,28
Total	942	3,86	3,84

Quadro 16 - Comparação dos valores de biomassa obtidos nas parcelas em campo com aqueles obtidos através da média de biomassa por m^2 na área das parcelas. MT = Método Tradicional . $C = 0,0019 \cdot A$

Parcelas	Bm medida no Px	Método Tradicional - Bm ajustada pela média de Bm das parcelas
S3	2,76	3,00
S1	3,09	3,00
S2	3,15	3,00
Total	9,00	9,00
PS3	5,14	6,54
PS1	6,80	6,54
PS2	7,69	6,54
Total	19,63	19,63

Quadro 17 - Comparação dos valores de biomassa obtidos no pixel com aqueles obtidos através da média de biomassa por m^2 na área dos pixels.

Para o método tradicional o valor médio encontrado foi $0,0019 \text{ Mg Bm}/m^2$. Em seguida foi feito um ajuste linear entre este valor e a área das parcelas em m^2 . Essa relação está exibida no quadro 16.

O quadro 17 representa a comparação entre o ajuste linear do valor médio para a área do pixel (1600 m^2) representante da parcela e o valor encontrado com base nas medidas de campo.

Como esperado, o valor total de biomassa não se altera. Isso ocorre porque a área amostrada (1600 m^2) e o método utilizado na extrapolação da quantidade de biomassa da área da parcela para a área do pixel é igual ao aplicado na determinação da biomassa pelo método tradicional. Porém, o que acontece se aumentarmos a área medida para $6,400 \text{ m}^2$? O quadro 18 abaixo responde essa questão.

Parcelas	MT - Bm/4Px (Mg)	MP - Bm/4Px (Mg)
S3	12,03	6,01
S1	12,03	12,24
S2	12,03	12,34
Total	36,09	30,59
PS3	26,18	12,10
PS1	26,18	20,55
PS2	26,18	47,09
Total	78,54	79,74

Quadro 18 - Comparação dos valores de biomassa obtidos em 4 pixels com aqueles obtidos através da média de biomassa por m^2 na área dos pixels. MT - Método Tradicional

Foram utilizados os 4 pixels adjacentes às parcelas inventariadas para esse experimento. Conforme se observa no Quadro 18, o resultado obtido pelo método tradicional foi uniforme. Isso porque a área das parcelas foi constante (4 pixels de 40X40m); o que não ocorre com o método proposto. Nesse, há uma variação entre os valores recuperados nos quatro pixels da imagem resultante do método proposto.

Para avaliar qual dos dois resultados representa melhor a área de estudo, foi feito o caminho inverso. Efetuou-se o ajuste linear do total de biomassa da área dos quatro pixels utilizados anteriormente pela área das parcelas. Em seguida, calculou-se o desvio existente entre os dois métodos analisados em relação à biomassa medida nas parcelas. O quadro abaixo apresenta o resultado dessa análise.

Parcelas	Área m ²	Biomassa Medida (Mg) ^a	Bm MT (Mg) ^b	Bm MP (Mg) ^c	Desvio MT (Mg) ^d	Desvio MP (Mg) ^e
S3	1256	2,17	7,08	6,01	4,91	3,83
S1	1256	2,43	7,08	6,01	4,65	3,57
S2	1256	2,48	7,08	6,01	4,60	3,53
Total	3768	7,08	21,24	18,02	14,16	10,94
PS3	314	1,01	1,77	1,50	0,76	0,49
PS1	314	1,34	1,77	1,50	0,44	0,17
PS2	314	1,51	1,77	1,50	0,26	-0,01
Total	942	3,85	5,31	4,50	1,46	0,65

Quadro 19 - Comparação entre os desvios do modelo,

- a: Biomassa em tonelada medida com dados de campo;
- b: Biomassa em tonelada ajustada pelo método tradicional;
- c: Biomassa em tonelada ajustada pelo método proposto;
- d: Desvio do modelo tradicional em megagrama (b-a)
- e: Desvio do modelo proposto em megagrama (c-a)

A análise do Quadro 19 demonstra que o método proposto apresentou um desvio total menor que aquele apresentado no método tradicional. Ao diminuir-se o desvio do método proposto pelo desvio do método tradicional, podemos observar que, entre as parcelas utilizadas para calibrar o modelo, há uma vantagem de 3,2 Mg para o primeiro. Se compararmos as parcelas utilizadas para validação, a diferença é de 0,8 Mg a mais para o método tradicional. Ambos os modelos superestimaram o total de biomassa da área da parcela. Contudo, pode-se observar que no método proposto o desvio foi menor do que no método tradicional.

Investigou-se também o desvio médio existente entre os modelos. Nas parcelas de calibração, o desvio médio foi de 4,6 Mg e 3,5 Mg para o método tradicional e o proposto, respectivamente. Já nas parcelas de validação, o desvio médio foi de 0,43 Mg e 0,16 Mg para o método tradicional e o proposto, respectivamente.

O quadro seguinte apresenta uma comparação entre os desvios médios em quilograma por metro quadrado (Kg/m^2) nas parcelas inventariadas, onde se pode observar que o desvio médio do método proposto em Mg/m^2 também foi menor que o do método tradicional.

1 - Desvio X PC MT Kg/m^2	2 - Desvio X PC MP Kg/m^2	3 - Desvio X PV MP Kg/m^2	4 - Desvio PV MP Kg/m^2	5 - Desvio X PC + PV KT Mg/m^2	6 - Desvio X PC + PV MP Kg/m^2
3,758	2,902	1,546	0,7	3,316	2,464

Quadro 20 - Comparação entre os desvios médios dos modelos. PC = parcelas de calibração; PV = Parcelas de validação

Comparados aos parâmetros encontrados na literatura, pode-se verificar que os valores médios alcançados para as vegetações da área de estudo através do método proposto, aproximam-se dos valores de referência global.

Tipo de ecossistema	Mg C ha^{-1}	Referência
Floresta tropical	165	Amthor & Houston (1998)
Floresta temperada	122	Amthor & Houston (1998)
Floresta boreal	24	Amthor & Houston (1998)
Bosque temperado	80	Amthor & Houston (1998)
Chaparral	32	Amthor & Houston (1998)
Cerrado	29	Amthor & Houston (1998)
Pastagem natural temperada	7	Amthor & Houston (1998)
Tundra ártica e alpina	6	Amthor & Houston (1998)
Floresta tropical decídua	42	Resende (2001)
Floresta primária neotropical (Brasil)	160 a 142	Resende (2001)

Quadro 21- Parâmetros globais de medidas de carbono na vegetação. Fonte: adaptado de Martins (2004)

O Quadro 21 apresenta os valores de parâmetros globais de medidas de carbono em diferentes vegetações.

Dentre as vegetações presentes nesse quadro, o Cerrado e a Pastagem Natural Temperada possuem fito-fisionomias que podem ser identificadas na área de estudo, a saber, o Cerrado e o Campo, respectivamente.

Para avaliar os resultados, formulou-se o Quadro 22. Nele, podem-se verificar os valores médios encontrados para as vegetações presentes na área de estudo que possuem correspondentes no Quadro 21.

Vegetação em Rio de Contas	Média Mg C ha ⁻¹ MT	Média Mg C ha ⁻¹ MP	Referência Mg C ha ⁻¹	Parâmetros Internacionais
Cerrado	19	18,7	29	Cerrado
Campo	-	8	7	Pastagem Natural Temperada

Quadro 22 - Comparação entre os valores médios de carbono na vegetação da área de estudo com parâmetros globais de medidas de carbono na vegetação. MT = Método tradicional; MP = Método proposto.

Esse quadro permite avaliar as medidas alcançadas pelos dois métodos. Entretanto a falta de informação específica sobre o Carrasco, a Caatinga e o Campo Rupestre impossibilita aprofundar essa comparação.

Embora não possuam o mesmo nome, fitofisiograficamente, as vegetações pastagem natural temperada e campo são muito parecidas.

Apesar de não ter sido mapeada pelo método tradicional, uma vez que não foi feito inventário nessa vegetação, ela pode ser utilizada para demonstrar o bom resultado da quantificação do carbono pelo método proposto. Nessa tipologia, verifica-se que o valor médio alcançado pelo método proposto está muito próximo dos parâmetros internacionais. De acordo com Amthor; Houston (1998), as medidas globais para esse tipo de vegetação são de 7 Mg ha⁻¹. Neste trabalho, esse valor foi de 8 Mg ha⁻¹. A diferença de 1 Mg junto ao total apresentado para a área, 71.980 Mg, demonstra que o resultado é satisfatório.

Quanto ao Cerrado, observa-se que os resultados obtidos pelos dois métodos foram muito próximos. Comparados ao valor de referência, tiveram 10 Mg ha⁻¹ de diferença para menos.

Embora próximos, esses valores apresentam diferenças significativas. Isso porque as parcelas utilizadas no inventário pelo método tradicional para extrapolação dos valores para o total da área da vegetação, foram plotadas em zonas com baixa concentração de carbono. Se as

parcelas estivessem numa área onde a vegetação fixasse mais carbono, os valores seriam mais elevados.

