



**Universidade de Brasília**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DA RECUPERAÇÃO NATURAL DE  
ÁREAS DE CERRADO DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO CLASSE  
II, NO DF, COM USO DO EVI2**

MARCO AURÉLIO LESSA VILLELA

ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO MENESES

Brasília  
2013



**Universidade de Brasília**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DA RECUPERAÇÃO NATURAL DE  
ÁREAS DE CERRADO DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO CLASSE  
II, NO DF, COM USO DO EVI2**

MARCO AURÉLIO LESSA VILLELA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Especialista em Geoprocessamento Ambiental, sob a orientação do Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses.

MARCO AURÉLIO LESSA VILLELA

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DA RECUPERAÇÃO NATURAL DE ÁREAS  
DE CERRADO DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO CLASSE II, NO DF,  
COM USO DO EVI2**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências, da Universidade de Brasília, aprovado pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses  
IG/UnB  
Orientador

---

Profa. Dra. Tati de Almeida  
IG/UnB

---

Prof. Dr. Edson Eyji Sano  
CSR/IBAMA

Brasília, 31 de janeiro de 2013

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Ministério do Meio Ambiente, que por meio de seu Programa de Incentivo à Pós-Graduação, capitaneado pela Divisão de Capacitação, Treinamento e Desenvolvimento - DICAD, fomentou e subsidiou minha participação no curso.

Ainda no MMA, agradeço ao meu gerente, Allan Milhomens, que apoiou minha participação no curso e autorizou meu horário especial, e ao Rodrigo Sabença, também meu chefe, que sempre apoiou minha participação e cuidou para eu pudesse me dedicar ao curso, sem receio de ficar em falta com a equipe. O agradecimento se estende a toda a equipe do Departamento de Desenvolvimento Rural Sustentável, que me sustentou firme nesse ano.

Ao professor Paulo Meneses, por todo o suporte que ofereceu ao longo do curso, como professor e coordenador, por assumir a orientação deste trabalho às vésperas do prazo para sua conclusão, e pelo que também nos proporcionou além do curso – como as confraternizações da turma em sua casa.

Ao professor Gustavo Baptista, por ter dado o empurrão sem o qual este trabalho dificilmente teria sido realizado – sugestão de tema e procedimentos, além de leituras e empréstimo de livro.

À professora Tati, à Aline e ao Beto, cujas orientações, ainda que rápidas, foram indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

Ao Leandro, que me recebeu em sua casa para trabalharmos juntos e até me emprestou seu laptop, de surpresa, em uma madrugada decisiva na qual a Lei de Murphy atuou.

À Eluzai, por todo o auxílio que nos ofereceu com carinho e muita paciência ao longo do ano. Ao Serjão, por todo o suporte, especialmente nos momentos de descontração.

À Olga, pela força nesse ano tão duro. É só o Amor.

Aos meus pais, irmão, avós, tios, primos e amigos, por serem tão fundamentais, pelo incentivo e por compreenderem minha presença um pouco mais ausente no ano que passou.

Ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial, do Instituto de Geociências da UnB, onde passei dias e noites.

Ao INPE, pela disponibilização gratuita e fácil das imagens Landsat empregadas neste trabalho.

Agradeço a todos que me ajudaram direta ou indiretamente no decorrer do curso e na realização desse trabalho.

# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>PRÓLOGO.....</b>   | <b>IX</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 APRESENTAÇÃO.....   | 1         |
| 1.2 OBJETIVOS .....   | 3         |
| 1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....  | 3         |
| <b>2 ÁREA DE ESTUDO.....</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1 GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E SOLOS.....                                      | 9         |
| 2.2 CLIMA E VEGETAÇÃO .....   | 10        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>   | <b>11</b> |
| 3.1 SOLOS E RECUPERAÇÃO DA VEGETAÇÃO.....                                     | 11        |
| 3.2 SENSORIAMENTO REMOTO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SATÉLITE ..... | 13        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>19</b> |
| 4.1 OBTENÇÃO DAS IMAGENS E PRÉ-PROCESSAMENTO .....                            | 19        |
| 4.2 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....                  | 21        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>26</b> |
| <b>6 CONCLUSÃO.....</b>   | <b>40</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>42</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1. LOCAIS OBJETO DO PRESENTE ESTUDO, EM IMAGEM GEOEYE (MAPLINK/TELE ATLAS) DE 2012 .....  | 4  |
| FIGURA 2. IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DE ESTUDO, SOBRE RESULTADO DO EVI2 GERADO COM AS BANDAS 3 E 4 DA IMAGEM LANDSAT TM DE 25/08/2011. ....                | 5  |
| FIGURA 3. QUANTIDADE REM QUE CHEGA À TERRA .....   | 13 |
| FIGURA 4. ESQUEMA ILUSTRATIVO DAS INTERAÇÕES SOFRIDAS PELA IRRADIÂNCIA SOLAR, DESDE A ENTRADA NA ATMOSFERA ATÉ A MEDIÇÃO REALIZADA PELO SENSOR .....     | 14 |
| FIGURA 5. IMAGEM DIGITAL (A) COM ÁREA EM ZOOM DE GRUPO DE PIXELS EM VALORES CINZA (B) E CORRESPONDENTES VALORES DIGITAIS (C).....                        | 15 |
| FIGURA 6. BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM DOS SATÉLITES LANDSAT, E ESPECTROS DE REFLECTÂNCIA DE MATERIAIS.....  | 17 |
| FIGURA 7. DIFERENÇA ENTRE O DESENHO DO VETOR NO ArcMAP E A ÁREA EXTRAÍDA PELO ENVI.....  | 21 |
| FIGURA 8. COMPOSIÇÃO COLORIDA 3(R) G(2) B(1) DAS IMAGEM LANDSAT TM 5 DE 2011 E 1993, COM O VETOR ANTES DA CORREÇÃO E APÓS A CORREÇÃO.....                | 22 |
| FIGURA 9. HISTOGRAMA DO RESULTADO DO EVI2 PARA O RECORTE DA IMAGEM LANDSAT 5 TM DE 2011.....   | 24 |
| FIGURA 10. DEFINIÇÃO DAS CLASSES PARA O DENSITY SLICE E O RESULTADO DE SUA APLICAÇÃO À SUBTRAÇÃO ENTRE O EVI2 DE 1993 E DE 1985, NOS LOCAIS 5 E 15 ..... | 25 |
| FIGURA 11. VARIAÇÃO DO EVI2 NO LOCAL 1, NOS PERÍODOS DE ESTUDO .....   | 26 |
| FIGURA 12. VARIAÇÃO DO EVI2 NO LOCAL 2, NOS PERÍODOS DE ESTUDO .....   | 28 |
| FIGURA 13. VARIAÇÃO DO EVI2 NO LOCAL 3, NOS PERÍODOS DE ESTUDO .....   | 30 |
| FIGURA 14. VARIAÇÃO DO EVI2 NO LOCAL 4, NOS PERÍODOS DE ESTUDO .....   | 31 |
| FIGURA 15. VARIAÇÃO DO EVI2 NOS LOCAIS 5 E 15, NOS PERÍODOS DE ESTUDO.....   | 33 |
| FIGURA 16. VARIAÇÃO DO EVI2 NO LOCAL 8, NOS PERÍODOS DE ESTUDO .....   | 35 |
| FIGURA 17. VARIAÇÃO DO EVI2 NO LOCAL 11, NOS PERÍODOS DE ESTUDO .....  | 36 |
| FIGURA 18. VARIAÇÃO DO EVI2 NO LOCAL 14, NOS PERÍODOS DE ESTUDO .....  | 38 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1. CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS DE ESTUDO.....                    | 8  |
| TABELA 2. LOCAL 1: VALORES DO EVI2 NOS ANOS DE 1985 E 2011.....       | 27 |
| TABELA 3. LOCAL 2: VALORES DO EVI2 NOS ANOS DE 1985 E 2011.....       | 28 |
| TABELA 4. LOCAL 3: VALORES DO EVI2 NOS ANOS DE 1985 E 2011.....       | 30 |
| TABELA 5. LOCAL 4: VALORES DO EVI2 NOS ANOS DE 1985 E 2011.....       | 31 |
| TABELA 6. LOCAIS 5 E 15: VALORES DO EVI2 NOS ANOS DE 1985 E 2011..... | 33 |
| TABELA 7. LOCAL 8: VALORES DO EVI2 NOS ANOS DE 1985 E 2011.....       | 35 |
| TABELA 8. LOCAL 11: VALORES DO EVI2 NOS ANOS DE 1985 E 2011.....      | 36 |
| TABELA 9. LOCAL 14: VALORES DO EVI2 NOS ANOS DE 1985 E 2011.....      | 38 |

VILLELA, Marco Aurélio Lessa. Análise multitemporal da recuperação de áreas de Cerrado degradadas pela mineração classe II, no DF, com uso do EVI2. Brasília, 2012. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Geoprocessamento Ambiental) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

## RESUMO

Por meio de série temporal de imagens Landsat TM, dos meses de agosto de 1985, 1993, 2004 e 2011, analisou-se a recuperação natural de oito áreas degradadas pela mineração classe II para aterro e leito de estradas, no Distrito Federal (DF). Após breve contextualização sobre a mineração no DF, o Cerrado e Sensoriamento Remoto, foram apresentadas as áreas objeto do presente estudo, situadas na porção centro-oeste do Distrito Federal. Na sequência, realizou-se breve revisão bibliográfica relativa à Pedologia, à recuperação de áreas degradadas no bioma Cerrado, ao Sensoriamento Remoto e ao processamento digital de imagens de satélite. Foi apresentada a metodologia de trabalho, passando pela obtenção das imagens Landsat TM, pré-processamento das imagens, geração do índice de vegetação EVI2 e subtração das bandas para detectar as mudanças. Os resultados foram então analisados e algumas conclusões foram tiradas. O sensoriamento remoto e o processamento digital das imagens de satélite permitiram analisar espacialmente a recuperação nas oito áreas, distinguindo os locais onde ocorreu e quantificando essa recuperação. Considerando o elevado potencial de regeneração do Cerrado, que após ser desmatado, leva cerca de 30 anos para atingir sua biomassa original, passados mais de 30 anos a recuperação observada das áreas de empréstimo/cascalheiras abandonadas foi tênue. Em todas as áreas houve remoção mais ou menos profunda do solo, expondo o regolito e removendo também as raízes da vegetação originária, o que impediu sua rebrota. O tempo para a recuperação das áreas em que houve remoção do solo passa a ser o tempo do processo de pedogênese, que deve ser facilitado por meio de medidas mínimas tais como o disciplinamento das águas pluviais, e que ainda assim pode levar muitas décadas até produzir as condições mínimas para recolonização por espécies do Cerrado.

Palavras chave: Cerrado; recuperação de áreas degradadas; mineração; Distrito Federal; EVI2.

## ABSTRACT

By means of Landsat TM satellite images from August of the years 1985, 1993, 2004 and 2011, the natural restoration of eight areas degraded by mining in the Federal District (DF) was studied. After a short context on mining in the DF, the Cerrado biome and Remote Sensing, the areas, located at the Center-West of the DF, are introduced. After that is presented a brief literature review on soils, land restoration in Cerrado biome, Remote Sensing and processing of digital images. The methodology adopted for this study is then presented, from the obtainance of the Landsat TM images, through the pre-processing of the images, the use of the EVI2 vegetation index and the band subtraction for change detection. Closing the work, the results are analyzed and some conclusions are deduced. Remote sensing and digital image processing allowed spatial analysis of the restoration in the eight areas, distinguishing the places where it happened and quantifying it. Despite of Cerrado high restoration potential – after deforestation it takes about 30 years of natural restoration to achieve its original biomass – it has been already more than 30 years and the restoration of the mining areas was insubstantial. All areas had its soil removed to varying depths, exposing the regolith and removing also the roots of the original plants, preventing its regrowth. The time necessary for the restoration of the areas is consequently not defined by the vegetation, but by the decades necessary for the pedogenesis to develop soil with minimum conditions for recolonization by Cerrado species.

Key words: Cerrado; restoration of degraded areas; mining; Federal District; EVI2.

## PRÓLOGO

Optei por incluir a presente seção neste TCC, pois ter cursado a Especialização em Geoprocessamento Ambiental, pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, remete a uma inquietação e a um desejo expressos em meu TCC do curso de Geografia, pela Universidade de São Paulo, em 2010. Naquele momento, identifiquei a falta que fazia o domínio do Geoprocessamento para minha atuação profissional, e ressaltei que era um problema a ser resolvido em nossa formação como geógrafos. Foi nesse intuito que busquei me especializar/iniciar no campo do Geoprocessamento Ambiental. Transcrevo a seguir o trecho em questão, de meu TCC (VILLELA, 2010, p. 73-74):

Outra limitação, essa mais séria, pois se trata de competência que se espera ser desenvolvida nos geógrafos, é o trabalho com mapas. Tendo cursado a disciplina optativa Hidrografia, além das obrigatórias nas quais aprendemos Cartografia, consigo ler/interpretar cartas razoavelmente, assim como, de forma muito limitada, produzir algo analógico.

Diante do potencial que vi existir para o emprego da ferramenta geoprocessamento ao planejamento socioambiental, a serviço da *res publica*, não me parece justificável o preconceito que ainda existe em relação a ela [na Geografia-USP] – cada vez menor, é verdade. Afinal, para estudar o espaço e sua organização, ajuda ser capaz de entender, organizar, analisar e produzir informações espaciais.

Além dos casos em que é indispensável, em outros permitiria partir para vãos mais altos – um mapa condensa informações, articula/correlaciona, diferencia, apresenta de forma mais palpável e convincente do que faria o texto “desacompanhado”.

A surpresa com nosso desconhecimento de tais técnicas é a regra – quando chamaram estagiário em Geografia, esperavam que, além de ter uma formação ampla/generalista e crítica, também soubesse trabalhar com informações espaciais. Caso fôssemos capazes de fazê-lo, percebo que teríamos grande potencial para coordenar trabalhos na área ambiental, pois ao estudar também algo de, p.ex., História, Economia, Política, Filosofia e rural-urbano, conseguimos avaliar interesses em jogo e conseqüências de ações/omissões, para além do assunto em questão.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

Desde antes da instalação de Brasília, foram apontados os perigos que a atividade de mineração trazia à região, o que resultou inclusive em sua proibição, na década de 1960 – o que não impediu que ocorresse de forma ilegal (CORRÊA et al., 2004, p. 9). A mineração classe II, definida pelo art. 7º do Decreto nº 62.934, de 2 de julho de 1968 [que aprova o Regulamento do Código de Mineração ] como “jazidas de substâncias minerais de emprego imediato na construção civil”, é o tipo predominante no Distrito Federal (DF), onde se caracteriza “pelo baixo investimento, pela atividade praticada em pequenas extensões e pela ausência de aporte tecnológico nas fases de produção, controle ambiental e recuperação da lavra” (ibid., p. 13). Conforme se difundiu a consciência dos danos ambientais causados por essa atividade, regulamentações surgiram para determinar sua minimização – a exemplo do §2º do art. 225 da Constituição Federal de 1988: “Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei”.

Contudo, até a década de 2000 essa determinação não era colocada em prática no DF e, nos raros casos em que foi desenvolvido algum trabalho de revegetação das áreas degradadas, em geral eles não levaram ao resultado esperado (CORRÊA et al., 2004, p. 11).

Em novembro de 2002, havia no DF 234 locais degradados pela mineração e não recuperados, somando 3.419 ha, 0,6% da área distrital – 80% dessa extensão são lavras em Cambissolos e Latossolos (ibid., p. 14). Exemplos dessa consequência são as oito áreas objetos deste estudo, como a caixa de empréstimo de 34 hectares existente desde a década de 1950 no Lago Sul, cujo latossolo foi empregado na barragem do Paranoá; e a caixa de empréstimo vizinha ao Lago de Santa Maria, no Parque Nacional de Brasília, cujo latossolo foi usado em 1969 para a construção da represa que forma o referido lago (ibid. p. 19).

O DF situa-se na porção central do Cerrado e o fato de apenas recentemente ter sido reconhecida a relevância desse bioma, que é segundo maior do país, ajuda a entender o descaso com as áreas degradadas pelas lavras. Esse descaso faz parte de um contexto mais amplo, que envolve a expansão da agropecuária, da urbanização e da mineração na região Centro-Oeste, resultando no quadro atual, em que já foi eliminada entre 40 e 70% da cobertura nativa desse bioma, que se estendia por ¼ do território brasileiro (CORRÊA; MELO FILHO, 2007, p. 1099).

De acordo com Durigan (2005, p. 104), a vasta extensão das áreas já devastadas leva à situação semelhante à do bioma Mata Atlântica, em que apenas a política de criação de Unidades de Conservação da Natureza seria insuficiente para garantir uma matriz da paisagem que permita a manutenção e mesmo a recuperação da biodiversidade – faz-se necessário aplicar também as determinações legais tais como a da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que obriga a recuperação das áreas de preservação permanente e de reserva legal dos imóveis rurais. Contudo, a pesquisa científica voltada à recuperação da cobertura vegetal em Cerrado ainda é insuficiente (ibid., p. 104).

Antes do sensoriamento com o uso de imagens de satélite, a principal fonte de informação para acompanhar as dinâmicas da vegetação e as mudanças no uso do solo, era o mapeamento baseado em pesquisa de campo. Além de demandar imenso trabalho e tempo, os resultados desses trabalhos frequentemente divergiam ou eram realizados com métodos diferentes, o que dificultava a obtenção de um “instantâneo” satisfatório para grandes áreas e mesmo para a Terra como um todo – obstáculo que era ainda maior para conseguir obter uma série temporal e analisar as mudanças.

