

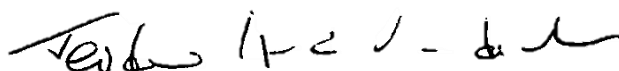
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO ÓPTICO E EM MICRO-ONDAS NO
RECONHECIMENTO DE EXSUDAÇÕES DE HIDROCARBONETOS NA BACIA DO
SOLIMÕES, REGIÃO DE CARAUARI, ESTADO DO AMAZONAS**

Lucas Vinicius Santos

Orientador: Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida

De Acordo:



Co Orientador: Carlos Roberto de Souza Filho

De Acordo:



Monografia

TF – 18/27

SÃO PAULO

2018

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao meu orientador Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida, que me deu todo o suporte para o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu co-orientador Carlos Roberto Souza Filho, pela disponibilização dos dados utilizados no projeto. Ao Gabriel Gutierrez, por todo apoio oferecido ao longo do ano.

Agradeço especialmente aos meus pais, Euzana e Luiz, que deram todo o apoio necessário para possibilitar a minha formação.

Aos meus irmãos, Heloisa e Rodrigo, por sempre estarem ao meu lado. À minha sobrinha Júlia, por ser um ar de renovação.

Aos meus amigos Aline, Matheus, Gustavo e Thais, por representarem a família que me conforta pelo prazer de estarmos juntos.

Aos amigos que encontrei trilhando o caminho das pedras: Tom, Pintolé, Escrota, Chuca, Indy, Sacolé e Baia. Obrigado por tornarem a jornada mais leve.

Ao meu fiel escudeiro Sancho Pança, quase irmão siamês de outra etnia, Yuri Matheus (Mama).

À T57, pelos bons momentos. Ao GGeo, pelas experiências que, mesmo efêmeras, produziram memórias inesquecíveis.

E, por fim, à mim. Por ter conseguido.

“steer alway from these rocks

we’d be a walking disaster”

RESUMO

O projeto consiste na análise da aplicabilidade de técnicas de sensoriamento remoto orbital na detectabilidade de possíveis exsudações de hidrocarbonetos (HCs) na Bacia do Solimões indicadas por gasometria na região do Campo de Gás do Juruá, no município de Carauari - AM. Para tanto, utilizou-se imagens de sensores ópticos multiespectrais e dados em micro-ondas para obtenção de Modelos Digitais de Superfície (MDS) e rede de drenagem.

A área de estudo está inserida na Bacia do Solimões, cuja compartimentação tectônica faz parte das bacias sedimentares fanerozóicas intracratônicas presentes na região do Amazonas. A área abrange a Formação Içá, constituída principalmente por arenitos friáveis amarelo-avermelhados finos a conglomeráticos, tendo siltitos associados de forma subordinada, além de argilitos com características de deposição continental em condições fluviais de alta energia e clima árido. Segundo a literatura, o sistema petrolífero da região é chamado de Barreirinha-Itaituba, sendo a região a terceira maior produtora de gás natural do país, possuindo reserva provada de 57,75 milhões de barris de petróleo e 46,66 bilhões de metros cúbicos de gás natural.

No projeto foram testadas imagens de diversos sensores, mas foram utilizadas principalmente imagens do sensor ótico RapidEye, e dos sensores de RADAR SRTM e ALOS PALSAR. Foram aplicadas técnicas de sensoriamento remoto às imagens ópticas multiespectrais, em uma abordagem geobotânica, envolvendo operações aritméticas entre bandas espectrais, além de análises por principais componentes (PCA). Estes processamentos foram aplicados com o objetivo de realçar possíveis anomalias espectrais na vegetação, causadas por exsudações de hidrocarbonetos. Além disso, com o objetivo de embasar as respostas encontradas na vegetação, foram aplicadas técnicas de geomorfometria sobre os Modelos Digitais de Elevação (DEM) e utilizados os dados geoquímicos (gasometria) oferecidos pela HRT Participações em Petróleo. As três fontes de dados foram integradas para testar a aplicabilidade da técnica na região.

ABSTRACT

The study focuses on the analysis of the applicability of orbital remote sensing techniques for detecting hydrocarbon seeps in Solimões Basin, using gasometry in the Gas Field of Juruá, Carauri city – AM. To this purpose, multispectral optical sensors images and microwave data were used to obtain Digital Surface Models (DSM).

The Solimões Basin's tectonic subset is part of the intracratonic phanerozoic sedimentary basins from Amazonas. The studied area includes the Içá Formation, consisting mainly of fine to conglomeratic reddish-yellow sandstones, with associations of siltstones, in addition to mudstone with characteristics of continental deposition in fluvial conditions of high energy and arid climate. According to the literature, the region's petroleum system is called Barreirinha-Itaituba, and it's the third largest producer of natural gas in the country, with a proven reserve of 57.75 million barrels of oil and 46.66 billion cubic meters of natural gas.

The project used images from the optical sensor RapidEye, in addition to RADAR SRTM and ALOS PALSAR sensors. Remote sensing techniques were applied to the multispectral optical images, in a geobotanical approach, involving arithmetic operations among spectral bands, and analysis by principal components (APC). These processes were applied with the objective of highlighting possible spectral anomalies in the vegetation, caused by hydrocarbon seeps. In order to support the results found in the vegetation, geomorphometry techniques were applied to the Digital Elevation Models (DEM) and the geochemical data (gasometry) offered by HRT Participações em Petróleo.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	6
2. METAS E OBJETIVOS	8
3. TRABALHOS PRÉVIOS	9
3.1. Geologia regional e geologia local	9
3.2. Contexto tectônico	13
3.3. Exsudações em áreas vegetadas e sua análise por sensoriamento remoto	14
3.4. Geoquímica	19
3.5. Geomorfometria	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1. Materiais	25
4.1.1. <i>Imagens ópticas multitemporais</i>	25
4.1.2. <i>Sensores de interferometria de micro-ondas</i>	26
4.1.3. <i>Geoquímica de Hidrocarbonetos Leves (gasometria)</i>	27
4.2. Métodos	27
4.2.1. <i>Geomorfometria</i>	27
4.2.2. <i>Gasometria e Geobotânica</i>	28
5. RESULTADOS OBTIDOS	32
5.1. Geoquímica (gasometria)	32
5.2. Geomorfometria	36
5.3. Geobotânica	48
5.4. Dificuldades encontradas e alterações nos objetivos iniciais	70
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	72
7. CONCLUSÕES	77
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1. INTRODUÇÃO

O projeto consiste na análise da aplicabilidade de técnicas de sensoriamento remoto orbital na detecção de possíveis exsudações de hidrocarbonetos (HCs) na Bacia do Solimões, indicadas por gasometria na região do Campo de Gás do Juruá, no município de Carauari - AM. Segundo Reis et al. (2006), a bacia intracratônica do Solimões faz parte das bacias fanerozoicas presentes na região do Amazonas, e sua história de sedimentação está associada a eventos tectônicos concentrados na borda da Placa Sulamericana que tiveram efeitos em seu interior, como epirogênese e reativação de arcos, além de deformações intraplacas, como antiformas e falhas reversas, que são importantes armadilhas estruturais para gás e petróleo. O sistema petrolífero proposto para a bacia do Solimões foi definido por Mello et al. (1994), e é chamado de Barreirinha-Itaituba. Outros autores, como Magoon e Dow (1994) dividiram o sistema petrolífero da região em dois, sendo eles o Jandiatuba-Juruá e o Jandiatuba-Uerê. De acordo com Barata & Caputo (2007) esta bacia do Paleozoico tem cerca de 950.000 km² de área total, com 480.000 km² de área prospectável para petróleo (óleo + gás + condensado). Dados da ANP (2018) indicam que a bacia é a terceira maior produtora de gás natural do Brasil, possuindo reserva provada de 57,75 milhões de barris de petróleo e 46,66 bilhões de metros cúbicos de gás natural.

Considerou-se na pesquisa o princípio de se ir do geral para o específico, verificando inicialmente a correspondência das anomalias geoquímicas com possíveis antiformas de grande porte, indicadas por geomorfometria sobre Modelos Digitais de Elevação (DEM) obtidos por interferometria de micro-ondas. A seguir, em maior detalhe, analisou-se a detectabilidade de possíveis anomalias geobotânicas associadas às anomalias geoquímicas em imagens orbitais multiespectrais ópticas.

A área de estudos (Figura 1.1) foi selecionada com base nos dados geoquímicos fornecidos pela HRT Participações em Petróleo S.A. em 2011, para a dissertação de mestrado de Mendes (2014). Como critério de seleção das áreas, utilizou-se a presença de anomalias dos índices correspondentes ao logaritmo C_2/C_3 e $Y0$ – dados pré-processados pela empresa responsável pelo levantamento bem como a disponibilidade de imagens ópticas sem nuvens ou névoa densa.

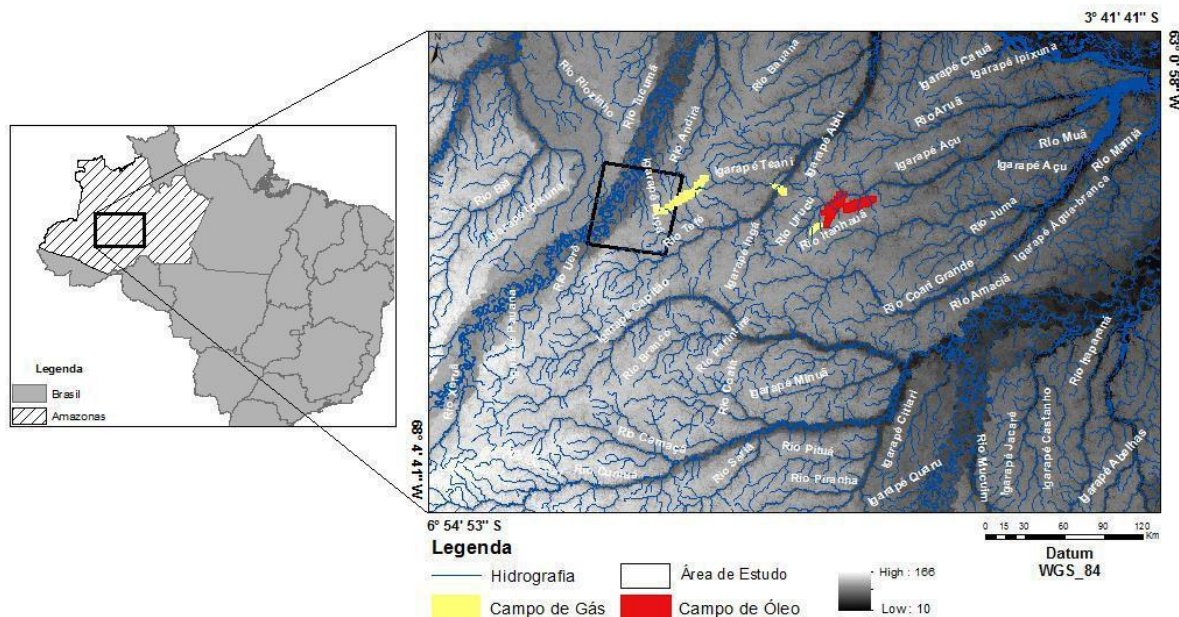


Figura 1.1 – Localização da área de estudo (retângulo preto) no contexto da bacia do Solimões e indicação de campos de óleo e gás conhecidos na região (fonte: Mendes, 2014)

No projeto, foram investigadas imagens dos sensores ópticos TM, OLI, ASTER, Sentinel 2 e, principalmente, RapidEye para estudar possíveis respostas da vegetação às exsudações de hidrocarbonetos, por meio de técnicas de sensoriamento remoto que se utilizam das bandas espectrais nas regiões do visível, do infravermelho próximo (NIR) e, quando disponíveis, do infravermelho de ondas curtas ou SWIR, sendo elas o SWIR 1 (região de 1650 nm) e SWIR 2 (região de 2200 nm). Dentre as análises geobotânicas iniciais, estão: (i) aritmética de bandas espectrais, com utilização de índices normalizados envolvendo as razões NIR/Red, NIR/Green, NIR/SWIR e Green/Blue, além da aplicação de índices de vegetação desenvolvidos por diversos autores para detecção de exsudações de hidrocarbonetos em áreas vegetadas; (ii) análise por principais componentes (PCAs), por meio da utilização da técnica proposta por Crósta et al. (2016), além do método sistêmico, desenvolvido por Almeida & Souza Filho (2004) e aplicação de PCAs sobre bandas pouco correlacionadas, conforme proposto por Rocchini (2007). Estes produtos foram, então, comparados nas diferentes datas de obtenção das imagens, a fim de observar possíveis variações no comportamento espectral da vegetação nas datas disponíveis. Os Modelos Digitais de Elevação (DEM), obtidos pelos sensores SRTM e ALOS PALSAR, foram utilizados conjuntamente com dados multitemporais das imagens de sensores ópticos, a fim de detectar mudanças no comportamento espectral da vegetação associadas a possíveis antiformas de grande porte, originadas a partir do Neojurássico, no Megacisalhamento do Solimões (Caputo e Silva, 1990), além de falhas transcorrentes de empurrão, originadas por eventos neotectônicos ocorridos no Cenozoico (Bezerra & Ribeiro, 2015).

A abordagem geomorfométrica foi feita com os métodos analíticos de Berger (1994) e Shahzad & Gloaguen (2010). A metodologia desenvolvida por Shahzad & Gloaguen (op cit.) tem como princípio a extração de redes de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas a partir de Modelos Digitais de Elevação (DEM) utilizando o software TecDEM (que, por sua vez, é uma ferramenta do software MATLAB) levando-se em consideração a íntima relação entre os padrões de drenagem e a geologia, geomorfologia e tectônica locais. A técnica visa a geração de mapas e índices morfométricos que subsidiam a interpretação das estruturas em subsuperfície. Foram utilizadas, então, três fontes de informação para compor um conjunto regional e integrado de dados, visando a prospecção por sensoriamento remoto de exsudações de hidrocarbonetos na região estudada, em análise da aplicabilidade dos métodos testados na prospecção de petróleo na área de estudo.

2. METAS E OBJETIVOS

O projeto tem como objetivo geral testar a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto óptico e em micro-ondas na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Solimões, na região do Campo de Gás do Juruá, localizado no município de Carauari – AM. Entre os objetivos específicos estão a análise das relações entre anomalias de gasometria – que aqui entram como dado de campo – com estruturas potencialmente formadoras de armadilhas para os HCs, identificadas por geomorfometria em Modelos Digitais de Superfície, além das alterações na resposta espectral e no desenvolvimento da vegetação causadas por exsudações de hidrocarbonetos, em uma abordagem geobotânica.

3. TRABALHOS PRÉVIOS

3.1. Geologia regional e geologia local

A área de estudo está inserida na Bacia do Solimões, cuja compartimentação tectônica faz parte das bacias sedimentares fanerozóicas intracratônicas presentes na região do Amazonas – a saber: Bacia do Amazonas, Bacia do Solimões, Bacia do Acre e Bacia do Alto Tapajós. A bacia está locada, principalmente, no estado do Amazonas, abrangendo uma área de aproximadamente 950.000 km². Em sua porção oeste, é limitada pelo Arco Iquitos, separando-a da Bacia do Acre, enquanto na porção leste é limitada pelo Arco Purus que, por sua vez, a separa da Bacia do Amazonas. Já a região setentrional bordeja as rochas proterozóicas do escudo das Guianas, enquanto na região meridional bordeja as rochas do Escudo Brasil-Central (Reis et al., 2006). Segundo dados da ANP, a Bacia do Solimões é a terceira maior produtora de gás natural do país, possuindo reserva provada de 57,75 milhões de barris de petróleo e 46,66 bilhões de metros cúbicos de gás natural.

A Bacia do Solimões recobre duas províncias geocronológicas pertencentes ao Cráton Amazônico, sendo elas a Província Rondônia-São Inácio e a Província Rio Negro-Juruena, que fazem parte do Escudo Brasil-Central ao sul, e do Escudo das Guianas ao norte, respectivamente. A Bacia do Solimões é subdividida em duas sub-bacias, denominadas Juruá e Jandiatuba, que são separadas pelo Arco Carauari (Reis et al., 2006). Eiras (2005) descreve o preenchimento sedimentar da Bacia do Solimões com espessura variando de 3.800 m (sub-bacia do Juruá) a 3.100 m (sub-Bacia de Jandiatuba). Segundo o autor, a sub-bacia Juruá, que se encontra na região a leste do Arco Carauari, foi melhor estudada pelo fato de que há maior incidência de províncias gaseíferas no local, como as de Juruá e Urucu.

No preenchimento da bacia há duas sequências de primeira ordem, sendo a principal de idade paleozóica e a secundária de idade mesozóico-cenozóica. A Figura 3.1.1 apresenta a coluna estratigráfica da região, enquanto a Figura 3.1.2 mostra a seção geológica longitudinal da Bacia do Solimões, apresentando a Província Gaseífera do Juruá e do Urucu, além das sub-bacias de Jandiatuba e Juruá.

A história da sedimentação na Bacia do Solimões está associada a eventos tectônicos concentrados na borda da Placa Sulamericana, que tiveram efeitos em seu interior, como epirogênese e reativação de arcos, além de deformações intraplaca, como anticlinais e falhas reversas, que são importantes trapas estruturais para gás e petróleo naquela bacia. A estratigrafia da Bacia do Solimões pode ser descrita em suas sequências

de segunda ordem, que apresentam discordâncias entre si. São elas: (I) Sequência Ordoviciano, (II) Sequência Siluro-devoniana, (III) Sequência Devoniana-carbonífera, (IV) Sequência Permo-carbonífera, (V) Sequência cretácea e (VI) Sequência Terciária (Reis et al., 2006).

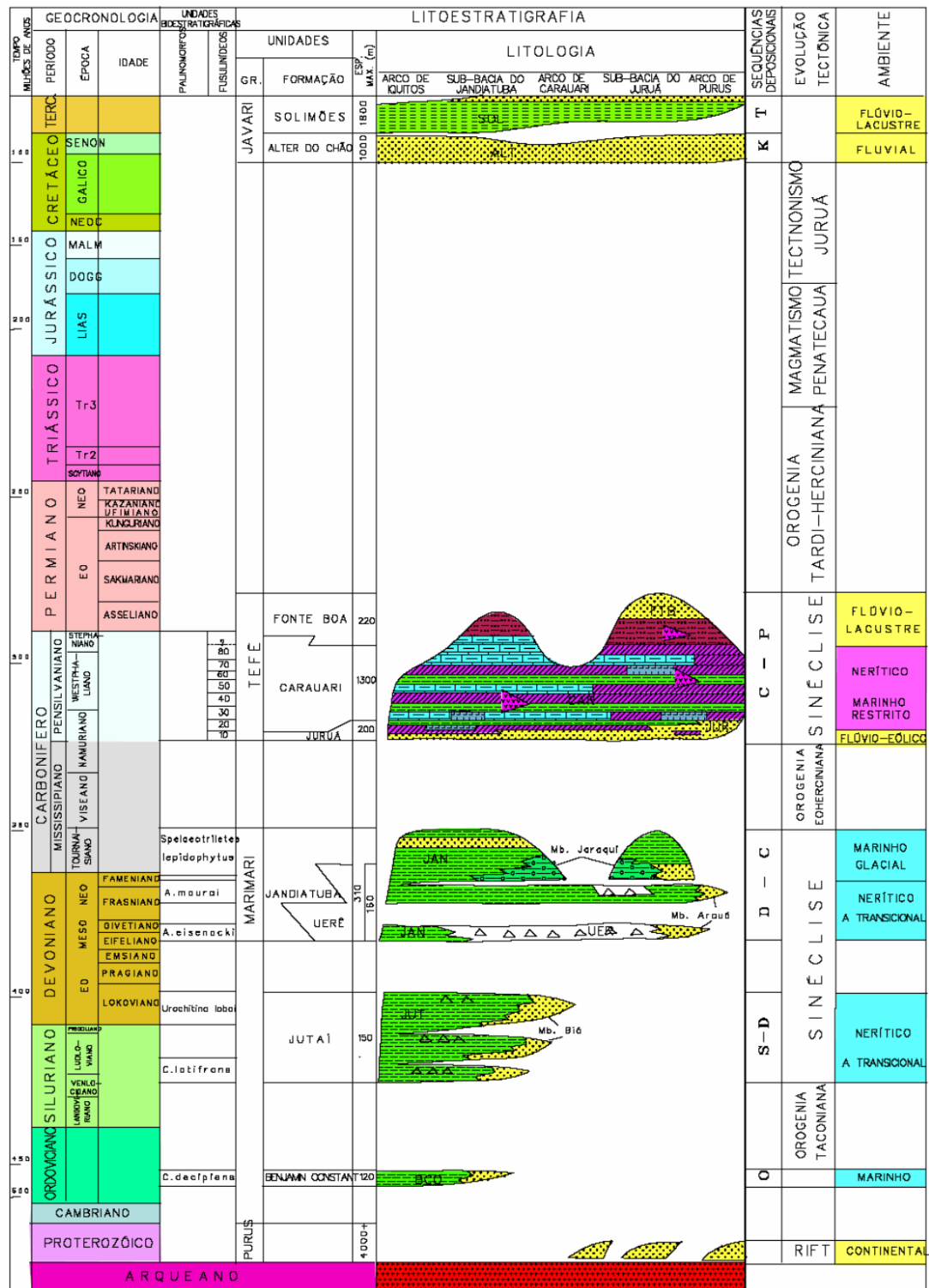


Figura 3.1.1 – Carta estratigráfica da Bacia do Solimões. Extraído de Eiras (1996). Modificado por Barata et al., 2007.

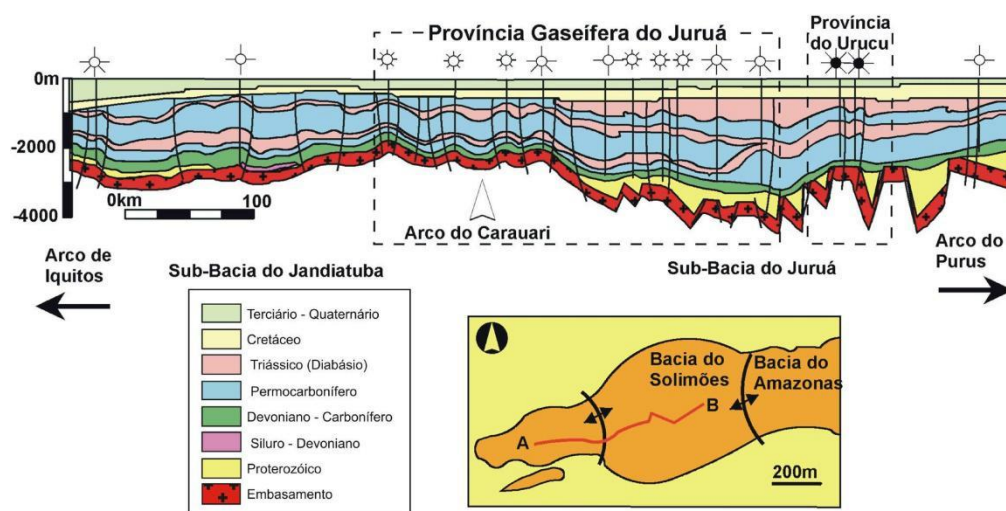


Figura 3.1.2 – Seção geológica longitudinal da bacia do Solimões, com destaque para os diferentes estágios de preenchimento. Extraído de Eiras (1996). Modificado por Reis et al. (2006).

O sistema petrolífero da região é chamado Barreirinha-Itaituba, e foi definido por Mello et al. (1994) como pertencendo à Bacia do Solimões. As rochas geradoras são folhelhos marinhos neodevonianos pertencentes ao Membro Barreirinha, Formação Curuá. As rochas reservatório, por sua vez, são arenitos eólicos de idade pensilvaniana pertencentes à Formação Itaituba, além dos arenitos deltaicos pertencentes a Formação Monte Alegre. Por fim, as rochas selantes são representadas pelos evaporitos pertencentes à Formação Itaituba (Barata et al., 2007). A Figura 3.1.3 representa a carta de eventos que teria originado o sistema petrolífero Barreirinha-Itaituba.

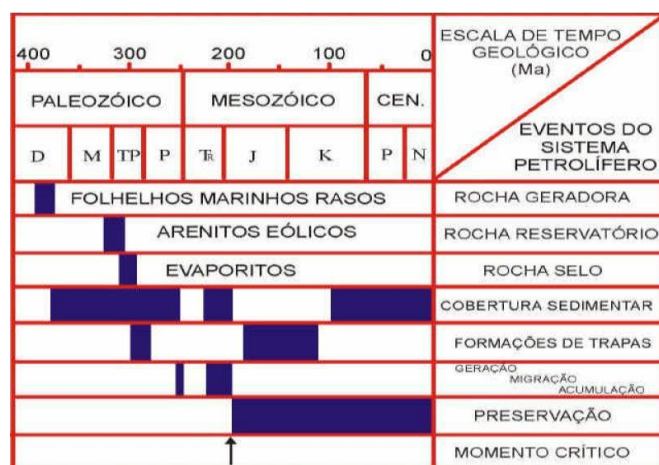


Figura 3.1.3 – Carta de eventos relacionados a gênese do sistema petrolífero Barreirinha-Itaituba. Extraído de Barata et al., 2007.

O polígono que define a região de interesse abrange uma área de aproximadamente 2.500 km², correspondendo à Área 5 da Figura 3.1.4, na região do município de Carauari, Amazonas. O Campo de Gás do Juruá encontra-se próximo ao polígono de interesse, à N-NE da Área 5. A geologia local é restrita apenas aos depósitos flúvio-lacustres da Formação Içá, bem como aos terraços fluviais e aos depósitos de planícies aluvionares, de idade quaternária que ocorrem na região.