6.4 GRADIENTE C: RESULTADOS DA QUANTIFICAÇÃO DO *POOL* DE CARBONO NAS TIPOLOGIAS VEGETAIS DA ÁREA DE ESTUDO

Após constatada a validação do modelo proposto para a área de estudo, buscou-se quantificar o *pool* de carbono e estabelecer o Gradiente C para as diferentes tipologias vegetacionais. Para tanto, foi calculada uma nova equação de regressão com base nas 9 parcelas inventariadas, efetuada a transformação da imagem de biomassa para a imagem de carbono e, com base no mapa de uso e ocupação do solo desenvolvido por Cerqueira e Franca-Rocha (2006) em escala 1:100.000, foram desenvolvidos os mapas Gradiente C.

A nova equação de regressão foi desenvolvida com intuito de aumentar a robustez do modelo desenvolvido. Sendo assim, utilizaram-se as parcelas inventariadas para a calibração mais aquelas inventariadas para validação. O quadro abaixo apresenta os valores utilizados nessa regressão.

Parcelas	NDVI				Média Px	Bm Px Médio (Mg)
	Px1	Px2	Px3	Px4		
S3	1.075	1.052	1.085	1.076	1.075	2.768
S1	1.122	1.106	1.131	1.104	1.114	3.098
S2	1.129	1.076	1.116	1.090	1.103	3.155
C2	1.240	1.242	1.368	1.265	1.253	10.005
C1	1.318	1.293	1.328	1.328	1.323	12.362
C3	1.354	1.374	1.389	1.349	1.364	12.991
PS3	1.175	1.099	1.139	1.106	1.123	5.141
PS1	1.135	1.119	1.097	1.080	1.108	6.803
PS2	1.133	1.116	1.111	1.133	1.124	7.694

Quadro 23 - Dados utilizados na composição da equação de regressão para determinação do Gradiente C. S = Parcela de calibração no cerrado; C = Parcela de calibração na Caatinga; PS = Parcelas de validação no cerrado; Px = Pixel; Bm = Biomassa.

A análise de correlação foi implementada no pacote estatístico R, com a aplicação do teste de Fila de Spearman, do Índice Kendall e do Módulo de Pearson. O Quadro 24 apresenta o resultado dessa análise e a Figura 17 apresenta o gráfico de dispersão.

MÉTODO	RESULTADO
Spearman	0.96
Kendall	0.88
Pearson	0.93

Quadro 24 - Resultado da análise de correlação para determinação do Gradiente C

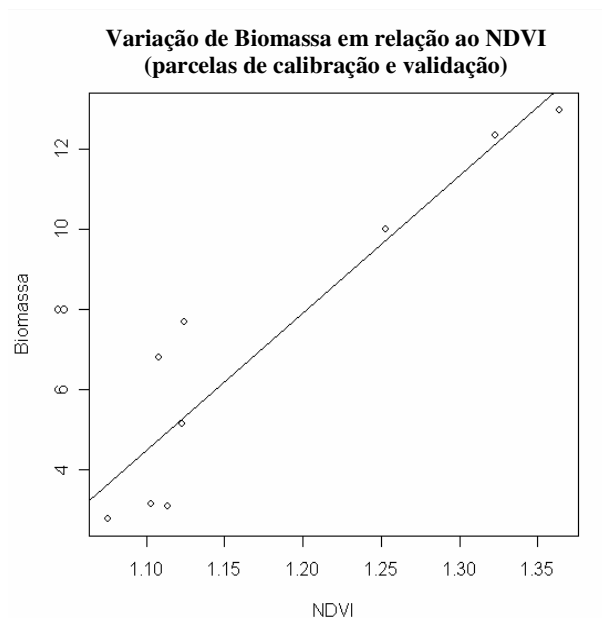


Figura 17 - Gráfico de dispersão resultante da análise de correlação para determinação do Gradiente C.

Também com auxílio do pacote estatístico R, foi encontrada a equação de regressão que determina a biomassa em função do NDVI:

$$ypv=(34.307*x)-33.245 \quad \dots(17)$$

Onde ypv = biomassa e x = NDVI.

A equação de regressão foi aplicada na imagem NDVI usando o *software Envi*, através do módulo *Band Math* (Fig. 18).

Depois de efetuada a regressão, foram extraídos da imagem resultante os valores negativos. Em seguida, a imagem de biomassa positiva foi transformada em imagem de carbono,

através do fator de conversão 0,5, conforme sugere a CQNUMC (2006). A Figura 19 corresponde ao resultado dessa operação.

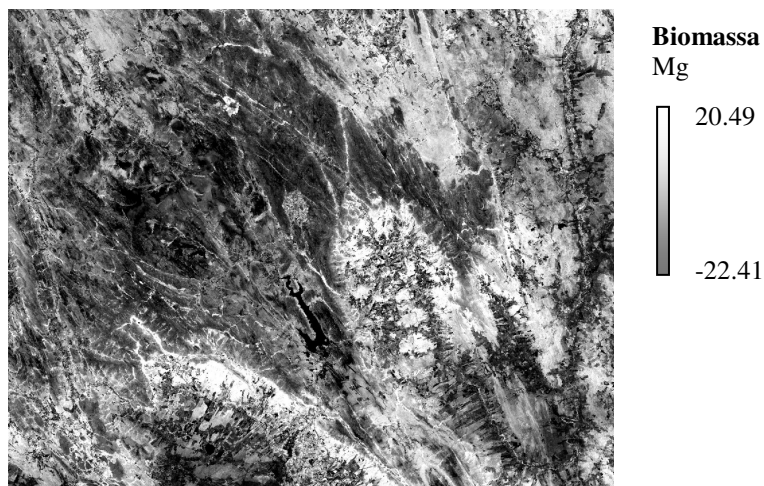


Figura 18 - Imagem resultante da regressão linear para GC

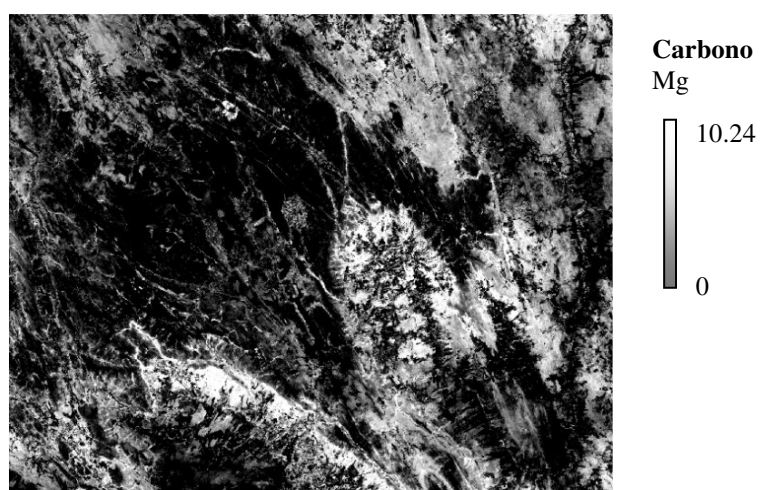


Figura 19 - Imagem GC para a área de estudo.

O mapa de vegetação de Cerqueira e Franca-Rocha (2006) foi elaborado por processamento digital de imagens Landsat, com suporte de trabalhos de campo. Foram testadas duas categorias do método automático, o não supervisionado e o supervisionado. Segundo os autores, o melhor resultado foi alcançado com o método supervisionado. Neste, foi aplicado o classificador Maxver (Máxima Verossimilhança), e as classes foram definidas com base na interpretação visual da imagem, em trabalhos de campo e no mapa de vegetação (SRH, 2004), como segue: Campo Limpo, Cerrado, Carrasco, Campo Rupestre, Caatinga, Solo Exposto, Agropecuária, Vegetação Secundária (Fig. 20).