Surgiu então o Sensoriamento Remoto por meio de satélites, no contexto da Corrida Espacial da década de 1960. A princípio, foram tomadas fotografias com filmes, porém devido à impossibilidade de substituir os filmes no espaço, fez-se necessário empregar formato digital para armazenar e transmitir os dados coletados, tendo sido desenvolvidos equipamentos eletrônicos especialmente para isso (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 2).

Com os satélites orbitais, tornou-se possível imagear repetitiva e sistematicamente, em pouco tempo, toda a superfície do planeta, facilitando a detecção e monitoramento das mudanças que acontecem na superfície terrestre. Um marco foi o lançamento, pelos EUA, do Earth Resource Satellite 1, posteriormente renomeado Landsat 1, dando início à famosa série de satélites, que atualmente encontra-se no número 7. Esse primeiro satélite trouxe uma grande inovação, por possuir bandas espectrais na faixa do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho termal – o não era possível obter com aerofotografias (ibid., p. 3).

A capacidade dos imageadores obterem imagens em diferentes comprimentos de onda ampliou sua utilização para além das aplicações temáticas das ciências da Terra. E o formato digital trouxe o computador como um meio rápido para visualizar as imagens e processá-las para uma análise qualitativa e quantitativa, pelos fotointérpretes. Surgiu uma nova tecnologia para análise de dados, que é o Processamento Digital de Imagens (ibid., p. 35)

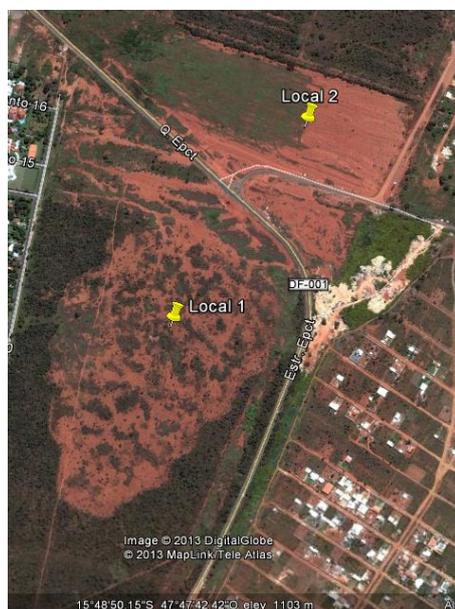
O satélite Landsat 5 (sensor TM – Thematic Mapper), cujas imagens foram empregadas neste trabalho, iniciou sua atividade em 1984 e continua gerando imagens da Terra até hoje, com o sensor Thematic Mapper – TM.

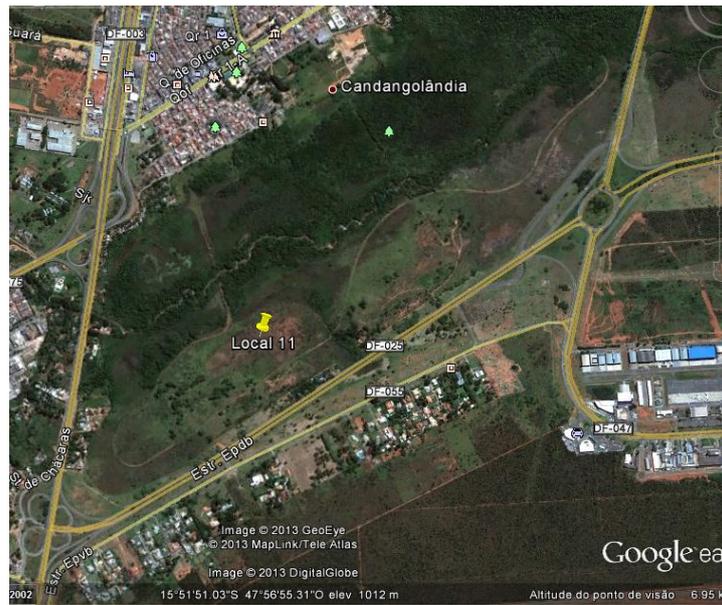
## 1.2 Objetivos

O objetivo deste estudo é analisar a recuperação natural, de 1985 a 2011, de oito áreas degradadas pela mineração classe II para aterro e leito de estradas, no Distrito Federal.

## 1.3 Localização da Área

As oito áreas objeto do presente estudo situam-se na porção centro-oeste do Distrito Federal (Figuras 1 e 2).





**Figura 1.** Locais objeto do presente estudo, em imagem GeoEye (MapLink/Tele Atlas) de 2012

**Figura 2.** Identificação dos locais de estudo, sobre resultado do EVI2 gerado com as bandas 3 e 4 da imagem Landsat TM de 25/08/2011.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

As oito áreas objeto deste trabalho foram selecionadas por já terem sido objeto do estudo de Corrêa e Melo Filho (2004; 2007), que analisaram a florística de 15 locais degradados por atividades de extração mineral no DF. Os oito locais representam nove dos locais individualizados por Corrêa e Melo Filho (2004, p. 125-126). A intenção era trabalhar com os 15 locais, porém ao iniciar o estudo, a realidade encontrada foi a seguinte (Tabela 1):

Local 1 - Foi localizada a área de mineração abandonada no ponto exato das coordenadas fornecidas para o local, porém com extensão superior ao apontado no estudo empregado como referência – 29,9 ha, em vez de 20 ha. A área foi expandida/trabalhada após 1985, portanto é possível que tais estudos tenham se limitado à porção norte dessa área que, constatou-se neste estudo, estava encerrada em 1985. Esse local é contíguo ao Local 2.

Local 2 – Foi localizada a área de mineração abandonada no ponto exato das coordenadas fornecidas para o local, trata-se de área de empréstimo a partir da qual foi retirado material para a barragem do Lago Paranoá. Houve mudanças no uso do solo, com a expansão da urbanização e o uso de parte do Local 2 para depósito de material de entulho, que levaram à decisão de restringir a área de estudo apenas àquela que não passou por tais alterações antrópicas, de modo a não prejudicar o resultado da análise da recuperação natural das áreas degradadas. Com isso, a extensão do Local 2 (28,8 ha) também ficou inferior à que é apresentada por Corrêa e Melo Filho (2004, p. 125-126) para o Local 2 (35 ha).

Local 3 - Foi localizada a área de mineração abandonada no ponto exato das coordenadas fornecidas para o local, com a extensão indicada nos estudos empregados como referência – 2,2 ha. Trata-se de área vizinha aos Locais 5, 15 e 8, todos no Parque Nacional de Brasília e bastante próximos à barragem do Lago de Santa Maria, onde seu material foi usado.

Local 4 – Foi encontrada área de mineração abandonada no ponto exato das coordenadas fornecidas para o local, vizinha à rodovia DF-150, em Sobradinho, porém com extensão inferior à metade do apontado no estudo empregado como referência – 1,62 ha, em vez de 5 ha.

Local 5 – Foi localizada a área de mineração abandonada no ponto exato das coordenadas fornecidas para o local. O polígono desenhado para este estudo reuniu os Locais 5 e 15, pois são contíguos e a evolução de sua recuperação foi similar. O polígono ficou com extensão de 22,9 ha – bastante inferior ao que Corrêa e Melo Filho apresentariam como soma para ambos (41 ha, sendo 16 ha no Local 5 e 25 ha no Local 15).

Local 6 – Foi localizada uma área de mineração abandonada no ponto exato das coordenadas fornecidas para o local. Contudo, observando as imagens percebeu-se que **trata-se de área de extração recente**, o que foi confirmado por meio da série temporal do Google Earth. Há diversas pequenas áreas de solo exposto que podem ter sido usadas para retirada de cascalho, então não é possível identificar qual a área mencionada no estudo empregado como referência. Por conta disso, esse **local foi descartado do presente estudo**.

Local 7 – Local vizinho à torre de TV, a norte, absorvido pela cidade e com alterações ocasionais, impossibilitando sua identificação precisa e o monitoramento de sua recuperação. Por conta disso, esse **local foi descartado do presente estudo**.

Local 8 - Não foi possível identificar nenhum local próximo às coordenadas fornecidas para o Local 8, no estudo empregado como referência. Por conta disso, foi selecionada para este estudo uma área vizinha aos locais 3 e 5, um pouco a NNE, que possui extensão semelhante à do Local 8 (7,8 ha, em vez de 6 ha), e que já existia em 1985 e não sofreu alteração antrópica após essa data. É possível que se trate do Local 8.

Local 9 – Não foi possível identificar nenhum local tão grande (45 ha) no entorno das coordenadas fornecidas para o local, no estudo empregado como referência. Por conta disso, esse **local foi descartado do presente estudo**.

Local 10 – Não foi possível identificar esse local pequeno (2 ha) em imagem Landsat TM (tentou-se observar em imagem de 1985, 1993, 2004 e 2011, em diferentes composições coloridas). Por conta disso, esse **local foi descartado do presente estudo**.

Local 11 – Foi localizada área de mineração abandonada no ponto exato das coordenadas fornecidas para o local, porém o polígono desenhado para este estudo possui extensão três vezes maior do que a apontada no estudo empregado como referência (13,4 ha, em vez de 4 ha).

Local 12 – Local vizinho à torre de TV, a norte, absorvido pela cidade e com alterações ocasionais, impossibilitando sua identificação precisa e o monitoramento de sua recuperação. Por conta disso, esse **local foi descartado do presente estudo**.

Local 13 - Foi localizada uma área de mineração abandonada no ponto exato das coordenadas fornecidas para o local. Contudo, observando as imagens percebeu-se que trata-se de área de empréstimo recente, o que foi confirmado por meio da série temporal do Google Earth. Há diversas pequenas áreas de solo exposto que podem ter sido usadas para empréstimo de material, então não é possível identificar qual a área mencionada no estudo empregado como referência. Por conta disso, esse **local foi descartado do presente estudo**.

Local 14 – Foi possível identificar uma área de solo exposto a nordeste do atual Parque Olhos d'Água, entre as avenidas L2 e L4 Norte. Trata-se de área de 0,8 ha (em vez dos 3 ha apresentados por Correa e Melo Filho) e que não corresponde exatamente às coordenadas fornecidas para o Local 14 (está situado 4'' para norte e 10'' para sul), porém talvez seja o local referido, visto que não percebeu-se nenhum outro no entorno que poderia sê-lo.

Local 15 – Unido ao Local 5, já descrito.

| Local | Localização   | Área (ha)                 | Fim da lavra | Solo original | Forma/erosão  | Corte (m) | Mat. orgân. (g/kg) | Nº plantas (2004) |
|-------|---|---------------------------|--------------|---------------|---|-----------|--------------------|-------------------|
| 1     | 15° 48' 51" S<br>47° 47' 33" O<br>APA Paranoá       | 20 /<br><u>29,9</u>       | 1986         | L             | Oval/cava fechada, sem escoamento de material       | 2,5       | 22                 | 490               |
| 2     | 15° 48' 44" S<br>47° 47' 28" O<br>APA Bartolomeu    | 35 /<br><u>28,8</u>       | 1955         | L             | Retangular/inclinada, laminar e voçoroca            | 5,5       | 6                  | 125               |
| 3     | 15° 40' 32" S<br>47° 57' 02" O<br>PARNA             | 2 / <u>2,2</u>            | 1969         | L             | Retangular/inclinada, erosão laminar e <i>pipes</i> | 1,5       | 10                 | 379               |
| 4     | 15° 37' 42" S<br>47° 51' 22" O<br>APA Cafuringa     | 5 / <u>1,6</u>            | 1977         | C             | Disforme/superfície côncava, voçorocas              | 7,5       | 5                  | 427               |
| 5     | 15° 40' 38" S<br>47° 56' 59" O<br>PARNA             | 16 /<br><u>22,9</u>       | 1969         | L             | Disforme, cava fechada, sem escoamentos             | 2,5       | 15                 | 603               |
| 6     | 15° 43' 09" S<br>47° 54' 04" O<br>Buracanã          | 2                         | 1964         | C             | Oval/escoamento pela entrada da cava                | 3,0       | 6                  | 97                |
| 7     | 15° 47' 18" S<br>47° 53' 29" O<br>Plano Piloto      | 3                         | 1988         | L             | Retangular/cava fechada, sem escoamentos            | 3,5       | 9                  | 96                |
| 8     | 15° 40' 31" S<br>47° 56' 03" O<br>PARNA             | 6 / <u>7,8</u>            | 1969         | C             | Retangular/inclinada, voçorocas                     | 1,5       | 6                  | 266               |
| 9     | 15° 37' 43" S<br>47° 51' 24" O<br>APA Cafuringa     | 45                        | 1964         | RQ            | Disforme, ainda sendo minerada                      | 6,0       | 5                  | 674               |
| 10    | 15° 40' 23" S<br>47° 06' 08" O<br>APA Paranoá       | 2                         | 1981         | C             | Disforme/cava fechada, inclinada, sem escoamento    | 4,0       | 4                  | 200               |
| 11    | 15° 51' 60" S<br>47° 56' 59" O<br>ARIE Riacho Fundo | 4 /<br><u>13,4</u>        | 1964         | C             | Retangular/inclinada, há escoamentos                | 2,5       | 11                 | 723               |
| 12    | 15° 47' 31" S<br>47° 52' 31" O<br>Plano Piloto, SHN | 8                         | 1980         | C             | Retangular/plana, com pequenas voçorocas            | 1,5       | 6                  | 225               |
| 13    | 15° 43' 25" S<br>47° 53' 55" O<br>Buracanã/Gj. Tort | 3                         | 1975         | C             | Disforme/cava fechada, inclinada, sem escoamento    | 2,5       | 9                  | 518               |
| 14    | 15° 44' 27" S<br>47° 53' 10" O<br>APA Paranoá       | 3 / <u>0,8</u>            | 1976         | C             | Retangular/plana, sem escorrimentos                 | 1,5       | 10                 | 276               |
| 15    | 15° 40' 43" S<br>47° 56' 57" O<br>PARNA             | 25 /<br>(Local <u>5</u> ) | 1969         | L             | Retangular/cava fechada, sem escoamentos            | 9,5       | 6                  | 13                |

L – Latossolo, C – Cambissolo, e RQ – Neossolo Quartzarênico / Corrêa e Melo Filho (2004, p. 125,148,156; 2007, p. 1101)

Locais não considerados no presente estudo

**Tabela 1.** Caracterização dos locais de estudo

A extensão total dos polígonos desenhados para os locais é de 107,4 ha, o que representa 3,16% da área minerada do DF, segundo Corrêa, Bias e Baptista (2004, p. 14).

## **2.1 Geologia, Geomorfologia e Solos**

Os locais situam-se na parte centro-oeste do Distrito Federal, entre altitudes de 1000 e 1100 m, inseridas na Unidade Ardósia do Grupo Paranoá, na Depressão do Paranoá, “uma superfície de dissecação moderada, desenvolvida sobre o núcleo do anticlinório Paranoá, em extensos interflúvios em que ocorrem Latossolos, Cambissolos e solos lateríticos”, com solos de textura argilosa a média (CARNEIRO; SOUZA, 2004, p. 53; EMBRAPA, 2004, p. 12). Os locais 1 e 2 situam-se na Depressão do Paranoá, porém na Unidade Metarritmito Arenoso. A única exceção é o Local 4, que situa-se no Chapada da Contagem, no domínio do Etchplano Paleogênico, Unidade Quartzito Médio, onde predominam os Latossolos de textura argilosa a arenosa, seguidos dos Cambissolos e solos lateríticos concrecionários (CARNEIRO; SOUZA, 2004, p. 51-52; EMBRAPA, 2004, p. 12). O Etchplano Paleogênico é o embasamento sobre o qual se desenvolve o domínio do Pediplano Pliopleistocênico, no qual se situa a Depressão do Paranoá.

A resistência à infiltração da água no solo dos locais estudados por Corrêa e Melo Filho (2004, p. 151) foi identificada como 210% acima do esperado para o tipo de solo e local, e a densidade global cerca de 30% maior. O Local 15 é o que apresenta maior compactação da superfície exposta, visto que teve corte de até 9,5 metros de profundidade (a O Local 2 também está entre os que tiveram corte mais profundo – até 5,5 m de profundidade), e essa compactação “se deve ao maior número de passagens de máquinas pesadas para retirada de material” (ibid., p. 152). O Local 2 apresenta ainda mais um fator negativo: trata-se de rampa inclinada, com mais de 100 metros de comprimento, que tende a dissipar o material que chegue à área.

Os locais 1, 2, 3, 5 e 15 situam-se em faixa de Latossolos Vermelhos, solos altamente intemperizados resultantes da remoção de sílica e de bases trocáveis do perfil. Em consequência, são pobres em nutrientes vegetais e concentram minerais secundários do grupo da caulinita, óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos de Fe e Al, e são distróficos e ácidos, com baixa a média capacidade de troca catiônica e níveis de pH entre 4,0 e 5,5 (EMBRAPA CERRADOS, 2004, p. 9-10).

Trata-se de solos profundos (mais de 2 m) com horizonte B latossólico muito espesso (> 50 cm). As estruturas predominantes são blocos subangulares (pouco desenvolvidos) e/ou em forma muito pequena granular podendo compreender partes com aspecto maciço poroso.