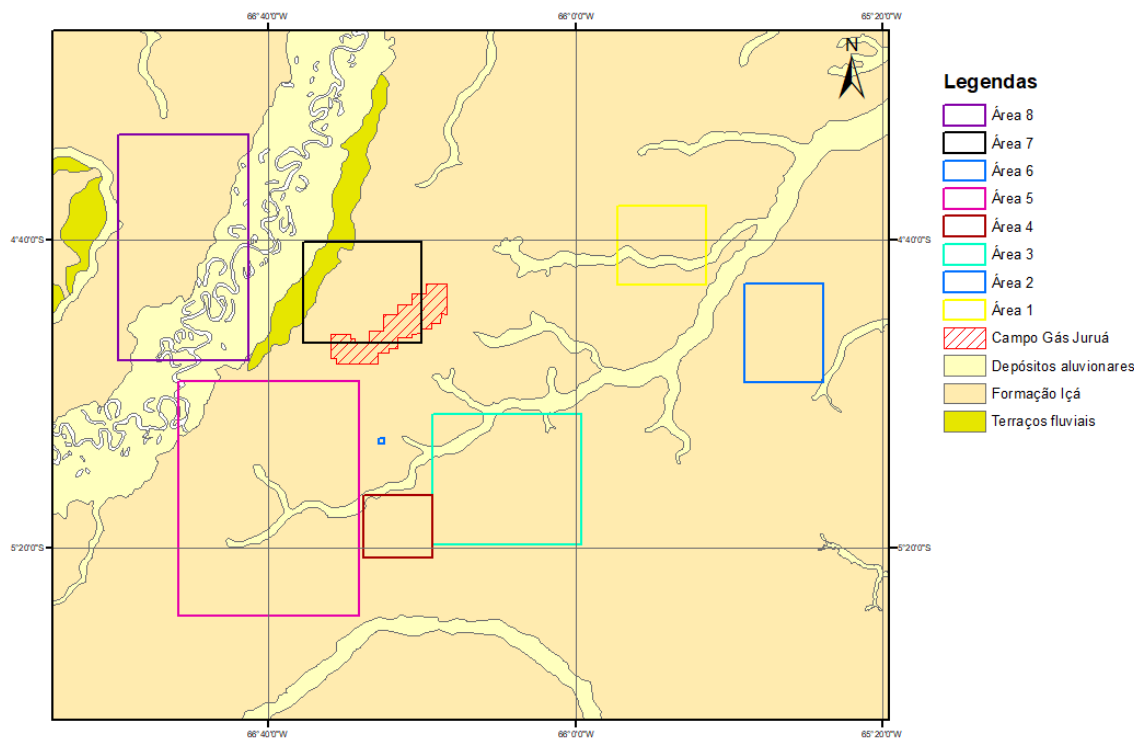


Figura 3.1.4 – Mapa geológico regional. Destaca-se a presença do rio Juruá, cuja orientação geral na região é NE-SW, além do polígono que delimita o campo de gás do Juruá, à N-NE do polígono de interesse. Mapa extraído do banco de dados Geobank (CPRM).

A Formação Içá, primeiramente definida por Maia et al. (1977), constitui-se principalmente por arenitos friáveis amarelo-avermelhados finos a conglomeráticos, tendo siltitos associados de forma subordinada, além de argilitos com características de deposição continental em condições fluviais de alta energia e clima árido. Os terraços fluviais, por sua vez, são caracterizados por extensos depósitos de argila, areia e cascalho. Em geral, encontram-se inconsolidados a semi-consolidados com espessuras de até dezenas de metros. Os depósitos de planícies aluvionares possuem uma extensa cobertura atrelada aos rios que fazem parte das bacias do Solimões e Amazonas. As bacias dos rios Madeira, Purus, Solimões, Japurá, Juruá, Jutai, Amazonas, Uatamã e Jatapu são as mais expressivas na região. São caracterizadas por sedimentos arenosos e argilosos que variam de inconsolidados a semi-consolidados, com níveis de cascalho e matéria orgânica, que se concentram em morfologias de planícies sedimentares de canais meandantes, lagos e meandros abandonados (Reis et al., 2006). As armadilhas estruturais de gás e petróleo

presentes na região tratam-se, de modo geral, de anticlinais pertencentes a blocos altos de falhas inversas com direção NE-SW, que se desenvolveram durante o Megacisalhamento do Solimões, conforme mostrado na Figura 3.1.2 (Barata et al, 2007).

3.2. Contexto tectônico

Durante a transição do Oligoceno para o Mioceno (há aproximadamente 27 milhões de anos), a Plataforma Sulamericana começou a sofrer os efeitos de um regime neotectônico transcorrente, sucessor ao regime paleotectônico extensional iniciado no Mesozoico. Este regime foi responsável pela movimentação de estruturas antigas, de idade Pré-Cambriana, que incluem os arcos e altos estruturais responsáveis pelas compartimentações na província Amazonas-Solimões, conhecidas como Bacia do Amazonas, Bacia do Solimões e Bacia do Acre, que se estendem até as bacias subandinas (Cunha, 1988; Bezerra & Ribeiro, 2015).

A ocorrência da reativação de estruturas antigas em eventos neotectônicos acarretou na geração de bacias responsáveis por abarcar a deposição de sedimentos de idades variando do Mioceno ao Holoceno. Tais feições foram denominadas como Bacia Cenozoica Solimões, Bacia Içá e Bacia do Rio Branco-Rio Negro (Bezerra, 2003 e Bezerra & Ribeiro, 2015). As estruturas que exerceram papel importante neste processo e que se estendem até a Amazônia ocidental são os lineamentos Tacutu e Madeira, de orientação NE-SW, o lineamento da Serra do Cachimbo, descrito por Silva et al. (1980), de direção NW-SE (coincidente com o Arco Purus), além do arco Carauari, que também possui orientação NW-SE. A evolução geotectônica destas bacias pode ser dividida em quatro intervalos de tempo distintos, sendo os dois primeiros ligados ao soerguimento da cordilheira andina e os dois últimos aos eventos neotectônicos ocorridos na transição Mioceno-Holoceno.

O primeiro evento, que se estendeu do Chattiano ao Serravalliano-Tortoniano (27-11,8 Ma), caracterizou-se pelo soerguimento da cordilheira andina, que resultou na subsidência flexural da porção à leste da cordilheira, que foi seguido pelo surgimento de uma área subsidente entre o sopé da cordilheira e o Arco Purus, na Amazônia Ocidental, denominada de Lago Pebas. Neste período, os sedimentos do proto-Amazonas e do proto-Solimões depositaram-se até o Tortoniano, gerando a Formação Solimões. O segundo evento, por sua vez, ocorreu entre o Serravalliano-Tortoniano e o Messiniano (11,8 a 7 Ma), e teve seu início com a compensação isostática, através de um soerguimento periférico (alto flexural, que provavelmente corresponde ao Arco Iquitos). O evento foi responsável pelo soerguimento regional do Lago Pebas, processo responsável por expor as sequências miocênicas da Formação Solimões (Chang, 1992; Bezerra & Ribeiro, 2015).

O terceiro intervalo ocorreu no final do Mioceno, do Messiniano ao Piacenziano (7 a 2,5 Ma). No período, o interior da placa Sul-Americana começou a sofrer os efeitos do regime de transcorrência neotectônico, caracterizado por um primeiro pulso cinemático predominantemente transpressivo, com eixo de extensão orientado na direção NNE-SSW. As drenagens invertidas ficaram restritas a um sistema fluvial arreico (Bacia Içá), no qual uma rede de canais desaguava em regiões de pântanos com lagos e deltas lacustres, dando origem à Formação Içá (Bezerra & Ribeiro, 2015). O último período, ocorrido entre o Piacenziano e o Holoceno (2,5 Ma-presente), foi caracterizado por um segundo evento cinemático neotectônico de caráter transtensivo. As antigas redes de drenagem foram capturadas por falhas e lineamentos de direção NW-SE, posteriormente se colocando em outras estruturas de direção E-W (Bezerra, 2003; Bezerra & Ribeiro, 2015).

3.3. Exsudações em áreas vegetadas e sua análise por sensoriamento remoto

Exsudações de hidrocarbonetos (HCs) – em inglês *seeps* ou *seepages* – podem ser definidas como processos de ascensão de HCs, que ocorrem na presença de espaços permeáveis que possibilitam escape dos fluidos das rochas reservatório para a superfície. Os caminhos permeáveis podem ser poros de rochas, reservatórios rompidos, intrusões, domos salinos, inconformidades estratigráficas, falhas, juntas e acamamentos interconectados (Link, 1952; Thompson et al., 1994). Além disso, os hidrocarbonetos podem migrar na forma de bolhas, em associação a águas subterrâneas, conhecidos como coloides. As moléculas de HC mais leves (metano, etano, propano, butano e pentano ou C1, C2, C3, C4 e C5) migram na fase gasosa, formando *microseepages*. Já os hidrocarbonetos pesados (> C5) migram em fase líquida, formando os *macroseepages* (Souza Filho et al., 2008). A Figura 3.3.1, extraída de Khan e Jacobson (2008), ilustra o processo de ascensão de hidrocarbonetos para a superfície por meio de falhas, fraturas e limites estratigráficos.

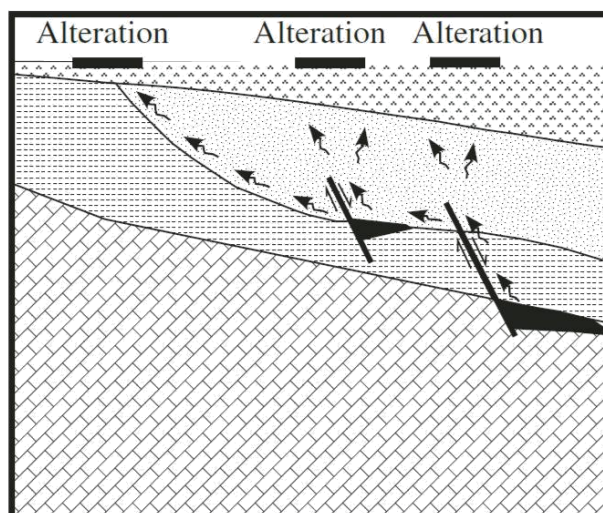


Figura 3.3.1 – Ilustração indicando a migração de HCs em direção à superfície por meio de falhas, fraturas e limites estratigráficos. Extraído de Khan e Jacobson (2008). Modificado de Schumacher (1999).

Segundo Schumacher (1996), bactérias e outros microorganismos encontrados nos solos e sedimentos são importantes no processo de oxidação dos hidrocarbonetos, o que pode acontecer de duas maneiras metabólicas distintas. A primeira ocorre com a oxidação dos HCs por bactérias aeróbicas para formação de CO_2 e bicarbonato, que eventualmente são precipitados como carbonatos, e a segunda ocorre com a redução de sulfato para H_2S pela ação bacteriana, uma vez que há falta de oxigênio nos sedimentos e fluidos que preenchem os poros. Estas mudanças podem alterar de maneira significativa o Eh e o pH do meio que está sob efeito dos HCs, alterando os campos de estabilidade de alguns minerais, o que favorece a solubilização de alguns e precipitação de outros. As principais alterações consequentes que se manifestam em solos e sedimentos sob influência de HCs são: (i) anomalias microbiológicas, com formação de “*paraffin dirt*”; (ii) mudanças mineralógicas, como gênese de calcita, pirita, óxidos magnéticos e sulfetos, além de anomalias de urânio e enxofre elemental; (iii) branqueamento de solos avermelhados; (iv) argilas derivadas de alteração; (v) mudanças eletroquímicas; (vi) anomalias radioativas; (vii) anomalias biogeoquímicas e geobotânicas. A Figura 3.3.2 ilustra um modelo generalizado de alterações geoquímicas e geofísicas em solos e sedimentos induzidas por exsudações de hidrocarbonetos.

A vegetação, por sua vez, responde a condições de estresse do meio por alterações metabólicas e morfológicas. Segundo Mora (2014), diferentes espécies de plantas respondem a poluições do ambiente de maneiras distintas. Fatores como intensidade, duração e natureza da exposição ao poluente também são importantes para o nível de estresse da vegetação. Baker (1970) definiu diferentes toxicidades aos HCs, baseando-se no conteúdo de componentes de baixo ponto de ebulição, insaturados, aromáticos e ácidos. Quanto maior a concentração destes compostos, maior a toxicidade do óleo para a

vegetação, que sofre alterações relacionadas tanto a transpiração e taxa fotossintética, reduzindo-as, quanto a respiração, que pode aumentar ou diminuir dependendo da espécie da planta ou do tipo de HC poluente.

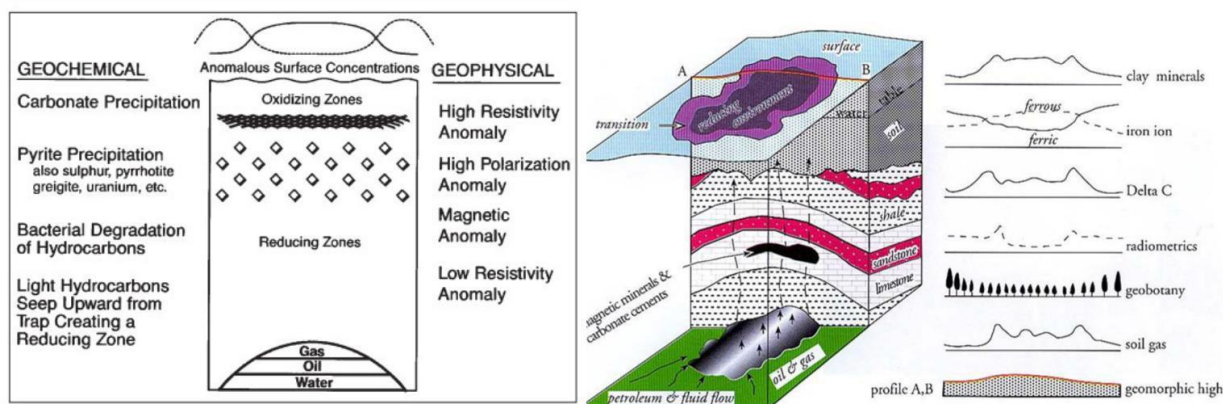


Figura 3.3.2 – (Esq.) Esquema mostrando as principais alterações geofísicas e geoquímicas em solos e sedimentos causadas pela presença de hidrocarbonetos em subsuperfície. Extraído de Schumacher (1996). (Dir.) Modelo generalizado de microseepage de HCs e suas manifestações em superfície. Extraído de Yang (1999), modificado por Mora (2014).

Noomen et al. (2012) concluíram que a área foliar da vegetação decresce conforme a aproximação do foco da exsudação. A 10 m de distância, a área foliar corresponde a 20% dos arredores, predominando solo exposto. Entre 20 e 30 m da exsudação, a cobertura vegetal sobe para 100%. A diversidade das espécies também é alterada, diminuindo até 10 m de distância da exsudação e se estabilizando em um número de espécies médio entre 20 e 30 m de distância. O fenômeno foi observado como um “halo verde” ao redor da exsudação, formando uma área circular dominada por solo exposto ao redor do foco da exsudação, com raio de 10 m, e uma quantidade média de espécies dominantes entre 20 e 30 m de distância. A Figura 3.3.3 mostra os gráficos resultantes do experimento.

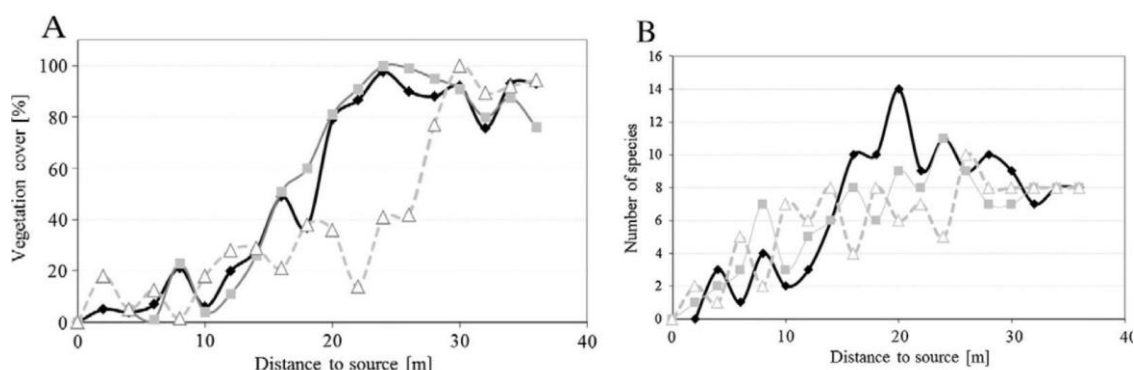


Figura 3.3.3 – A: Gráfico de área foliar (cobertura vegetal) pela distância da exsudação. B: Gráfico de diversidade de vegetação pela distância da exsudação. Extraído de Noomen et al. 2012.

Noomen et al. (2008) recriaram um ambiente de exsudação de hidrocarbonetos em área vegetada, utilizando uma plantação de milho e trigo, com a finalidade de analisar a

resposta destas espécies sob regime de poluição de HCs. Houve, como resultado da injeção de HCs na cultura de milho, diminuição dos seguintes parâmetros: (i) concentração de O₂, indo de 20% para 2,5%; (ii) altura das plantas, reduzidas em 22%; (iii) cobertura do dossel e número de folhas por espécie, diminuídos em 10% e (iv) teor de clorofila, diminuído em 44%. A cultura do trigo, por sua vez, teve o número de folhas a uma distância de 50 cm do foco da exsudação artificial diminuída em 27%, e o teor de clorofila em 50%. A água foliar, por sua vez, não sofreu alterações significativas (Tabela 3.3.1).

Tabela 3.3.1 – Características médias do dossel para cada uma das espécies. Extraído de Noomen et al. 2008

Distance to source (cm)	Plant height (cm)	Canopy cover (%)	Number of leaves	Total chlorophyll (mg g ⁻¹)	Leaf moisture* (%)
Maize					
0-60	80.0 ± 23.0	67.2 ± 17.0	8.3 ± 1.2	1.77 ± 0.2	83.0 ± 0.6
61-125	97.7 ± 11.6	75.1 ± 1.0	9.2 ± 0.6	3.38 ± 0.2	—
≥126	102.2 ± 3.2	75.2 ± 0.3	9.5 ± 0.4	3.17 ± 0.4	83.3 ± 1.3
Wheat					
0-60	47.2 ± 4.0	40.3 ± 13.8	4.4 ± 0.8	2.03 ± 0.3	74.8 ± 2.1
61-125	47.5 ± 3.8	46.9 ± 0.6	4.7 ± 0.6	4.03 ± 0.2	—
≥126	48.0 ± 2.2	42.5 ± 1.8	6.0 ± 1.0	4.03 ± 0.3	74.3 ± 1.6

A utilização de imagens multiespectrais e hiperespectrais para análise de áreas continentais influenciadas por *microseepages*, no sistema solo-vegetação, foi abordada em detalhe por diversos autores. Os dados multiespectrais mais comuns para esta finalidade são de sensores orbitais como o Landsat TM. Entretanto, a baixa resolução espectral destes dados configura uma limitação para caracterização dos efeitos diretos e indiretos dos *microseepages* em superfície. Uma das alternativas para análise destas regiões, portanto, são os dados ASTER, que não foram amplamente explorados para esta finalidade, mas mostram-se promissores (Souza Filho et al., 2008).

Algumas das aplicações de técnicas de sensoriamento remoto para alterações de superfície, ocorridas principalmente em solos e sedimentos sob efeito de HCs, são: (i) detecção de carbonatos por suas feições diagnósticas no intervalo do SWIR (2,34 µm) (van der Meer et al., 2002); (ii) detecção de descoloração de solos avermelhados por meio da análise do comportamento espectral da rocha ou solo na região do visível, em função da perda de Fe³⁺, onde ocorre um decréscimo significativo do gradiente de reflectância no visível, pois hematita, goethita e limonita, que tendem a respostas espectrais decrescentes da radiação vermelha para a azul, são removidas do sistema (Segal et al., 1986; van der Meer et al. 2002; Souza Filho et al., 2008) e (iii) detecção de argilominerías, como caulinita, que pode ser identificada por possuir duas duplas de absorção diagnósticas na região do

SWIR, a saber: 1,40-1,42 μm e 2,162-2,206 μm (Segal et al., 1986; Segal e Merin, 1987; van der Meer et al., 2002; Souza Filho et al., 2008).

Com relação à geobotânica, ocorrem alterações no comportamento espectral da vegetação nas regiões do visível, NIR e SWIR, causadas pelas deficiências minerais e toxicidade química em regiões de exsudação. Plantas condicionadas a estresses hídricos, por exemplo, apresentam reflectância maior nas regiões do visível e do SWIR, e menor na região do NIR. A porcentagem de reflectância máxima no platô do NIR também é afetada, causada pelos danos às estruturas das folhas, além do aumento da reflectância no ponto de absorção máxima da clorofila causada pela redução desta na vegetação e mudança da posição na região espectral do Red Edge na direção de comprimentos de onda mais curtos (*blue shift*) ou maiores (*red shift*). Experimentos mostraram que baixas concentrações de gás etano causam redução da reflectância (550-750 nm), principalmente na região do amarelo. Altas concentrações do mesmo gás, associadas a falta de oxigênio, causam mudanças mais efetivas na curva espectral, devido ao decréscimo no conteúdo de clorofila (Souza Filho et al., 2008). A detecção por sensoriamento remoto de estresse na vegetação também pode ser monitorada pela redução da área foliar exposta. A redução é consequência da perda direta de folhas, bem como da mudança de sua orientação ou da interrupção do crescimento das plantas. A resposta da reflectância, nestes casos, tende a ser alterada no NIR, ou por conta da maior exposição de solo, ou por conta da redução do mecanismo de camadas (Valeriano, 2003), que aumenta a reflectância difusa e especular na região espectral do NIR uma vez que próximo a 50% da radiação incidente nas folhas, naquele intervalo de comprimentos de onda, é transmitida e refletida, sucessivamente, pelas camadas inferiores da planta.

Mora (2014) utilizou diversos índices de vegetação com a finalidade de identificar alterações causadas por exsudações de HCs em áreas vegetadas da floresta amazônica do Equador. Os resultados demonstraram que a combinação de um índice de vegetação sensível ao conteúdo de clorofila no dossel (Sum Green) com o índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é interessante para detecção de vegetação sob influência de HCs. Estes índices teriam identificado, de forma bastante precisa, vegetação desenvolvida próxima a áreas poluídas por petróleo, tanto de origem industrial quanto em *macroseepages*. Além disso, o autor propôs dois novos índices para diferenciar vegetação secundária poluída de não-poluída. Noomen et al. (2012), por sua vez, utilizou o índice Lichtenthaler (R440/R740) em imagens hiperespectrais do sensor aeroportado Probe-1 (resolução espacial de 8 m), que permitiu uma boa distinção entre o solo exposto no foco das exsudações e a vegetação densa ao redor. Entretanto, os outros índices utilizados – *Red edge position* REP descrito por Guyot e Baret (1988), *Red edge position* descrito por Cho e Skidmore (2006) e Índice Carter CTR – R695/R760 descrito por Carter, (1994) –

ainda foram bem sucedidos no mapeamento de diferenças nas concentrações de clorofila em áreas afetadas por HCs gasosos. Segundo alguns autores, como Thenot et al. (2002) é importante considerar a eficiência fotossintética da planta. Noomen (2006), entretanto, realizou um experimento com milho e trigo e o PRI (*Physiological Reflectance Index*, de Gamon et al., 1992) não realçou a presença de metano e etano.

Ainda segundo Mora (op cit.), a reflectância no espectro visível de áreas vegetadas sob estresse de HCs mostrou aumento significativo, devido à redução no conteúdo de clorofila, além de uma reduzida reflectância no NIR devido a danos estruturais causados nas plantas. Mudanças na concentração de clorofila causam um *shift* (deslocamento) espectral do ponto de maior inclinação no espectro de vegetação, entre o red e o NIR, em direção ao blue (*blue shift*) (van der Meer et al., 2006). Como consequência deste efeito, diminui-se a altura do patamar do NIR, devido a danos estruturais causados na vegetação, além de haver um aumento de reflectância no ponto de máxima absorção de clorofila e o deslocamento da posição na região espectral do Red Edge em direção a comprimentos de onda menores (Demarez et al., 2000).

3.4. Geoquímica

Os dados de gasometria disponíveis para realização deste trabalho foram cedidos pela HRT Participações em Petróleo S.A, obtidos por levantamento realizado em 2011. Segundo Mendes (2014) a gasometria é um método geoquímico direto utilizado na detecção de hidrocarbonetos em superfície, sendo aplicado principalmente em *greenfields*, servindo como método complementar na prospecção de petróleo. O método detecta alterações físicas, químicas e biológicas em sedimentos superficiais e solos causados por difusão, efusão e flutuabilidade que ocorrem, de forma ideal, nas frações mais leves de acumulações de HCs. O método permite: (i) detecção de sistema petrolífero ativo; (ii) separação de gás superficial originado de bactérias daquele de origem termogênica; (iii) determinação da maturidade dos HCs e (iv) determinar se a malha de amostragem é suficientemente densa. Os dados disponibilizados para este trabalho são pré-processados (ou índices geoquímicos), a saber: (i) log etano/propano, que indica o craqueamento primário do querogênio em gás, definindo o tipo de óleo e concentração de HCs termogênicos (Neto, 2007); (ii) log iso-butano/n-butano, que indica o tipo de rocha geradora e seu grau de maturação térmica e (iii) Y0, que corresponde à interceptação da correlação dos logaritmos das concentrações de etano-propano-iso-butano-n-butano com o eixo Y, indicando a concentração de gás termogênico contido (Mendes, 2014).

O índice geoquímico mais interessante para aplicações neste trabalho é o $\log (C_2/C_3)$, pois segundo Noomen (2006), as alterações espectrais causadas em áreas vegetadas sob estresse de HC são devidas à presença de etano (C_2) no solo. Segundo Neto (2007), os gases gerados na chamada “janela do óleo” são aqueles que, durante a catagênese, possuem correlação com a geração do óleo, sendo assim conhecidos como gases associados. Gases gerados nesta janela apresentam menores porcentagens de metano, com valores menores de 95%, se comparados àqueles de origem biogênica. Estes gases podem ser identificados pela diferença isotópica entre C_2 e C_3 , que fica entre +5‰ e -5‰, além das razões baixas de C_2/C_3 (<4) (Lorant et al., 1998). A Figura 3.4.1 mostra um gráfico calculado para diferenciar gases gerados por craqueamento primário e craqueamento secundário, portanto a maturidade do gás, usando a diferença isotópica e a razão entre C_2 e C_3 .