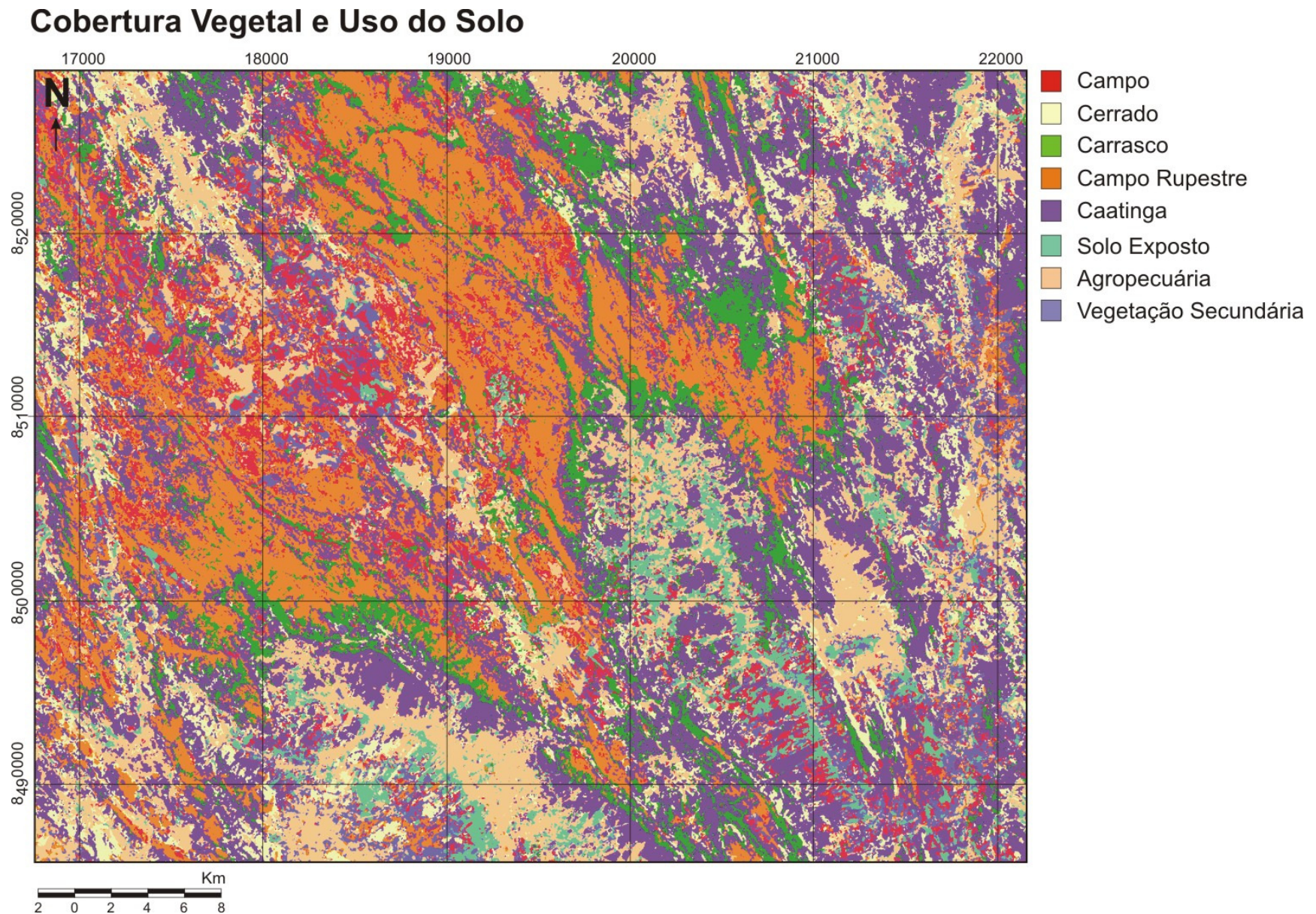


Figura 20 - Mapa de Uso e Cobertura do Solo. Fonte: Cerqueira (2006)

O mapa de vegetação foi subdividido de maneira a separar cada categoria de vegetação transformando-as em uma matriz booleana. Em seguida, a matriz booleana foi utilizada como máscara para separar, no mapa de carbono, as tipologias vegetacionais. Esse procedimento resultou em seis mapas de Gradiente de Carbono (GC). Neles, pode-se observar a variação espacial do carbono dentro de cada categoria de vegetação. Podem-se observar estes resultados nas figuras 19 a 24. Para determinar a quantidade de classes de conteúdo de carbono e o intervalo entre as mesmas, foi aplicada a regra de Sturges para o universo dos pixels que compõem a matriz booleana.

O Quadro 25 sintetiza os teores de carbono para as diferentes vegetações presentes na área de estudo.

Vegetação	Área (ha)	C Total (Mg)	Média C/ha	% do Total
Vegetação Secundária	2.658	13.472	5	0.5
Caatinga	62.581	1.444.953	23	56.2
Carrasco	21.959	545.992	25	21.2
Campo Rupestre	15.326	76.572	5	3.1
Cerrado	22.514	417.640	19	16.2
Campo	8.603	71.980	8	2.8
Total	133.642	2.570.609	19*	100

Quadro 25 - Total de carbono por vegetação na área de estudo

* Média para a área de estudo

Os valores de C total, apresentados no quadro acima, foram obtidos através do somatório dos teores de carbono de todos os pixels que compunham a imagem GC para cada vegetação.