São solos com alta permeabilidade à água e boa drenagem, podendo ser até mesmo excessiva, dependendo de sua estrutura e da conformação do relevo (ibid., p. 9-10).

Os Latossolos sob vegetação de cerrado costumam ser ácidos (devido ao alumínio tóxico) e pobres em nutrientes, o que condiciona inclusive a ocorrência do Cerrado como vegetação natural, em vez de floresta estacional semidecídua, p. ex. (LEPSCH, 2002, p. 135).

Os locais 4, 8, 11 e 14 situam-se em faixa de Cambissolos, solos pouco intemperizados e pouco profundos (0,2 a 1 m), com maior presença de silte e alteração suficiente apenas para desenvolver cor e estrutura no horizonte subsuperficial, apresentando horizonte B incipiente (ibid., p. 12-13). Sua estrutura é bastante variável, com predominância de blocos subangulares e ocasional ocorrência de cascalhos e material concrecionário (ibid., p. 13). A textura varia de argilosa a franco-arenosa, com ou sem cascalho, e o solo é quimicamente distrófico, “em função do material de origem e do clima local” (ibid., p. 13). Devido a sua profundidade, estrutura e textura, os Cambissolos minerados apresentam 20% menos poros e armazenam pouco menos da metade da quantidade de água do que os Latossolos na mesma condição (CORRÊA; MELO FILHO, 2004, p. 152).

Em geral, todos os elementos dos solos analisados aparecem em quantidade muito inferior ao comum para o Cerrado (p. ex. matéria orgânica e capacidade de troca catiônica), porém os teores de fósforo são críticos nessas áreas, pois estão inferiores a centésimos de ppm, enquanto o natural para solos no Cerrado é de 0,4 ppm – o que evidencia o baixo potencial de recuperação natural das áreas mineradas e a necessidade de correção e tratamento para favorecer a revegetação das áreas (ibid., p. 154-156).

## **2.2 Clima e Vegetação**

O clima da área de estudo é tropical continental de altitude. Fortemente sazonal, a precipitação anual média é de 1.500 mm, porém o inverno (maio a setembro) apresenta baixa precipitação (ausência absoluta de precipitação por mais de dois meses é comum), pouca nebulosidade e baixa umidade relativa (chega a ser inferior a 15%), temperaturas médias relativamente baixas e elevada evapotranspiração; o verão (outubro a abril) é chuvoso e quente, com significativa nebulosidade e umidade relativa média em torno de 75% (CAMPOS, 2004, p. 43). Segundo a classificação de Köppen, o clima da área de estudo é temperado úmido de inverno seco e verão quente (T média >22° C).

Nos 177 hectares de lavras estudados nos referidos trabalhos, foram encontradas 5.112 plantas, representando 29 plantas/ha, ou 345 m<sup>2</sup>/planta – além da densidade populacional extremamente baixa, a densidade de espécies também era inferior a 10% da esperada para um Cerrado ralo (CORRÊA; MELO FILHO, 2004, p. 128). Metade das espécies identificadas era

original do Cerrado, e aproximadamente 50% dos indivíduos presentes nas áreas eram arbóreos – “as árvores predominam em onze das quinze lavras investigadas”, com exceção dos locais 3 e 6 (arbustos) e 8 e 15 (subarbustos) (ibid., p. 130). Faziam-se presentes manchas de camada herbácea, onde ocorreu acúmulo de sedimentos – as leguminosas sobressaíram como as espécies mais presentes, devido a sua rusticidade, baixas exigências nutricionais e capacidade de nodular e fixar nitrogênio: “são fartamente relatadas como colonizadoras espontâneas de áreas degradadas pela mineração e como tendo grande sucesso em plantios para recuperação” (ibid., p. 129; 2007, p. 1105).

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Solos e recuperação da vegetação**

O principal fator para a recuperação ou não das áreas de empréstimo/cascalheiras degradadas é o solo. Lepsch (2002, p. 9-10) define solo como “coleção de corpos naturais dinâmicos, que contém matéria viva, e é resultante da ação do clima e da biosfera sobre a rocha, cuja transformação em solo se realiza durante certo tempo e é influenciada pelo tipo de relevo”.

O processo de alteração química e física da rocha para dar origem ao material semiconsolidado (regolito, ou manto de alteração) que servirá como matéria-prima para o solo, é denominado intemperismo. O intemperismo pode ser físico (desintegração) ou químico (alteração). Conforme vão ocorrendo diversos processos de adição, transformação, remoção e translocação de componentes, tais como a adição de material orgânico na forma de húmus, e a transformação dos minerais menos resistentes em argila e sua posterior translocação de partes mais superficiais para partes mais profundas, formam-se horizontes e constitui-se o perfil do solo, em um processo denominado pedogênese (ibid., p. 19-20).

Há diversas classes e subclasses de solos, porém é comum que eles apresentem um horizonte superficial com presença de matéria orgânica em decomposição, seguido logo abaixo por um horizonte mineral com acúmulo de húmus, seguido por um horizonte de acúmulo de argila e então um horizonte de rocha alterada, situado diretamente sobre a rocha íntegra (ibid., p. 20). Trata-se de perfil apresentado apenas a título de exemplo, visto que há muita variação e pode haver mais ou menos horizontes, pode haver ou não argila/matéria orgânica etc.

Além dos constituintes minerais e da matéria orgânica, os solos possuem características morfológicas que são primordiais para a função ecológica que desempenham:

sua textura, estrutura e consistência. A soma dos constituintes e das características morfológicas resultará na presença de poros para o ar e no potencial de infiltração e armazenamento de água no solo (ibid., p. 24-49).

Como exposto na definição de *solo*, ele é formado pela interação do clima, relevo e tempo, sobre o material de origem. Temperatura e umidade exercem influência direta e indireta sobre a formação do solo, pois também condicionam a ocorrência dos organismos, que além de contribuírem para os constituintes do solo, exercem papel fundamental também em sua morfologia, a exemplo das raízes da vegetação e dos canais criados por minhocas e formigas (ibid., p. 51-56).

Quanto ao material de origem, que podem ser rochas máficas, félsicas, materiais derivados de sedimentos consolidados ou sedimentos inconsolidados, ele exerce um papel de resistência e condiciona muitas das características do solo (ibid., p.57-60). O relevo desempenha papel fundamental e pode, p.ex., propiciar a infiltração da água no solo e o acúmulo de sedimentos, ou então na forma de uma rampa, propiciar erosão que resulta em remoção do solo em velocidade igual ou mesmo superior à de sua formação (ibid., p. 61-63).

Os processos de pedogênese requerem tempo, que pode ser diferente de acordo com o tipo de material de origem, relevo em que está situado e o clima e organismos aos quais está submetido. A intemperização do material de origem é muito mais rápida em ambientes quentes e com abundância de água, desde que condições como a drenagem sejam favoráveis. Contudo, não basta a intemperização, é preciso que haja o acúmulo de húmus, a formação de horizontes etc., para que o solo forneça o substrato adequado ao estabelecimento de vegetação mais expressiva – a maturação de um solo requer de centenas a muitos milhares de anos para ser completada (ibid., p. 65).

O potencial de regeneração do Cerrado costuma ser superior ao de ecossistemas florestais e sua vegetação leva cerca de 30 anos para atingir a biomassa original, após ser desmatada (DURIGAN, 2005, p. 106-107). Contudo, o desenvolvimento das plantas em áreas degradadas pela mineração é inferior ao seu desenvolvimento em solos não degradados (CORREA; MELO FILHO, 2007, p. 1102).

As áreas submetidas a interferências na estrutura e características químicas do solo de cerrado, p.ex. revolvimento do solo (subsolagem, aração, gradagem), fertilização e calagem, tem seu processo de regeneração prejudicado ou mesmo não se regeneram naturalmente (DURIGAN, 2005, p. 108-109).

O processo de rebrota é o que tem maior importância para a recobertura das áreas de Cerrado, cujas árvores típicas são heliófitas e de crescimento lento – “o cerrado típico não

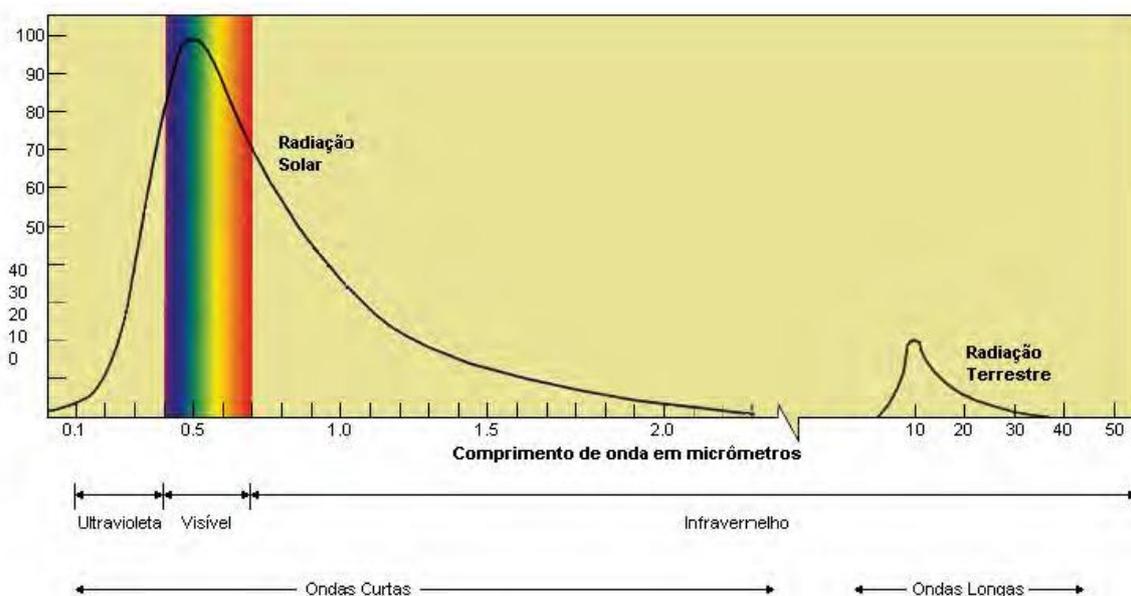
possui banco de sementes de espécies arbóreas de rápido crescimento, que seriam pioneiras típicas, suficiente para recolonizar áreas perturbadas” (ibid., p. 108).

### 3.2 Sensoriamento remoto e processamento digital de imagens de satélite

Para realizar a análise, foram empregadas técnicas de Sensoriamento Remoto que, segundo Meneses e Almeida (2012, p. 3), “é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética [REM] com os materiais terrestres”.

Toda matéria que apresenta temperatura acima de  $-273,15^{\circ}\text{C}$ , o *zero absoluto*, emite REM. A REM apresenta comportamento dual, ao mesmo de partícula e de onda senoidal harmônica. Como onda, possui um comprimento constante, que define a forma como vai interagir com os alvos imageados – trata-se da interação macroscópica, relativa à textura do alvo (ibid., p. 4-7). Constante também é o quantum de energia para um determinado comprimento de onda, que só interage com o alvo quando a quantidade é a exata [discreta] que excita um processo interno naquele alvo – daí a possibilidade de identificar a *assinatura espectral* dos alvos e identificá-los, por meio da análise do quanto foi absorvida ou não da REM de cada comprimento de onda que chegou a ele (ibid., p. 8 e 44). Nesse caso, a interação é microscópica, dependendo da constituição química/atômica do alvo (ibid., p. 8).

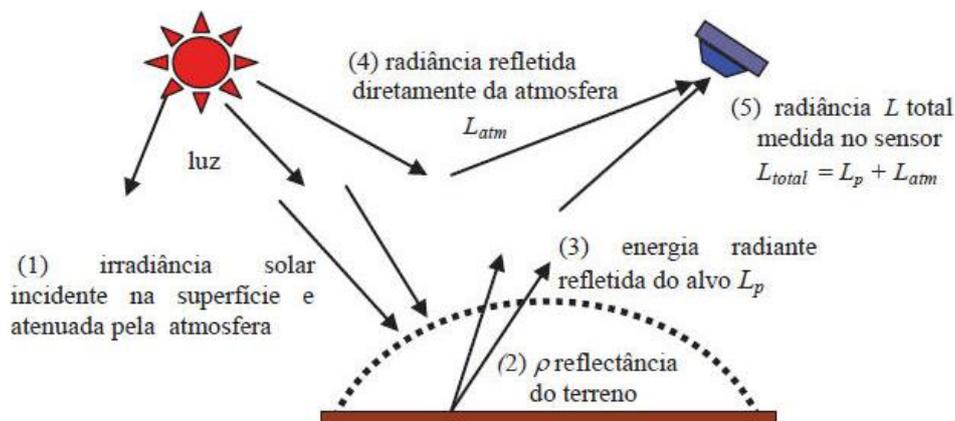
Devido à maior intensidade, em comparação com as emissões termais e as microondas (empregadas em radar), a luz solar é a que mais revela as propriedades das naturezas dos materiais (Figura 3).



**Figura 3.** Quantidade REM que chega à Terra – o pico da irradiância solar representa 100% (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 12)

A atmosfera não é passiva à REM que a atravessa, pelo contrário: seus materiais particulados e constituintes gasosos interagem com os fluxos e absorvem e/ou refletem parcela considerável deles (Figura 4) – é devido à absorção excessiva da atmosfera que algumas faixas espectrais não são usadas em Sensoriamento Remoto (p. 14-15).

Conforme ilustra a Figura 4, os sensores imageadores medem a radiância que chega a eles, e não a reflectância do terreno – para conhecer o valor de reflectância é preciso calcular a irradiância incidente na área estudada e a interferência atmosférica, no momento em que a imagem foi gerada (p. 23).

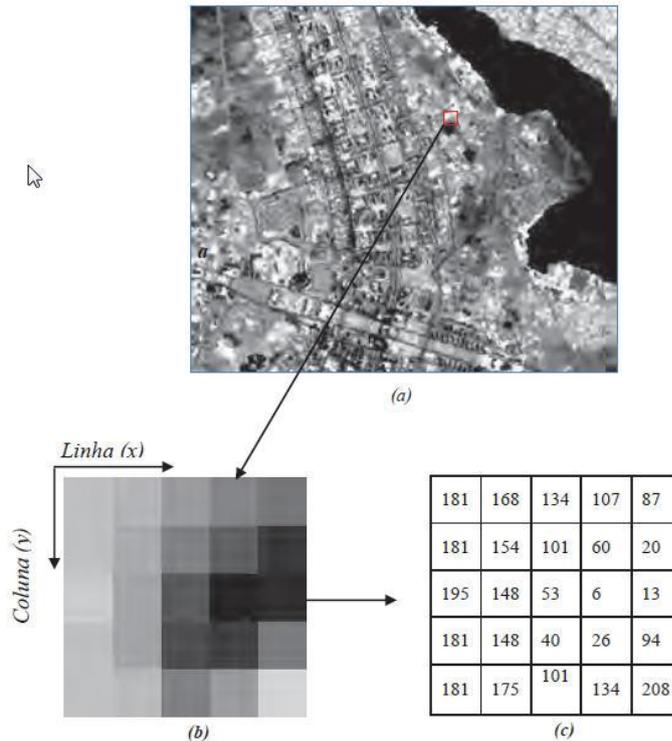


**Figura 4.** Esquema ilustrativo das interações sofridas pela irradiância solar, desde a entrada na atmosfera até a medição realizada pelo sensor (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 14).

Os sensores são constituídos basicamente de três sistemas: um sistema óptico (espelhos e lentes), um sistema de detecção (grades dicróicas, prismas e detectores) e um sistema eletrônico de registro de dados (que transforma o sinal elétrico em valor digital), que são agrupados em uma única unidade aeroespacial (ibid., 36) (Figura 5).

A Figura 5 ilustra a forma como programas de processamento de imagens trabalham – eles empregam o formato de dados matriciais denominado *raster* – um arquivo binário que contém os dados da imagem, acompanhado de um pequeno arquivo de texto [header] que fornece informações [metadados] sobre a imagem (ibid., p. 79).

As imagens de satélite possuem quatro tipos de resolução: espacial, espectral, radiométrica e temporal. A resolução espacial determina o tamanho do menor objeto que pode ser detectado pela imagem; um sensor tem melhor resolução espectral se ele possui maior número de bandas situadas em diferentes regiões espectrais e com larguras estreitas de comprimentos de onda, e a resolução radiométrica é a capacidade de o detector diferenciar as intensidades dos níveis de radiância de cada pixel imageado.



**Figura 5.** Imagem digital (a) com área em zoom de grupo de pixels em valores cinza (b) e correspondentes valores digitais (c) (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 88).

Distorções geométricas e radiométricas são inerentes ao sensoriamento remoto e sua correção faz parte do conjunto de funções denominadas pré-processamento. Um pouco sobre distorções radiométricas já foi falado, ao tratar da interação da atmosfera com a REM. Quanto às distorções geométricas, elas são geradas por diversos fatores, tais como a rotação da Terra durante o tempo de imageamento e instabilidades dos eixos de posicionamento da plataforma do sensor (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 90-91). Para corrigir e remover os erros e distorções, que podem ser causados inclusive por erros instrumentais (ruídos espúrios), são empregadas diferentes funções operacionais (p. 82).