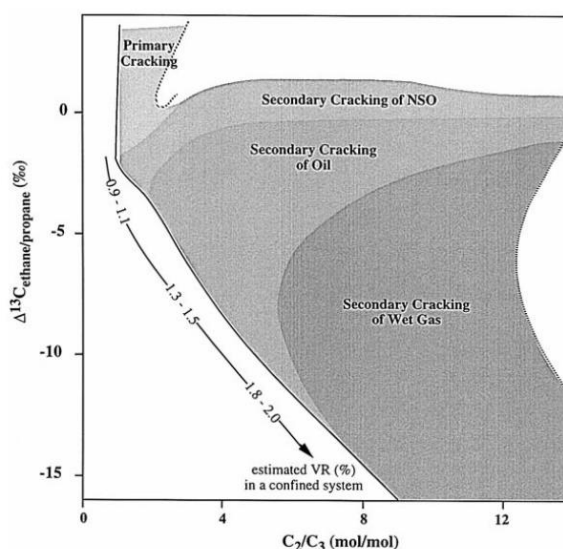


Figura 3.4.1 – Exemplo de digrama C2-C3 calculado mostrando a evolução da maturidade dos HCs. Extraído de Lorant et al., 1998.

Por meio de estudos conduzidos por Prinzhofer & Huc (1995) em amostras de gás natural coletadas no Kansas, Angola e Califórnia, foi possível caracterizar o fracionamento isotópico e molecular, singenético e pós-genético, dos hidrocarbonetos estudados. Neste sentido, foram usadas razões e diferenças isotópicas entre etano e propano (C_2 e C_3), com o objetivo de distinguir gases gerados pelo craqueamento primário de querogênio dos gases gerados pelo craqueamento secundário de óleo. Os resultados mostraram que, em situações de maior temperatura e pressão, ocorre o craqueamento secundário do óleo que já havia sido gerado. Assim, durante o craqueamento primário do querogênio, a razão entre etano e propano (C_2/C_3) tende a ficar constante (ou até diminuir em alguns casos), enquanto no craqueamento secundário do óleo, a razão tende a aumentar. A Figura 3.4.2 ilustra o modelo de fracionamento genético para gases termogênicos. Além disso, a razão C_2/C_3 foi utilizado por Sechman et al. (2015) para detecção de acumulações de gás condensado e gás seco no leste da Polônia. Acredita-se que a prospecção realizada no levantamento da

HRT Participações em Petróleo em 2011 tinha como objetivo a prospecção de gás condensado, conforme entrevista concedida pela empresa à revista Veja (01/03/2012), onde confirmaram que haviam encontrado na Formação Juruá (sic) reservatório com oito metros de espessura, com potencial de produção 250 mil m³ de gás natural e 300 barris de condensado por dia em poço vertical.

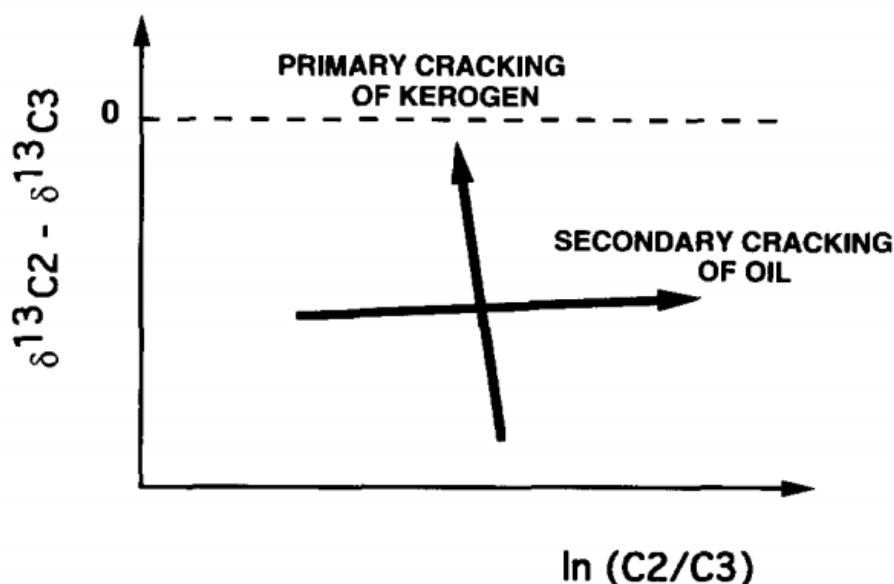


Figura 3.4.2 – Modelo de fracionamento genético para gases termogênicos em um diagrama de $\delta^{13}\text{C}_2 - \delta^{13}\text{C}_3$ por $\ln(\text{C}_2/\text{C}_3)$, diferenciando os gases gerados por craqueamento primário do querogênio (linha vertical) dos gases gerados por craqueamento secundário do óleo (sub-horizontal). Extraído de Prinzhofer & Huc (1995).

3.5. Geomorfometria

Pike et al. (2008) definiu a geomorfometria como a área do conhecimento que agrega as áreas da geociências, matemática, engenharia e ciências da computação para análise quantitativa e qualitativa das superfícies topográficas.

Alguns métodos de análise de sensoriamento remoto podem ser aplicados para identificar as estruturas dômicas – como dobras anticlinais – em subsuperfície. Berger e Aghassy (1980 apud Berger, 1994) propuseram um método para análise de topografias dômicas, baseando-se em elementos geomorfológicos. Tais elementos, que variam de escarpas a rios cuja montante aponta para o centro do domo, também podem ser aplicados na análise de domos em subsuperfície, ainda que estas características se apresentem de maneira menos pronunciada. As estruturas dômicas podem ser reconhecidas em imagens de satélite durante três estágios evolutivos distintos, a saber: (I) estágio de alívio positivo; (II) estágio “brechado” e (III) estágio de obliteração (Berger, 1994).

A análise de padrões de drenagem é comum em áreas cujas estruturas não estão expostas em superfície. Segundo Berger (op cit.), há uma sequência de etapas a ser

seguida na análise geomorfométrica de reconstituição de topografia dômica de subsuperfície. Esta sequência consiste em, primeiramente, utilizar as imagens para traçar drenagens controladas por estruturas. Em seguida, as drenagens que aparentam seguir as direções e mergulhos das camadas das rochas são caracterizadas como canais fluviais estruturalmente controlados. Por fim, faz-se o cruzamento das interpretações com dados geofísicos, para obtenção de uma interpretação final de subsuperfície. A Figura 3.4.1 mostra um esquema que ilustra o processo de interpretação e mapeamento de subsuperfície utilizando padrões de drenagem.

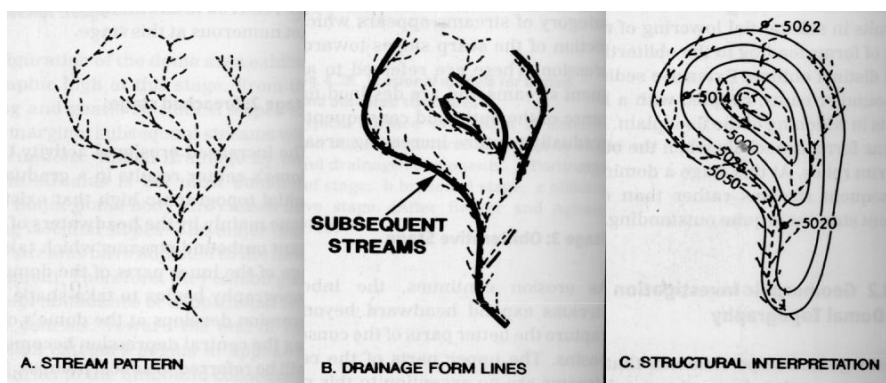


Figura 3.4.1 – Procedimento em três passos para interpretação de padrões de drenagem como guia para mapeamento de subsuperfície. Extraído de Berger, 1994.

Shahzad & Gloaguen (2010) desenvolveram uma ferramenta denominada TecDEM, integrada ao *software* MATLAB, que possui o objetivo de extrair informações tectono-geomorfológicas de Modelos Digitais de Elevação (DEM). A metodologia consiste na extração de informações relacionadas aos padrões de drenagem, bacias e sub-bacias hidrográficas presentes na região analisada e, então, interpretá-las em uma abordagem tectônica e geomorfológica.

Segundo Kirby & Whipple (2001) e Schoenbohm et al. (2004), o gradiente de canais de drenagem está intimamente ligado à geologia e tectônica locais. Portanto, esta relação permite a interpretação de dados litológicos e feições tectônicas utilizando a distribuição de canais e rede de drenagens como guia. Para tanto, a ferramenta TecDEM gera produtos como: mapas de direção de fluxo, delineação de redes de drenagem, delimitação de bacias hidrográficas, análise de perfis de rios e dos índices de concavidade, inclinação e Hack (definido por Hack, 1973), que é utilizado para calcular o gradiente dos rios e drenagens. A Figura 3.4.2 ilustra um exemplo de bacias hidrográficas geradas pelo *software* TecDEM com diferentes ordens de Strahler (1957).



Figura 3.4.2 - Ilustração simplificada da extração das bacias de drenagem. a) bacias de drenagem com ordem de Strahler 1; b) bacias de drenagem com ordem de Strahler 1 e 2; c) bacias de drenagem de ordem de Strahler 1, 2 e 3 e d) bacia de drenagem completa com a ordem de Strahler desejada (4, no caso).

Extraído de Shahzad & Gloaguen (2010).

Estudos anteriores mostraram que análises de bacias morfométricas podem evidenciar as dinâmicas superficiais e a neotectônica (Cox, 1994; Day, 1979; Grohmann, 2004). Assim, o *software* desenvolvido por Shahzad & Gloaguen (op cit.) utiliza os dados DEM e as drenagens previamente extraídas para geração de índices morfométricos. Dentre os principais produtos morfométricos que podem ser gerados, estão: mapas de isobase, incisão, rugosidade superficial, densidade de drenagem, assimetria de bacias e hipsométrico. Para este estudo, um dos produtos mais interessantes gerados pelo *software* será o mapa de isobases.

Os mapas de isobases baseiam-se na ordem de Strahler (op cit.) dos canais de drenagem, fator que está intimamente ligada à topografia. Portanto, variações na ordem de Strahler possuem grande conexão com o relevo, fazendo com que em uma mesma região, drenagens com ordens de Strahler iguais estejam relacionadas aos mesmos eventos geológicos, tendendo a possuir idades próximas e/ou iguais. As linhas de isobase representam superfícies de erosão, relacionadas a eventos tectônicos ou erosionais recentes (Filosofov, 1960; Shahzad & Gloaguen, op cit.). A Figura 3.4.3 ilustra um exemplo de mapas de isobase.

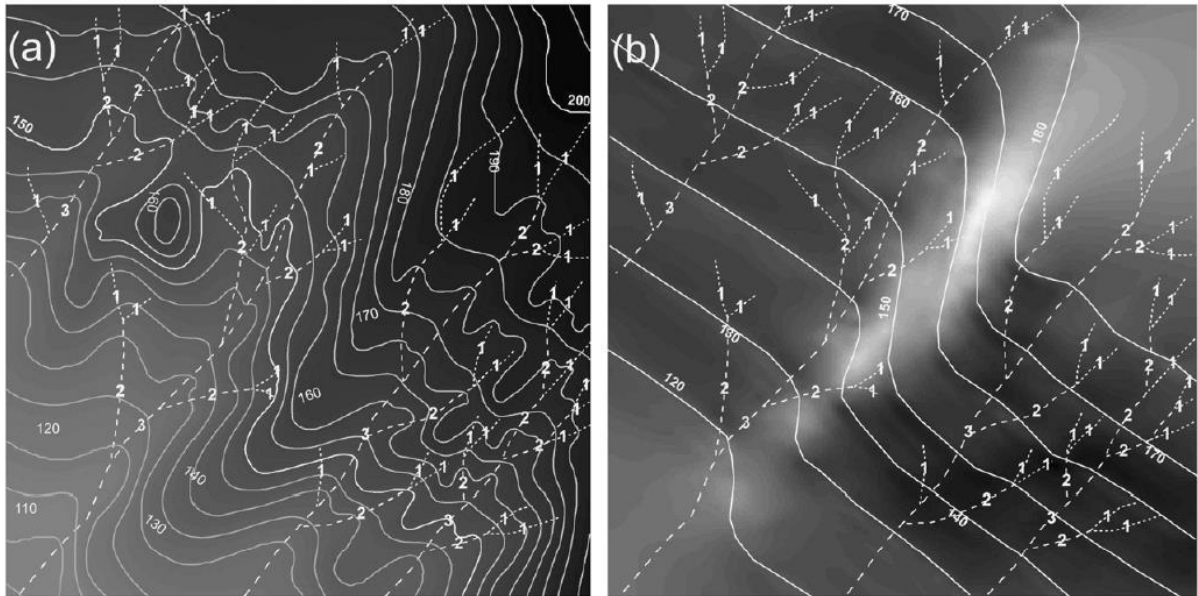


Figura 3.4.3 – Ilustração de mapa de isobase. Em a) observa-se um DEM em *grayscale*, com os contornos de elevação e as drenagens extraídas sobrepostas. Em b) observa-se as linhas de isobase geradas por drenagens de 1° e 2° ordens, sobrepondo um *hillshade* do Modelo Digital de Elevação do terreno. A porção destacada em branco demarca um local de ocorrência de uma feição morfométrica. Extraído de Shahzad & Gloaguen, 2010.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. *Imagens ópticas multitemporais*

As imagens ópticas multiespectrais investigadas neste trabalho são as das missões RapidEye, Landsat TM/ETM/OLI, ASTER e Sentinel-2. A missão RapidEye consiste na constelação de 5 satélites diferentes, que foram lançados em agosto de 2008 ao mesmo tempo. Os satélites foram construídos pela empresa Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL). O sensor RapidEye é multiespectral, possuindo 5 bandas (*blue, green, red, red-edge* e *NIR*), com dimensões da cena básica de 25,0 x 25,0 km (produto 3A ortorretificado), e resolução espacial de 6,5 m (nível 1B) a 5 m (ortorretificado, nível 3A) (EngeSat).

O projeto Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*), idealizado pela *U. S. Geological Survey* (USGS) e pela NASA teve início em 1972 com o satélite ERTS-1. A sequência do projeto foi dada com lançamentos dos satélites Landsat 2, 3, 4 e, principalmente, com os satélites Landsat 5 e 7. O objetivo do sistema Landsat é o mapeamento multiespectral em resolução alta-moderada do planeta Terra. Os instrumentos imageadores do Landsat 5 eram o MSS (*Multispectral Scanner*) e o TM (*Thematic Mapper*). Os dados MSS possuem 4 bandas espectrais, com uma resolução espacial de 79 m e uma cena típica de 185,0 x 185,0 km Gupta (1991). O sensor TM, por sua vez, possui 7 bandas espectrais, com resolução espacial de 30 m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 e resolução espacial de 120 m na banda 6. Já o Landsat 7 possui uma banda pancromática com resolução espacial de 15 m, e sua banda 6, correspondente ao infravermelho termal, possui resolução espacial de 60 m. Os instrumentos OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) fazem parte do satélite Landsat 8. As bandas espectrais do sensor OLI são similares às do sensor ETM+ do satélite Landsat 7, com a adição de uma banda do “azul profundo” (banda 1), utilizada para recursos hídricos e estudos de zonas de costa, e uma banda do infravermelho (banda 9), utilizada para detecção de nuvens cirrus. O sensor TIRS, por sua vez, possui duas bandas do infravermelho termal, com um mínimo de 100 m de resolução espacial (EngeSat).

A missão Sentinel-2 foi idealizada pela Agência Espacial Europeia (ESA), com início em junho de 2015. Trata-se de um sensor multiespectral de domínio público que fornece imagens com resolução espacial de 10 m nos menores comprimentos de onda (Bandas *Blue, Green, Red* e *NIR*) até 60 m (Bandas *Aerosol, Water Vapor* e *Cirrus*). Possui um

total de 13 bandas espectrais, com um tamanho da cena básica correspondente a uma área de 100,0 x 100,0 km (EngeSat).

O sensor multiespectral ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection*), foi lançado pela NASA em dezembro de 1999, integrando o primeiro programa “*Earth Observation Satellite*” (EOS-AM-1, também conhecido como TERRA). ASTER é um dos cinco sensores portados pelo satélite TERRA, possuindo sensores de imageamento de resolução alta-moderada. Com o objetivo de abranger uma maior gama de cobertura espectral, a sensor ASTER possui três subsistemas, sendo eles: a) um subsistema radiométrico no visível e infravermelho próximo (VNIR); (b) um subsistema radiométrico no infravermelho de ondas curtas (SWIR) e (c) um subsistema radiométrico no infravermelho termal (TIR). Consiste, portanto, em um sensor que obtém imagens de alta resolução (15 a 90 metros quadrados por pixel) em 14 diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético. Tais características permitem a criação de mapas de temperatura, emissividade, reflectância e elevação (NASA) (EngeSat).

4.1.2. Sensores de interferometria de micro-ondas

As imagens dos sensores de interferometria de microondas SRTM e ALOS PALSAR serão utilizadas neste trabalho. PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) foi um dos três instrumentos presentes no satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite-1*), desenvolvido para contribuir nos campos de mapeamento, monitoramento de desastres, pesquisa de recursos etc. A missão ALOS foi realizada pela JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), e ocorreu de 2006 a 2011. As imagens ALOS PALSAR possuem uma resolução espacial variando de 7,0-44,0 m, 14,0-88,0 m (Fine), 100,0 m (ScanSar) e 24,0-89,0 m (Polarimétrico). O tamanho da cena básica também varia, sendo 40,0 x 40,0 a 70,0 x 70,0 km (Fine) e 250,0 x 250,0 a 350,0 x 350,0 km (EngeSat).

A missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi responsabilidade da *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) e da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). As imagens de radar foram coletadas entre 11 e 22 de fevereiro de 2000, na nave de nome Endeavour. O propósito da missão foi produzir um banco de dados de todo o planeta, que possibilitasse a elaboração de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Com a finalidade de obtenção de dados topográficos, SRTM utilizou a técnica de interferometria SAR, onde duas imagens de um mesmo local são tiradas de pontos diferentes, permitindo a determinação da elevação do terreno. A resolução espacial geral varia de 1” (1 arco segundo) a 3” (EngeSat).

4.1.3. Geoquímica de Hidrocarbonetos Leves (gasometria)

Os dados de gasometria a serem utilizados neste TF foram cedidos pela HRT Participações em Petróleo S.A. em 2011 para o Mestrado de Flávia Mendes (Mendes, 2014). Segundo esta autora, a gasometria é um método geoquímico direto utilizado na detecção de hidrocarbonetos em superfície, sendo aplicado principalmente em *greenfields*, serve como método complementar na prospecção de petróleo. O método detecta alterações físicas, químicas e biológicas em sedimentos superficiais e solos causados por difusão, efusão e flutuabilidade que ocorrem, de forma ideal, nas frações mais leves de acumulações de HCs. O método permite: (i) detecção de sistema petrolífero ativo; (ii) separação de gás superficial originado de bactérias daquele de origem termogênica; (iii) determinação da maturidade dos HCs e (iv) determinar se a malha de amostragem é suficientemente densa. Os dados disponibilizados para este trabalho são pré-processados (ou índices geoquímicos), a saber:

- i. log etano/propano, que indica o craqueamento primário do querogênio em gás, definindo o tipo de óleo e concentração de HCs termogênicos (Neto, 2007);
- ii. log iso-butano/n-butano, que indica o tipo de rocha geradora e seu grau de maturação térmica e
- iii. Y0, que corresponde à interceptação da correlação dos logaritmos das concentrações de etano-propano-iso-butano-n-butano com o eixo Y, indicando a concentração de gás termogênico contido (Mendes, 2014).

4.2. Métodos

4.2.1. Geomorfometria

Utilizando os Modelos Digitais de Elevação (DEM) obtidos pelos sensores SRTM e ALOS PALSAR, objetiva-se interpretar, em subsuperfície, estruturas que possam servir como armadilhas estruturais para hidrocarbonetos. A análise será feita com técnicas de geomorfometria, que consiste na avaliação e interpretação de elementos geomorfológicos, como anomalias topográficas positivas e padrões de drenagem, para interpretação estrutural em superfície e subsuperfície. Os métodos utilizados para a análise geomorfométrica neste trabalho serão os de Berger (1994) e Shahzad & Gloaguen (2010). O método de Berger (op cit.) se utiliza da detecção, por meio de MDS, de padrões de drenagem convergentes, domos suaves e escarpas para o mapeamento de estruturas dômicas subsuperfície. Espera-se encontrar por meio deste método, estruturas antiformais que teriam sido originadas na Bacia do Solimões pelo Megacisalhamento Solimões, datado do Mesozoico

Já o método desenvolvido por Shahzad & Gloaguen (2010) consiste na utilização de uma ferramenta denominada TecDEM, que é um compilado de algoritmos destinado ao *software* MATLAB e desenvolvida pelos autores, que possui o objetivo de realizar análises geomorfológicas e morfométricas pela extração de dados de drenagem a partir de Modelos Digitais de Elevação (DEM). A utilização deste método será feita utilizando-se dados de micro-ondas dos sensores SRTM e ALOS PALSAR e objetiva a obtenção de mapas e índices morfométricos, como os mapas de isobase, que auxiliam na interpretação do relevo e da estruturação local, de modo a colocar em evidência possíveis armadilhas estruturais para hidrocarbonetos.

4.2.2. Gasometria e Geobotânica

Antes do processamento das imagens ópticas multiespectrais, mais especificamente dos sensores ASTER, Landsat TM e RapidEye, foi realizado o pré-processamento dos dados, por meio da correção atmosférica do tipo FLAASH (*Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercubes*) ENVI. Trata-se de um *software* de correção atmosférica baseado em MODTRAN4, idealizado pelo laboratório *Phillips* da Força Aérea dos Estados Unidos da América, *Hanscom FB* e *Spectral Sciences Inc.* (Adler-Golden et al., 1999, Gutierrez, 2017). Tal medida foi adotada para reduzir os efeitos atmosféricos que influenciam no comportamento espectral das imagens, garantido uma resposta mais confiável dos resultados obtidos pelas análises geobotânicas.

Os processamentos inicialmente estão restritos à análise das respostas de índices espectrais sobre as anomalias de gasometria. Os estudos de Noomen (2006) indicaram o etano como o gás que mais gerou alterações na vegetação associadas a feições espectrais detectáveis, como uma significativa queda na absorção na região do vermelho (550-750nm), em particular na região 560-600 nm (região do amarelo). No experimento feito por Noomen (op. cit.) este mesmo gás diminuiu a absorção da radiação por água foliar, confirmando uma queda na atividade fotossintética. Os dados de gasometria disponíveis para este TF, no entanto, referem-se a dados pré-processados, tratando-se de índices geoquímicos, e a informação de etano está no logaritmo da razão entre etano e propano ($\log C_2/C_3$), a qual se relaciona diretamente à presença de HC termogênico ([Ainda assim, as anomalias $\log$ (etano/propano) parecem ser as mais interessantes do ponto de vista do sensoriamento remoto. Nestas anomalias, além dos índices espectrais desenhados a realçar as respostas esperadas (NIR/R; NIR/G; NIR/SWIR1) foi testado um PRI (*Photochemical Reflectance Index*), índice proposto por Gamon et al. (1992) e Peñuelas et al. (1995) como método para obtenção remota de dados referentes à eficiência fotossintética de áreas vegetadas, se utilizando originalmente de *narrowbands* de sensores hiperespectrais, e será adaptado à resolução espectral dos sensores disponíveis, utilizando a equação $(G-B) / (G+B)$). Ressalta-

se a dificuldade na utilização deste índice, devido ao espalhamento atmosférico intenso que ocorre nas bandas do visível, sobretudo na região do azul, na área estudada. Em uma segunda fase foram analisadas as anomalias no índice log etano/propano coincidentes com anomalias do índice Y0, que indica o gás termogênico contido, ou seja, que separa gases da decomposição de matéria orgânica atual de gases formados em condições de alta temperatura e pressão associados à maturação do petróleo (Mendes, 2014). Dessa comparação de dados geoquímicos em princípio ficam definidos os alvos prioritários para exsudações e, assim, para se buscar anomalias geobotânicas.

Na análise geobotânica foram utilizadas todas as bandas disponíveis em cada sensor, ainda que as mais citadas na literatura se refiram às bandas do NIR (~840 nm), RedEdge (~690 nm) e Vermelho (R ~650 nm). Estas bandas estão disponíveis em todos os sensores multiespectrais (ASTER, Sentinel-2, Landsat TM/ETM/OLI e RapidEye) que foram utilizados para detectar alterações espectrais, causadas pela toxicidade e deficiências minerais em zonas sob influência de exsudações de hidrocarbonetos. Os índices de vegetação baseados na razão NIR/R são particularmente eficientes na detecção da variação da área foliar e das clorofilas a + b. A área foliar de áreas vegetadas sob estresse por HCs é reduzida, diminuindo a reflectância no NIR e aumentando a do R. Outros índices espectrais para realce de pigmentos foliares foram baseados na razão do NIR com bandas nas regiões do verde (informando de carotenos). Já razões NIR/SWIR foram utilizadas para informar conteúdos de água foliar a 1650 nm e, na região de 2000 a 2350 nm, de água e compostos bioquímicos foliares.

A variabilidade das respostas espectrais sobre exsudações deve-se principalmente à toxicidade, inexistindo, salvo em exsudações de longo tempo de ocorrência, uma variabilidade fito-sociológica. Há histórico de aplicação de geobotânica associada à geoquímica, na região do Campo de Gás do Juruá, Bacia do Solimões, quando imagens Landsat MSS evidenciaram respostas espectrais anômalas sobre as anomalias geoquímicas, possivelmente pela exposição a longo-termo da vegetação a condições anaeróbicas causadas por exsudações de hidrocarbonetos (Melo et al., 1996 apud Mora, 2014). Segundo estudos de Noomen et al. (2012) e Noomen et al. (2006), a resposta nas plantas é considerada, de maneira relativa, não dependente das estações do ano. Entretanto, a abordagem da literatura foi feita sobre monoculturas de milho e trigo, não contemplando a variabilidade sazonal em uma floresta biodiversa como a amazônica. Mora (2014), trabalhando na Amazônia equatoriana, considera a floresta como “*Aseasonal-Lowland evergreen rainforest*”, mas levando-se em conta o bom resultado obtido por Gutierrez (2017) no realce do acamamento de meta-arenitos e meta-conglomerados paleoproterozóicos em Castelo dos Sonhos, PA, resolveu-se testar métodos multitemporais. Considera-se ainda que a literatura classifica a Floresta Amazônica como semi-decídua, com importantes variações em seu ciclo anual.