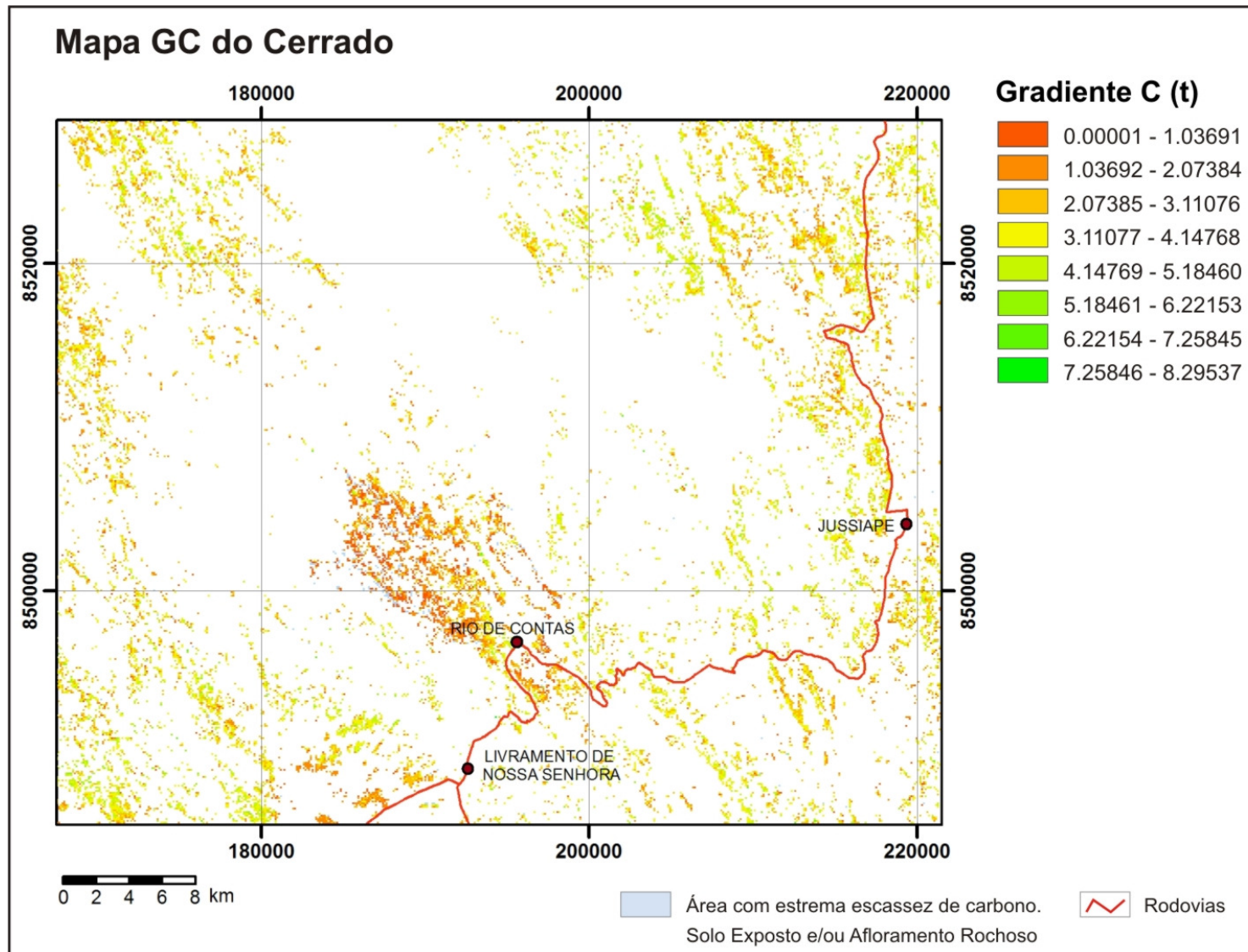


Figura 21 - Mapa do Gradiente C para a vegetação Cerrado

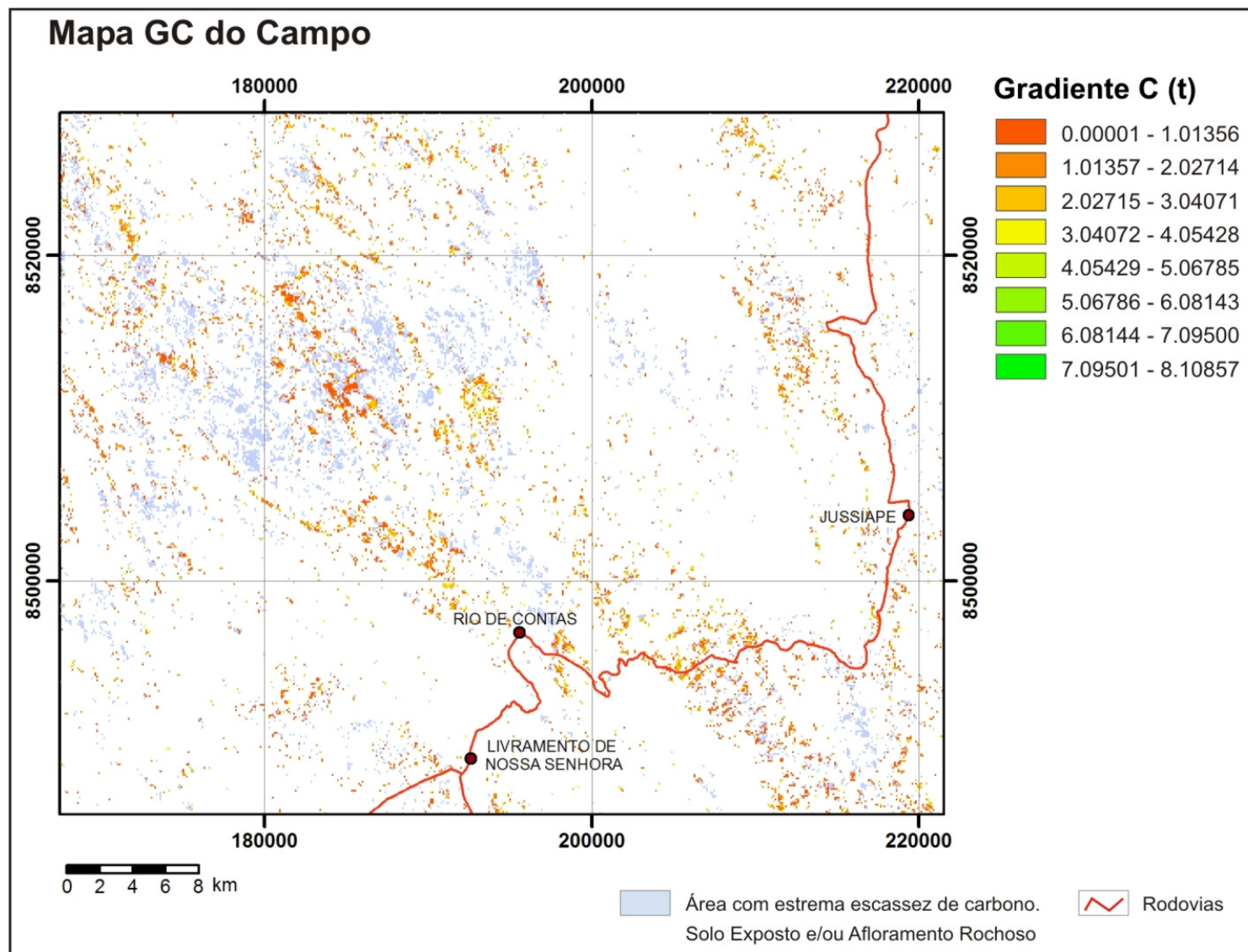


Figura 22 - Mapa do Gradiente C para a vegetação Campo Limpo

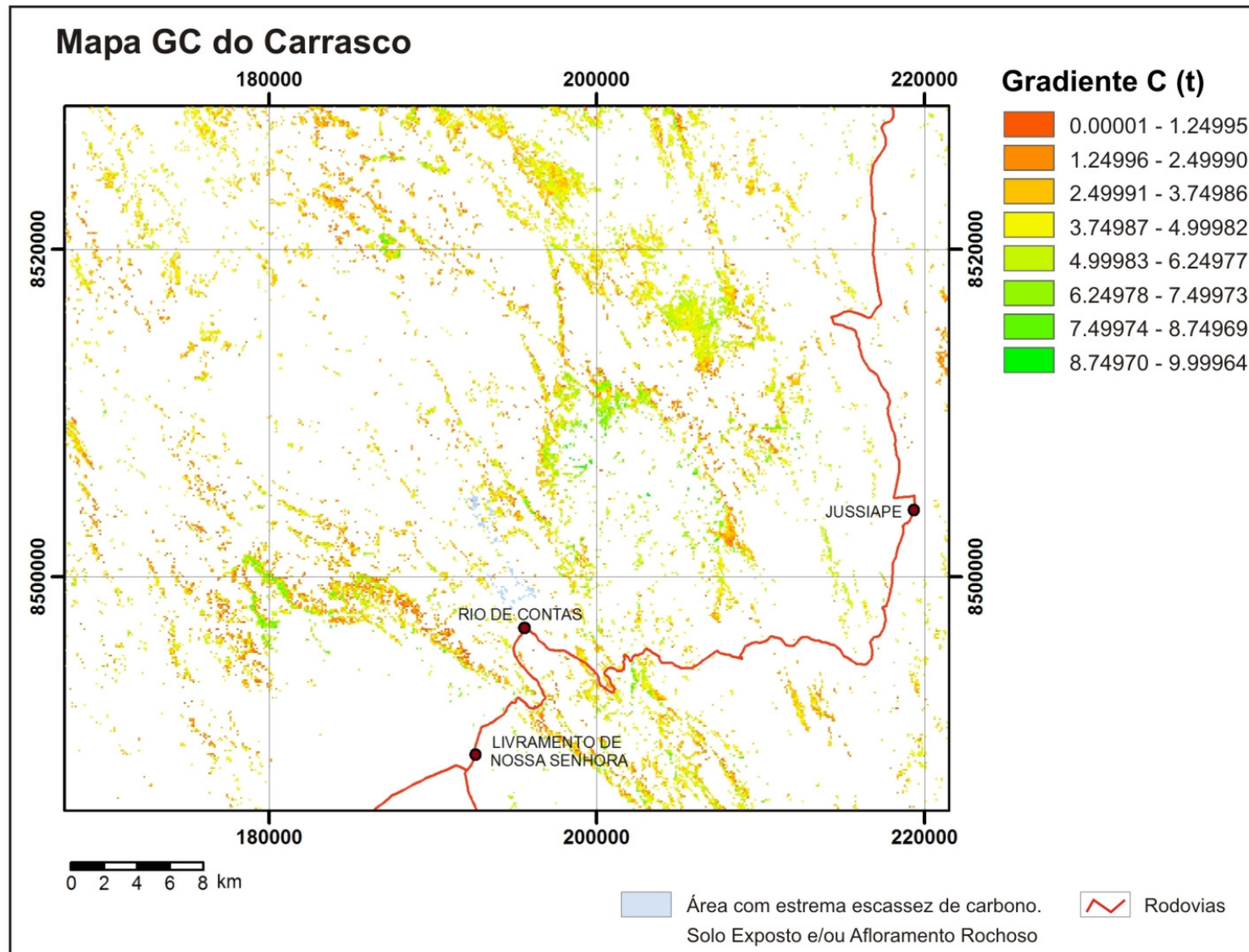


Figura 23 - Mapa do Gradiente C para a vegetação Carrasco

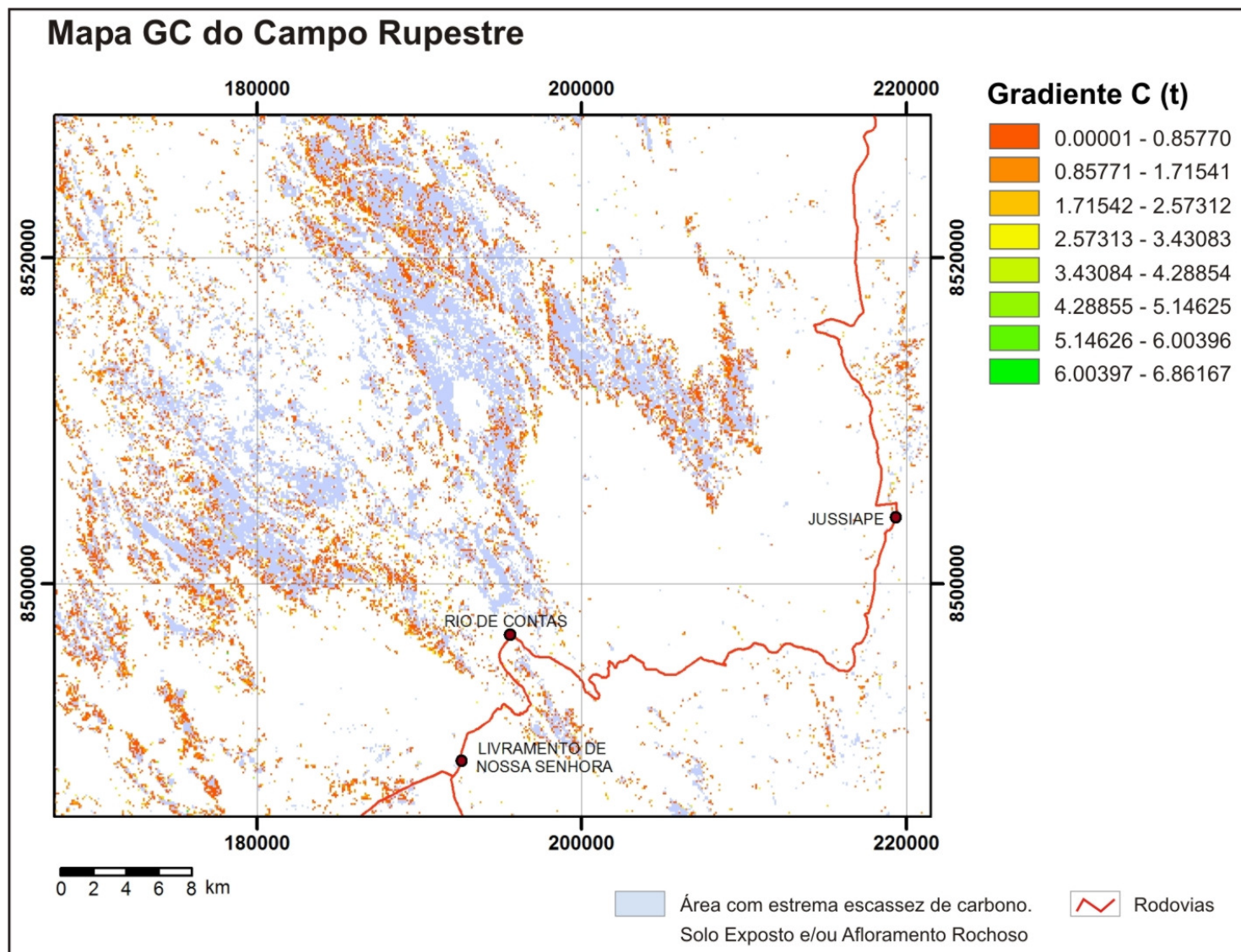


Figura 24 - Mapa do Gradiente C para a vegetação Campo Rupestre

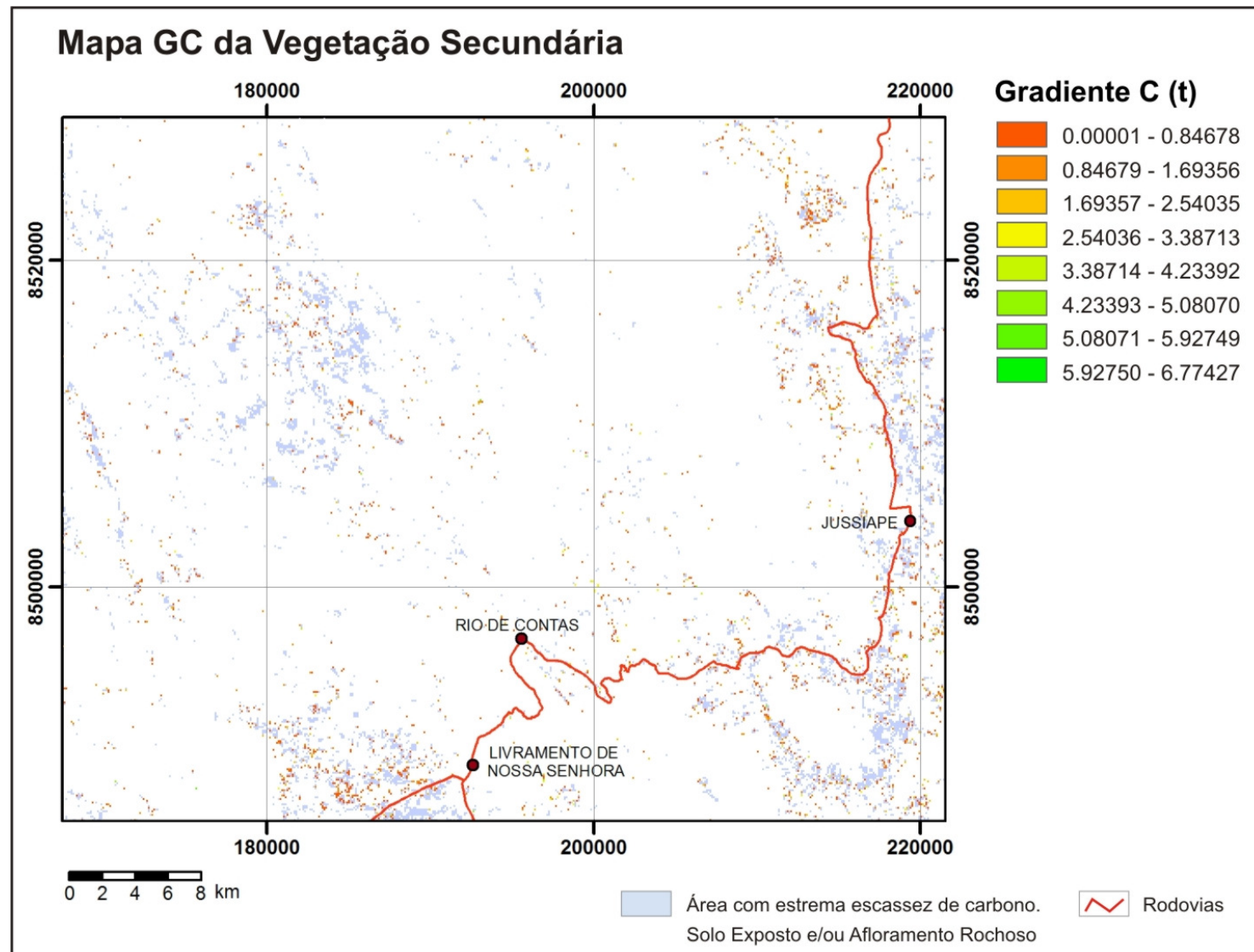


Figura 25 - Mapa do Gradiente C para a Vegetação Secundária

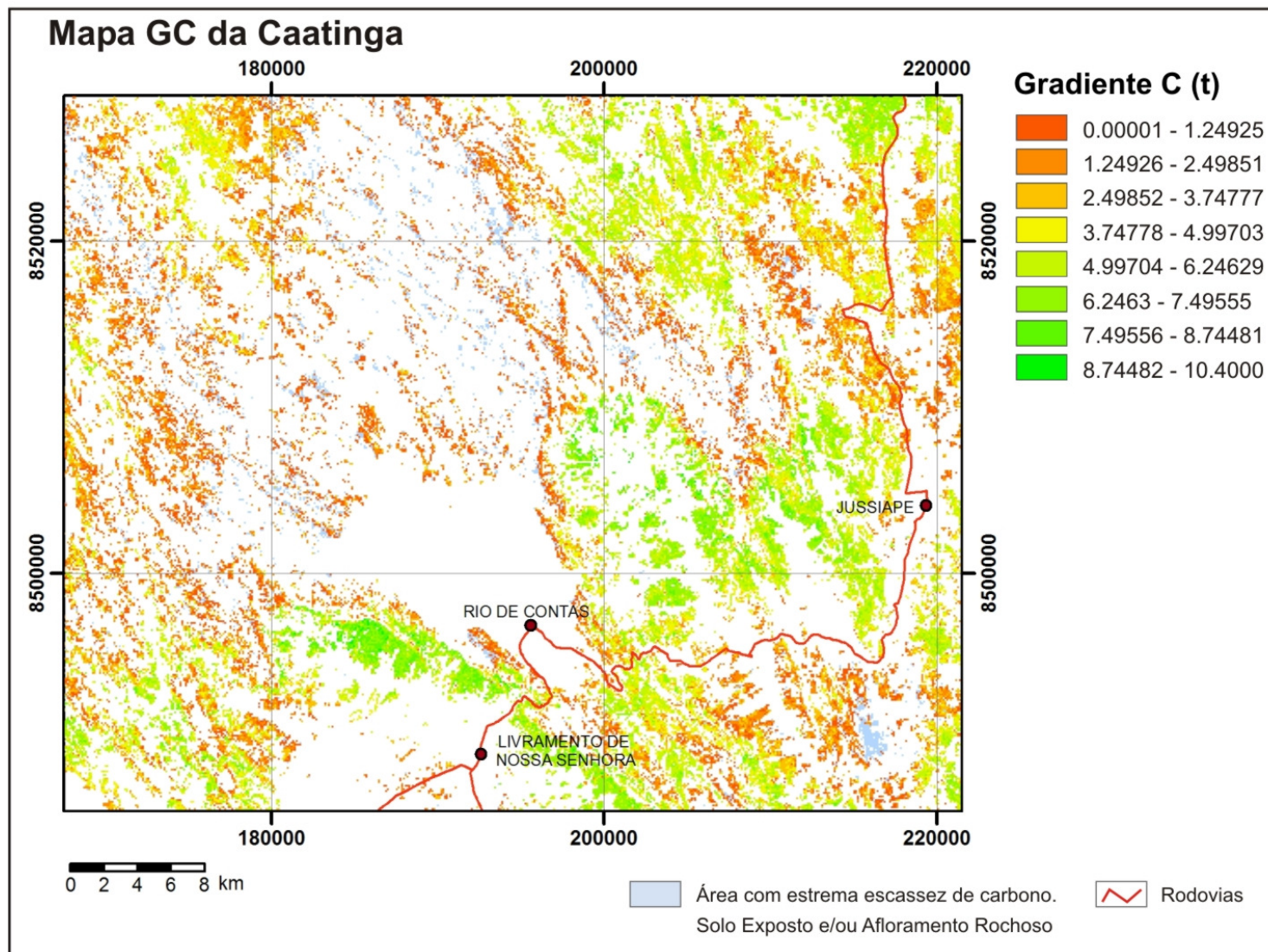


Figura 26 - Mapa do Gradiente C para a vegetação Caatinga

7 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Dentre os resultados alcançados nesta pesquisa, podem-se destacar:

- O modelo proposto para quantificar o teor de carbono na vegetação apresentou um erro médio menor do que aqueles encontrados no modelo tradicional, demonstrando que houve uma diminuição do efeito de discretização, possibilitando aumentar a segurança dos mapeamentos do teor de carbono na vegetação;
- O modelo proposto permitiu a quantificação do *pool* de carbono em vegetações não inventariadas presentes na área de estudo;
- O modelo proposto permitiu estabelecer o Gradiente C para as diferentes vegetações presentes na área de estudo e localizar, dentro de um mesmo extrato de vegetação, as áreas onde ocorrem a maior concentração de carbono.

7.1 DIMINUIÇÃO DO EFEITO DE DISCRETIZAÇÃO E AUMENTO DA SEGURANÇA DOS MAPEAMENTOS DO TEOR DE CARBONO NA VEGETAÇÃO

O método utilizado nesta pesquisa permitiu reduzir significativamente os efeitos de discretização comumente observados em trabalhos de medições de carbono na vegetação.

Isso foi possível porque a metodologia utilizada dimensionou a área de cada vegetação em unidades homogêneas de 1600m² e calculou os teores de carbono para cada uma delas.

Os métodos tradicionais utilizados para a quantificação de carbono consideram a área de vegetação de forma homogênea. Dessa maneira, ao executar a extrapolação dos valores alcançados nas atividades de medições em campo, os resultados da totalização do carbono são os mesmos observados na área de medição, não considerando, portanto, possíveis variações devido aos diferentes componentes.