Concluído o pré-processamento, realiza-se o que é denominado processamento de imagens digitais. A aritmética de bandas é uma das mais simples formulações algorítmicas de processamento de imagens; as operações aritméticas realizam um processamento de transformação dos dados a partir da combinação de imagens, gerando como resultado uma nova matriz de dados. O processo de transformação é executado pixel a pixel por meio de uma regra matemática pré-definida envolvendo diferentes bandas espectrais ou datas de aquisição diferentes, da mesma banda (ibid., p. 138). A subtração e a divisão são utilizadas para realçar diferenças espectrais dos alvos (ibid., p. 139).

A subtração de bandas é usada para detectar mudanças temporais dos alvos em uma área e costuma ser usada para monitoramento ambiental. São necessárias imagens de datas

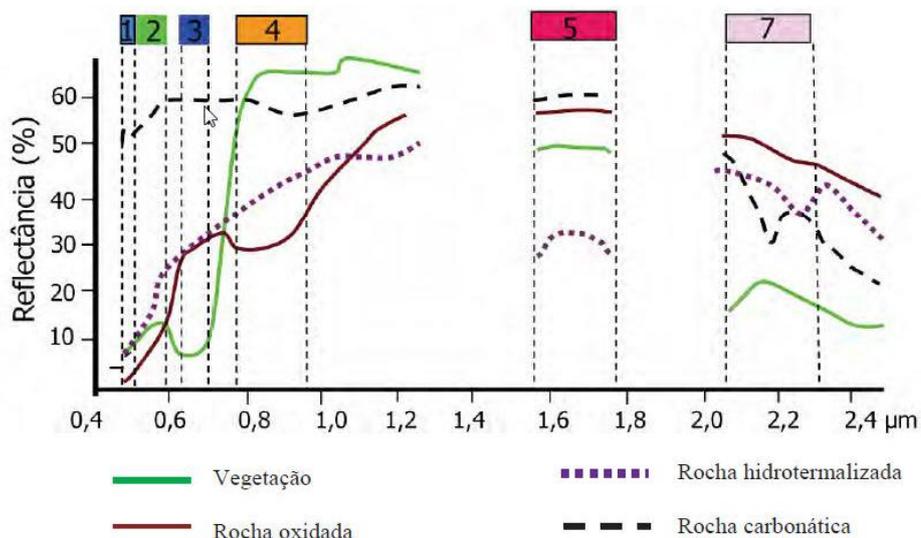
diferentes da mesma banda espectral, preferencialmente do mesmo sensor e com o mesmo ângulo de iluminação (ibid., p. 144). Para evitar a geração de *artefatos* – resultados que não existem de fato, e sim foram artificialmente criados, por erros ou processamentos indevidos –, é necessário equalizar a radiância das imagens, visto que as condições atmosféricas variam e isso resulta em diferentes valores obtidos pelo sensor, sem que de fato tenha ocorrido alteração no objeto analisado.

A divisão de bandas trabalha no realce das assinaturas espectrais dos alvos e seu exemplo clássico é a criação de índices, sendo o mais conhecido a divisão de bandas visando ao realce das variações de densidade da cobertura vegetal, ao qual se denomina de índice de vegetação (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 144 e 147). Os índices de vegetação são medidas do dossel que integram itens como clorofila das folhas, área foliar e cobertura e arquitetura do dossel (JIANG et al., 2008, p. 3833).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é a diferença entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (R), dividida pela soma dessas duas bandas, já foi o índice mais empregado em estudos da vegetação no mundo, e foi comprovada a correspondência entre as variações no NDVI com as variações na vegetação (HUETE et al., 1997, p. 440).

$$NDVI = \frac{N-R}{N+R} \quad (1)$$

A escolha das bandas do vermelho e do infravermelho próximo para identificação da vegetação não é fortuita. A identificação da vegetação [excetuando a vegetação sem folhas] por meio de imagens multiespectrais é relativamente simples, pois o padrão de reflectância das folhas varia muito pouco entre os tipos vegetais, visto que “os componentes moleculares químicos, pigmentos e demais constituintes das folhas muito pouco se modificam” (MENESES, 2012, p. 2). Muito pouca REM é refletida na região espectral do visível [inclusive na faixa do verde], principalmente devido à forte absorção nos comprimentos de onda do azul e do vermelho; por outro lado, na região do infravermelho próximo, como mecanismo de proteção contra o superaquecimento, a reflectância das folhas é muito elevada, chegando a 60% (ibid., p. 4-5) (Figura 6). Como a banda azul apresenta maior presença de ruído devido a interferências com a atmosfera, consagrou-se o uso das bandas do vermelho (pico de absorção) e do infravermelho próximo no desenvolvimento de índices de vegetação.



**Figura 6.** Bandas espectrais do sensor TM dos satélites Landsat, e espectros de reflectância de materiais (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 128)

Apesar disso, o uso desse índice resultava em erros significativos, p.ex. relacionados a interferências causadas pela atmosfera e pelo solo, o que motivou o desenvolvimento de índices mais precisos (HUETE, 1988, p. 306; HUETE et al., 1997, p. 440-441). Usando o NDVI em ambientes em que o dossel não é totalmente fechado e conseqüentemente a radiação do solo exerce impacto na detecção pelo sensor, solos escuros resultavam em índice de vegetação mais elevado (HUETE, 1988, p. 295 e 302).

Para corrigir a influência do solo, foi desenvolvido o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI). Esse índice emprega um fator de ajuste  $L$  baseado nas diferenças entre absorção e transmitância da radiação na banda do vermelho e do infravermelho próximo – o fator de ajuste ideal é inversamente proporcional à densidade da vegetação, porém percebeu-se que o valor de 0,5 reduz substancialmente os erros causados pelo solo, na grande maioria dos casos, além de evitar a necessidade de conhecimento prévio (HUETE, 1988, p. 306).

$$SAVI = (1 + L) \frac{N - R}{N + R + L} \quad (2)$$

Outro desenvolvimento posterior no campo dos índices de vegetação foi o Índice de Vegetação Resistente à Atmosfera (ARVI). O ruído atmosférico na banda vermelha é muito maior do que no infravermelho próximo, de modo que esse índice buscou reduzir tal efeito no vermelho (KAUFMAN; TANRÉ, 1992, p. 262-263). Para reduzir a influência da atmosfera no ARVI, foi inserida a banda azul em sua equação, tornando o índice quatro vezes menos sensível ao ruído atmosférico do que o NDVI (KAUFMAN; TANRÉ, 1992, p. 263 e 269).

$$\text{ARVI} = -0.18 + 1.17 * \text{NDVI} \quad (3)$$

Reunindo os ajustes ao solo e à vegetação, Huete (1997) desenvolveu o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo e à Atmosfera 2 (SARVI2), posteriormente renomeado Índice de Vegetação Melhorado (EVI). O NDVI responde mais à reflectância no vermelho e à absorção decorrente da fotossíntese, e não é linear, saturando em áreas de floresta mais densa, enquanto o EVI responde muito mais ao infravermelho próximo, associado a parâmetros do dossel tais como o índice de área foliar (HUETE, 1997, p. 445).

$$\text{EVI} = 2.5 \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + 6\rho_{\text{RED}} - 7.5\rho_{\text{BLUE}} + 1} \quad (4)$$

O multiplicador 2,5 é um fator de ganho; os multiplicadores 6 e 7,5 são coeficientes relacionados à correção dos aerossóis, usando a banda azul para corrigir os ruídos que eles causam na banda vermelha; e o valor 1 adicionado ao denominador é o fator de ajuste do solo.

Comparado ao NDVI, o EVI correlaciona-se mais diretamente com o índice de área foliar, é menos suscetível à saturação em florestas e muito pouco sensível a ruídos causados por aerossóis decorrentes de queimadas, como as na Amazônia (JIANG et al., 2008, p. 3834).

O EVI vem sendo usado para uma ampla variedade de estudos, incluindo biodiversidade, cobertura do solo e mudança na cobertura do solo, e já teve suas vantagens apontadas por diversos estudos – p.ex. para a detecção de mudanças e avaliação de mudanças sazonais em áreas de floresta (JIANG et al., 2008, p. 3835).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para processar e analisar os dados foi utilizado essencialmente o programa ENVI 4.8, com o uso do ArcMap 9.3 apenas para o desenho de vetores. As etapas de elaboração foram divididas em duas fases: obtenção das imagens e pré-processamento; e processamento das imagens e análise dos dados.

### 4.1 Obtenção das imagens e pré-processamento

Essa etapa caracterizou-se pela preparação das imagens que foram empregadas no objeto deste estudo – a análise da recuperação das áreas degradadas pela mineração.

Foram baixadas do Catálogo de Imagens do INPE<sup>1</sup> as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 das imagens geradas pelo satélite Landsat 5, sensor TM 5, na órbita 221, ponto 71, que foram reunidas em um arquivo GeoTIFF e seu header, por meio do ENVI. O nome da banda 7 foi corrigido, para evitar confusões – pois o ENVI cria os nomes na sequência, de modo que ela é automaticamente nomeada Banda 6 – e o comprimento de onda central de cada banda foi indicado no header do arquivo gerado.

As imagens são todas dos meses de agosto, dos anos de 1985 (17/08/1985), 1993 (07/08/1993), 2004 (21/08/2004) e 2011 (25/08/2011). Essa opção teve como objetivo obter imagens quase sem nuvens (período de seca), além de evitar empregar imagens de períodos diferenciados (seco/úmido) e dificultar sua interpretação.

Reunidas as bandas, foi realizada a correção atmosférica. Para análises multitemporais da vegetação, é especialmente importante corrigir os erros atmosféricos, caso contrário as variações resultantes da atmosfera podem ser maiores do que as variações na vegetação, induzindo a erro nas conclusões (HUETE, 1988, p. 295).

Para a correção, foi empregada uma ferramenta do ENVI, a QUick Atmospheric Correction (QUAC). O QUAC é um método de correção atmosférica para imagens multi e hiperespectrais, nas bandas do visível e infravermelho – do infravermelho próximo até o infravermelho de ondas curtas (~0,4 µm a 2,5 µm). Diferente de outros métodos, ele determina os parâmetros para compensação atmosférica diretamente a partir dos dados dos pixels contidos na cena, sem necessidade de mais informações (ENVI, 2009, p. 6).

O QUAC fundamenta-se em resultados empíricos que comprovaram que a reflectância média de uma coleção de espectros de diversos materiais, como os *endmember* de uma cena, independe da cena em questão (ibid., p. 6; BERNSTEIN et al., 2005, p. 1; BERNSTEIN et al.,

---

<sup>1</sup> Endereço: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/index.php?lang=EN>>, acesso em set. 2012.

2008, p. 1). Ele realiza uma correção atmosférica menos precisa do que o FLAASH e outros métodos que demandam informações fornecidas pelo usuário, porém produz resultados de reflectância satisfatórios, com RMS (erro médio quadrático) de  $\pm 15\%$  em relação aos resultados desses métodos mais precisos (BERNSTEIN et al., 2008, p. 1). Além disso, permite obter valores de reflectância razoavelmente precisos, mesmo quando o sensor não possui adequada calibração radiométrica ou do comprimento de onda, ou quando não se dispõe de informação da intensidade da iluminação solar (BERNSTEIN et al., 2005, p. 1).

Para que o QUAC produza um resultado satisfatório, é preciso que haja ao menos 10 alvos distintos na cena, e que haja número suficiente de pixels escuros para permitir uma estimativa adequada da linha de base espectral (ibid., p. 9). Por esse motivo foi realizada a correção atmosférica e obtidos os valores de reflectância dos pixels, via QUAC, antes que fosse realizado o recorte das imagens.

A imagem de 2011 foi recortada empregando-se a ferramenta Resize Data do ENVI, reduzindo sua extensão para um quadrado de 1300 x 1300 pixels, englobando o Parque Nacional de Brasília, o Plano Piloto e o Lago Paranoá. O recorte foi além do mínimo necessário para as áreas de estudo, visando facilitar a obtenção de pontos de controle adequados para o posterior georreferenciamento. Na sequência, foram recortadas as demais imagens, tendo a imagem recortada de 2011 como arquivo de referência.

As imagens, que já são disponibilizadas com correções geométricas e georreferenciamento primário (realizado pelos próprios laboratórios, antes de serem distribuídas), foram novamente georreferenciadas/registradas, por meio da ferramenta Select GCPs (Ground Control Points): Image to Image, do software ENVI, empregando-se como base a imagem de 2011. Isso foi feito para ajustar com precisão as imagens, para que os polígonos criados para a análise multitemporal das áreas de estudo não apresentassem deslocamento nos pixels de uma imagem para a outra.

O georreferenciamento das imagens foi realizado com ao menos 10 pontos de controle no terreno bem distribuídos pela imagem, abrangendo bordas e centro, e o RMS total das imagens ficou em torno de 0,5. RMS, *root mean square*, é a medida da distância de cada ponto de controle à curva polinomial gerada pela função polinomial empregada para a correção da geométrica da imagem, e “o erro RMS total é o somatório dos erros residuais de todos os pontos de controle” (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 99).

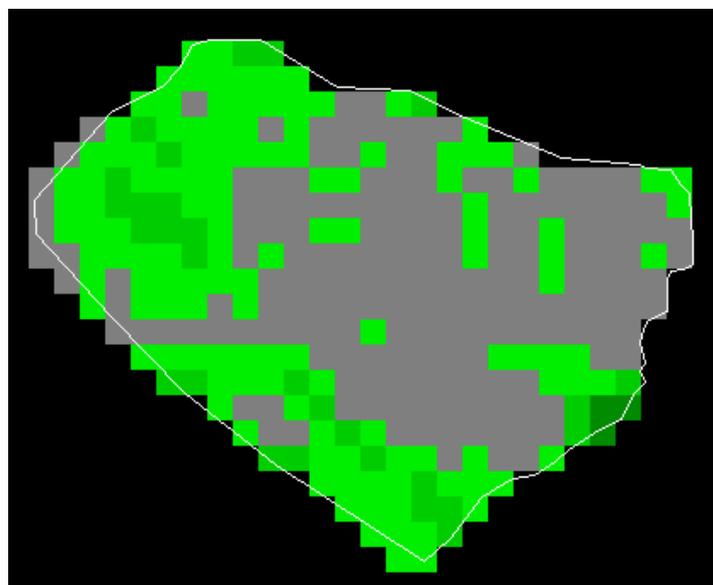
Os pontos de controle foram definidos com precisão – foi empregada aproximação de 25x, na janela Zoom do ENVI, e a qualidade do georreferenciamento realizado foi conferida visualmente por meio da sobreposição do polígono, gerado posteriormente, nas duas imagens

ao mesmo tempo. O georreferenciamento das imagens foi realizado com uma função polinomial de 1º grau, visto que o grau de distorção da imagem não é elevado, e a reamostragem foi realizada com o método de interpolação com o vizinho mais próximo.

Foi escolhido esse método de reamostragem, visto que para análise multitemporal realizada, era importante manter os valores radiométricos da imagem original. O método do vizinho mais próximo transfere para a imagem reamostrada o valor de brilho do pixel da imagem original que estiver mais próximo – introduzindo uma pequena descontinuidade geométrica da ordem de 0,5 pixel, que não impacta o resultado desta análise, que não apresenta precisão tão elevada (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 101).

#### 4.2 Processamento das imagens e análise dos resultados

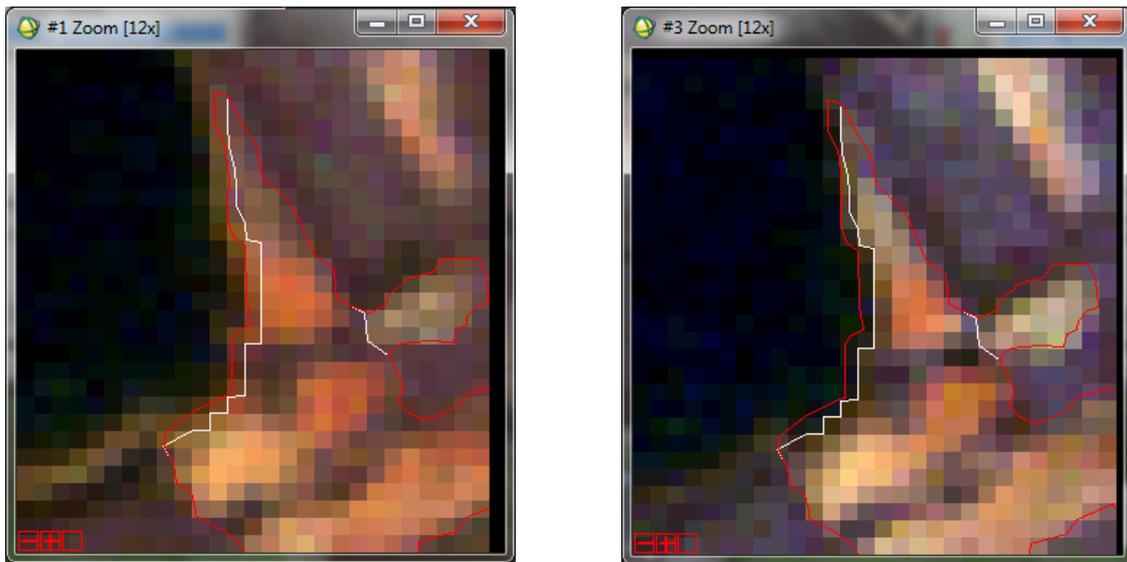
Sem dispor dos limites das áreas escolhidas, foi necessário vetorizá-las sobre a imagem. A vetorização das áreas foi realizada no programa ArcMap 9.3, sobre composição colorida 3(R) 2(G) 1(B), da imagem de 2011, com posterior conferência e correção ao sobrepor às imagens dos demais anos os vetores gerados. Devido às diferenças entre os softwares, apesar de o polígono ter sido desenhado como vetor suave, o ENVI extrai a área delimitada como raster, empregando pixels inteiros e tornando abrupto o desenho da área (Figura 7).