Yang (1999) realizou uma série de experimentos para medir a relação entre a resposta espectral do REP (*Red Edge Position*) e o índice LAI (*Leaf Area Index* ou Índice de Área Foliar). Os resultados obtidos mostraram que, se o LAI permanece relativamente constante, como ocorre em florestas tropicais, a posição na região espectral do Red Edge é relacionada apenas ao conteúdo de clorofila na vegetação, o que pode ser significativo na detecção de exsudações em áreas vegetadas (Mora, 2014). Portanto, índices utilizando o *red edge* (RE) serão testados para avaliar tais variações, sempre no desenho NIR/R. Observe-se que dos vários sensores com possibilidade de ter imagens disponibilizadas sem custo as mais interessantes são as do sensor RapidEye pelo conjunto das resoluções espectral e espacial. Considera-se de extrema importância a resolução espacial em função dos ensaios feitos por Noomen et al. (2012), que indicam a pequena área afetada por exsudações. Naturalmente quanto menor o pixel, menor será a mistura espectral da resposta e mais fácil a sua detecção.

Em uma terceira fase, foram testados métodos como o sistêmico, desenvolvido por Almeida & Souza Filho (2004) e aplicado por Almeida et al. (2006), Perrotta et al. (2008), Almeida et al. (2009) e Zacchi et al. (2010). Este método consiste na realização de diversas *band ratios* (razões de banda) destinadas a realçar diferentes compostos da vegetação e, posteriormente, na realização de uma PCA sobre as razões que apresentaram melhores resultados. Por fim, os resultados são analisados e as imagens mais representativas são selecionadas. Além disso, foi realizada a aplicação de uma PCA sobre as bandas espectrais correspondentes ao NIR e ao SWIR da imagem, onde a PC1 é uma imagem que apresenta grande correlação com o albedo, fazendo-se a junção da PC1 com as PCs obtidas pela aplicação do método sistêmico (Gutierrez, 2017).

Na quarta fase foi introduzida a abordagem multitemporal, onde foram feitas razões de banda nos arranjos Red Edge/Red Edge e Red/Red, objetivando a observação de possíveis *blue shifts* ou *red shifts*, ou seja, mudanças na posição na região espectral do vermelho Edge, conforme previsto por Li et al. (2005). Estas razões de banda foram utilizadas, também, para elaboração de composições coloridas falsa-cor, objetivando a observação de variação sazonal. Além disso, os métodos citados anteriormente serão testados nas duas datas distintas, quando possível, para observação de eventuais alterações no comportamento espectral da vegetação nas duas datas distintas.

Crósta et al. (2016) utilizaram imagens de uma mesma área, em duas datas distintas, objetivando a análise do comportamento espectral da vegetação por meio da aplicação de uma PCA sobre a mesma banda espectral em duas datas distintas. Assim, as informações redundantes concentram-se na PC1, enquanto a informação distinta nas duas imagens se concentra na PC2. Desta forma, obtém-se um conjunto de PCs2 para as diversas bandas disponíveis no sensor utilizado, sobre o qual se aplica uma PCA que realça, por meio de uma composição colorida falsa-cor, as variações existentes entre as duas

datas. De maneira análoga, foi utilizada a técnica de composições coloridas falsa-cor, utilizando a mesma banda em pares de datas distintas, sem aplicação de mais processamentos.

Por fim, adotando os dados obtidos por Noomen et al. (2012) com relação ao tamanho restrito das anomalias causadas por exsudações de hidrocarbonetos, foi feita uma análise de pixels das imagens RapidEye próximos aos pontos onde o $\log C_2/C_3$ apresenta valores anômalos. Trata-se, portanto, de uma análise em um raio médio de 5 a 10 m ao redor das anomalias geoquímicas.

Com relação às anomalias geoquímicas, foi realizada uma interpolação dos dados de $\log C_2/C_3$, objetivando estimar os valores do índice em região onde não houve amostragem. O algoritmo usado na interpolação por vizinhanças naturais encontra o ponto mais próximo ao que se quer estimar e, a partir daí, aplica pesos proporcionais às áreas a serem interpoladas (Sibson, 1981).

A etapa final será a análise do conjunto de dados, onde se discutirá a presença ou ausência de ocorrência simultânea de indicações de exsudações de HCs pelos diversos métodos utilizados. Portanto, espera-se como produto final interpretações quanto a localização de sistemas petrolíferos na Bacia do Solimões, região do município de Carauari - AM, obtidos pelo cruzamento das anomalias geoquímicas com as interpretações geomorfométricas e com as análises de alterações geobotânicas em dados multiespectrais e multitemporais.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1. Geoquímica (gasometria)

O método geoquímico em questão, denominado gasometria, detecta alterações físicas, químicas e biológicas em sedimentos superficiais e solos causados por difusão, efusão e flutuabilidade que ocorrem, de maneira ideal, nas frações mais leves de acumulações de HCs.

A distribuição de dados geoquímicos coletados pela HRT Participações em Petróleo S.A. em 2011 foi feita em extensa área nas regiões de Carauari - AM e do Campo de Gás do Juruá. Apresentam-se em malhas diversas, variando de aleatórias a lineares, com poucas e restritas localidades de malhas regulares, conforme mostra a Figura 5.1.1. Os dados foram interpolados pelo método de vizinhanças naturais, que se mostrou o mais interessante para o caso, com a finalidade de estimar os valores das anomalias geoquímicas em regiões onde não foram coletados dados, permitindo uma análise geobotânica melhor direcionada às áreas com maiores valores (anomalias positivas) dos índices geoquímicos de interesse.

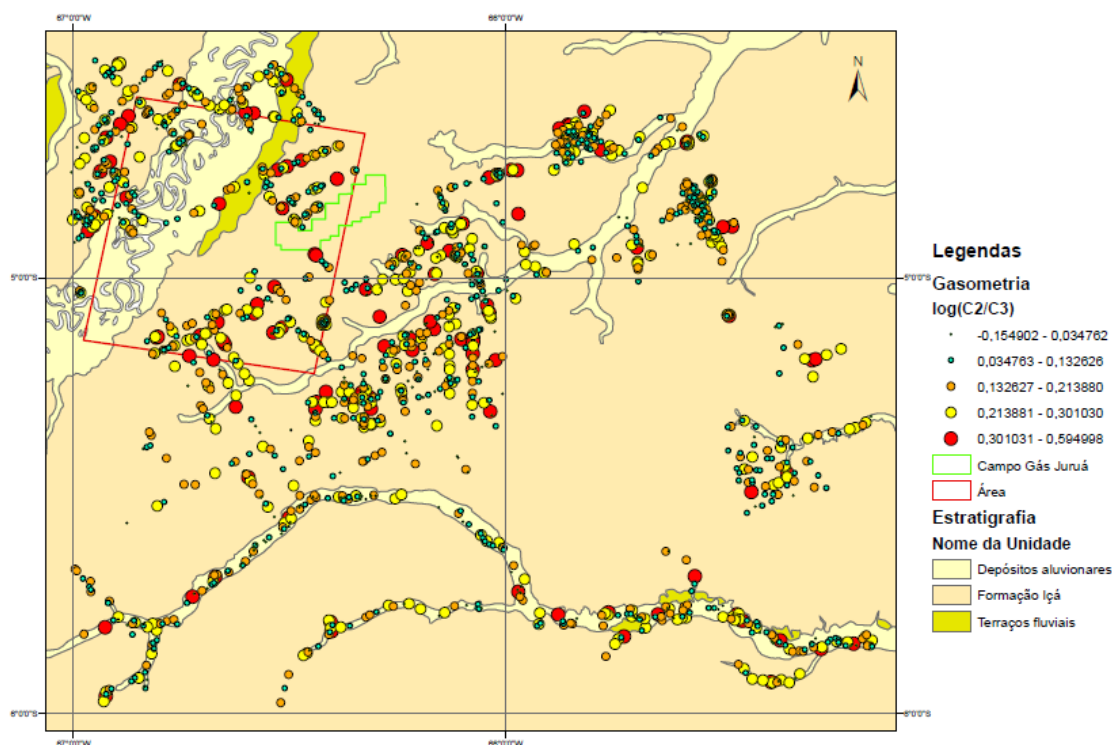


Figura 5.1.1 – Mapa da região estudada. Os círculos coloridos representam o índice geoquímico correspondente ao log da razão C_2/C_3 . Portanto, os pontos são os dados geoquímicos disponíveis para a realização do trabalho. O retângulo vermelho representa a área estudada anteriormente por Mendes (2014) e que foi considerada no Projeto Inicial, localizada sobre o município de Carauari.

Segundo Noomen (2012), as anomalias espectrais observáveis nas espécies afetadas por exsudações de hidrocarbonetos são muito localizadas, ocorrendo em áreas restritas, próximas aos focos das exsudações. Por conta disso, com o objetivo de delimitar as áreas-alvo para o direcionamento deste estudo, foram delimitadas oito subáreas de interesse, conforme mostrado na Figura 5.1.2, diferentes da área original proposta no projeto inicial. Os critérios utilizados para seleção das subáreas basearam-se na distribuição dos dados quanto à malha, a densidade de pontos e, por fim, quanto à intensidade das anomalias dos índices geoquímicos Y0 e $\log C_2/C_3$. Considera-se este último como o mais importante, tendo em vista que o etano é o gás de maior interesse na busca por exsudações, já que provoca as maiores mudanças nas respostas espectrais da vegetação, conforme resultados obtidos por Noomen (2006).

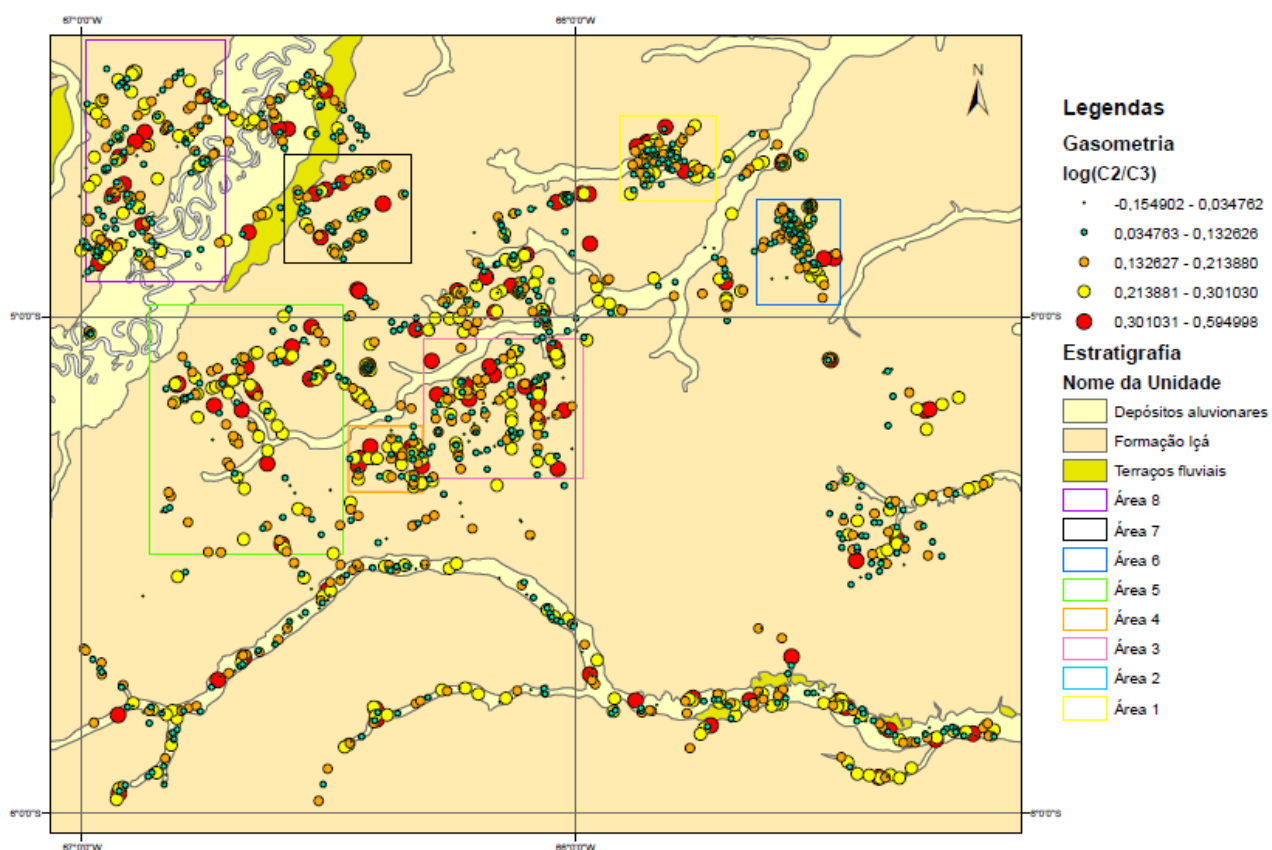


Figura 5.1.2 – Mapa da região estudada. Os círculos coloridos representam o índice geoquímico correspondente ao $\log$ da razão C_2/C_3 . Portanto, os pontos são os dados geoquímicos

Dentre as oito subáreas definidas na etapa anterior deste projeto, optou-se pelo aproveitamento parcial de apenas uma delas (Área 5), devido à limitação na disponibilidade de imagens em boas condições para processamento nas demais regiões. A Figura 5.1.3 mostra, em detalhe, a área de interesse, bem como os pontos da malha de amostragem geoquímica. É possível observar que as linhas de caminhamento realizadas pela equipe de

amostragem possuem orientação geral NE-SW e NW-SE. Acredita-se que estas direções de levantamento não foram escolhidas de modo arbitrário, mas sim considerando a estruturação regional e o regime neotectônico pelo qual a região ocidental do estado do Amazonas foi submetida durante o Cenozóico, conforme discutido no levantamento bibliográfico deste trabalho.

A Figura 5.1.4, por sua vez, apresenta o resultado da interpolação dos dados geoquímicos pelo método de vizinhanças naturais na área em questão. Observa-se pela imagem que as maiores anomalias de $\log C_2/C_3$ estão concentradas na linha de levantamento NE-SW, com valores do índice $\log C_2/C_3$ variando de 0,20 a 0,43, seguidas pelas linhas centrais de orientação NW-SE, com valores de $\log C_2/C_3$ girando em torno de 0,20-0,32. Ressalta-se, no entanto, que a amostragem não foi realizada em toda a extensão do polígono, levando a possíveis áreas com valores interpolados menores que a realidade.

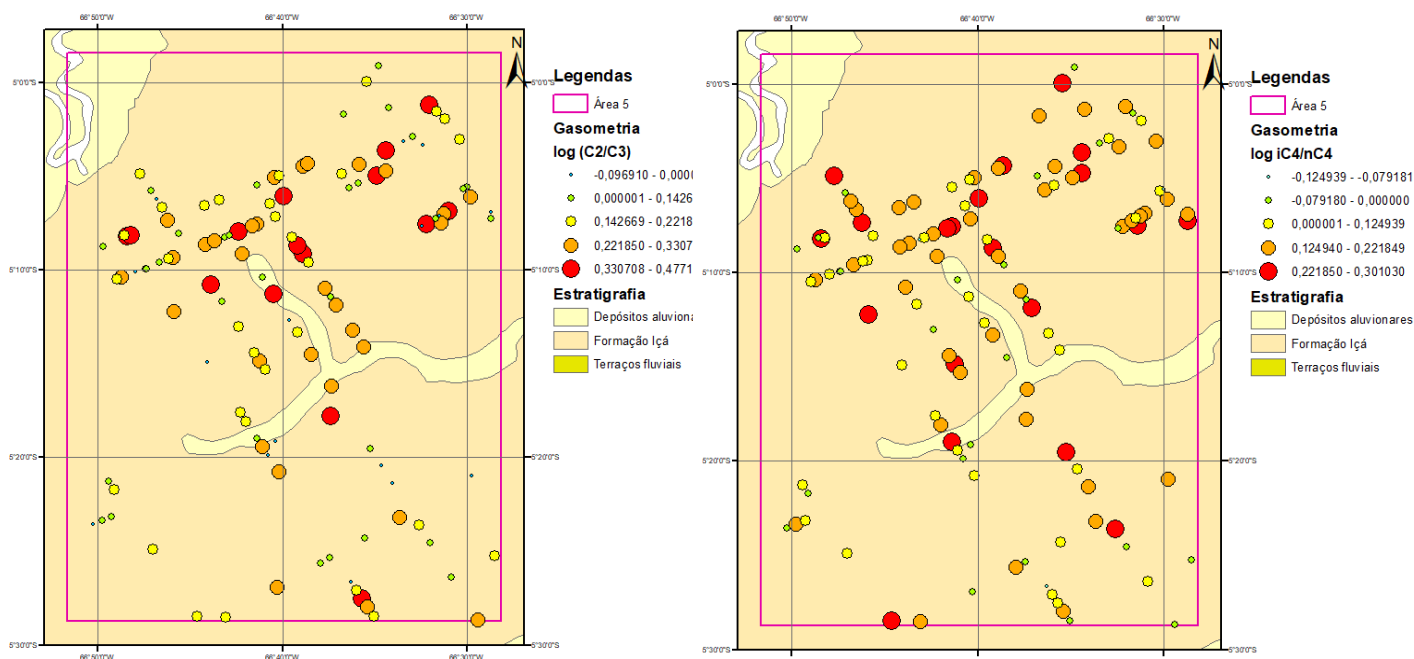


Figura 5.1.3 – Detalhe da área de interesse (Área 5). Os círculos coloridos representam o índice geoquímico correspondente ao log da razão C_2/C_3 (esq.) e log da razão iC_4/nC_4 (dir.). Ressalta-se as direções de amostragem, que são principalmente NE-SW e NW-SE.

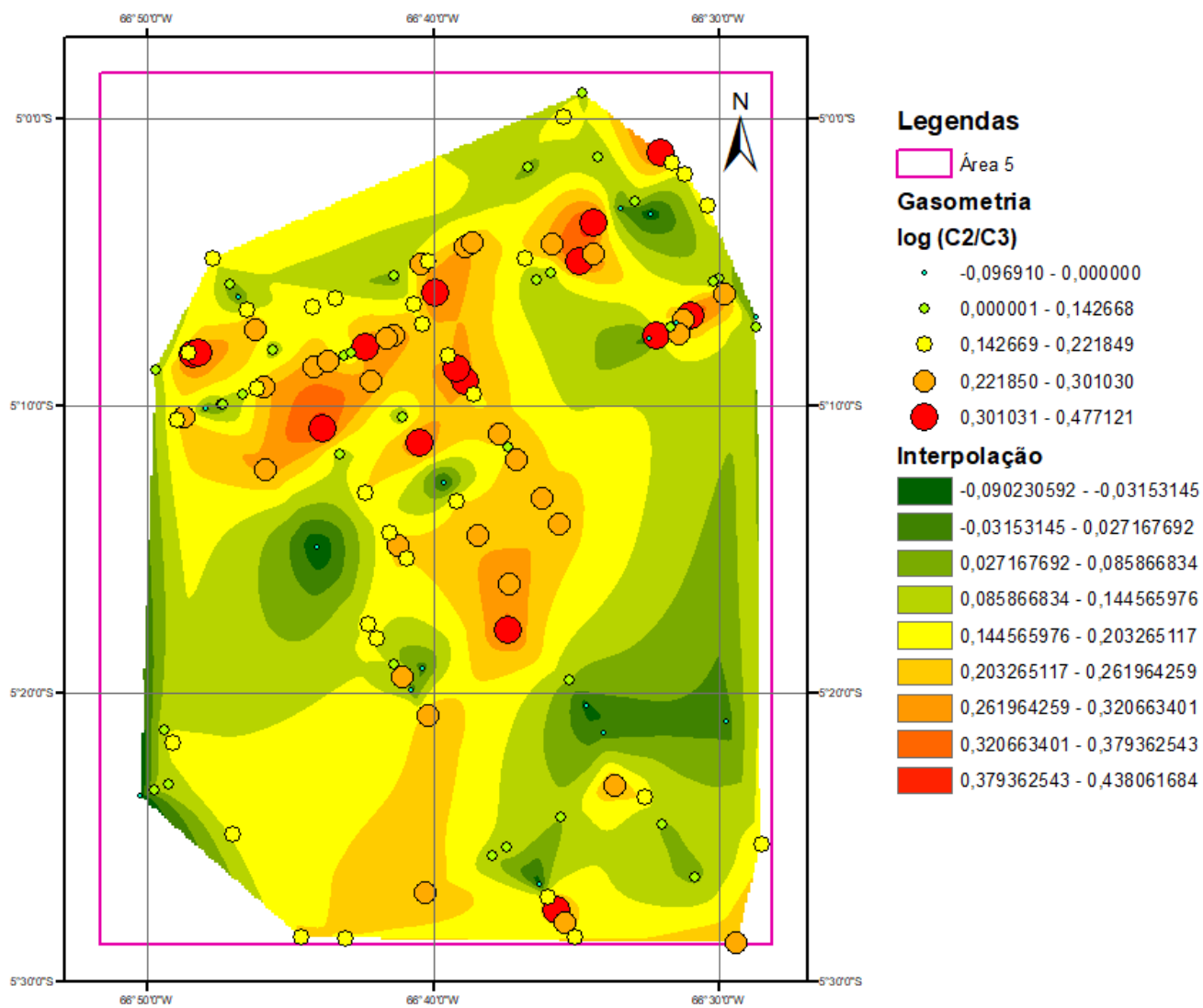


Figura 5.1.4 – Interpolação do log da razão C₂/C₃ pelo método de vizinhanças naturais.

5.2. Geomorfometria

A análise geomorfométrica preliminar foi baseada nos conceitos de Berger (1994), que sugeriu um método para identificação de estruturas dômicas em subsuperfície drenagens superficiais. Segundo Berger e Aghassy (apud Berger, op cit.) topografias dômicas em subsuperfície possuem características geomorfológicas distintas, variando de escarpas a rios cuja jusante aponta para o centro do domo. Tais estruturas podem ser reconhecidas em imagens de satélite em algum dos três estágios evolutivos a seguir: (I) estágio de alívio positivo; (II) estágio “brechado” e (III) estágio de obliteração.

Para a reconstituição topográfica de subsuperfície, Berger (op. cit) sugere, primeiramente, a utilização das imagens de satélite para traçar drenagens controlados por estruturas. Em seguida, caracteriza-se as drenagens que aparentam seguir direções e mergulhos das camadas das rochas como canais fluviais estruturalmente controlados. Por fim, faz-se o cruzamento das interpretações com dados geofísicos, para obtenção de uma interpretação final de subsuperfície.

Para a aplicação do método, utilizou-se os Modelos Digitais de Elevação (DEM) dos satélites ALOS PALSAR e SRTM, com o objetivo de extração dos canais de drenagem com diferentes ordens de Strahler (1957). Os resultados regionais estão apresentados nas Figuras 5.2.1 e 5.2.2. Observa-se que a região é altamente irrigada, chegando até ordem de Strahler 5, com rios de canais de morfologia majoritariamente meandrante, formando uma rede de drenagens dendrítica. Entretanto, não foi possível observar quase nenhum padrão óbvio que indicasse o caráter de topografia dômica em subsuperfície. Alguns poucos padrões nas configurações dos canais, no entanto, podem indicar estrutura dômica, tendo em vista que divergem de um ponto central preferencial. Pode-se observar este padrão nas porções do extremo sudeste e norte-noroeste do mapa (10.000 células). Ressalta-se, no entanto, que tais padrões podem ser falsos positivos, e que maiores investigações precisam ser feitas para caracterizar a região.

Foi elaborado, ainda, um mapa hipsométrico da região onde há disponibilidade de dados geoquímicos, utilizando os dados do sensor de micro-ondas SRTM. O resultado, apresentado na Figura 5.2.3, mostra que a área possui relevo majoritariamente arrasado, e pode ser previamente classificada como uma região de planícies. A variação de altitude é relativamente baixa, indo de 20 m no talvegue dos rios e drenagens principais, a 145 m na porção do extremo sudoeste da área. Ressalta-se que, por se tratar de mapa gerado na escala 1:1.000.000, as mudanças de altitude não são abruptas, fator evidenciado pela região de transição das altitudes mais baixas para as mais altas (coloração amarelada) que se estende desde a poligonal do Campo de Gás do Juruá (polígono verde) até as porções mais altas a sudoeste, ao sul do canal do Rio Juruá.

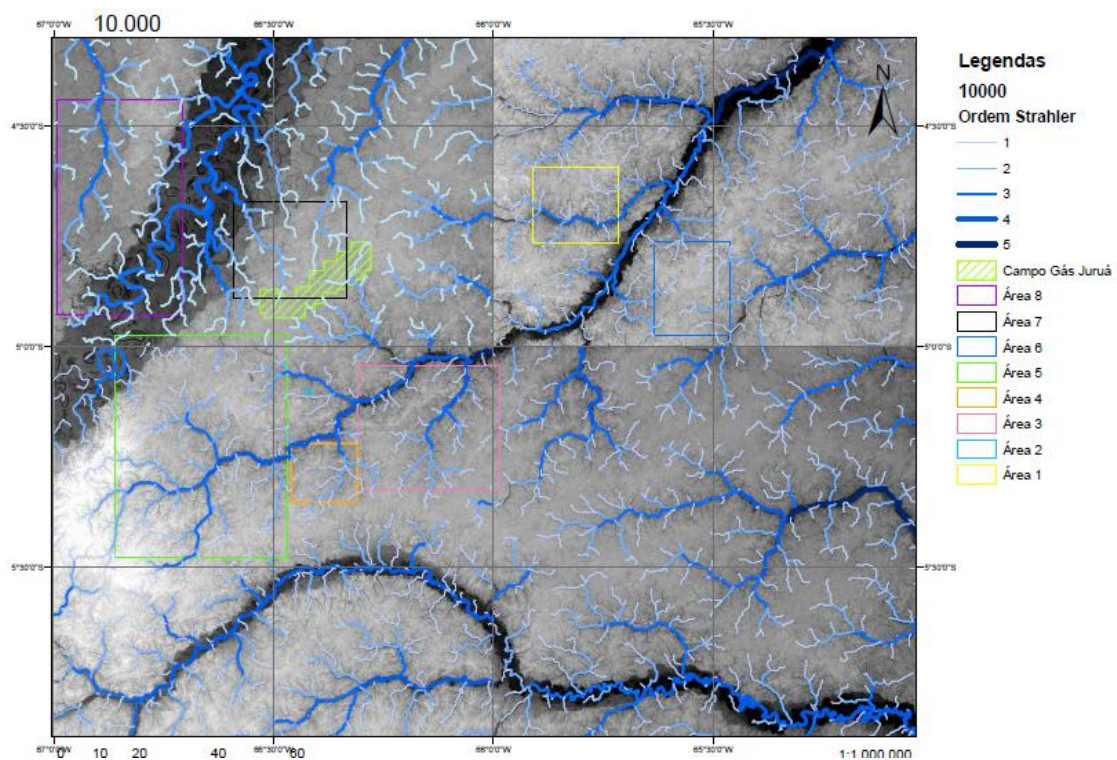


Figura 5.2.1 – Drenagens extraídas de DEM do satélite SRTM. O número de células escolhidos foi igual a 10.000, o que confere maior densidade de drenagens (mais drenagens secundárias).