Em outras palavras, os valores derivados do método tradicional são mais sensíveis a variações locais, conseqüentes da heterogeneidade edafoclimática da paisagem, do que o método proposto. Posto que, a quantidade de carbono a ser fixada varia em função da composição florística e das características populacionais de cada estrato por comunidade vegetacional, a qual é determinada pelo nicho ecológico que compõe a biomassa de um dado ecossistema.

No método proposto, essa variação é considerada no momento em que são compostas as equações de regressão entre os dados obtidos em campo e a imagem índice de vegetação.

7.2 QUANTIFICAÇÃO DO *POOL* DE CARBONO EM VEGETAÇÕES NÃO INVENTARIADAS PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO

Através dos resultados oriundos do Gradiente C, pode-se verificar que o método de quantificação desenvolvido neste trabalho permitiu quantificar o *pool* de carbono mesmo em vegetações que não foram inventariadas. Isso foi possível graças ao uso do NDVI.

A imagem resultante do NDVI expressa valores que, se por um lado reflete a qualidade da vegetação, por outro não considera divisões entre as tipologias vegetacionais. Isso significa que podem ocorrer resultados iguais do NDVI para diferentes tipos de vegetação. Em outras palavras, o valor máximo do NDVI encontrado na caatinga pode ser o mesmo do carrasco.

Aparentemente, isso pode ser um problema, porém, é graças a essa característica que, através da calibração do NDVI com as medidas de carbono em campo, pode-se aferir o teor de carbono em vegetações não inventariadas na área de estudo. A saber, a Caatinga, o Carrasco e o Campo Rupestre.

Quanto à Caatinga e ao Carrasco, foram desenvolvidos trabalhos de medições de carbono através de parceria entre a Universidade Estadual de Feira de Santana e a Petrobras, no Projeto “Seqüestro de Carbono no Semi-Árido” (PETROBRAS, 2004). Os dados desses trabalhos ainda não foram publicados.

Não se encontrou relatos na bibliografia de pesquisas que tenham quantificado o teor de carbono em vegetações como o campo rupestre.

Resgatando o Quadro 23, apresentado no capítulo anterior, é possível verificar a totalização do carbono para todas as tipologias vegetacionais presentes na área de estudo.

Vegetação	Área (ha)	C Total (t)	Média C/ha	% do Total
Vegetação Secundária	2.658	13.472	5	0.5
Caatinga	62.581	1.444.953	23	56.2
Carrasco	21.959	545.992	25	21.2
Campo Rupestre	15.326	76.572	5	3.1
Cerrado	22.514	417.640	19	16.2
Campo	8.603	71.980	8	2.8
Total	133.642	2.570.609	19*	100

Quadro 26 - Total de carbono por vegetação na área de estudo

* Média para a área de estudo

Dessas vegetações, destaca-se a Caatinga e o Carrasco que juntas representam 77,4% do total de carbono da área mapeada.

Esse resultado é significativo, uma vez que ele demonstra que a Caatinga possui uma média de carbono por hectare próxima àquelas alcançadas em Florestas Boreais, que é de 24 Mg C ha⁻¹ (AMTHOR; HOUSTON, 1998). Nesse mesmo sentido, o Carrasco possui média superior com 25 Mg C ha⁻¹.

Por ser uma vegetação com pouca biomassa, o Campo Rupestre tem sido desprezado em trabalhos de quantificação de carbono. Contudo, na área de estudo, essa vegetação representa 3% do total de carbono estocado com 76.572 Mg, sendo ligeiramente superior ao campo, que perfaz 2.8% do total, com 71.980 Mg.

7.3 GRADIENTE C PARA AS DIFERENTES VEGETAÇÕES PRESENTES NA ÁREA DE ESTUDO

O estabelecimento do Gradiente C para as vegetações presentes na área de estudo revela características importantes para os trabalhos de quantificação do carbono na vegetação. Para observar essas características, elaborou-se o Gráfico 2.

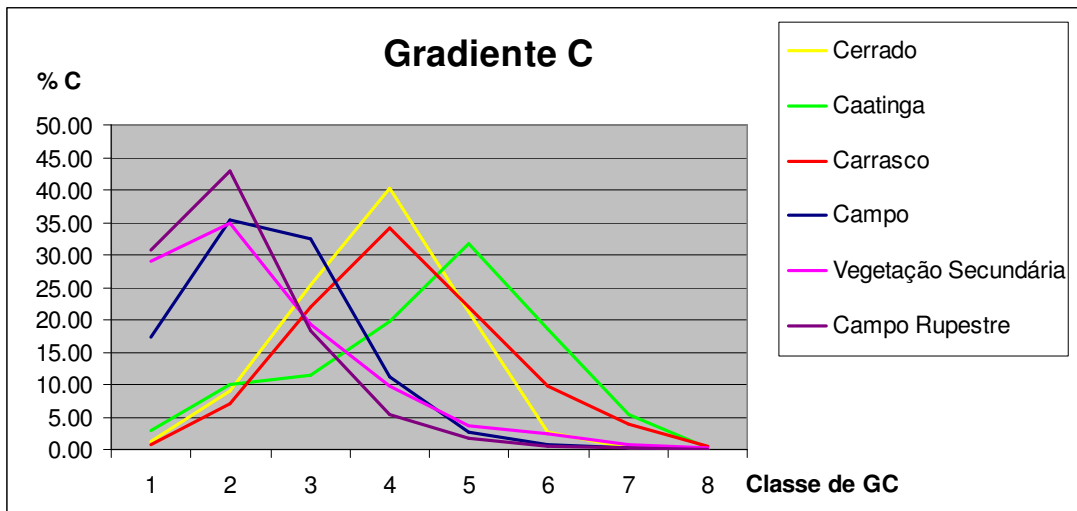


Gráfico 2 - Curvas do Gradiente C para as vegetações da área de estudo

A observação do gráfico possibilita perceber que a curva representativa das vegetações Campo, Campo Rupestre e Vegetação Secundária possuem seus picos centrados na classe 2. Significando que a maior parte da área é composta por baixos valores de concentração de carbono. O Cerrado e o Carrasco possuem seu pico na classe número, 4 com 40% e 34% do C total, respectivamente. Para essas vegetações, os valores de carbono, nessa classe, variam de 3 a 4 MgC para o Cerrado e 3.7 a 4.9 MgC para o Carrasco. Já a Caatinga tem seu pico centrado na classe número 5, com valores de carbono que variam entre 4.9 e 6.2 MgC, representando 33% do total de carbono.

Outra característica que se observa no gráfico é que ele demonstra claramente que as metodologias para quantificação de carbono devem levar em consideração a variação de concentração de carbono dentro de cada vegetação. Isso porque, se as parcelas inventariadas forem plotadas nas extremidades das curvas do Gradiente C, a quantificação do carbono estará seriamente comprometida. Se as parcelas forem plotadas na extremidade esquerda do gráfico a totalização do carbono será subestimada; se plotadas na extremidade direita, a totalização será superestimada.

A representação espacial desse gráfico pode ser observada nas figuras de número 19 a 24, do capítulo anterior. A representação espacial dessas classes permite avaliar quais as áreas que apresentam maiores quantidade de carbono estocado.

O conhecimento dessas áreas tem implicações que vão além dos resultados numéricos apresentados neste trabalho. De posse desta informação, pode-se:

- Planejar estratégias de conservação das vegetações voltadas para a mitigação do CO₂ da atmosfera;
- Ordenar o uso da vegetação, tendo em vista a conservação do carbono na vegetação;
- Estimar valores de compensação para empresas de extração de madeira com base em medidas reais de carbono;
- Calcular o carbono lançado na atmosfera por consequência de queimadas, posto que com técnicas de sensoriamento remoto se pode efetuar um ajuste linear de índices de vegetação de períodos distintos.

Os resultados desta pesquisa podem ainda contribuir para o aperfeiçoamento dos modelos preditivos das taxas de concentração de CO₂ na vegetação e na atmosfera. Isso porque esses modelos sofrem influência direta dos efeitos de discretização, à medida que estão baseados em metodologia de estimativas que desconsideram esse efeito em seus parâmetros.

Além disso, podem contribuir para melhorar os modelos de simulação das mudanças climáticas, uma vez que esses apresentam uma gama de cenários possíveis considerando emissões de CO₂ idealizadas e hipóteses de concentrações. (IPCC/ONU, 2007).

7.4 RECOMENDAÇÕES

- As conclusões aqui obtidas apresentam as primeiras referências de medições de estoque de carbono nas vegetações de Caatinga e Carrasco, devendo ser melhoradas com trabalhos em outras fitofisionomias de Caatinga.
- As técnicas desenvolvidas neste trabalho precisam ser testadas, no que diz respeito a variações sazonais.
- Outra experiência que se faz necessária é a calibração, usando como referência torres de carbono, a fim de se comparar com os resultados aqui apresentados.
- Por fim, seria importante verificar qual o efeito da escala nessas quantificações, procedendo a medições multi-escalares.

REFERÊNCIAS

ACOSTA-MIRELES et al. Estimación de la biomasa aérea con relaciones alométricas. In: **Agrociencia**. v. 36, n. 6, p. 725-736, Nov.-Dic., 2002.

ADUAN, R. E. **Respiração de solos e ciclagem de carbono em cerrado nativo e pastagem no Brasil Central**. 2003. 130 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

AGUILAR, J. G. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. In: **Taller Secuestro de Carbono**. Venezuela, 2001.