**Figura 7.** Diferença entre o desenho do vetor no ArcMap e a área extraída pelo ENVI.

Após georreferenciar a imagem de 1993 com base na imagem de 2011, foi criado no ArcMap um shapefile com o polígono dos Locais 5 e 15, sobre a imagem de 2011. Testou-se então sobrepor esse vetor à imagem de 1993. Observando no Zoom do ENVI, percebeu-se que uma faixa próxima ao lago, “terra firme” na imagem de 2011, apresentou pixel de água

em 1993. Ao analisar o perímetro do polígono em referência aos pixels em cada imagem, confirmou-se não ter ocorrido deslocamento do polígono. O polígono foi reduzido, excluindo essa faixa de água na imagem de 1993, decorrente de variações na cota do espelho d'água (Figura 8). Posteriormente foi realizada nova redução no desenho do polígono, para evitar influência no valor de EVI2 obtido na faixa limítrofe ao lago – por se tratar de *pixel mistura*, que acaba englobando alguma faixa de água dentro dos 30 metros do pixel.



**Figura 8.** Composição colorida 3(R) G(2) B(1) das imagem Landsat TM 5 de 2011 (esquerda) e 1993 (direita), com o vetor antes da correção (vermelho) e após a correção (branco – não aparece onde o traçado é igual ao do vermelho); à direita, o “braço” vermelho é o Local 3 (CORRÊA e MELO FILHO, 2004, p. 125-126), que havia sido vetorizado junto com os Locais 5 e 15 e foi posteriormente identificado e resultou em outro polígono.

Após o georreferenciamento das imagens e o desenho dos polígonos, foi realizado o índice de vegetação das imagens. A ideia inicial deste trabalho era iniciar a análise na década de 1970, com uma imagem produzida pelo Landsat 1, sensor MSS, porém foi posteriormente abandonada, devido às dificuldades decorrentes das diversas e significativas diferenças entre os sensores, tais como a resolução espacial. Todavia, manteve-se a opção pelo índice de vegetação EVI2, escolhido por não empregar banda espectral na faixa do azul e, portanto, ser passível de uso com o sensor MSS, que não possui banda espectral nessa faixa.

$$EVI2 = 2.5 \frac{N-R}{N + 2.4R + 1} \quad (5)$$

Esse índice foi uma adaptação desenvolvida para permitir análises multitemporais com a qualidade do EVI, sem empregar a faixa espectral do azul – pois sensores como o Landsat

MSS e ASTER não possuem uma banda nessa faixa espectral e conseqüentemente as imagens geradas por esses sensores não poderiam ser analisadas com tal índice. Não empregar uma banda azul poderia tornar o índice mais suscetível a ruídos atmosféricos, porém os progressos na correção atmosférica minimizaram consideravelmente esse problema - além disso, a banda azul oferece muito pouca ou nenhuma informação biofísica complementar à da banda vermelha (JIANG et al., 2008, p. 3834 e 3843).

O EVI2 pode ser substituto exato do EVI, em imagens/pixels sem nuvens e neve, que apresentam pequena quantidade de aerossóis e tenham passado por correção atmosférica, apresentando em praticamente todos os pixels diferença entre  $\pm 0.02$  [em relação ao EVI], independente da cobertura do solo e da época do ano (JIANG et al., 2008, p. 3844).

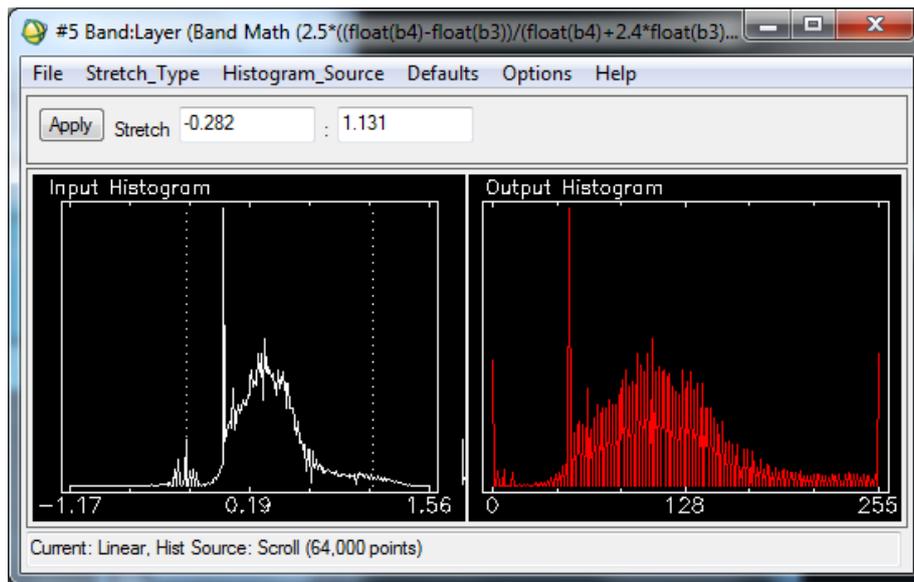
Considerando que as imagens foram selecionadas justamente por não apresentarem nuvens, e que a correção atmosférica já havia sido realizada, foi empregado o EVI2 para a análise temporal da vegetação nas áreas objeto deste estudo.

Foi inserida a seguinte equação, na ferramenta Band Math do ENVI:

$$2.5*((float(b4)-float(b3))/(float(b4)+2.4*float(b3)+1)) \quad (6)$$

Com essa equação foram obtidas as imagens cujos valores digitais são os valores do EVI2 das imagens originais. Emprega-se o comando *float*, para possibilitar a obtenção de números reais [não-inteiros], caso contrário o ENVI iria realizar aproximação para o número inteiro mais próximo. Os valores de EVI2 obtidos variaram entre 1,57 e -1,17, porém desconsiderando-se os valores extremos, que contam com apenas um pixel e podem ser decorrentes de erros (interpretação feita com base no histograma gerado, do qual a Figura 9 é um exemplo), tem-se que os valores ficaram entre aproximadamente 1,4 e -0,5.

Em análise empírica realizada nas imagens resultantes da aplicação do índice, constatou-se que valores entre aproximadamente **0,3 e 0,65** são típicos de Cerrado. Ressalta-se que todas as imagens empregadas são do período de seca, no mês de agosto.

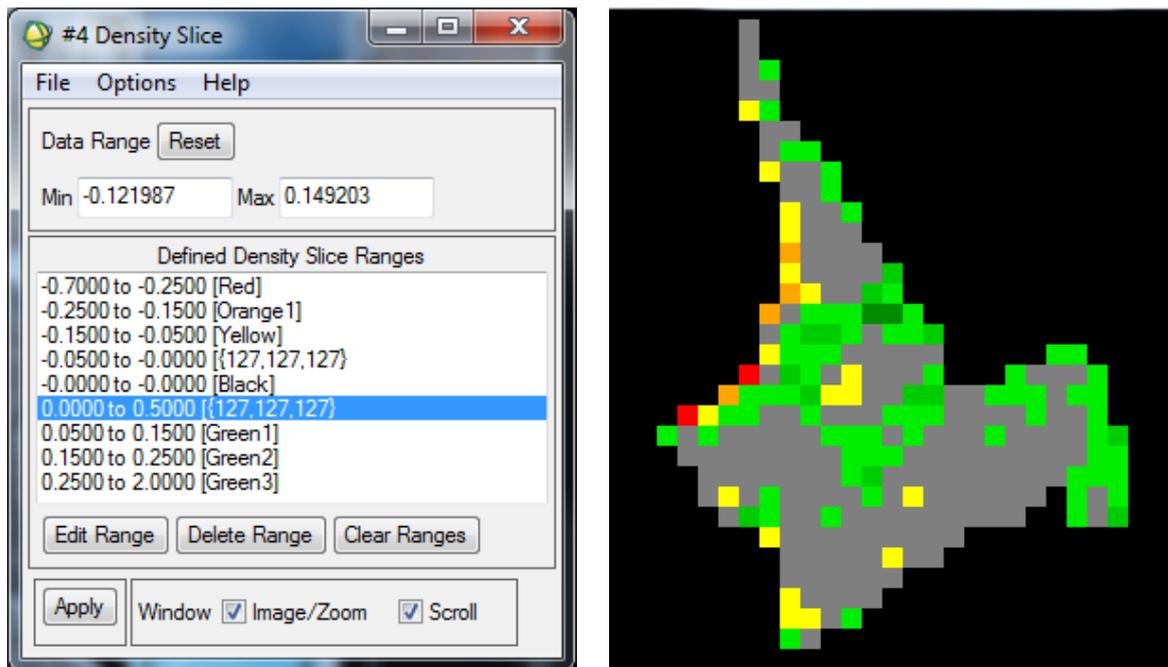


**Figura 9.** Histograma do resultado do EVI2 para o recorte da imagem Landsat 5 TM de 2011.

Para identificar as mudanças ocorridas na cobertura vegetal, no período coberto pelas imagens empregadas, foi realizada a subtração entre as imagens resultantes do EVI2 de cada década: 1993 e 1985; 2004 e 1993; e 2011 e 2004; além de uma subtração para analisar a mudança entre 1985 e 2011. Para conseguir realizar a aritmética de bandas no ENVI, é preciso que elas estejam reunidas, o que foi feito por meio da ferramenta *Layer Stacking*, do próprio software. Reunidas, procedeu-se à subtração por meio da seguinte equação da subtração de bandas:

$$\text{float}(b2)-\text{float}(b1) \quad (7)$$

Feita a subtração, é gerado uma nova matriz/imagem, com a diferença entre os valores digitais de cada pixel nas imagens empregadas na subtração. Para realizar a análise da mudança nas áreas de estudo, Área 1 e Área 2, foi aplicado o vetor anteriormente criado, para gerar uma máscara para cada área, em cada imagem – empregando a ferramenta *Export Active Layer to ROIs* e então *Build Mask*, (estando ativos os vetores, pois serão usados junto com a ROI, para gerar o arquivo com a máscara). Aplicada a máscara, foi realizado o *Density Slice*, separando os valores de mudança obtidos em oito classes (Figura 10), das quais três indicam redução no EVI2 (cores quentes progressivas), três indicam aumento (tons progressivos de verde), uma indica que não houve mudança digna de nota (cinza) e a última classe foi criada para separar o fundo (valor zero).



**Figura 10.** Definição das classes para o Density Slice e o resultado de sua aplicação à subtração entre o EVI2 de 1993 e de 1985, nos Locais 5 e 15.

A escolha das classes foi realizada empiricamente, com base em interpretação do autor sobre os resultados de EVI2 obtidos. Considerou-se que mudanças no EVI2 inferiores a 0,05 não representam recuperação ou degradação da cobertura vegetal dignas de nota nas áreas de estudo, tanto em decorrência de pequenas variações que ocorrem naturalmente, quanto devido a pequenos erros inerentes ao processo de análise, a começar pela correção atmosférica obtida por meio do QUAC.

É possível quantificar o resultado, por meio da ferramenta Band Threshold to ROI, definindo cada classe como uma região de interesse e assim obter seu número de pixels e área. Contudo, o presente trabalho limitou-se produzir o resultado e analisar sua alteração mediante análise visual e de resultados estatísticos simples gerados com o uso da ferramenta Compute Statistics, do ENVI.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Local 1 – Figura 11.

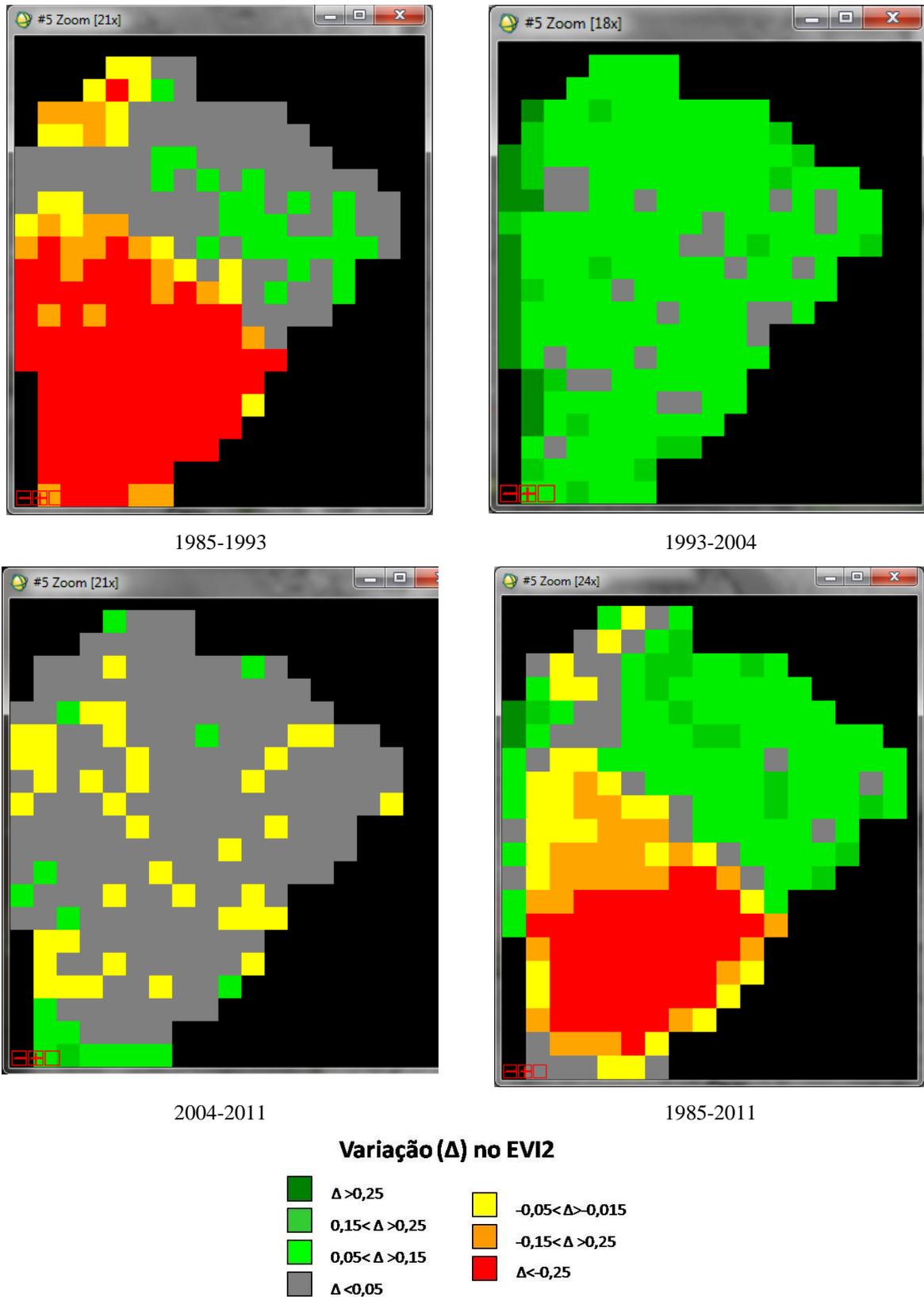


Figura 11. Variação do EVI2 no Local 1, nos períodos de estudo

|                | MÍNIMO (1985/2011) | MÁXIMO (1985/2011) | MÉDIA (1985/2011) |
|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| <b>LOCAL 1</b> | -0,02 / 0,06       | 0,54 / 0,45        | 0,23 / 0,18       |

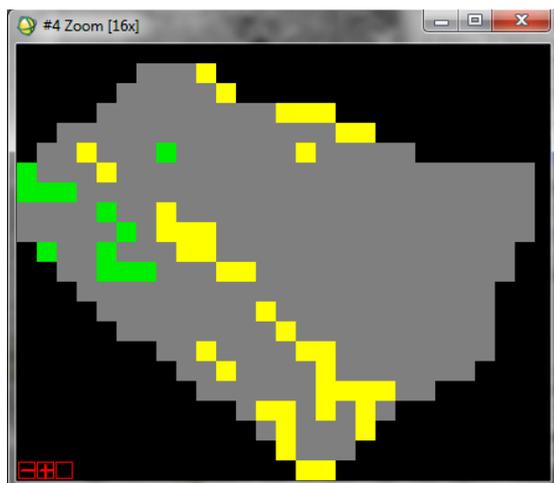
**Tabela 2.** Local 1: valores do EVI2 nos anos de 1985 e 2011

Entre os anos de 1985 e 1993, percebe-se que houve redução bastante significativa no EVI2 do Local 1, em sua porção centro-sul – o que decorreu do fato de que a lavra e sofreu expansão entre a data da imagem (17/08/1985) e seu encerramento em 1986. É possível observar que houve alguma recuperação na porção centro-nordeste, que já estava encerrada.