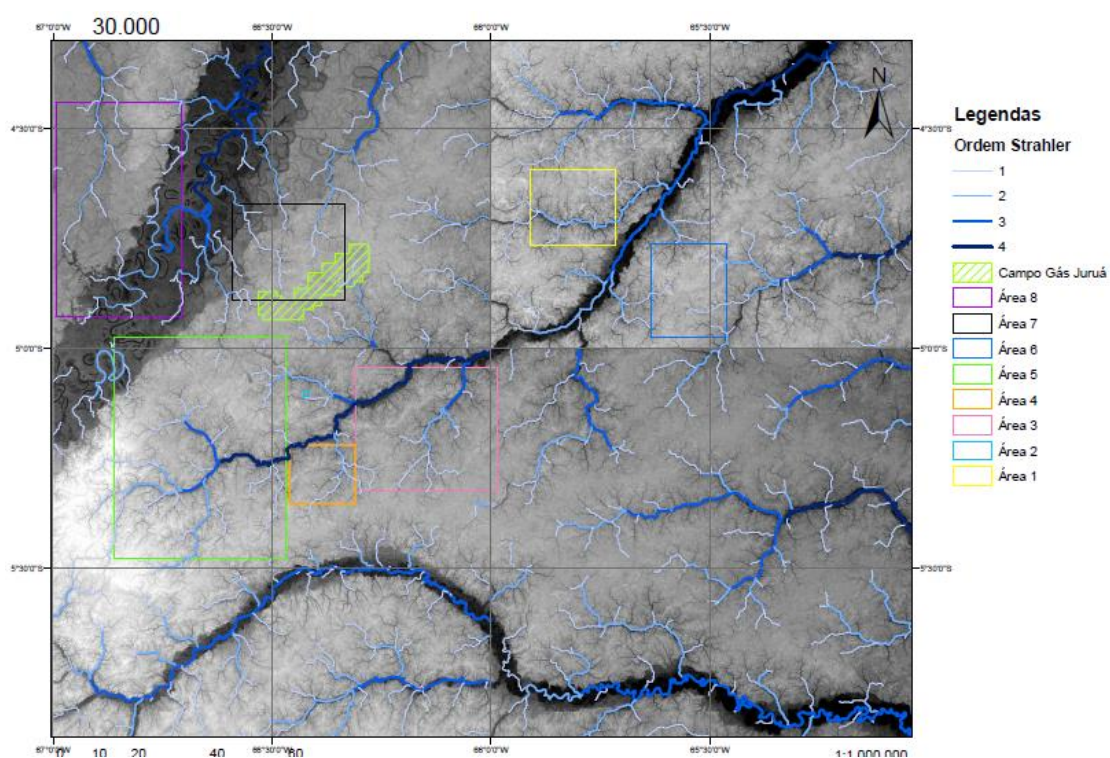


Figura 5.2.2 - Drenagens extraídas de DEM do satélite SRTM. O número de células escolhidos foi igual a 30.000, o que confere menor densidade de drenagens. Em contrapartida, é possível observar melhor o comportamento das drenagens de maior relevância (primárias).

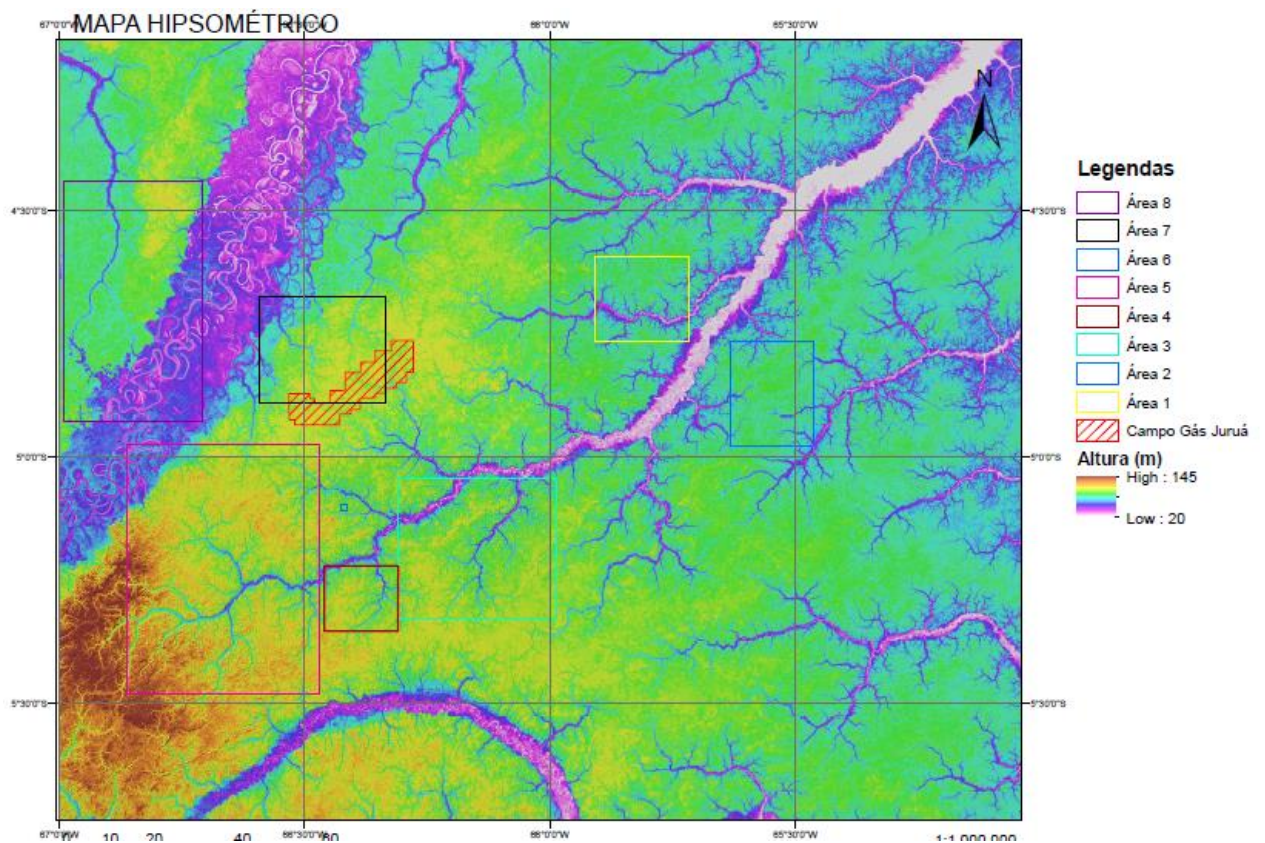


Figura 5.2.3 – Mapa hipsométrico regional. Elaborado com dados SRTM.

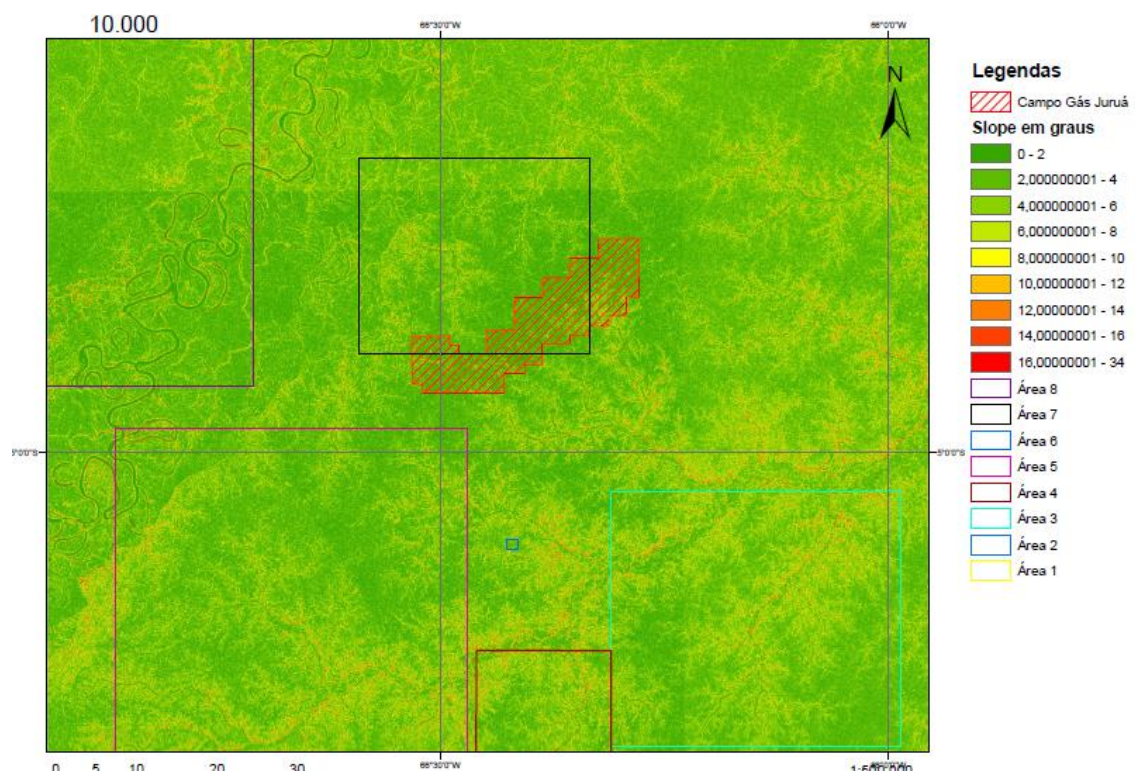


Figura 5.2.4 – Mapa de declividade ou mapa de *slope*. Elaborado com dados ALOS PALSAR.

Para avaliação das declividades regionais foi elaborado um mapa de *slope*, conforme mostrado na Figura 5.2.4, a fim de observar se havia congruência com o fato de que se trata de área extremamente arrasada, sem grandes estruturas óbvias e elementos geomorfológicos, positivos ou negativos, que indicassem estruturação tectônica ou feição de erosão, como evidenciado pelo mapa hipsométrico.

Para este mapa, foram utilizadas as imagens de mais alta resolução espacial do sensor ALOS PALSAR. Observa-se pelos resultados que a área não possui grandes declividades, com ângulo médio variando de 4 a 10° em quase toda a extensão do mapa. Os locais onde há maior variação são, usualmente, os leitos dos rios e drenagens. Portanto, é de se esperar que não haja grandes feições geomorfológicas positivas ou negativas de destaque na região, conforme observado no mapa hipsométrico da Figura 5.2.3.

Por fim, os últimos produtos gerados para a análise geomorfométrica foram os *hillshades*, ou seja, os Modelos Digitais de Superfície (Figura 5.2.5). As imagens selecionadas para este fim foram as do satélite ALOS PALSAR, pois apresentaram melhores resultados que as SRTM e ASTER DEM. Em conformidade com os resultados obtidos nos mapas de hipsometria e *slope*, não foi identificada nenhuma estrutura ou feição geomorfológica proeminente. Os resultados correspondem a uma área majoritariamente plana, com relevo monótono e aplainado. As rugosidades e demarcações observadas na superfície do terreno nos *hillshades* correspondem, em maioria, a evolução dos canais dos rios, sendo possível reconhecer e compartimentalizar antigos canais e meandros abandonados (lagos em ferradura). No mais, não foram encontradas estruturas lineares, dômicas ou anomalias geomorfológicas importantes no contexto regional.

Algumas feições sutis quanto ao relevo também são observáveis próximas ao rio Juruá. Essa compartimentalização é concordante com a mudança de altitude da região da várzea do rio (coloração azulada na porção noroeste do mapa hipsométrico da Figura 5.2.3), além de ser concordante com os contatos entre as unidades geológicas do mapeamento geológico em escala 1:1.000.000 disponibilizado pela CPRM no banco de dados *geobank*. Portanto, provavelmente trata-se do contato entre a Formação Içá, os terraços fluviais e os terrenos aluvionares, conforme Figura 5.2.6.

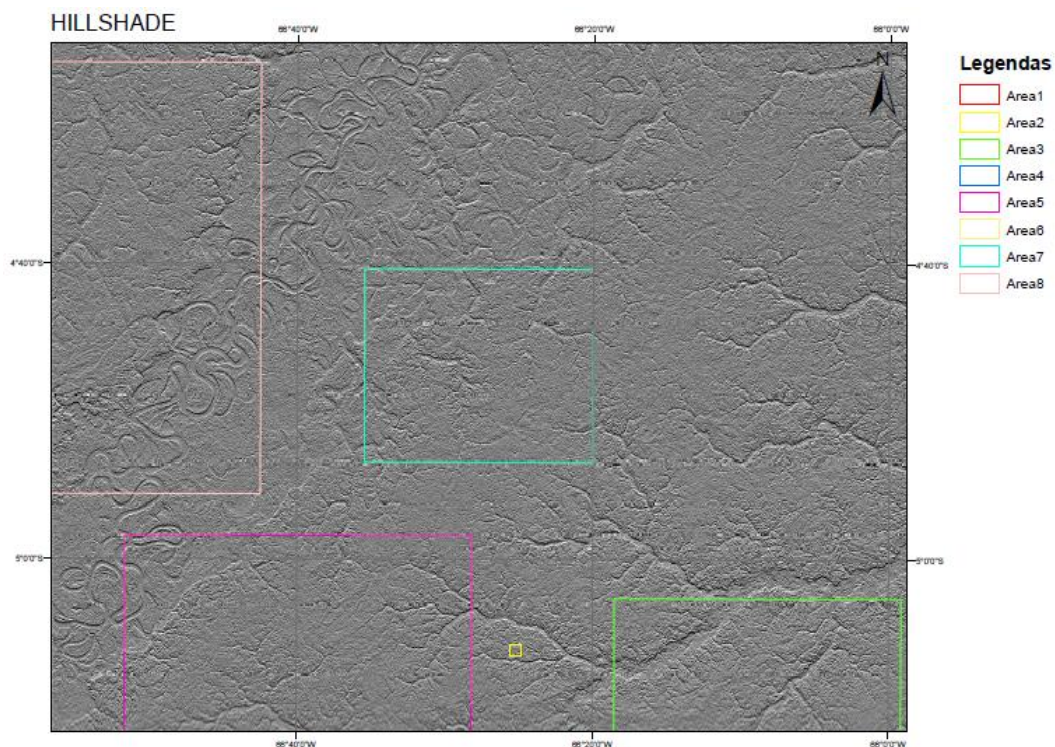


Figura 5.2.5 – *Hillshade* obtido de DEM do sensor ALOS PALSAR. Azimute de iluminação igual a 0°, inclinação de 35°. Ressalta-se a monotonia geomorfológica da região, com destaque para as feições de drenagem bem demarcadas.

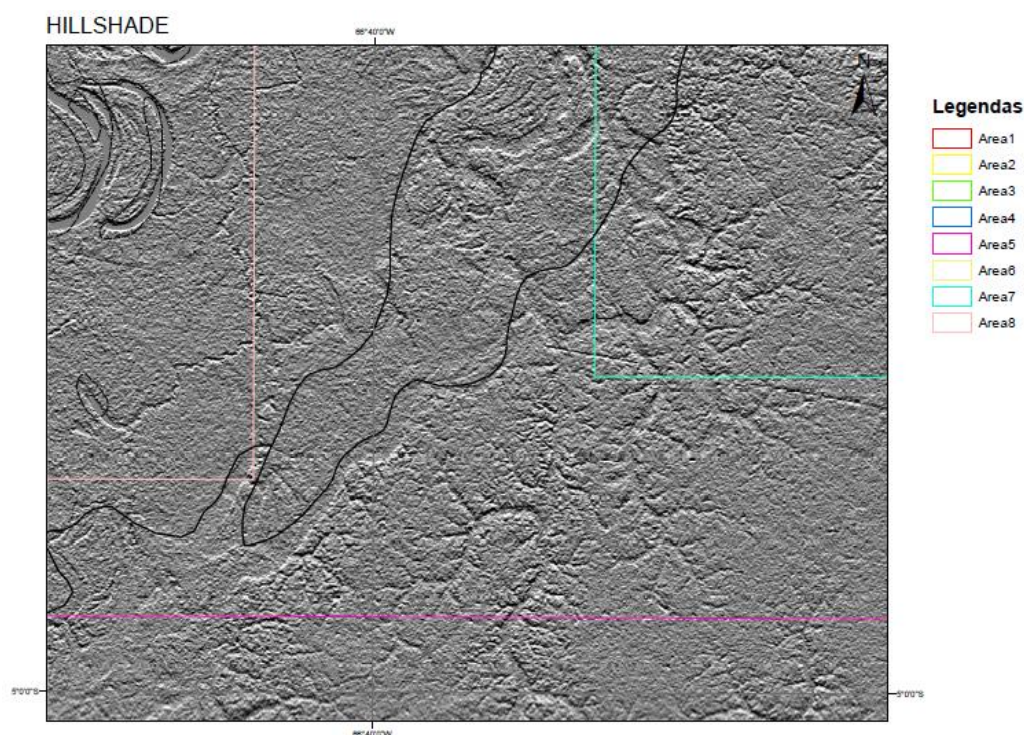


Figura 5.2.6 – *Hillshade* obtido de DEM do sensor ALOS PALSAR. Azimute de iluminação igual a 0°, inclinação de 35°. Mapa mostrando a compartimentalização da rugosidade do terreno. Sobrepondo o contorno da litologia fornecida pela CPRM (linhas pontilhadas), nota-se a concordância destas feições com os contatos apresentados no mapeamento, permitindo a interpretação de que se tratam dos contatos das litologias locais.

A utilização do *software* TecDEM para avaliação das características dos padrões de drenagem, bacias hidrográficas e da neotectônica regional se limitou apenas a alguns dos itens mencionados na revisão bibliográfica, propostos por Shahzad & Gloaguen (2010). A limitação foi devida ao lançamento de uma nova versão do *software*, o TecDEM 2.0, para o qual não existe bibliografia específica disponível. Seguiu-se, de forma parcial, o *workflow* apresentado na Figura 5.2.7, elaborado por Shahzad & Gloaguen (2010) no guia para utilização do *software*.

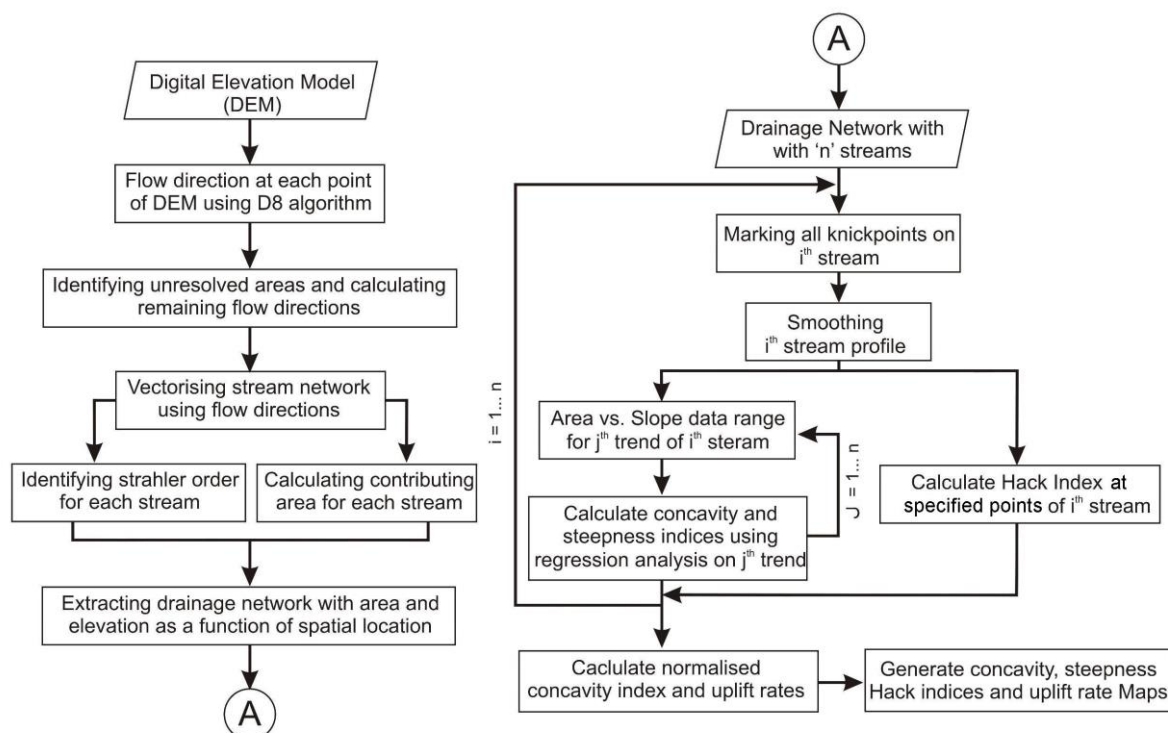


Figura 5.2.7 – *Workflow* do *software* TecDEM (primeira versão). Extraído do Manual do usuário elaborado por Shahzad & Gloaguen (2010).

O Modelo Digital de Elevação (DEM) utilizado foi uma imagem SRTM (1 Arc Second) que contém o polígono da Área 5 – escolhida como alvo para realização deste trabalho – em sua porção nordeste. O primeiro produto adquirido com o *software* foi um mapa hipsométrico (Figura 5.2.8), semelhante aos obtidos pelo *software* ArcGis. Ressalta-se o caráter qualitativo destes resultados, tendo em vista que o programa não disponibiliza ferramentas avançadas para inserção de informações de altitude, rampa de cores etc. Além disso, não é possível colocar *grid* de coordenadas, escala e polígonos de localização, funções permitidas em outros *softwares* convencionais de processamento de imagens. Observando o mapa hipsométrico, é possível observar a tendência do aumento do relevo na direção SW, acompanhando a direção do canal do rio Juruá. Comparando ao mapa hipsométrico da Figura 7.2.3, observa-se que a tendência de aumento do relevo é concordante.

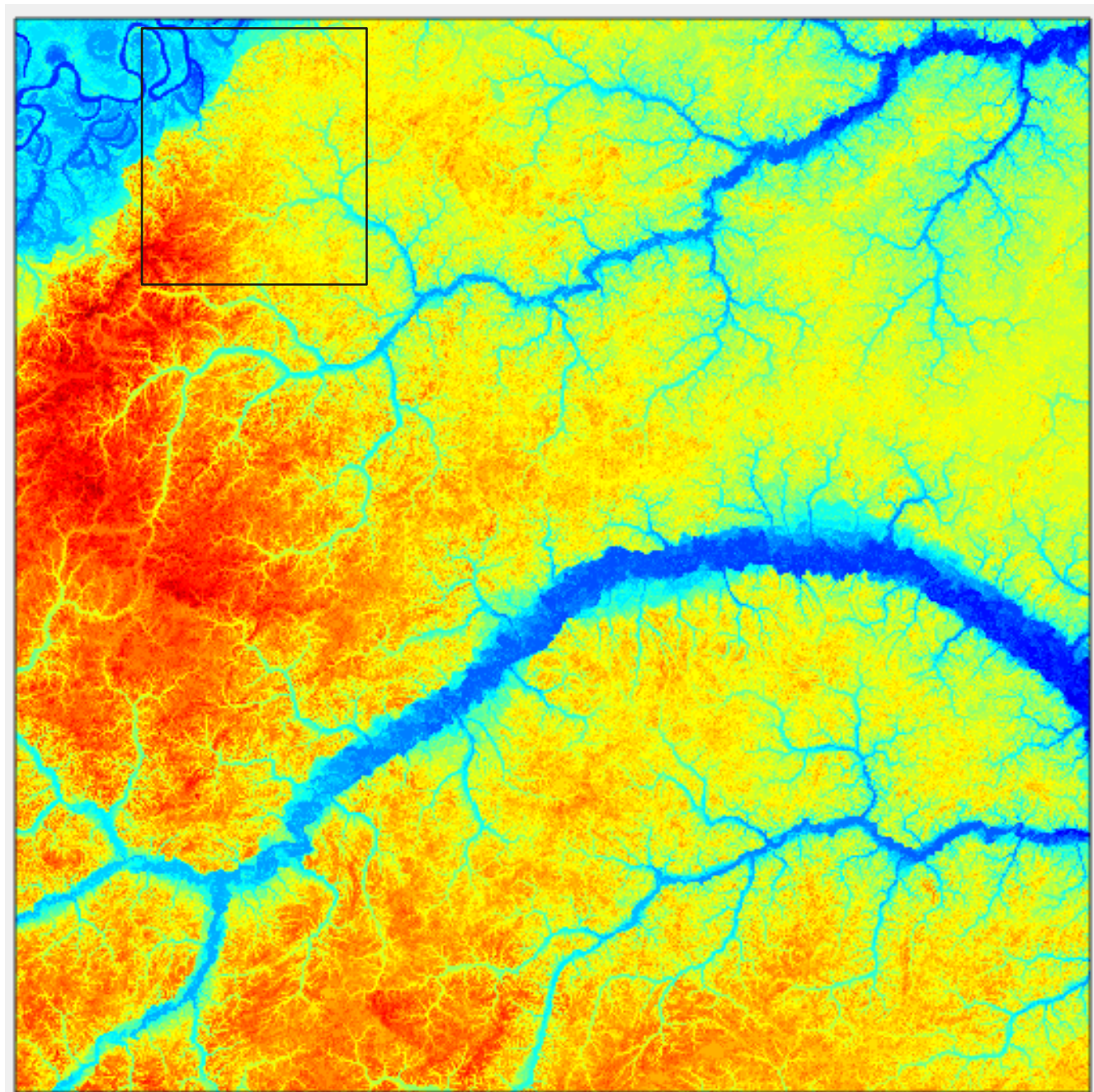


Figura 5.2.8 – Mapa hipsométrico gerado no *software* TecDEM para uma cena SRTM que contém o polígono da Área 5. Devido às limitações do *software*, a região em que se encontra a área de interesse (Área 5) está destacada pelo polígono preto da figura.