AMTHOR, J. S.; HOUSTON, M. **Terrestrial Ecosystem Responses to Global change: a Research Strategy**. ORNL/TM-1998/27. Oak Ridge National Laboratory. 1998.

ANDRADE M.V. et al. Compostos carbonílicos atmosféricos: Fontes, Reatividade, Níveis de Concentração, e Efeitos Toxicológicos. **Quim. Nova**, v.25, p. 1117-1131, 2002.

ANDRAE, F. H. **Ecologia Florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1978.

BALBINOT, R. **Implantação de florestas geradoras de créditos de carbono: estudo de viabilidade no sul do Estado do Paraná, Brasil**. 2004. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

BEGON, M.; HARPER, J.L.; TOWNSEND, C.R. **Ecology: individuals, populations and communities**. 3.ed. Oxford: Blackwell Science, 1996.

BIGARELLA, J. J. et al. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: UFSC, 1994.

BROWN, S.; GASTON, G.; DANIELS, R. **Tropical Africa: Land Use, Biomass, and Carbon Estimates for 1980**. ORNL/CDIAC-92, NDP-055. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. 1996.

BROWN, S.; GILLESPIE, A.J.R.; LUGO, A. **Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data**. *Forest Science*. v.35, p.881-902. 1989.

BRUNCKHORST, D. **Bioregional planning: resource management beyond the new millennium**. Amsterdam: Harwood Academic Publishers, 2000.

CALDER W.A. **An allometric approach to population cycles of mammals.** Journal of Theoretical Biology 100: 275-282. 1983.

CARVALHO JUNIOR, O. A. et al. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise seqüencial da transformação por Fração de Ruído Mínima. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 31-41, 2002.

CASTRI, F. **Ecologia: gênese de uma ciência do homem e da natureza.** Correio da Unesco: Rio de Janeiro, 1994.

CAUSTON, D. R. 1985. Biometrical, structural and physiological relationships among tree parts. In: CANNELL, M. G. R.; JACKSON, J. E. (eds). **Attributes of trees as crop plants.** Inst. Terrestrial Ecology, Huntingdon. pp: 137-159., 1985.

CENTRO DE ESTATÍSTICA E INFORMAÇÕES (Bahia). **Zoneamento de potencialidade do uso das terras:** Bacia superior do Rio de Contas-Bahia. Salvador, 1985.

CERQUEIRA, D. B. ; FRANCA-ROCHA, W. Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio de Contas - Ba. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007.** p. 2413-2419.

_____. **Mapa Geomorfológico do Estado da Bahia.** Salvador, 1980.

CIHLAR, J., et al. **Initiative to quantify terrestrial carbon sources and sinks.** EOS, Transactions of the American Geophysical Union, 83, 1-7. 2002.

COHEN, W. B.; JUSTICE, C. O. **Validating MODIS terrestrial ecology products: linking in situ and satellite measurements.** Remote Sensing of Environment, 70, 1-3. 1999.

CONDEPE. **Base de dados do Estado - Climatologia:** descrição dos tipos. Recife: FISEPE, 2000. Dados impressos.

CORREIA, A. C. P. **Floresta, Ciclo do Carbono e Alterações Climáticas.** Disponível em: <<http://www.naturlink.pt/canais/Artigo.asp>>. Acesso em: 25/03/2007.

COSTA, T. C. C. et al. Phytomass mapping of the “Seridó caatinga” vegetation by the plant area and the normalized difference vegetation indices. **Scientia Agrícola**, n. 59, p. 707-715, 2002.

CQNUMC: Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. **Metodologia de linha de base aprovada de florestamento e reflorestamento:** Recuperação de terras degradadas por meio de florestamento/reflorestamento. AR-AM0002/Versão 1. 2006.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, 1992.

_____. Sensoriamento Remoto Hiperespectral: Aplicações na Geologia. In: CHAVES, J. M.; FRANCA-ROCHA, W. de J. S. (Orgs.). **Geotecnologias: trilhando novos caminhos**. Salvador: SBG, 2006. p. 43-71. (Coleção Hermes Inda).

CURRAN, P. J.; WILLIAMSON, H.D. The accuracy of ground data used in remote-sensing investigations. **Int. J. Remote Sensing**, n. 6, p. 1637-1651, 1985.

DEERING, D.W. et al. Measuring “forage production” of grazing units from Landsat MSS data. In: **Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment**, II, University of Michigan, pp. 1169-1178.

DI CASTRI F. **Mediterranean-type shrublands of the world**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp 1–52. 1981.

EASTMAN, J.R. **Idrisi for Windows – Manual do usuário: introdução e exercícios tutoriais**. Editores da versão em português, Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre, UFRGS Centro de Recursos Idrisi, 1998. 240p.

ECOLATINA. Relatório do IPCC / ONU: novos cenários climáticos. Disponível em <<http://www.ecolatina.com.br>>. Acesso em: 02 fev. 2007.

ELVIDGE, C. D.; CHEN, Z. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 54, n. 1, p. 38-48, 1995.

EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on Sun/sensor geometry and its effect on *f*APAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 3, p. 351-360, 1995.

ESPINOSA-BANCALARI, M. A.; PERRY, D. A. **Distribution and increment of biomass in adjacent young Douglas-fir stands with different early growth rates**. Canadian Journal of Forest Research. 17: 722-730. 1987

FEARNSIDE, P. M.; LEAL FILHO, N.; FERNANDES, F. M. **Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon**. J. of Geophysical Research, 98(D9):16733-16743, 1993.

FENCHEL T. **Intrinsic rate of natural increase: the relationship with body size**. Oecologia 14: 317-326. 1974.

FEYNMAN R. P. **Feynman Lectures on Physics**. Volume 2. Disponível em: <http://socrates.if.usp.br/~everton/download/html/vol02/volume_02.html>. Acesso em 13/10/2007.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM. 269 p. 1992.

FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Mudanças Climáticas - Guia de Informação**. Brasília, 2002.

FOSTER BROWN et al. Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: an example from Rondônia. **Forest Ecology and Management**, 75:175-189, 1995.

FRANCA-ROCHA W. Levantamento da cobertura vegetal e do uso do solo do Bioma Caatinga. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007.

FRANCO, A. L. S.; BASTOS, A. C. S. **Um olhar sobre o programa de saúde da família: a perspectiva ecológica na psicologia do desenvolvimento segundo bronfenbrenner e o modelo da vigilância da saúde**. Psicologia em Estudo, Maringá, v. 7, n. 2, p. 65-72, 2002.

FUNCH, R. **Um guia para o visitante da Chapada Diamantina: o circuito do diamante**. Coleção Apoio, nº 15. Salvador: Empresa Gráfica da Bahia. 1997.

GIULIETTI, A. M et al. Espécies endêmicas da caatinga. In: SAMPAIO, E. et al. (Ed.). **Vegetação & flora da caatinga**. Recife: Associação Plantas do Nordeste, 2000.

GOODIN, D. G.; HENEYRY, G. M. A technique for monitoring ecological disturbance in tallgrass prairie using seasonal NDVI trajectories and a discriminant function mixture model. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 2, p. 270-278, 1997.

GUIMARÃES, J. T. (Org.). **Projeto Ibitiara – Rio de Contas: Estado da Bahia**. Salvador: CPRM, 2005. Escala 1:200.000.

HAEMIG P.D. **Leis da Ecologia Populacional**. Ecologia. Info 23. Disponível em: <http://www.ecologia.info/leis-ecologia-populacional.htm>. Acesso em 15/07/2007

HAGGE, R. C. F. et al. Caracterização do relevo dos municípios de Abaíra e Rio de Contas para o conhecimento da diversidade de ambientes naturais da Chapada Diamantina – Bahia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UERJ, 2003.

HARLEY, R. M & SIMMONS, N. A. **Florula of Mucugê, Chapada Diamantina - Bahia, Brazil**. Royal Botanic Gardens, Kew, 227p. 1986.

HARLEY, R. M. et al. **Flora of the Pico das Almas, Chapada Diamantina, Brazil**. Royal Botanic Gardens, Kew. Pp. 1-42. 1995.

HIGUCHI, N. et al. **Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central**. Floresta, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 295-304, 2004.

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B.; CUNHA, U.S. **Introdução ao manejo e economia de florestas**. Curitiba: UFPR, 1998.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUTCHINSON, G. E. Concluding remarks. **Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology**, v. 22: p. 415-427, 1957.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa de biomas e de vegetação**. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>> Acesso em 19/11/2006

_____. **Mapa de vegetação do Brasil**. IBGE, Rio de Janeiro. 1993.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Geneva, 2007.

_____. **Climate change 2001: the scientific basis**. Cambridge: University Press, 2001a.

_____. **Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: University Press, 2001b.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 261-270, 1992.

KING, D. A. Allometry and life history of tropical trees. **Journal of Tropical Ecology**, n. 12, p. 25-44, 1995.

MACDICKEN, K. G. **A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects**. USA: Winrok International Institute for Agricultural Development, 1997. Forest Carbon Monitoring Program.

MAESTRI, R. **Análise Econômica da Atividade Florestal visando seqüestro de carbono: efeito do clima na produtividade e rentabilidade do empreendimento**. RJ. [2004.?.]. [S.I.].

MARTINS, F.R.; SANTOS, F. A. M. **Técnicas usuais de estimativa de Biodiversidade**. Campinas: UNICAMP, 2000.