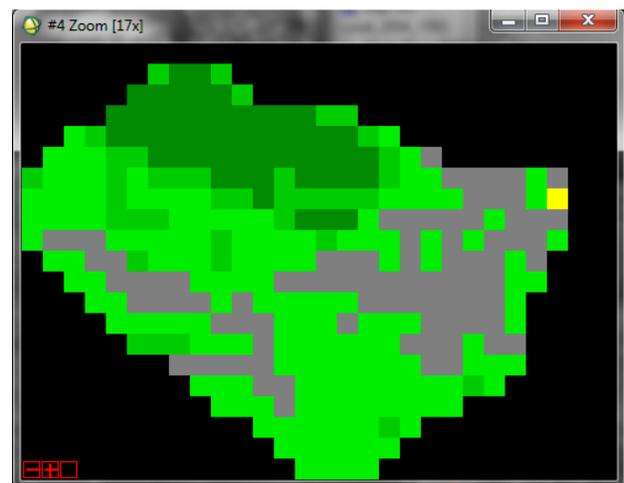
Entre 1993 e 2004, ocorreu ligeiro aumento do EVI2 em praticamente toda a área, mesmo onde o encerramento da lavra era mais recente. Entre 2004 e 2011, ocorreu algum retrocesso na recuperação da área, espalhado e pouco significativo.

Considerando o período inteiro, de 1985 a 2011, observou-se queda no EVI2 da porção centro-sul - oeste e aumento na centro-norte – leste. Em menos de 30 anos, é possível constatar alguma recuperação no local, e a queda nos valores máximo e médio no EVI2 é resultado da expansão da lavra que ocorreu entre a obtenção da primeira e da segunda imagem empregadas nesta análise. Na descrição dos locais, item 3 deste trabalho, foi comentado que existe controle das águas pluviais neste local, o que resulta em proteção contra erosão e dispersão de nutrientes, com conseqüente acúmulo de matéria orgânica e entrada de sementes para recolonizarem a área – visto que a rebrota é bastante prejudicada devido à remoção da camada superficial do solo, que no Local 1 foi de 2,5 metros de profundidade.

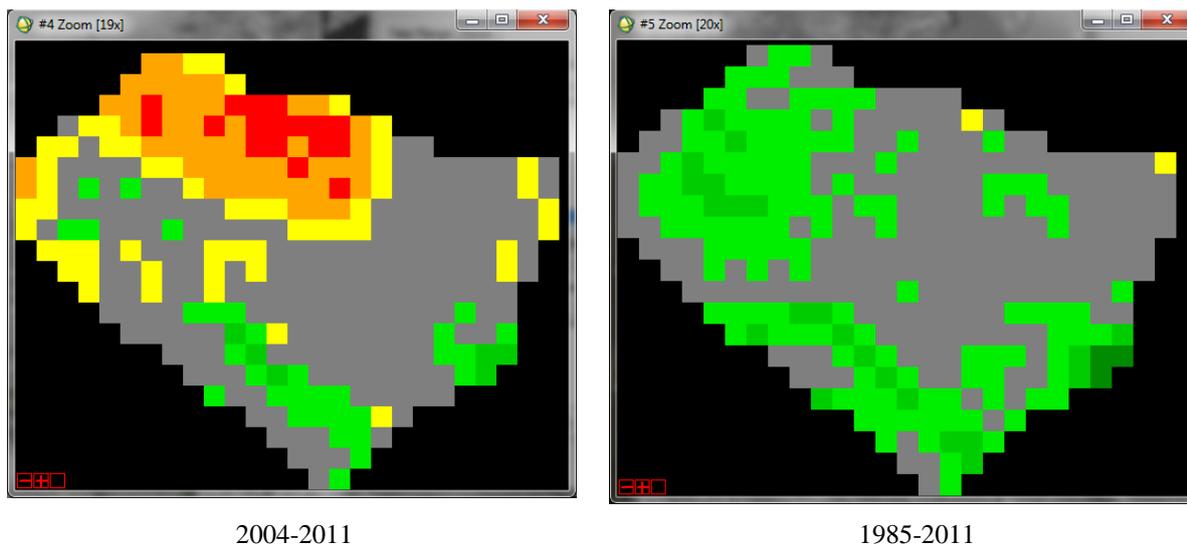
Local 2 – Figura 12.



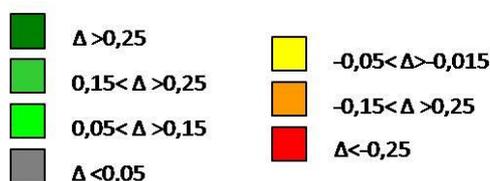
1985-1993



1993-2004



### Variação ( $\Delta$ ) no EVI2



**Figura 12.** Variação do EVI2 no Local 2, nos períodos de estudo

|                | MÍNIMO (1985/2011) | MÁXIMO (1985/2011) | MÉDIA (1985/2011) |
|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| <b>LOCAL 2</b> | -0,06 / -0,03      | 0,20 / 0,35        | 0,01 / 0,06       |

**Tabela 3.** Local 2: valores do EVI2 nos anos de 1985 e 2011

Conforme pode ser observado na Figura 12, O Local 2 praticamente não sofreu alteração entre 1985 e 1993. Mais de  $\frac{3}{4}$  dos pixels situaram-se dentro da faixa de  $\pm 0,05$ , assumindo a cor cinza. Quanto aos demais, houve leve tendência de redução do EVI, em uma pequena faixa no norte da área, e em duas faixas a oeste, orientadas na direção NO-SE.

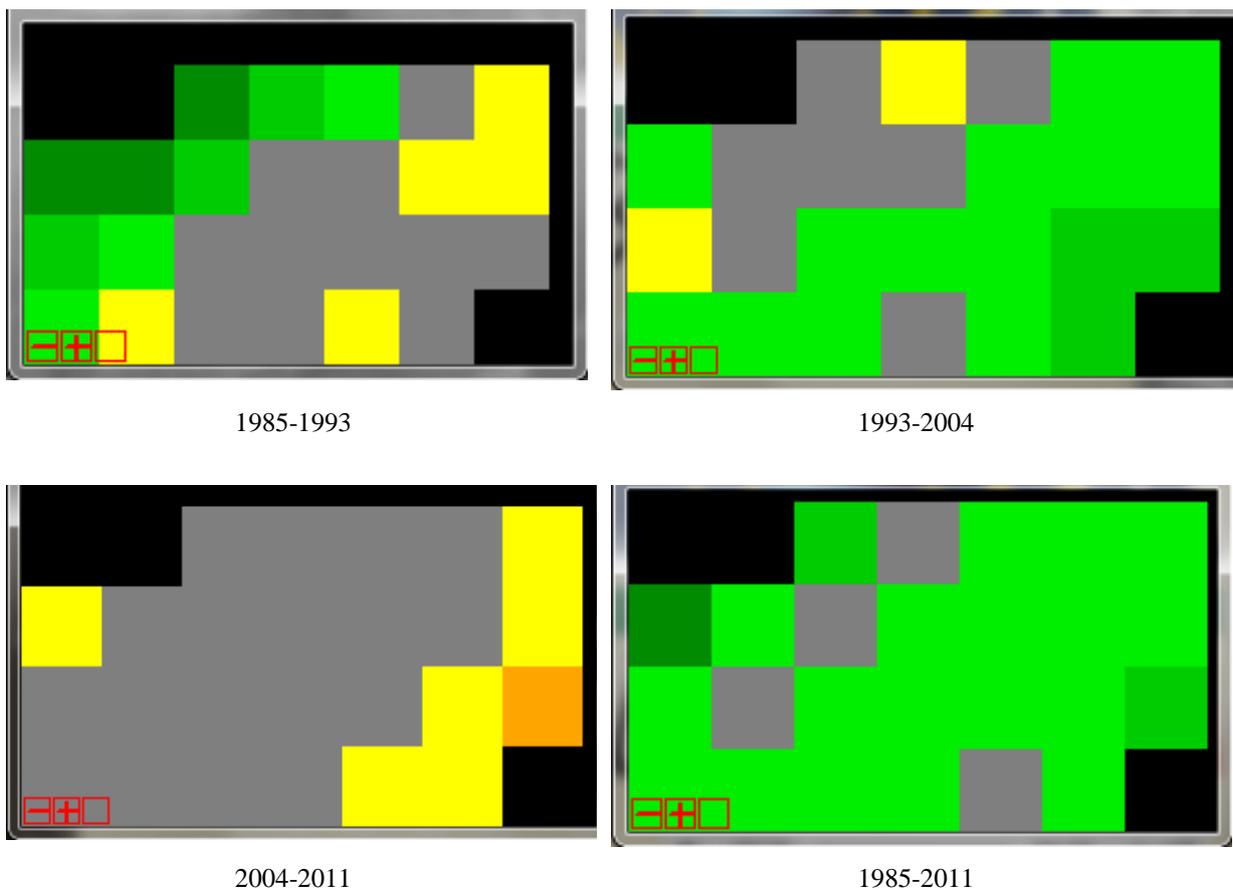
Entre 1993 e 2004, o padrão foi bastante distinto do anterior, ocorrendo aumento do EVI2 em aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de seus pixels, sendo que a faixa em que o aumento foi mais intenso (aumento acima de 0,25 no EVI2) fica em seu limite N-NO, e a que menos se alterou fica na faixa leste. Provavelmente essa diferença decorre do fato de que essa área é uma rampa inclinada no sentido noroeste, resultando em perda de materiais, nutrientes e sementes em sua porção leste e acúmulo no limite NO, propiciando o desenvolvimento de manchas de camada rasteira, composta por ervas (CORREA; MELO FILHO, 2004, p. 129).

Entre 2004 e 2011, ocorreu expressiva redução do EVI2 justamente na faixa N-NO, onde havia ocorrido o maior aumento no período anterior – provavelmente a camada herbácea não estava mais presente, o que pode ser resultado de um período com maior déficit hídrico –

suposição que encontra fundamento no fato de que a queda no EVI2 ocorreu em quase todos os locais, nesse período. A região situada mais a sul apresentou aumento no índice, em uma faixa NO-SE e em uma mancha a leste.

Considerando o período inteiro, de 1985 a 2011, observou-se ligeiro aumento no EVI2 nesse local, que não foi homogêneo e sim concentrado no limite N-NO e em sua porção sul, em duas faixas orientadas NO-SE e NE-SO (onde situa-se o valor máximo). O “coração” dessa área, sua porção centro-leste, não sofreu alteração digna de nota nesse período de 26 anos, o que manteve baixos os valores mínimo e médio do EVI2. O Local 2 é vizinho ao Local 1 e está abandonado para recuperação há mais de 50 anos, porém seu EVI2 médio é três vezes inferior ao do local vizinho – o que pode ser melhor entendido ao considerar-se outro fator já citado anteriormente: além da inclinação do relevo e da ausência de disciplinamento das águas pluviais, a remoção do solo foi mais profunda nesse local, chegando a 5,5 m. O que também explica a continuidade do valor bastante baixo do EVI2 mínimo, entre 1985 e 2011.

Local 3 – Figura 13.



### Variação ( $\Delta$ ) no EVI2

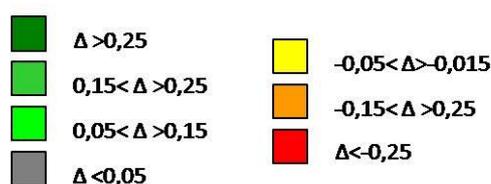


Figura 13. Variação do EVI2 no Local 3, nos períodos de estudo

|                | MÍNIMO (1985/2011) | MÁXIMO (1985/2011) | MÉDIA (1985/2011) |
|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| <b>LOCAL 3</b> | 0,05 / 0,10        | 0,26 / 0,57        | 0,07 / 0,11       |

Tabela 4. Local 3: valores do EVI2 nos anos de 1985 e 2011

Entre 1985 e 1993, observa-se duas tendências opostas no Local 3: aumento significativo do índice de vegetação em sua porção leste (chegando a mais de 0,25), enquanto ocorreu ligeira redução em sua porção NE – o que mais uma vez pode ser explicado, ao menos parcialmente, pelo relevo: trata-se de rampa suave orientada para oeste, o que levaria a perda de materiais na faixa leste e acúmulo a oeste.

Contudo, entre 1993 e 2004 observa-se tendência diferente, com aumento do EVI2 em mais da metade do local, concentrada em sua faixa sul e leste, com ápice no limite SE. Repetindo o que ocorreu nos locais 1 e 2, no período de 2004 a 2011 não ocorreu recuperação e sim ligeira queda no EVI2 do Local 3, que concentrou-se na faixa leste e SE, justamente onde houve maior aumento no período anterior.

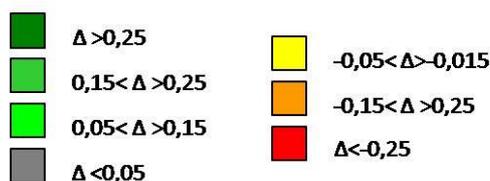
Considerando o período inteiro, de 1985 a 2011, houve aumento no EVI2 do local como um todo, sendo curioso que o valor mínimo do índice está bastante próximo do valor médio. O ponto com maior valor do EVI2 fica no limite oeste, o que poderia apoiar a hipótese de que estaria ocorrendo acúmulo de nutrientes nessa faixa, porém também observou-se aumento significativo na faixa leste do Local 3.

#### Local 4 – Figura 14.





### Variação ( $\Delta$ ) no EVI2



**Figura 14.** Variação do EVI2 no Local 4, nos períodos de estudo

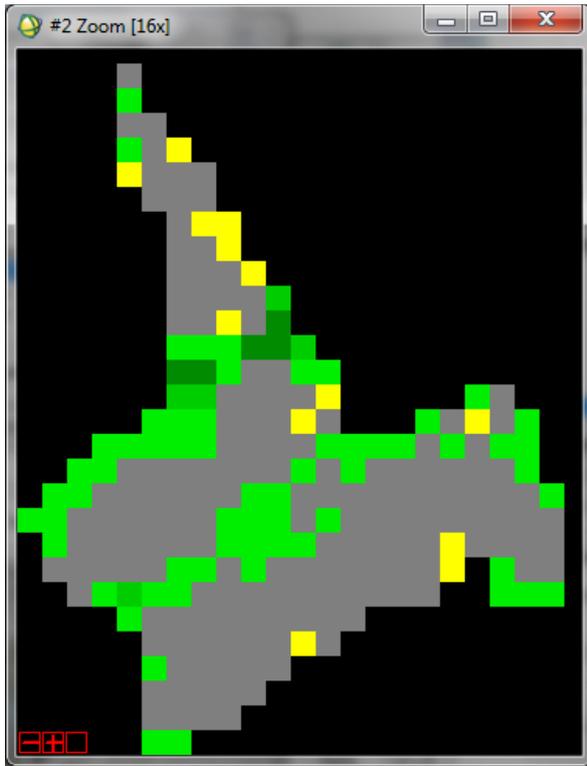
|                | MÍNIMO (1985/2011) | MÁXIMO (1985/2011) | MÉDIA (1985/2011) |
|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| <b>LOCAL 4</b> | 0,06 / 0,09        | 0,28 / 0,70        | 0,13 / 0,32       |

**Tabela 5.** Local 4: valores do EVI2 nos anos de 1985 e 2011

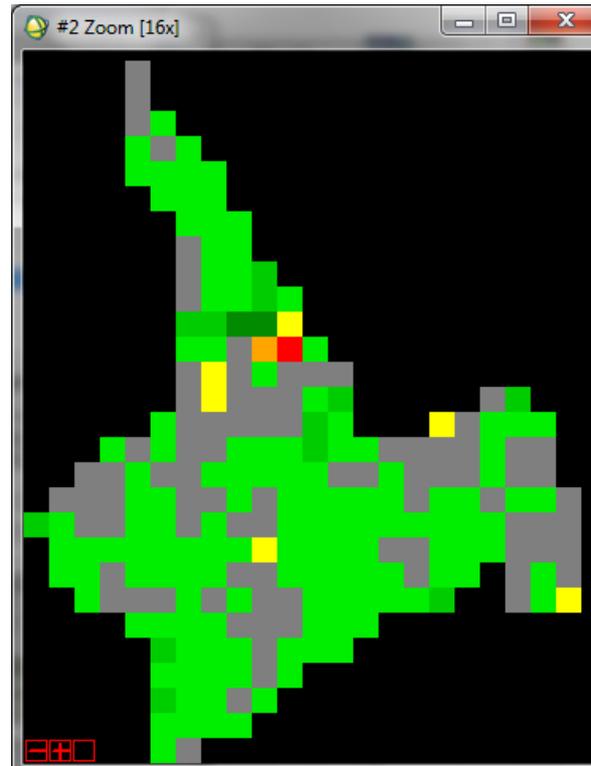
Conforme pode ser observado na Figura 14, no período de 1985 a 1993 houve redução no EVI2 na parte SE do Local 4, o que foi revertido no período seguinte, de 1993 a 2004, quando o local praticamente inteiro apresentou aumento significativo no índice. Entre 2004 e 2011, ocorreu aumento do EVI2 na faixa do local situada mais a sul, enquanto houve redução na faixa mais a norte. O balanço final, entre 1985 e 2011, foi de significativo aumento do EVI2 ( $>0,25$ ) em metade da extensão do Local 4, situada a sul e leste.

O Local 4 é o primeiro tratado aqui, em que o substrato não é de Latossolo, e sim de Cambissolo, que costuma ser empregado para leito de estradas (e não para aterros, como são os Latossolos). A profundidade de corte foi de 7,5 m (a segunda mais profunda entre os locais estudados) e a quantidade de matéria orgânica está entre as mais baixas entre os locais estudados, porém surpreendentemente foi o que apresentou maior aumento na média do EVI2, além do segundo maior aumento no valor máximo. É bastante improvável que uma recuperação tão expressiva tenha ocorrido onde houve remoção de 7,5 m do substrato, então se considera a possibilidade de que o local em que foi desenhado o polígono não seja o Local 4 do estudo de Corrêa e Melo Filho (2004; 2011).