O produto seguinte foi a extração das malha de drenagens a partir do mesmo Modelo Digital de Elevação. A ordem de Strahler (1957) utilizada foi igual a 6. Isso significa que existem 6 hierarquias de drenagem na imagem, representadas por cores diferentes, correspondendo a rios principais (tons rosados e esverdeados) e seus afluentes (tons de azul escuro e verde escuro). O resultado apresentado na Figura 5.2.9 evidencia uma malha de drenagens extremamente densa, indicando que a área é extremamente irrigada. Não é possível distinguir, no entanto, preferências óbvias de direção da jusante dos rios, em padrões possivelmente radiados, com a jusante apontando para o exterior do círculo. Este fator indicaria, a partir das proposições feitas por Berger (1994), a possibilidade de uma estrutura dômica em subsuperfície.

A partir dos resultados anteriores, foi elaborado um mapa de bacias hidrográficas, conforme Figura 5.2.10. Segundo Shahzad & Gloaguen (2011), a sequência de numeração das bacias também segue a ordem de Strahler. A bacia hidrográfica mais importante e que, portanto, abarca a o rio mais expressivo da região, fica localizada na porção sul da imagem (ordem de Strahler 1).

Os mapas de Isobase consistem na relação entre as ordens de Strahler das drenagens presentes na região e as variações topográficas. As variações no ordem de Strahler possuem grande conexão com as variações na topografia, além de ser um indicativo de drenagens geradas por eventos geológicos similares, possuindo correlação de idades (Golts & Rosenthal, 1992). As linhas de isobase representam eventos de erosão e tectônica recentes (Filosofov, 1960; Shahzad & Gloaguen, op cit.). A Figura 5.2.11 apresenta os resultados do mapa de Isobases para a área estudada. É possível compartimentalizar os resultados em algumas seções. As áreas azuladas representam as regiões baixas associadas às várzeas dos rios e drenagens. As áreas esverdeadas, por sua vez, correspondem às regiões de transição entre drenagens (ou bacias hidrográficas), com relevo mais suave e sem variações abruptas. Por último, uma feição presente na porção W da imagem se destaca, com linhas de isobase com maiores valores. Esta região é correspondente ao alto topográfico apresentado no mapa hipsométrico da Figura 5.2.8, e é representado pela bacia hidrográfica de ordem de Strahler 2, representada na Figura 5.2.10. Conforme a literatura, esta região tanto pode ser fruto de processos erosivos, quanto de neotectônica. Levando-se em consideração a idade dos sedimentos que recobrem a região, e os processos erosivos a que estes foram submetidos, conforme Bezerra & Ribeiro (2015), a hipótese mais provável é de que o alto topográfico existente na região tenha origem erosiva.

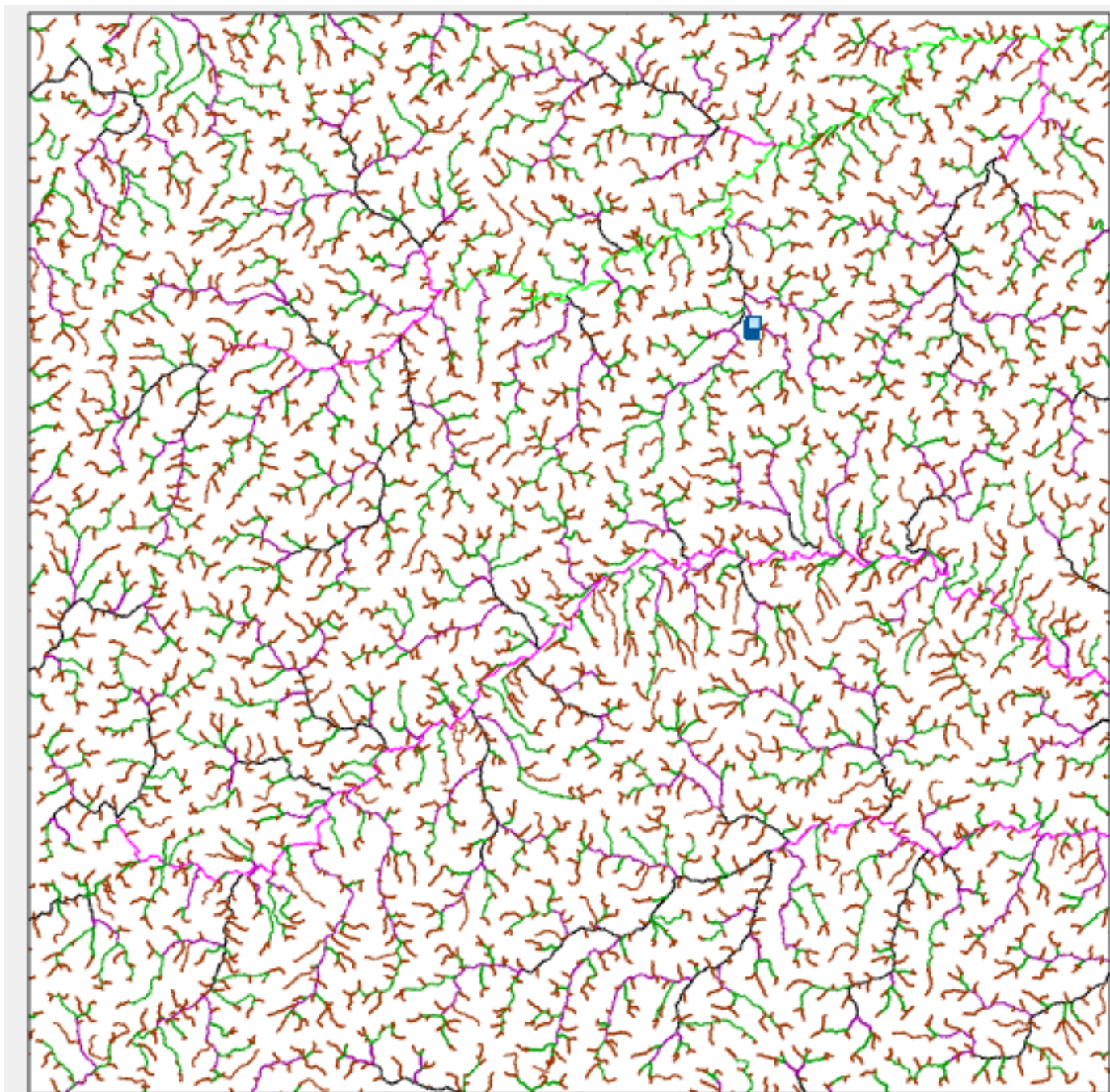


Figura 5.2.9 – Rede de drenagens gerada no *software* TecDEM para uma cena SRTM que contém o polígono da Área 5. As drenagens estão coloridas segundo suas respectivas Ordens de Strahler (1957). Cores como rosa e verde claro indicam os rios principais, enquanto cores como azul escuro e verde escuro indicam seus afluentes.

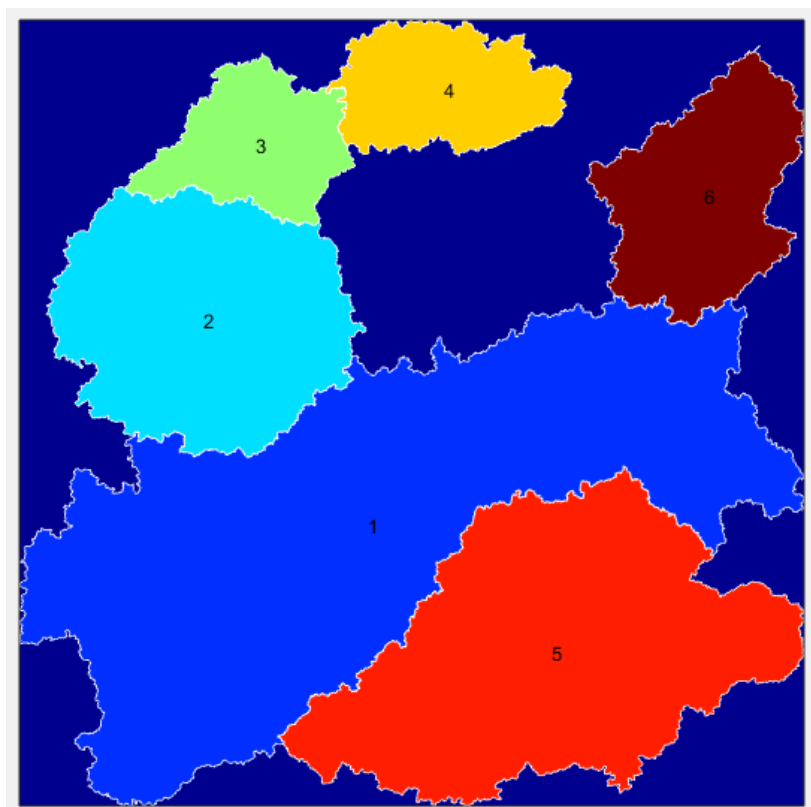


Figura 5.2.10 – Bacias hidrográficas geradas no *software* TecDEM para uma cena SRTM que contém o polígono da Área 5. A numeração é correspondente ao número de Strahler associado às drenagens.

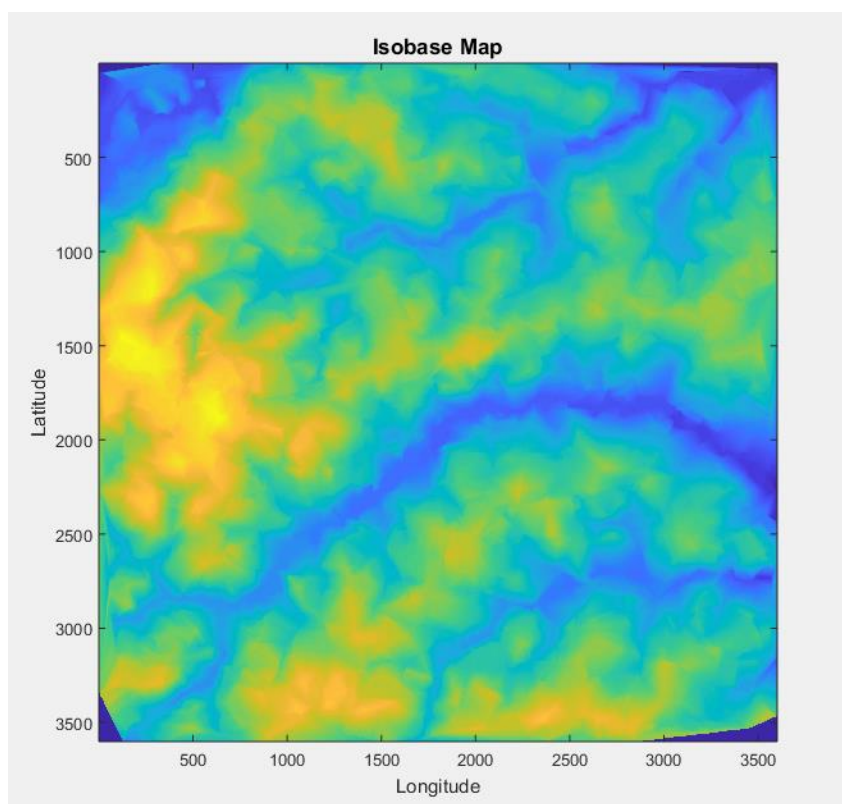


Figura 5.2.11 – Mapa de isobase gerado no *software* TecDEM para uma cena SRTM que contém o polígono da Área 5.

Os mapas de incisão tendem a ressaltar relevos relativos ou locais, e são calculados pela diferença de elevação máxima e mínima dentro de uma “janela” variável. A técnica apresenta uma limitação que depende da janela variável adotada, onde teoricamente seria necessário abarcar uma região com pelo menos dois altos topográficos e/ou dois vales. De outra forma, os resultados não mostram o relevo local ou relativo, mas sim um mapa de *slope* (Evans, 1972; Shahzad & Gloaguen, 2010). No caso da área de estudo, apesar de haver um alto topográfico na porção oeste da imagem, a variação do relevo é bastante monótona. Portanto, conforme mostrado na Figura 5.2.12, o mapa resultante é muito parecido com o mapa de *slope* da Figura 5.2.4, obtido para área a norte. As regiões entre as drenagens tendem a ser mais planas (azul mais profundo), enquanto as regiões próximas aos canais fluviais apresentam *slope* mais proeminente (coloração amarelada). O mapa de “*vertical dissection*” possui objetivo similar aos mapas de isobase e de incisão, evidenciando feições erosivas e tectônicas. Observa-se na Figura 5.2.13 que os resultados também mostram uma região bastante monótona à declividade. Os azuis mais profundos, que indicam baixa declividade, se concentram nas regiões entre as drenagens e na porção do platô. As regiões das drenagens e canais fluviais, no entanto, apresentam coloração azul mais amena e/ou amarelada, indicando aumento da declividade nestas regiões. Nenhuma feição tectônica importante é ressaltada, no entanto, o que corrobora com a inferência de monotonia topográfica regional.

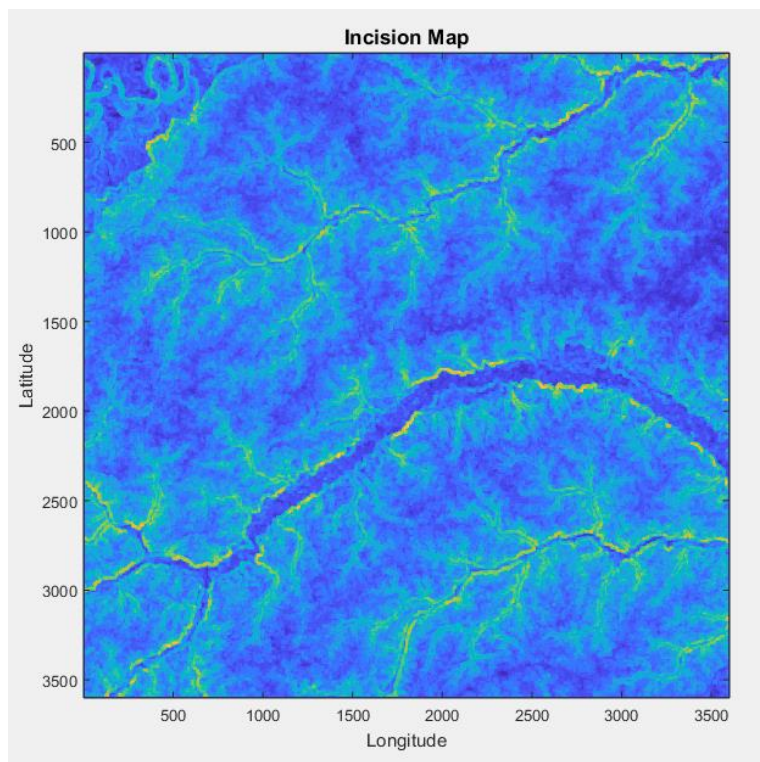


Figura 5.2.12 – Mapa de incisão gerado no software TecDEM para uma cena SRTM que contém o polígono da Área 5.

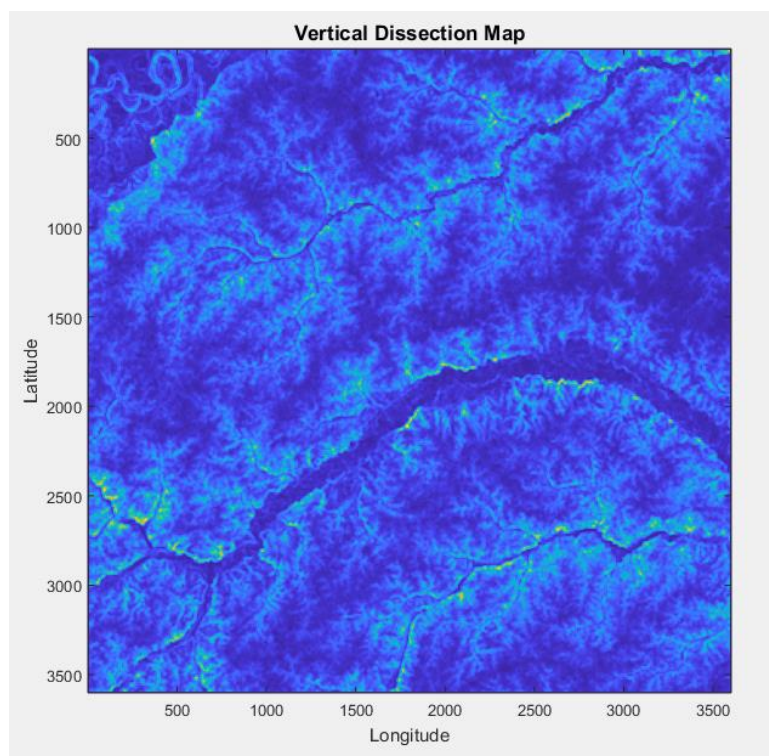


Figura 5.2.13 – Mapa de “vertical dissection” gerado no *software* TecDEM para uma cena SRTM que contém o polígono da Área 5.

Alguns outros recursos do *software* TecDEM foram utilizados, como o cálculo de bacias assimétricas e índice T, que servem para avaliar a variação da curvatura dos canais de drenagem em áreas de tectônica ativa (como um orógeno ativo, por exemplo), além de curvas hipsométricas, que servem para comparar o relevo com as bases de canais fluviais (Figura 5.2.14). Entretanto, estes resultados seriam interessantes para um sistema tectonicamente ativo, não se aplicando ao contexto da Bacia do Solimões.

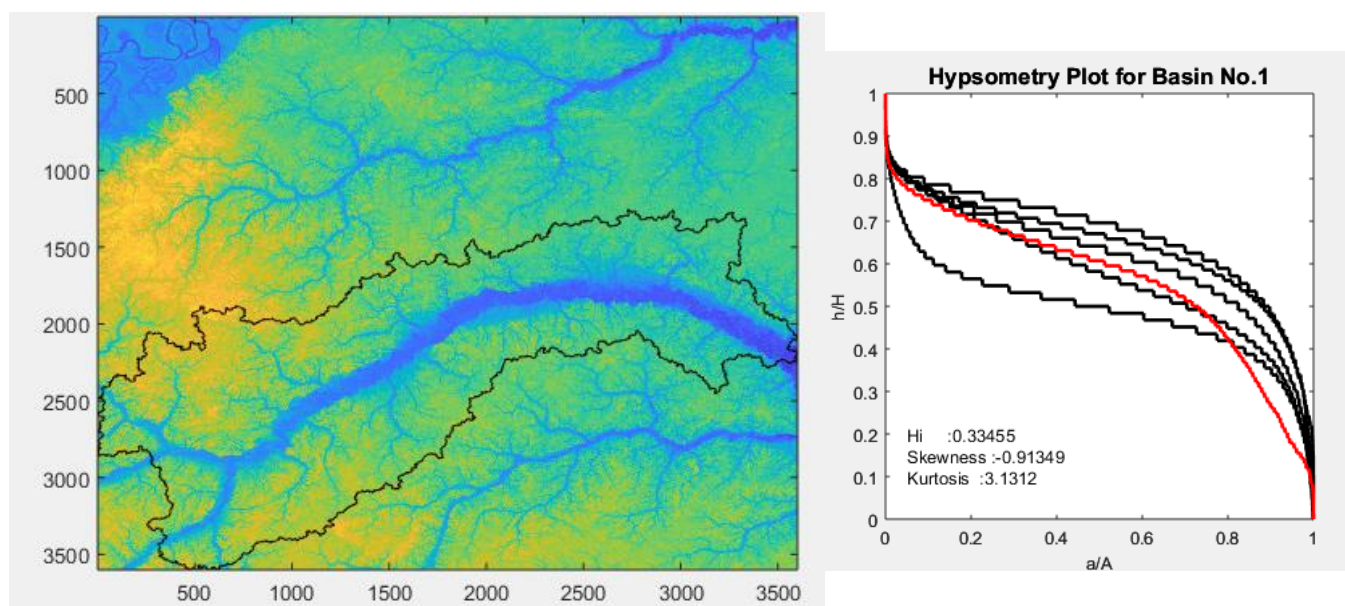


Figura 5.2.14 – Delimitação de bacias assimétricas (esq.) e curva hipsométrica (dir.). Estes dados não foram utilizados no trabalho por não se aplicarem ao contexto tectônico da Bacia do Solimões

5.3. Geobotânica

A análise geobotânica foi feita, majoritariamente, sobre um mosaico composto por duas cenas RapidEye (tiles 726 e 725), obtidas nas datas de 01/09/2014 e 09/07/2017. A Figura 5.3.1 mostra uma composição colorida RGB 321 das duas cenas RapidEye utilizadas, ambas obtidas em 2014. Os processamentos limitados a essas duas imagens foi dado por conta da extrema escassez de imagens em boa qualidade disponíveis para a região, em todos os sensores multiespectrais pesquisados. Este fenômeno acontece, principalmente, devido ao clima da região que fica localizada próxima ao Equador, com alta umidade e altos índices de precipitação, o que torna a cobertura de nuvens e a influência atmosférica muito altas, impossibilitando a utilização da maioria dos dados de sensores ópticos multiespectrais.

Inicialmente, foi feita a comparação dos dados em *grayscale* para cada uma das cinco bandas espectrais do sensor RapidEye. Neles, é possível distinguir regiões mais claras, que indicam maiores valores de reflectância naquele determinado comprimento de onda, enquanto as áreas mais escuras indicam o inverso. A sequência de imagens de 5.3.2 a 5.3.11 apresenta a comparação entre as bandas espectrais para as duas imagens, nas duas datas distintas, para as tiles 725 e 726.

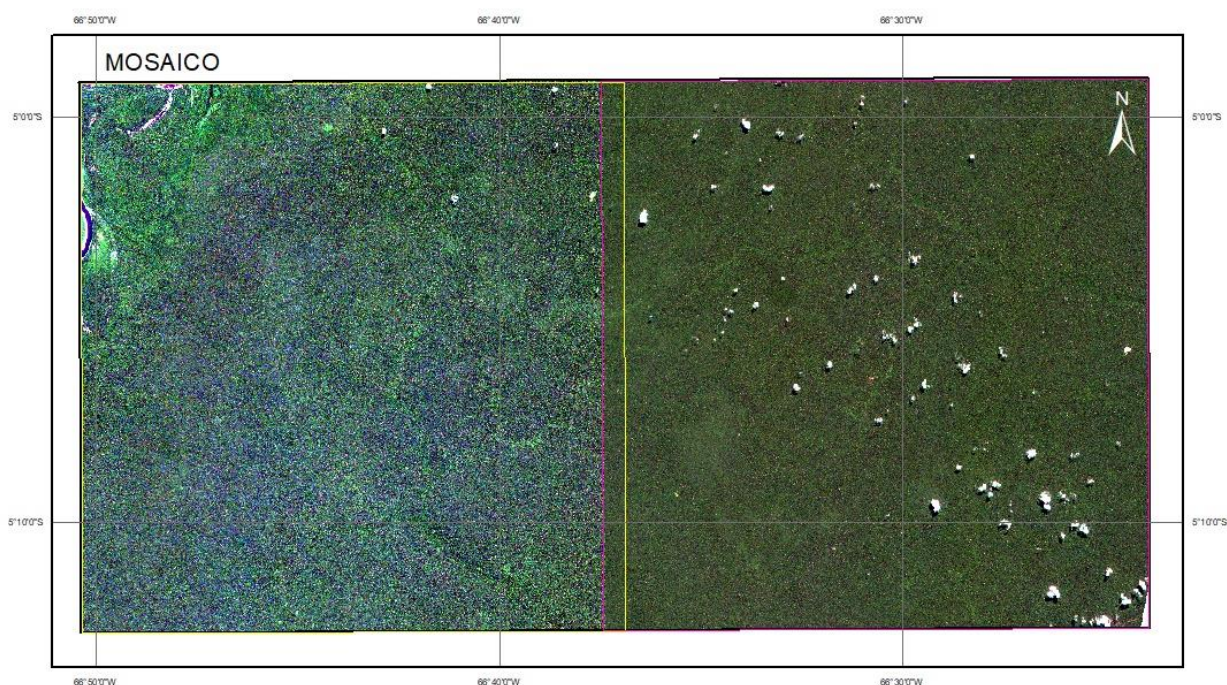


Figura 5.3.1 – Mosaico das cenas RapidEye em cores naturais (RGB 321) utilizadas para os processamentos de geobotânica. Ambas as imagens foram obtidas em 2014.

A sequência de *grayscale*s gerados para as duas datas distintas (2014 e 2017) em cada cena, possibilitou a comparação do comportamento espectral das imagens para as bandas espectrais disponíveis nas imagens RapidEye. No caso da cena (*tile*) 726, foi possível observar uma região bem demarcada, localizada na porção W-SW da imagem, com extensão de aproximadamente 7 km, de maior reflectância dentro do espectro visível (RGB). Apesar de o fenômeno ser mais evidente na imagem de 2014, nas bandas na região espectral do vermelho (Figura 7.3.4) e *Green* (Figura 7.3.3) de 2017 ainda é possível observar, na mesma região, uma área com reflectância levemente superior nas bandas do visível. A região do *Blue* (Figura 7.3.2), no entanto, não apresenta o mesmo padrão na imagem de 2017, possivelmente devido ao alto espalhamento de Rayleigh a que esta banda está submetida. Desta forma, a imagem de 2014 apresenta uma variação mais demarcada para as três bandas da região do espectro visível, possibilitando a compartimentalização de uma área limitada (~7 km na direção N) cuja vegetação apresenta comportamento espectral diferente com relação às vizinhanças, no sentido do aumento de reflectância no espectro visível. Este fenômeno está possivelmente associado às estações do ano e, por consequência, à pluviosidade da região e saúde das plantas. A obtenção das imagens ocorreu em 01/09/2014 e 09/07/2017, extremo da seca e meio da seca respectivamente. Observe-se que a imagem coletada em 01/09 poderia refletir as primeiras chuvas, mas não é o que pode-se depreender da interpretação das imagens. A imagem obtida no auge da seca apresenta uma variação nas respostas da reflectância muito maiores que a imagem obtida em julho, meados da estação seca, quando a vegetação, tanto a crescida em locais menos propícios como as espécies mais sensíveis, ainda não apresenta importante estresse hídrico, levando a respostas espectrais mais homogêneas no geral.