MARTINS, O. S. **Determinação do potencial de sequestro de carbono na recuperação de matas ciliares na região de São Carlos – SP**. 2004. 117f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.

METZGER, J. P. **O que é ecologia de paisagens?** Disponível em: <<http://www.biotaneotropica.org.br>>. Acesso em: 24 out. 2007.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global, el niño, manchas solares, vulcões e oscilação decadal do pacífico. **Revista Climanálise**, v. 3, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www6.cptec.inpe.br/revclima/revista/>>. Acesso em: 4 set. 2007.

MOREIRA, R. C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 2000. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

MOURA-COSTA, P. Breve historia da evolução dos mercados de carbono. **Silvicultura**, n. 76, 1998.

NEFTEL, A. et al. Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the last two centuries. **Nature**, v. 315, p.45-47, 1985.

NIKLAS, K. J. Influence of tissue density-specific mechanical properties on the scaling of plant height. **Annals of Botany**, v. 72, p. 173-179, 1994.

_____. The scaling of plant height: a comparison among major plant clades and anatomical grades. **Annals of Botany**, v.72, p. 165-172, 1993.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. et al. **Comparison of the woody flora and soils of six areas of montane semideciduous forest in southern Minas Gerais, Brazil**. *Edinburgh Journal of Botany*, v. 51, n. 3, p. 355-389, 1994.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. RATTER, J. A. **A study of the origin of central Brazilian forests by the analysis of plant species distribution patterns**. *Edinburgh Journal of Botany*, v. 52, n. 2, p. 141-194, 1995.

PETROBRAS. Atividades desenvolvimento tecnológico relacionadas a seqüestro de carbono na Petrobras. In: Segundo simpósio Latino americano sobre fixação de carbono. 2004. Curitiba. **Anais...** Curitiba. 2004. Disponível em: <http://www2.petrobras.com.br/ri/ing/ApresentaçõesEventos/Apresentações/pdf/Castelo_segundo_Simposio_fixacao_carbono.pdf>. Acesso em: 05/09/2006

PIVELLO V.R. **Invasões Biológicas no Cerrado Brasileiro: efeitos da introdução de espécies exóticas sobre a biodiversidade**. *Ecologia Info* 33. 2007

PONZONI, F. J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: **Sensoriamento remoto: refletância dos alvos naturais**. MENEZES, P. R.; NETO, J.S.M (Orgs.). Brasília: UnB; Planaltina: Empresa Cerrados, 2001. p.157-199

PROTIL, C. Z. **Contribuição de quatro espécies arbóreas ao ciclo biogeoquímico em Floresta Atlântica na planície litorânea do Paraná**. 2006. 128 f. Tese (Doutorado) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

REED, C. B.; YANG, L. Seasonal vegetation characteristics of the United States. **Geocarto International**, v. 12, n. 2, p. 65-71, 1997.

REICH, P. B., et al. **An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at the landscape scale and its application in validation of EOS NPP products**. *Remote Sensing of Environment*, 70, 69-81 - 1999.

REIS, A. E. et al. Modelos de razão para estimar a biomassa de árvores individuais da floresta tropical úmida de terra firme da Amazônia brasileira. **Revista Árvore**, Viçosa, v.22, n.2, p.163-177, 1998.

RENNER, R. M. **Seqüestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RESENDE, D.; MERLIN, S.; SANTOS, M. T. **Seqüestro de carbono: uma experiência concreta**. Instituto Ecológica. Palmas. 2001.

REZENDE, A. V. et. al. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume, biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília, DF. **Scientia Florestalis**, n. 71, p. 65-76, 2006. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr71.asp>>. Acesso em: 25/03/2007

RICHARDSON, A. J.; EVERITT, J. H.; GAUSMAN, H. W. Radiometric estimation of biomass and nitrogen content of Alicia Grass. **Remote Sensing of Environment**, v. 13, n. 2, p. 179-184, 1983.

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT**. 2003. 196 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

RODAL, M. J. et al. Composição florística de um trecho de vegetação arbustiva caducifólia, no município de Ibimirim, PERNAMBUCO, Brasil. **Acta Botânica Brasileira**, n. 13, p. 14-29, 1999.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM 3.**, 1973, Washington, D. C. **Proceedings...** Washington, D. C.: NASA, 1973. v. 1. (NASA SP-351).

RUNNING, S.W., et al. **A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data.** Remote Sensing of Environment, 70, 108– 127. 1999.

SAMPAIO, E.V.S.B. et al. **Vegetação e flora da Caatinga.** Associação Plantas do Nordeste e Centro Nordestino de Informação sobre Plantas. Recife-Brasil. 2002

SAN JOSÉ, J J.; BRACHO, R.; NIKONOVA, N. Comparison of water transfer as a component of the energy balance in a cultivated grass (*Brachiaria decumbens* Stopf.) field and a savanna during the wet season of the Orinoco Llanos. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 90, p. 65-79, 1998.

SANTANA, J. A. S.; SOUTO, J. S. Diversidade e estrutura fitossociológica da caatinga na Estação Ecológica do Seridó-RN. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 002, p. 232-242, 2006.

SANTOS, E. O. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da Floresta Amazônica.** 1999. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SCHLEGEL, S.; GAYOSO, J.; GUERRA, J. **Medicion de la capacidad de captura de carbono em bosques de Chile y promocion en el mercado mundial:** Manual de procedimientos para inventários de carbono em ecossistemas forestales. Universidad Austral De Chile. FONDEF. Valdivia, 2001.

SCHNEIDER, P. R. et al. Determinação indireta do estoque de biomassa e carbono em povoamentos de Acácia-Negra (*Acacia Mearnsii de Wild*). **Ciência Florestal**, v. 15, n. 4, p. 391-402, 2005.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Senging:** Models and Methos for Image Processing. 2.ed. London: Academic Press, 1997.

SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; LIMA, C.S.A. **Obtenção de relações quantitativas para estimativa de volume do fuste em floresta estacional semidecídua montana.** Cerne, Lavras, v.1, p.123-134, 1995.

SILVA, A. de B. **Sistema de Informações Geo-referenciadas.** Conceitos e fundamentos. Editora da Unicamp, 1999.

SILVA, J.N.M. **The behaviour of the tropical rain forest of the Brazilian Amazon after logging.** 1989. 335p. Tese (Doutorado) - Oxford University, Oxford, 1989.

SOUSA FILHO et al 2007. **Dados de campo** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <dbcerqueira@yahoo.com.br> em 20 julho de 2007.

SOUZA, A.L.; JESUS, R.M. Equações de volume comercial e fator de forma para espécies de Mata Atlântica ocorrentes na reserva florestal da Companhia Vale do Rio Doce, Linhares, ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v.15, n.3, p.257-273, 1991.

SPOSITO, T. C. S. **Arquitetura e alometria de três espécies de *Cecropia* (Cecropiaceae) da Região Sudeste do Brasil**. 1994. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Campinas, Campinas.

STANNARD, B.L. (Ed). **Flora of the Pico das Almas: Chapada Diamantina, Bahia, Brazil**. Royal Botanic Gardens, Kew, 853p. 1995.

STURGES, H.A. **The choice of a class interval**. Journal of the American Statistical Association, 21. 1926

TABARELLI, et al. **Análise de representatividade das unidades de conservação de uso direto e indireto na caatinga**. Relatório do Projeto Avaliação e Ações Prioritárias para a Conservação da biodiversidade da Caatinga. Petrolina, Brasil. 2000.

TEILLET, P. M.; STAENZ, K.; WILLIAMS, D. J. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on sensing vegetation indices of forested regions. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 1, p. 139-149, 1997.

TER-MIKAELIAN, M. T.; KORZUKHIN M. D. **Biomass equations for sixty-five North American Tree species**. Forest Ecology and Management, 1-24. 1997

TROPMAIR, H. Ecologia da paisagem: uma retrospectiva. In: FÓRUM DE DEBATES ECOLOGIA DA PAISAGEM E PLANEJAMENTO AMBIENTAL, 1., 2000, Rio Claro. **Anais ...** Rio Claro: Sociedade de Ecologia do Brasil, 2000.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE – UNFCCC. **Draft decision – CMP 1: land use, land-use change and forestry**. Disponível em: <<http://unfccc.int>>. Acesso em: 15 nov. 2007.

_____. **Protocolo de Quioto**. 2.ed. Brasília: MCT, 2001.

VAN RENSBURG, B. J., CHOW, S. L., GASTON, K. J. Species richness, environmental correlates, and spatial scale: atest using South African Birds. **The American Naturalist**, v. 159, n. 5, p. 566-577, 2002.

VELLOSO, A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. C (Ed.). **Ecorregiões propostas para o Bioma Caatinga**. Recife: APNE, 2002.

VELOSO, H.P. et al. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Rio de Janeiro. 1991.

VEROUSTRAETE, F., PATYN, J.; MYNENI, R.B. (1996). **Estimating net ecosystem exchange of carbon using the Normalised Difference Vegetation Index and an ecosystem model.** Remote Sensing of Environment, 58, 115-130.

XIMENES, A. C.; RIBEIRO, J. R.; AMARAL, S. Mapas auto-organizáveis e parâmetros geofísicos para a caracterização da heterogeneidade de paisagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007.

YU, M. C. Sequestro florestal do carbono no Brasil – Dimensões políticas socioeconômicas e ecológicas. In: SANQUETA, C. et al. (Ed.) **Fixação de carbono:** atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba: UFPR/Instituto Ecoplan, 2004, p. 1-24.