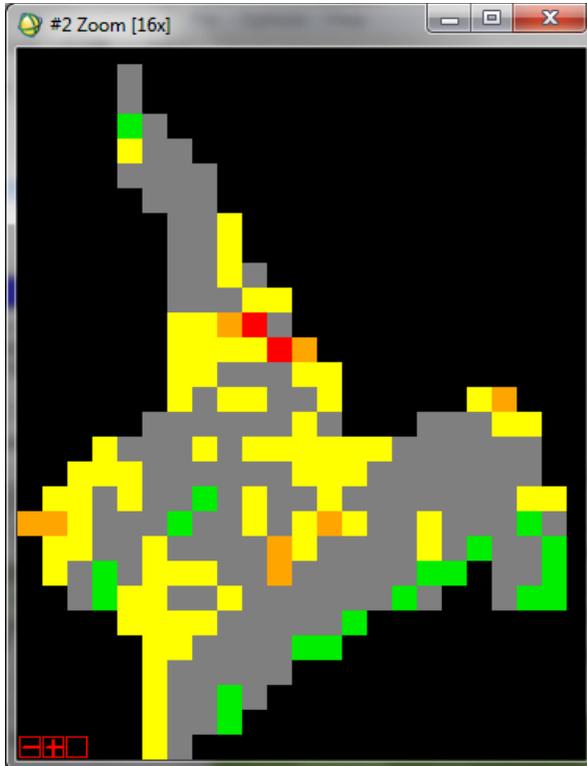
Locais 5 e 15 – Figura 15.



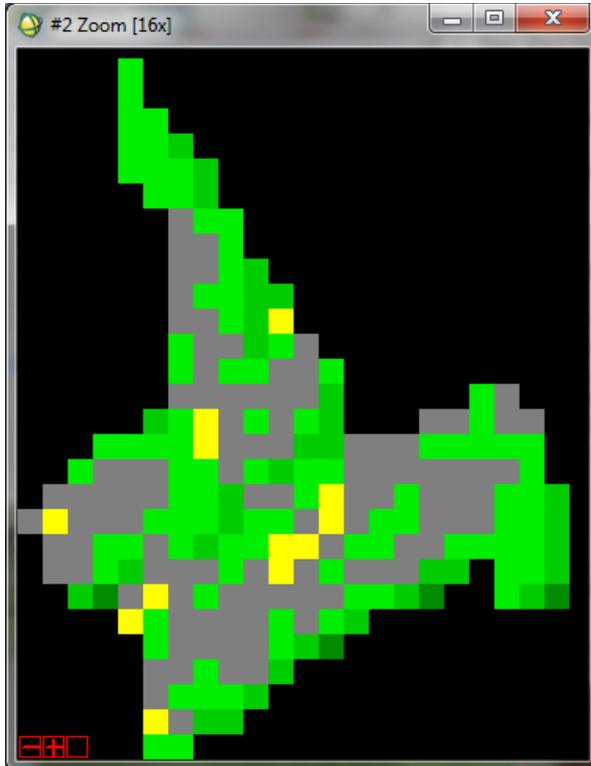
1985-1993



1993-2004

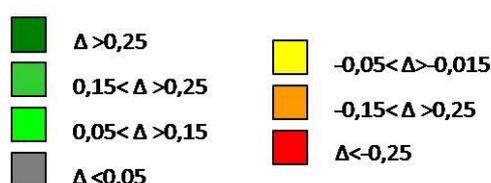


2004-2011



1985-2011

### Variação ( $\Delta$ ) no EVI2



**Figura 15.** Variação do EVI2 nos Locais 5 e 15, nos períodos de estudo

|                      | MÍNIMO (1985/2011) | MÁXIMO (1985/2011) | MÉDIA (1985/2011) |
|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| <b>LOCAIS 5 e 15</b> | -0,03 / 0,00       | 0,39 / 0,48        | 0,10 / 0,16       |

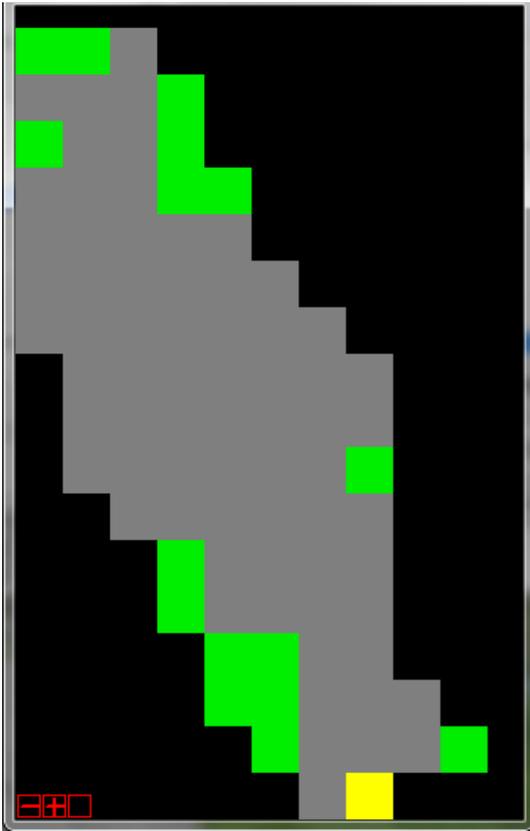
**Tabela 6.** Locais 5 e 15: valores do EVI2 nos anos de 1985 e 2011

Entre 1985 e 1993, os Locais 5 e 15 apresentaram aumento no EVI2 em duas faixas orientadas na direção NE-SO, que também são encontradas (com maior ou menor nitidez) nas demais subtrações. É possível que se trate de faixas que foram degradadas pela atividade de remoção do substrato ao seu redor, porém onde o solo não tenha sido removido – o que explicaria seu maior potencial de recuperação, em relação às áreas limítrofes nos próprios Locais. Além dessa área, houve alguma recuperação pontual também nos limites N, S e L.

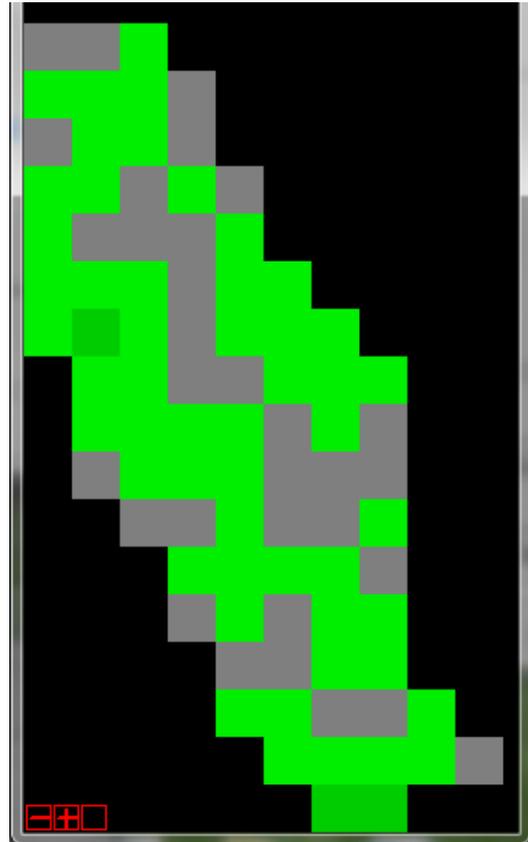
Entre 1993 e 2004, ocorreu aumento do EVI2 em aproximadamente  $\frac{3}{4}$  dos pixels, de forma bem distribuída, com algumas exceções que estão mais evidentes no balanço de todo o período. Entre 2004 e 2011, seguindo a tendência da maioria dos locais estudados, ocorreu redução no EVI2 em quase metade da área, concentrando-se nos locais em que havia alguma vegetação; a maioria dos demais pixels, especialmente as partes em que o solo está exposto, não apresentou alteração em grau considerado significativo para esta análise, assumindo cor cinza. A queda foi bem distribuída, tendo ocorrido inclusive em faixas que apresentaram aumento do EVI2 entre 1985 e 2004. Houve ligeiro aumento na faixa SE no limite do Local.

O balanço entre 1985 e 2011 foi positivo para mais da metade da extensão dos Locais 5 e 15, sendo que a extensão restante praticamente não apresentou alteração – provavelmente as faixas em que o solo foi de fato removido em profundidades que atingiram 9,5 m – o que explica a continuidade do valor reduzido do EVI2 mínimo, entre 1985 e 2011. O aumento se concentrou em duas faixas com orientação NE-SO, sendo que uma delas fica no limite SE da área. Outra faixa que concentrou aumento foi a situada no limite N da área. O valor máximo inicial do EVI2 foi o segundo mais elevado, o que se explica pela presença de faixas em que a vegetação foi apenas degradada pela lavra realizada ao seu redor.

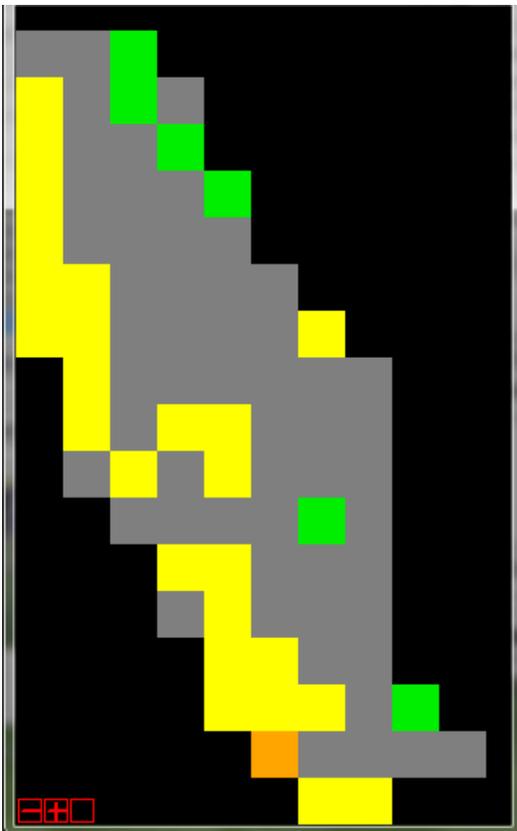
Local 8 – Figura 16.



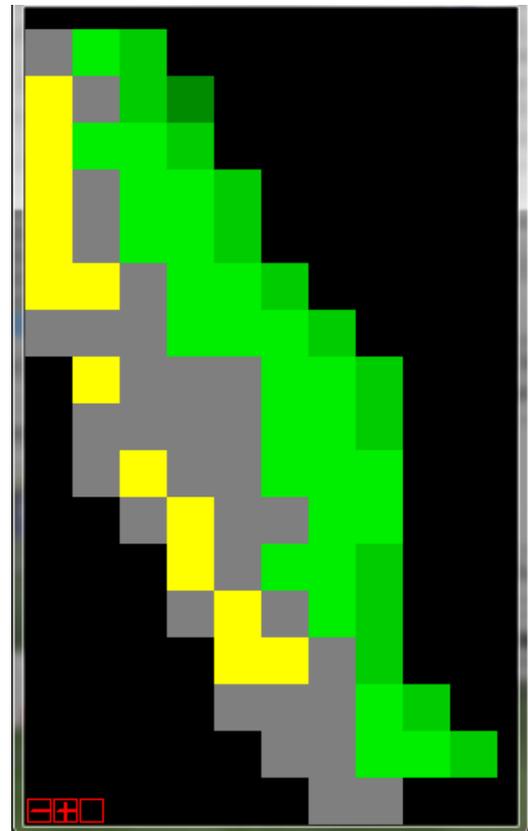
1985-1993



1993-2004



2004-2011



1985-2011

### Variação ( $\Delta$ ) no EVI2

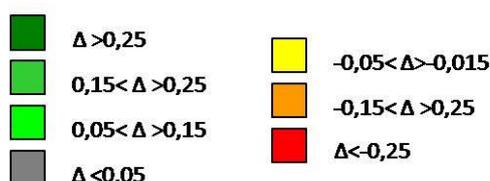


Figura 16. Variação do EVI2 no Local 8, nos períodos de estudo

|                | MÍNIMO (1985/2011) | MÁXIMO (1985/2011) | MÉDIA (1985/2011) |
|----------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| <b>LOCAL 8</b> | 0,02 / 0,05        | 0,21 / 0,38        | 0,10 / 0,17       |

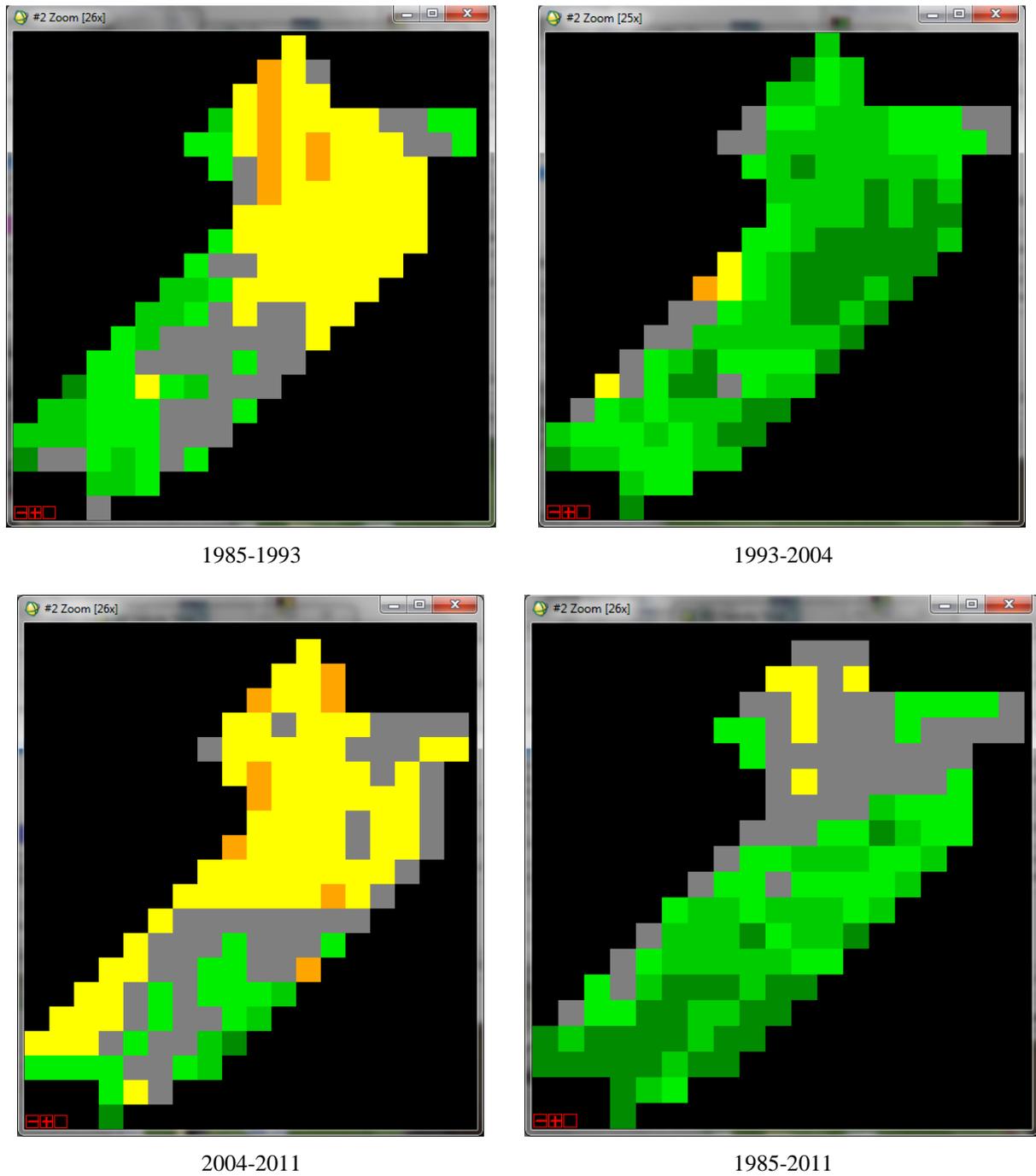
Tabela 7. Local 8: valores do EVI2 nos anos de 1985 e 2011

Entre 1985 e 1993, o Local 8 praticamente não apresentou alteração em seus valores de EVI2, tendo ocorrido apenas ligeiro aumento a N e SO. Entre 1993 e 2004, o quadro foi outro e ocorreu pequeno aumento do índice em mais da metade da área, de maneira distribuída. Entre 2004 e 2011, essa tendência foi revertida e ocorreu redução do índice, como na maioria dos demais locais. Essa redução concentrou-se no limite oeste do Local, em toda sua extensão N-S, representando aproximadamente 30% da área total.

O balanço para todo o período (1985-2011) foi positivo, como pode ser percebido tanto pela análise visual, quanto pelo incremento nos valores mínimo, máximo e médio do índice. Entretanto, esse aumento não foi homogêneo e sim concentrado em faixa N-S no lado leste, que ocupa aproximadamente metade da extensão do Local 8, enquanto na outra metade, no lado oeste, ou não ocorreu alteração, ou ocorreu ligeira regressão no valor do EVI2.