Ressalta-se, ainda, que a maior parte da região de maior reflectância no visível coincide com uma área sobrelevada, conforme observado no mapa hipsométrico da seção 5.2 e destacado no retângulo vermelho da Figura 5.3.3, onde ocorrem variações de altitude na ordem de 10 a 15 m com relação às vizinhanças o que deve implicar em início de estresse hídrico: ambas as imagens são do período seco e esta situação se agrava na imagem do início de setembro, quando o verdor vai se restringindo às matas de várzea, nas proximidades dos grandes rios. Como fator adicional para a variabilidade espectral, observe-se que diferenças de altitude podem condicionar variações florísticas em florestas tropicais úmidas de terras baixas, como a região de estudo (Liebermann et al., 1985). É possível concluir, portanto, que a “mancha” onde a variação na reflectância ocorre é devida a uma diversificação florística, causada por uma anomalia topográfica positiva. Entretanto, as variações de resposta espectral da vegetação ocorrem, também, em uma região que não está sob efeito da sobrelevação do terreno, na região destacada no retângulo amarelo da Figura 5.3.3, abrindo espaço para outras interpretações. Trabalhos como os de Gustafson

(1950) e Mora (2014), mostraram que a reflectância de áreas vegetadas sob estresse cresceu consideravelmente nas bandas do visível, devido a redução do conteúdo de clorofila, além de uma diminuição da reflectância na região do NIR devido a danos estruturais das plantas.

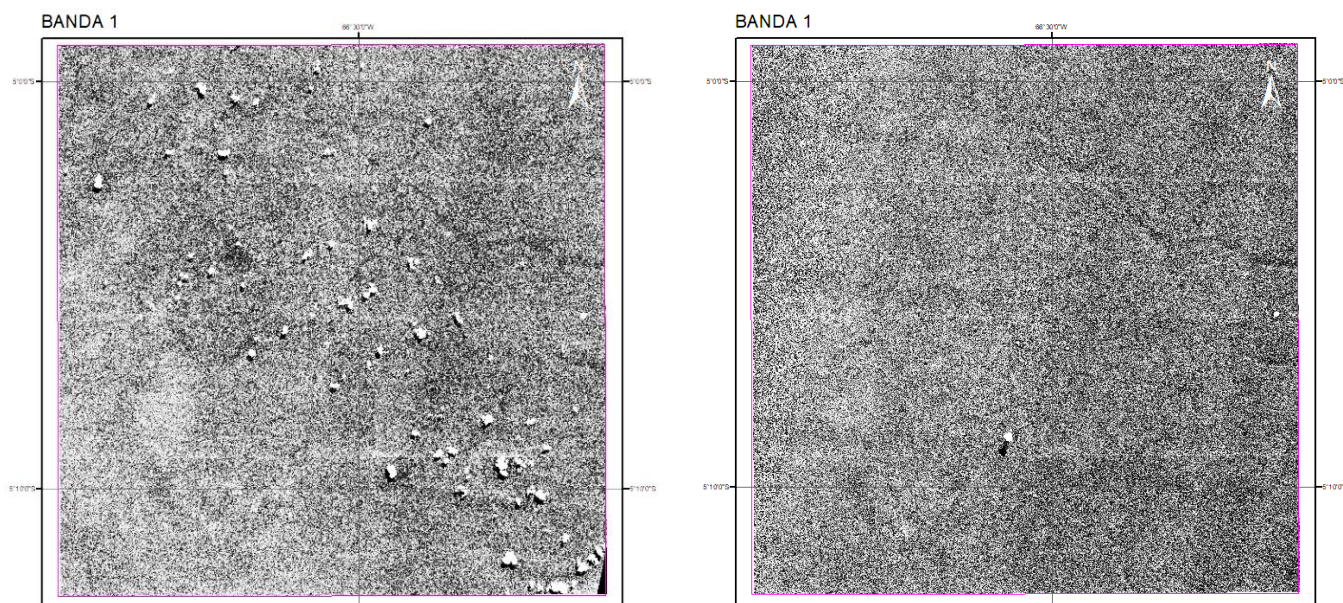


Figura 5.3.2 – Cena RapidEye (tile 726) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). *Greyscale* da banda espectral na região do azul (440-510 nm). É possível observar uma região mais clara na porção W-SW da imagem, principalmente na data de 2014, indicando que a reflectância no azul é mais intensa nesta região. Destaca-se a grande influência atmosférica nesta região do espectro, devido ao espalhamento de Rayleigh.

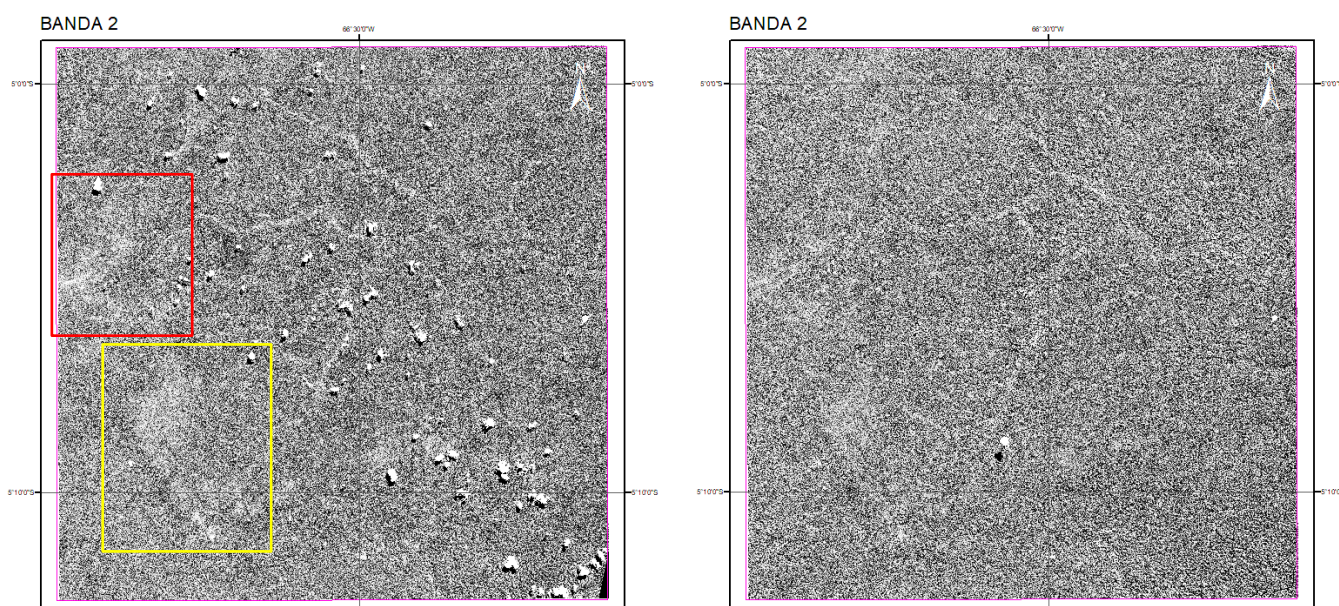


Figura 5.3.3 – Cena RapidEye (tile 726) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). *Grayscale* da banda espectral na região do verde (520-590 nm). É possível observar, também, uma região mais clara na porção W-SW da imagem obtida em 2014, indicando que a reflectância no verde é mais intensa nesta região na referida data. A reflectância deste comprimento de onda em 2017 é menos expressiva. O retângulo vermelho indica a região que não está sobre anomalia topográfica, enquanto o retângulo amarelo indica área que está sobre anomalia topográfica positiva, conforme discutido no texto.

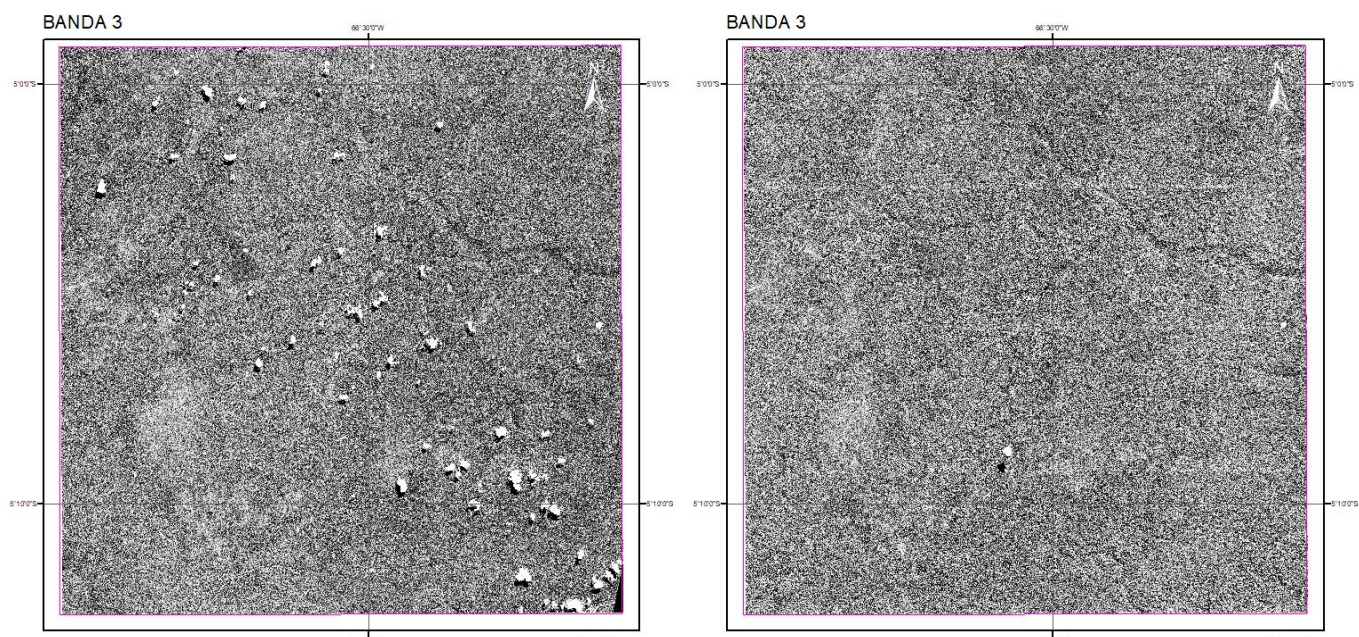


Figura 5.3.4 – Cena RapidEye (tile 726) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). *Grayscale* da banda espectral na região do vermelho (630-690 nm). Na imagem de 2014, também é possível observar a região com maior reflectância neste comprimento de onda, localizado na porção W-SW da imagem. Portanto, o comportamento é característico para o espectro no visível.

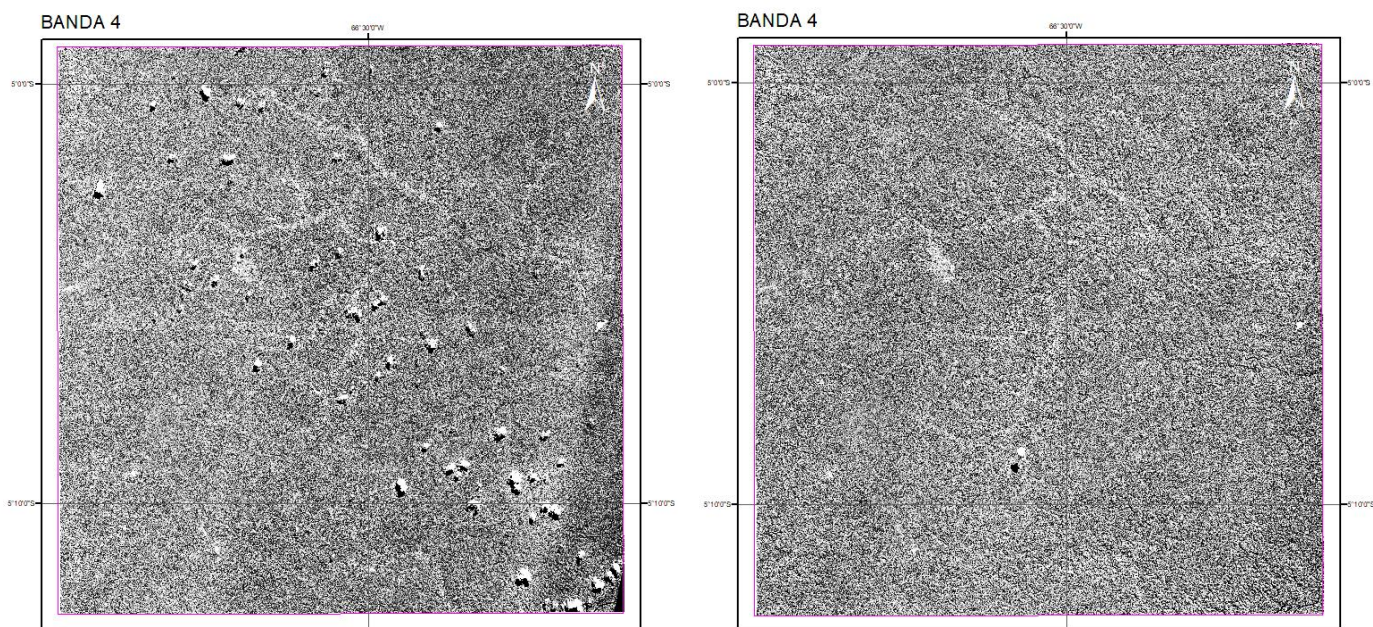


Figura 5.3.5 – Cena RapidEye (tile 726) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). *Grayscale* da banda espectral na região na região espectral do Red Edge (690-730 nm). Neste caso, não se observa alterações óbvias na resposta espectral entre as duas imagens, com exceção à faixa de menor resposta na porção SE da imagem obtida em 2014, que pode existir devido a ruídos.

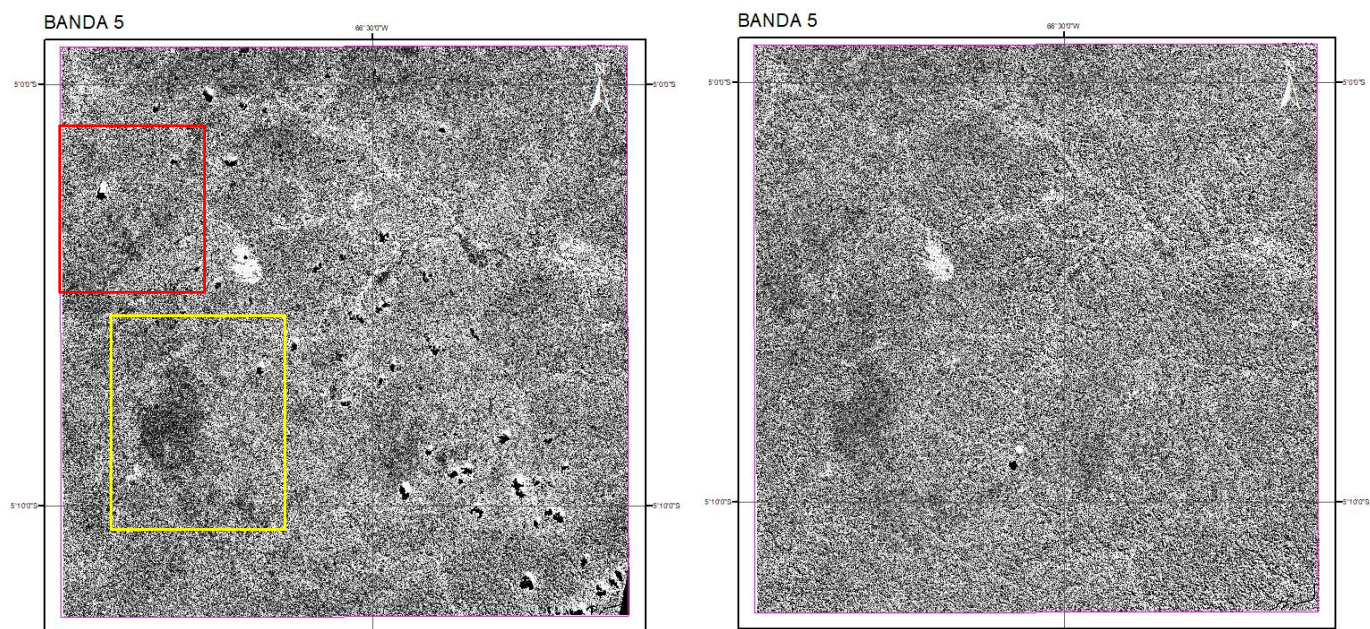


Figura 5.3.6 – Cena RapidEye (tile 726) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). *Grayscale* da banda espectral na região do NIR (760-880 nm). Existe uma área de menor reflectância nesta região do espectro bem demarcada na imagem de 2014 (retângulo amarelo), e uma menos expressiva de direção NE-SW (retângulo vermelho).

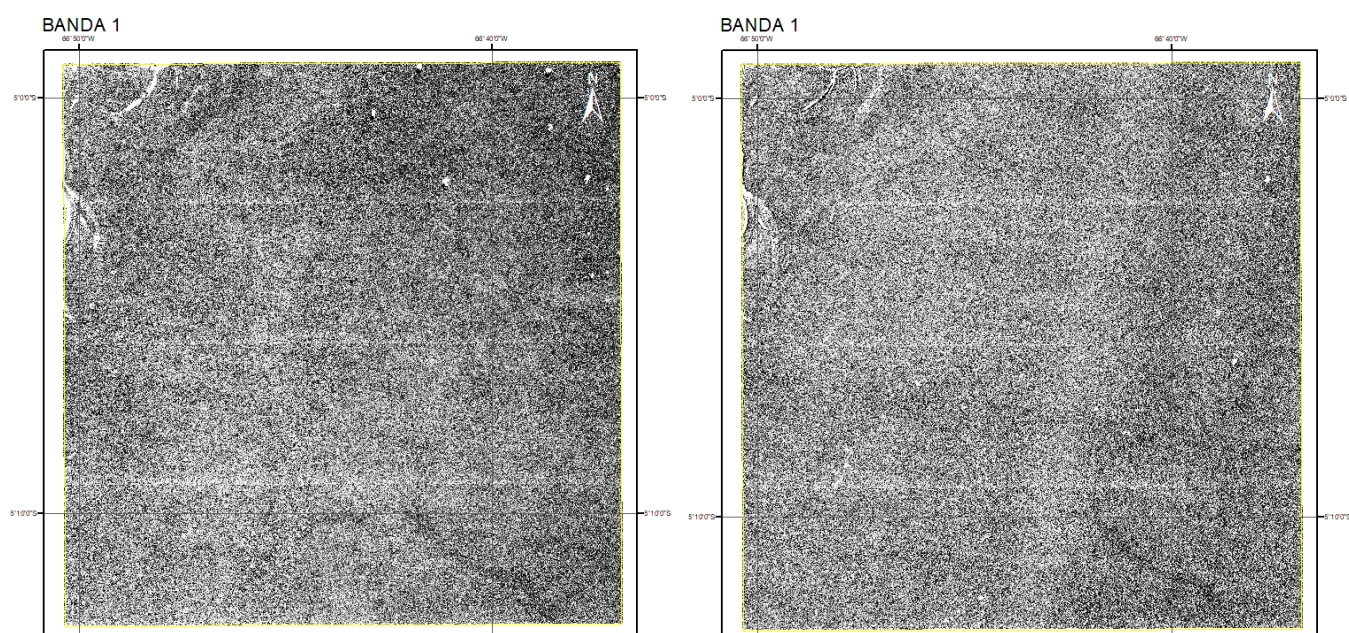


Figura 5.3.7 – Cena RapidEye (tile 725) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). *Grayscale* da banda espectral na região do azul (440-510 nm). Observa-se tendência de menor reflectância neste comprimento de onda na porção norte da imagem de 2014.

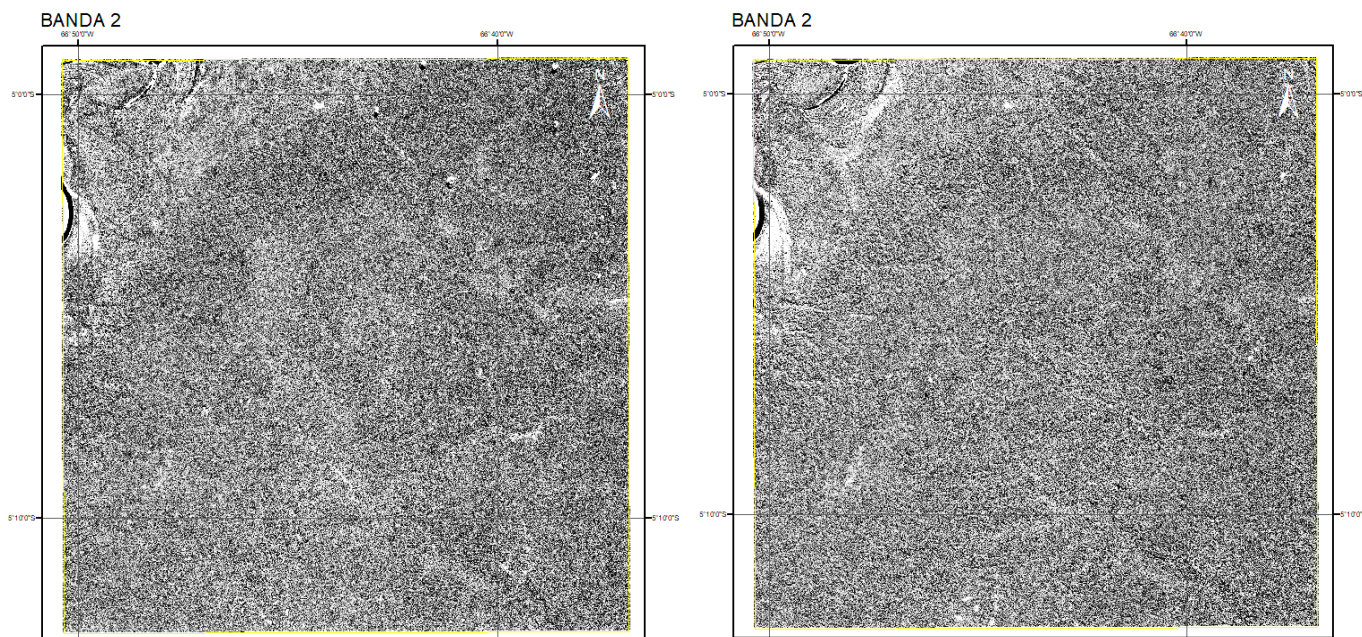


Figura 5.3.8 – Cena RapidEye (tile 725) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). Grayscale da banda espectral na região do verde (520-590 nm). Nota-se faixa de orientação NE-SW, na porção NW da imagem (próximo ao rio Juruá) com tendência de menor reflectância nesta faixa do espectro na imagem de 2014.

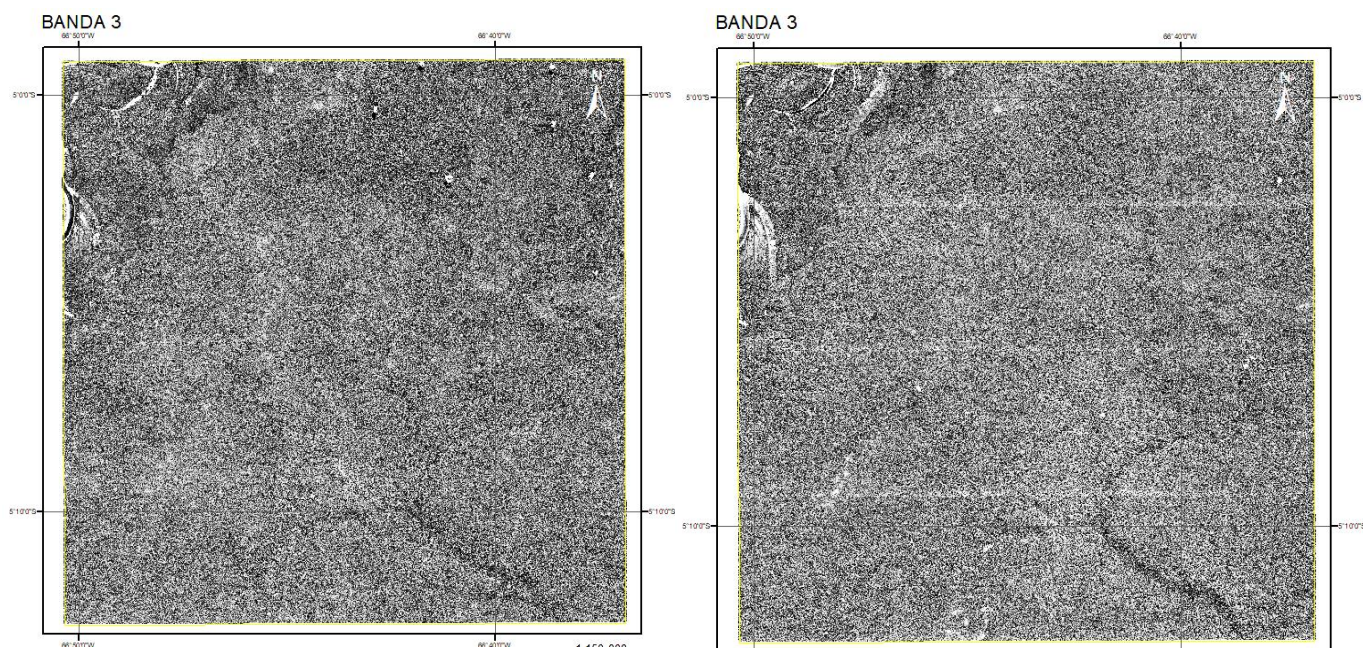


Figura 5.3.9 – Cena RapidEye (tile 725) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). Grayscale da banda espectral na região do vermelho (630-690 nm). Não se observam alterações óbvias no comportamento espectral das imagens obtidas nas duas datas para este comprimento de onda.