Por se tratar de área de Cambissolo cuja remoção do substrato esteve entre as mais rasas (1,5 m), que teve sua lavra encerrada há mais de 40 anos e que está inserida no Parque Nacional de Brasília (assim como os Locais 3 e 5/15), seria esperado que houvesse recuperação mais significativa. A ocorrência de voçorocas, assim como a pequena presença de matéria orgânica nesse Local, indica que não há controle das águas pluviais, o que provavelmente é fator importante para explicar a dificuldade encontrada para a recuperação.

Local 11 – Figura 17.



**Varição ( $\Delta$ ) no EVI2**

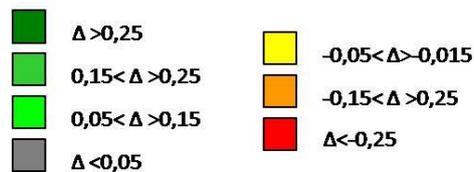


Figura 17. Variação do EVI2 no Local 11, nos períodos de estudo

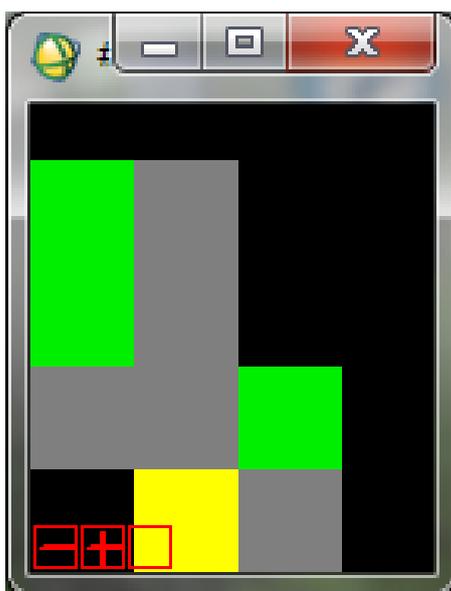
|          | MÍNIMO (1985/2011) | MÁXIMO (1985/2011) | MÉDIA (1985/2011) |
|----------|--------------------|--------------------|-------------------|
| LOCAL 11 | 0,01 / 0,05        | 0,32 / 0,98        | 0,11 / 0,25       |

Tabela 8. Local 11: valores do EVI2 nos anos de 1985 e 2011

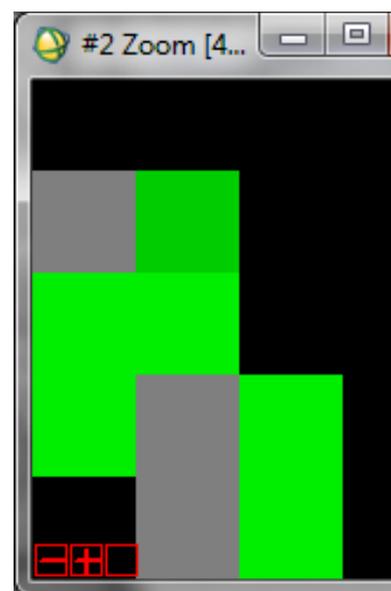
Entre 1985 e 1993, observou-se duas tendências distintas no Local 11: redução no EVI2 em uma mancha extensa na porção norte, que ocupa aproximadamente metade da extensão do local, e aumento em uma faixa a SO. Entre 1993 e 2004, ocorreu aumento do índice em praticamente toda a área, com manchas em que o aumento foi mais expressivo – p.ex., na mesma área em que ocorreu redução no período anterior. Entre 2004 e 2011 observou-se a mesma tendência da maioria dos demais locais, tendo ocorrido redução do índice em aproximadamente metade da extensão do local, concentrada em uma mancha a norte e uma menor a SO; ocorreu aumento em uma pequena mancha na parte sul.

O balanço para o período de 1985 a 2011 foi bastante positivo, ainda que não tenha sido uniforme – visto que a porção a norte e o limite oeste praticamente não apresentaram alteração e os valores mínimos do EVI2 continuaram baixos. Com exceção dessa área, o aumento foi expressivo: o valor máximo do índice foi encontrado neste local, e o aumento na média, apesar de não ter sido o maior, apresenta significância maior do que o dos locais 4 e 14, devido à extensão bastante superior do Local 11. A recuperação dessa área foi razoável, considerando-se que estava encerrada há 47 anos e a profundidade de remoção do substrato foi de 2,5 m. O fato dessa área ser vizinha à ARIE Riacho Fundo certamente contribuiu para a presença de matéria orgânica em quantidade significativa (para áreas degradadas por mineração) e ocorrência da maior quantidade de plantas, entre todos os locais estudados.

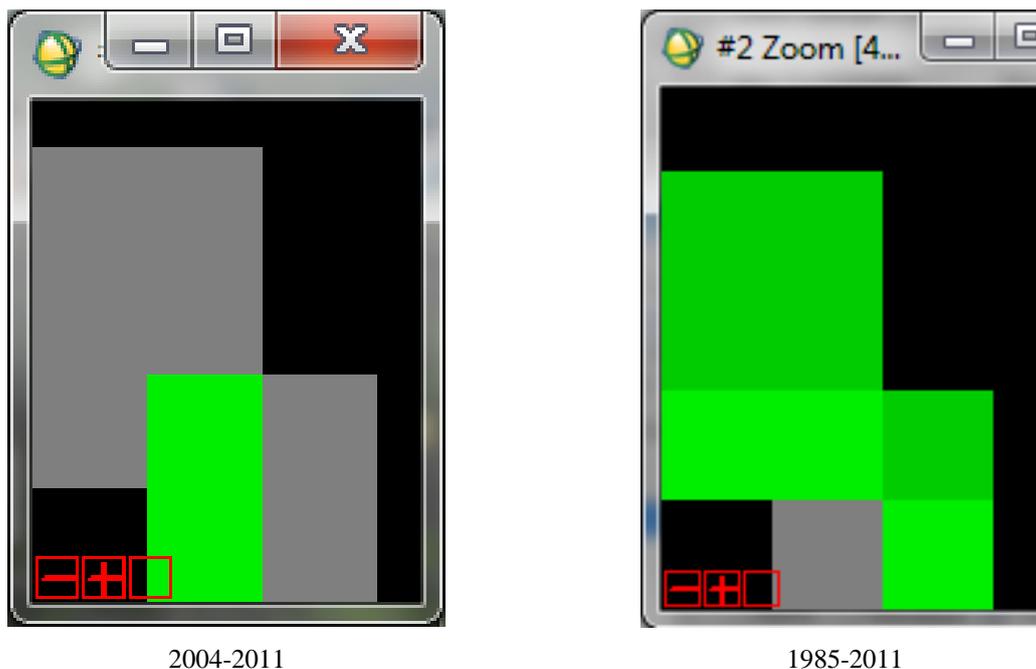
Local 14 – Figura 18.



1985-1993



1993-2004



### Varição ( $\Delta$ ) no EVI2

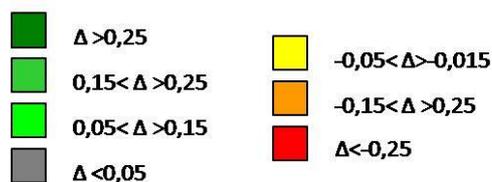


Figura 18. Variação do EVI2 no Local 14, nos períodos de estudo

|                 | MÍNIMO (1985/2011) | MÁXIMO (1985/2011) | MÉDIA (1985/2011) |
|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| <b>LOCAL 14</b> | 0,05 / 0,15        | 0,12 / 0,31        | 0,07 / 0,22       |

Tabela 9. Local 14: valores do EVI2 nos anos de 1985 e 2011

Entre 1985 e 1993, observou-se ligeiro aumento no EVI2 em 1/3 da área, com ligeira redução no limite sul, em 1/9 da área – foi a única redução observada no Local 14. Entre 1993 e 2004, ocorreu novamente um pequeno aumento no índice, agora em 2/3 da área. Entre 2004 e 2011, diferente da maioria dos locais estudados, não ocorreu redução do EVI2, porém o aumento foi pequeno e limitado a 22% da área. O balanço para o período de 1985 a 2011 foi bastante positivo e mais significativo na porção norte, porém foi bem distribuído por quase toda a área, com exceção de um ponto no limite sul, que manteve seu valor. O aumento nos valores mínimo, máximo e médio do índice parece satisfatório para o período de 35 anos desde o término da lavra, considerando-se que a remoção do substrato teve profundidade de 1,5 m.

Apesar de ter sido possível observar que ocorreu melhora do índice de vegetação nos locais estudados, o aumento foi pequeno e os valores absolutos do EVI2 continuam baixos – com algumas exceções já comentadas. Mesmo baixos, os valores máximos do índice, em todos os locais, são suficiente para indicar a ocorrência de Cerrado, ainda que ralo e de extensão limitada. As áreas que tiveram maior profundidade de solo removido para empréstimo de material/cascalheiras apresentaram recuperação ínfima ou mesmo nula, passados mais de trinta anos desde o término da lavra e abandono da área.

O contexto favorável de diversos locais (p. ex. estarem inseridos no Parque Nacional de Brasília, ou vizinhos à ARIE Riacho Fundo) não foi suficiente para superar as limitações decorrentes da remoção do solo, que é o substrato necessário para a recolonização das áreas pela vegetação. Confirmando tal consideração, na maioria dos locais estudados, as áreas com cor cinza são facilmente identificadas, em imagens de satélite ou em campo, como aquelas em que houve remoção do substrato – a correspondência é mais visível onde a tendência à recuperação é mais pronunciada e evidencia os locais em que encontra fatores limitantes.

Pouca mudança ocorreu nos valores mínimos encontrados – o que reafirma a existência de áreas em que não havia nenhuma presença de vegetação em 1985 e que permaneciam assim em 2011 –, enquanto os valores máximos e médios apresentam ligeiro aumento. Os valores máximos encontrados são razoáveis e poderiam indicar inclusive uma condição não-degradada, porém os valores médios apresentam uma realidade bem distinta. O valor médio de 0,06 no Local 2 evidencia a recuperação praticamente nula dessa área, no período de 26 anos transcorrido entre a obtenção das duas imagens. O valor médio de 0,16, para os Locais 5 e 15, ainda que superior ao do Local 2, também é desanimador, quando levado em consideração o contexto extremamente propício à recuperação em que essa área se encontra – inserida no Parque Nacional de Brasília.

## 6 CONCLUSÃO

Considerando que o potencial de regeneração do Cerrado é, em geral, superior ao de ecossistemas florestais, e que a vegetação do cerrado leva cerca de 30 anos para atingir a biomassa original, após ser desmatada (DURIGAN, 2005, p. 106-107), passados mais de 30 anos a recuperação observada das áreas de empréstimo/cascalheiras abandonadas foi tênue.

Esse resultado não causa surpresa, contudo, ao considerar-se que houve remoção do solo com profundidade de corte que chegou a ser superior a 9 metros. Removido o solo, restou o horizonte C, o regolito/manto de alteração, que não possui constituição e morfologia adequadas para a recolonização pela vegetação. Condições mínimas de solo são pré-requisito para a recolonização por espécies vegetais, de modo que o tempo para a recuperação das áreas degradadas pelo empréstimo de material/cascalheiras passa a ser o tempo do processo de pedogênese, que ainda deve levar muitas décadas até produzir as condições mínimas para sustento às espécies do Cerrado.

Considerando o processo erosivo apontado por Corrêa e Melo Filho (2004, p. 142), é possível que não ocorra naturalmente a pedogênese em regiões do Local 2, p.ex., que talvez continuem perdendo material em velocidade superior àquela em que o material se deposita.

Obstáculo bastante relevante à recuperação das áreas que tiveram o solo removido, é que o processo de maior importância para a revegetação das áreas de Cerrado é a rebrota a partir das raízes que permaneceram no solo (DURIGAN, 2005, p. 108). Como o solo foi removido, as raízes também o foram.

Corrêa e Melo Filho (2004, p. 153) apontaram a existência de bastante significativa correlação entre a presença de matéria orgânica e o número de espécies encontradas nos locais, porém lembram que é provável que ambos sejam decorrência da topografia, que concentra ou dispersa nutrientes e sementes. Os referidos autores ressaltam que é fundamental controlar as águas pluviais para minimizar a ocorrência de dispersão e permitir a recuperação das áreas, citando como exemplo a diferença observada entre os Locais 1 e 2: o primeiro é “uma cava fechada, com águas pluviais disciplinadas e sem sinal de erosão”, e apresenta maior presença de matéria orgânica entre os locais estudados, enquanto o segundo, que é seu vizinho, figura é uma longa rampa sem disciplinamento das águas e figura entre os locais com menor presença de matéria orgânica (ibid., p. 154). A diferença na recuperação dos Locais 1 e 2 foi apresentada no item anterior e é significativa – desconsiderando a porção situada na parte sul, que ainda não havia sido explorada na data da primeira imagem.

Analisando-se diversas áreas, foi possível perceber a influência de fatores externos na recuperação ou não da vegetação, a exemplo do período de 2004 a 2011, no qual todas as áreas apresentaram regressão no EVI2, ou no mínimo um aumento menor. Supõe-se que o fator atuante, nesse caso, tenha sido o clima, na forma de déficit hídrico mais pronunciado do que o habitual. Tal suposição deve-se ao fato de que as áreas estão distantes e parece pouco provável que algum outro fator pudesse atuar sobre todas com a mesma influência e intensidade semelhante.

O sensoriamento remoto e o processamento digital das imagens de satélite permitiram analisar espacialmente a recuperação nos locais estudados, distinguindo onde ocorreu – ou não – e quantificando essa recuperação. As imagens geradas pelo sensor Landsat TM possuem resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal bastante inferiores às que se encontram atualmente disponíveis para uso, porém possibilitam a realização de análises bastante satisfatórias, para diversas finalidades, tais como a do presente estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNSTEIN, L. S. et al. A New Method for Atmospheric Correction and Aerosol Optical Property Retrieval for VIS-SWIR Multi- and Hyperspectral Imaging Sensors: QUAC (QUick Atmospheric Correction). **International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings (25th)**. Seul, Coréia do Sul, p. 3549 – 3552, jul. 2005.

\_\_\_\_\_ et al. In-scene based atmospheric correction of uncalibrated VISible-SWIR (VIS-SWIR) hyper- and multispectral imagery. **Proceedings of the SPIE**, v. 7107, p. 710706-710706-7, 2008.

CAMPOS, José Eloi Guimarães. Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para a Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 41-48, março de 2004. Disponível em: <[http://sbgeo.org.br/pub\\_sbg/rbg/vol34\\_down/3401/1372.pdf](http://sbgeo.org.br/pub_sbg/rbg/vol34_down/3401/1372.pdf)>. Acesso em: dez. 2012.

CARNEIRO, Paulo Jorge Rosa; SOUZA, Newton Moreira de. Distribuição e localização dos materiais naturais de construção no Distrito Federal. In: CORRÊA, Rodrigo Studart; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello (Orgs.). **Mineração e áreas degradadas no cerrado**. Brasília: Universa, 2004. p. 49-68.

CORRÊA, Rodrigo Studart; BIAS, Edilson de Souza; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello (Orgs.). Áreas degradadas pela mineração no Distrito Federal. In: CORRÊA, Rodrigo Studart; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello (Orgs.). **Mineração e áreas degradadas no cerrado**. Brasília: Universa, 2004. p. 9-21.

CORRÊA, Rodrigo Studart; MELO FILHO, Benício. Aspectos ecológicos da sucessão secundária em áreas mineradas no cerrado. In: CORRÊA, Rodrigo Studart; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello (Orgs.). **Mineração e áreas degradadas no cerrado**. Brasília: Universa, 2004. p. 123-159.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. Levantamento florístico do estrato lenhoso das áreas mineradas no Distrito Federal. **Revista Árvore**: Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1099-1108, 2007.

DURIGAN, Giselda. Restauração da Cobertura Vegetal em Região de Domínio do Cerrado. In: GALVÃO, A. Paulo M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, Vanderley (Orgs.). **Restauração Florestal: Fundamentos e Estudos de Caso**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. p. 103-118.

EMBRAPA CERRADOS. **Mapa pedológico digital – SIG atualizado do Distrito Federal, escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo**. Adriana Reatto et al. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 31 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-51 11; n. 120).

ENVI. **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide (Version 4.7)**. White Plains: ITT Corporation, 2009. 44 f.

HUETE, Alfredo R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York: Elsevier, v. 25, p. 295-309, 1988.

\_\_\_\_\_ et al. A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York: Elsevier, v. 59, p. 440-451, 1997.

JIANG, Zhangyan et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, New York: Elsevier, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 15 out. 2008.

KAUFMAN, Yoram J.; TANRÉ, Didier. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 261-270, mar. 1992.

LEPSCH, Igo Fernando. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178 p.

MENESES, Paulo Roberto; ALMEIDA, Tati de (Orgs.). **Introdução ao Processamento de Imagens por Sensoriamento Remoto**. Brasília: UnB/CNPq, 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: set. 2012.

MENESES, Paulo Roberto. **Padrão de reflectância da vegetação, solos e água**. Texto de aulas – Curso de Especialização em Geoprocessamento. Brasília: Instituto de Geociências/UnB, 2012. 30 p.

VILLELA, Marco Aurélio Lessa. **Contribuição à compreensão do papel do geógrafo em planejamento ambiental: estágio no Núcleo Planos de Manejo/FF**. São Paulo, 2010. 90 f. Trabalho de Graduação Individual (Bacharel em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.