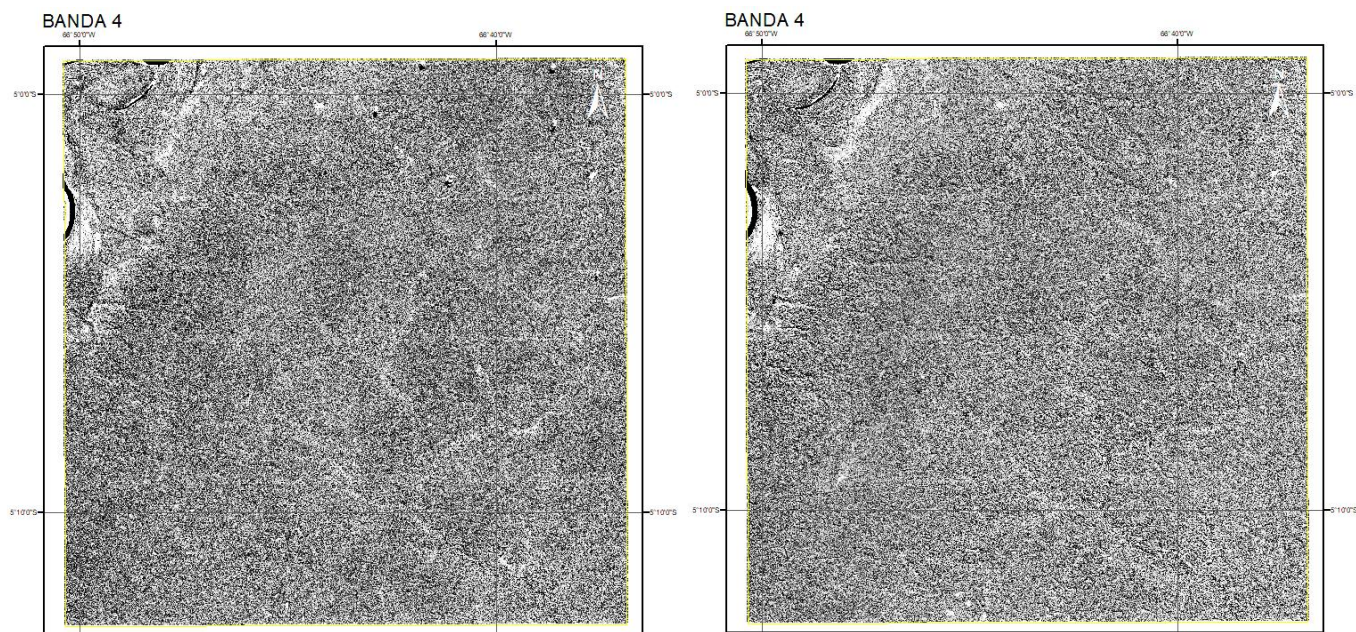


Figura 5.3.10 – Cena RapidEye (tile 725) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). Grayscale da banda espectral na região na região espectral do Red Edge (690-730 nm). É possível observar leve tendência a menores respostas neste comprimento de onda em faixa de orientação NE-SW na porção NW da imagem de 2014.

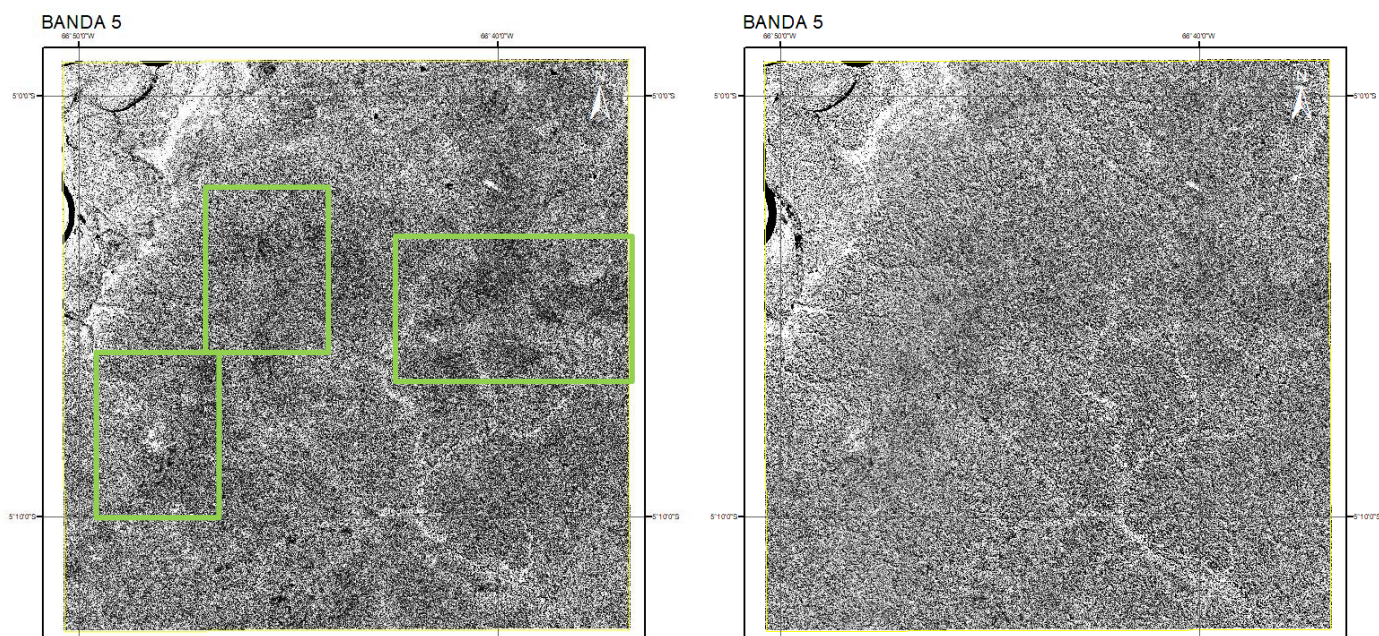


Figura 5.3.11 – Cena RapidEye (tile 725) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). Grayscale da banda espectral na região do NIR (760-880 nm). Neste caso, é possível observar porções difusas de menor reflectância na região central da imagem de 2014, conforme indicado pelos retângulos verdes.

A banda na região espectral do Red Edge (Figura 5.3.5), por sua vez, não apresentou grandes diferenças quanto à reflectância nas duas datas, excetuando-se uma faixa de menor resposta na porção SW da imagem de 2014. A banda do NIR (Figura 5.3.6), no entanto, apresentou resultados bastante interessantes. É possível observar que, na imagem de 2014, a região da “mancha” de reflectância distinta possui valores menores de reflectância nesta faixa do espectro. Sabe-se que a região do espectro do NIR tende a ser mais bem refletida conforme o aumento do índice de área foliar, dada a intensa absorção que ocorre pelo solo e, menos intensamente, pela serapilheira. Assim as respostas mais baixas deste comprimento de onda na região W-SW da imagem, principalmente no auge da seca, indicam que menor densidade da floresta se comparada às vizinhanças. Este comportamento corrobora a hipótese de variação florística causada pela presença de anomalia topográfica. Nota-se, no entanto, que a área que está na região mais baixa, destacada pelo retângulo vermelho da Figura 5.3.6., também possui reflectância menor que as vizinhanças na região do NIR, com tendência de orientação NE-SW. Na imagem de 2017, ainda é possível observar a “mancha” de baixa reflectância no NIR, porém de forma mais amena, tendo em vista que os arredores possuem comportamento espectral semelhante nesta data. Este fenômeno pode ser devido a diminuição de reflectância no NIR sofrida pela vegetação na estação seca, particularmente em seu auge.

Já para a cena (*tile*) 725, as variações no comportamento espectral nas diferentes bandas disponíveis no sensor RapidEye apresentam tendências muito mais homogêneas e/ou difusas. As bandas nas regiões do Blue (Figura 5.3.7) e na região espectral do vermelho (Figura 5.3.9), por exemplo, não apresentam variações significativas entre as duas datas. Já as bandas nas regiões na região espectral do verde (Figura 5.3.8) e na região espectral do Red Edge (Figura 5.3.10) apresentam uma faixa larga, de orientação NE-SW, com menores valores de reflectância nestes pontos. Já no caso da banda NIR, é possível observar diversas regiões com reflectância mais baixa neste comprimento de onda na data de 2014, que se distribuem de maneira difusa e/ou sem direção preferencial, conforme destacado pelos retângulos verdes da Figura 5.3.11. Na data de 2017, no entanto, a resposta espectral no NIR tende a homogeneidade, refletindo um momento menos agressivo da seca.

Foram elaboradas composições coloridas falsa-cor (CCFC), no arranjo RGB 543 (NIR - Red Edge - Red), para as cenas 726 e 725 (imagens de 2014 e 2017) com o objetivo de observar, qualitativamente, as reflectâncias de cada uma dessas bandas para cada imagem, bem como suas variações temporais. Os resultados estão apresentados nas imagens 5.3.12 e 5.3.13.

É possível observar, pela Figura 5.3.12, que os resultados obtidos para a cena 726 na imagem de 2014, a existência de uma forte compartimentalização das áreas vegetadas com comportamentos espectrais distintos. Como apontado anteriormente pela análise individual das bandas, existe uma região na porção W-SW da imagem que apresenta variação espectral importante com relação às áreas adjacentes. Nesta composição colorida, esta região possui coloração azulada marcante, indicando maior reflectância da banda do vermelho do que das bandas do NIR e *red edge*. As demais áreas, em sua maioria, variam de uma coloração amarelada, que indica altas respostas das bandas do NIR e *red edge*, para áreas ciano-amareladas, indicando valores importantes de reflectância de vermelho + *red edge* e *red edge* + NIR. A imagem de 2017, por sua vez, apresenta uma coloração azulada predominante por toda sua extensão, o que indica maior importância da banda do vermelho. A região de comportamento espectral anômalo ainda é distinguível, mas não de maneira tão evidente. A hipótese para explicar o fenômeno, como já levantado anteriormente, é de que a vegetação esteja mais saudável na imagem de 2014, pois foi obtida no início da primavera, enquanto a imagem de 2017 foi obtida durante o inverno, onde as plantas em senescência tendem a estar com menor conteúdo de água foliar e menor índice de área foliar. Além disso, a CCFC RGB 543 da imagem de 2014 corrobora com a hipótese de que a vegetação sobre o alto topográfico e suas adjacências possuem menor índice de área foliar e densidade de vegetação verde, mesmo quando as demais áreas vegetadas possuem valores mais altos para os referidos parâmetros, por conta da mudança de estação e, conseqüentemente, do clima e da pluviosidade. Levando-se em consideração as respostas anômalas na imagem de 2014, a Figura 5.3.14 apresenta um *zoom* na região de interesse, onde se pode observar um padrão marcante na direção NE-SW, em que a vegetação apresenta as características de reflectância descritas anteriormente.

A cena 725, no entanto, apresentou resultados menos contrastantes. Observa-se pela Figura 5.3.13 que as regiões com predomínio de azul (Red) são bastante homogêneas nas duas datas. Nota-se que existem algumas áreas de coloração azul/ciano mais intensa na imagem de 2014, ocorrendo em manchas esparsas, difusas e sem direção preferencial. Este comportamento era esperado na CCFC 543, tendo em vista a baixa reflectância da banda do NIR observada na imagem 5.3.11. Além disso, na porção NW das duas imagens, é possível observar uma coloração amarelada intensa, indicando alta reflectância dos comprimentos de onda do NIR e *red edge*. Este comportamento é devido à vegetação que ocorre na área de várzea do rio Juruá, onde ocorre mata de várzea, não tão sujeita aos períodos de seca.

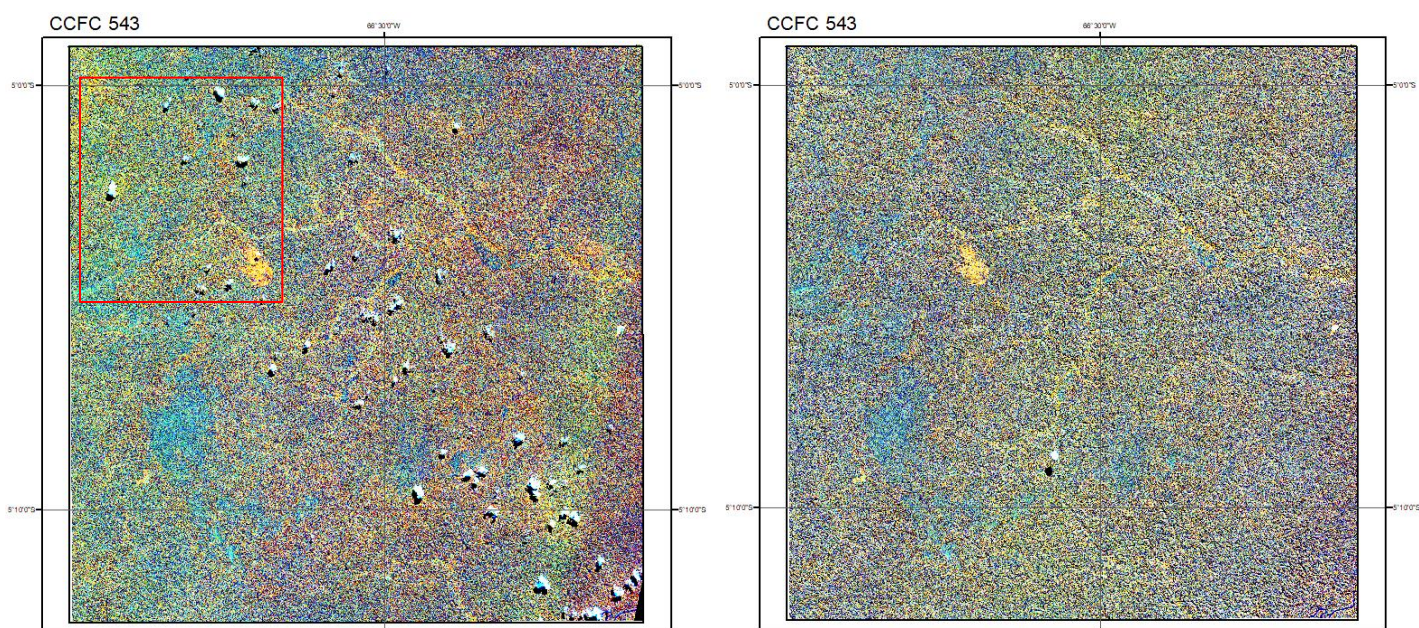


Figura 5.3.12 – Cena RapidEye (tile 726) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). CCFC RGB 543. Observa-se maior reflectância na região espectral do Red Edge do NIR na imagem de 2014, com exceção às áreas do platô e adjacências. O retângulo vermelho destaca a área em zoom na Figura 5.3.14.

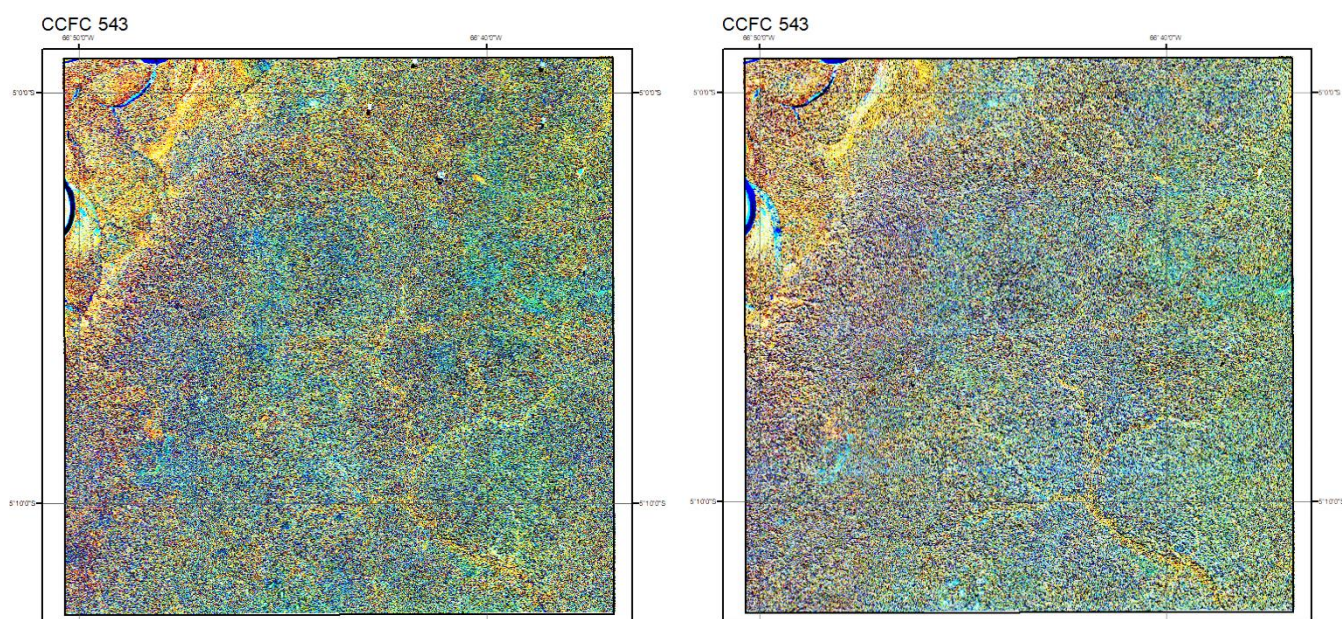


Figura 5.3.13 – Cena RapidEye (tile 726) obtida nas datas de 01/09/2014 (esq.) e 09/07/2017 (dir.). CCFC RGB 543. Observa-se maior reflectância na região espectral do vermelho em ambas as imagens, representado pela coloração azulada. A imagem de 2014, no entanto, apresenta regiões de coloração azul mais intensa, indicando maior reflectância na região espectral do vermelho nessas regiões.

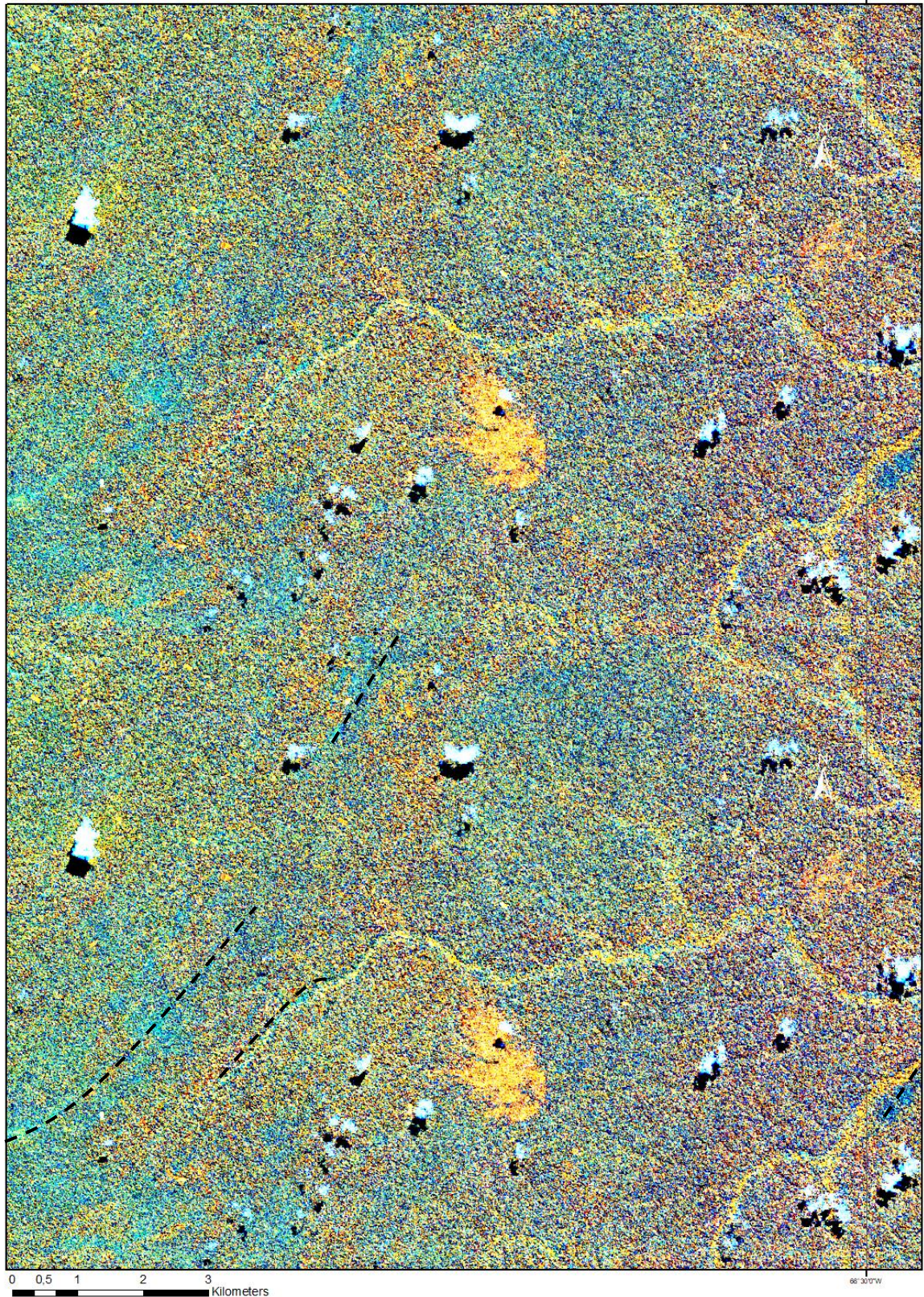


Figura 5.3.14 – Zoom da Cena RapidEye (tile 726), conforme retângulo da Figura 7.3.12. Observa-se a tendência de vegetação com comportamento espectral distinto dos arredores, em faixas estreitas subparelas, com orientação geral NE-SW, conforme ressaltado pelas linhas tracejadas da imagem inferior.

Como abordado na seção 3.3, mudanças na concentração de clorofila de áreas vegetadas sob estresse causam um *shift* (deslocamento) do ponto de absorção próximo ao 0,7 μm . Dentre outros efeitos, este ponto, localizado entre o vermelho e o NIR (portanto, trata-se na região espectral do vermelho *edge*), é deslocado para a região do azul com a redução do conteúdo de clorofila (van der Meer et al., 2006; Mora, 2014). Para verificar se este fenômeno ocorre nas áreas vegetadas de interesse, foram feitas duas *band ratios* (razões de banda) utilizando as bandas na mesma faixa do espectro e em datas distintas. Portanto, as razões seguiram as seguintes equações: *Red Edge* (2014)/*Red Edge* (2017) e *Red* (2014)/*Red* (2017).

Os resultados estão apresentados na Figura 5.3.15. Levando-se em consideração as observações feitas nas duas primeiras etapas, optou-se por elaborar as razões de bandas apenas para a cena 726 do mosaico RapidEye, tendo em vista a melhor variabilidade espectral entre as duas datas de obtenção das imagens.

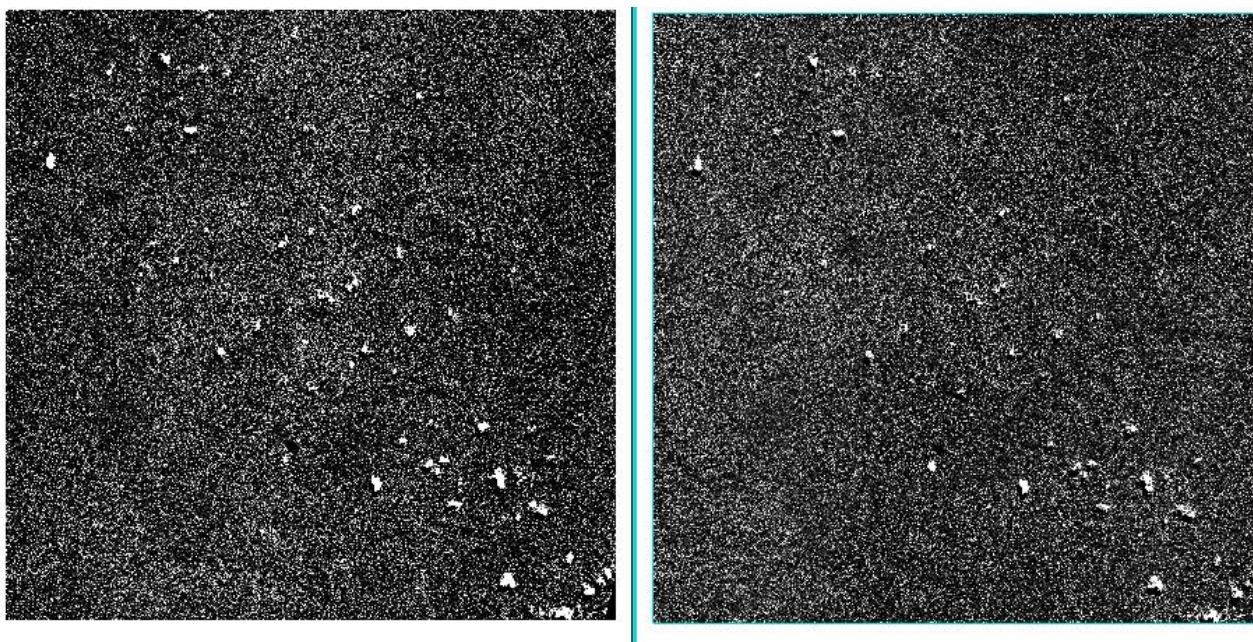


Figura 5.3.15 – Resultados obtidos pela aplicação das *band ratios* nas bandas na região espectral do vermelho (esq.) e na região espectral do Red Edge (dir.).

As variações nos valores (pixels) das razões de banda foram muito sutis. Ainda assim, conforme a Figura 5.3.15, é possível observar regiões onde os valores das razões de banda *Red* (2014)/*Red* (2017) foram menores. Neste caso, os pixels resultantes da razão nas áreas de interesse, principalmente na região do W-SW da imagem, giraram em torno de 0,90, indicando que a reflectância em 2014 neste comprimento de onda era menor que a reflectância em 2017. Já a razão de bandas para o *Red Edge* (*Red Edge* (2014)/*Red Edge* (2017)) resultou em pixels menos diversos, com valores girando em torno de 1,2 na mesma região, o que indica que a reflectância em 2014 era maior que em 2017 nesta faixa do espectro. Portanto, isso significa que os valores de reflectância na região espectral do Red

Edge diminuíram com o tempo, enquanto os valores de reflectância na região espectral do vermelho aumentaram, mesmo que sutilmente. Neste caso, observa-se que houve leve *shift* de reflectância do Red Edge em direção ao blue (*blue shift*), conforme previsto na literatura para áreas vegetadas sob estresse causado por exsudações de HCs.

Alguns outros índices muito utilizados na literatura, como o NDVI e o PRI, também foram testados na área de interesse. O índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), já utilizado por Mora (2014) para a identificação de áreas vegetadas sob estresse de microseeps, foi calculado para a área em questão, utilizando a cena RapidEye 726. O índice consiste na razão normalizada entre as bandas da região espectral do NIR e na região espectral do vermelho. Os resultados estão apresentados na Figura 5.3.16, em *grayscale*. É possível observar que as regiões com maiores respostas, portanto com maiores valores de reflectância no NIR, estão representadas pelas áreas arrasadas do relevo, enquanto as áreas escuras estão concentradas na região do platô e adjacências, em concordância com os demais processamentos já realizados.

Já o índice PRI (*Photochemical Reflectance Index*), adaptado ao sensor RapidEye, serve para obtenção de resposta quanto à eficiência fotossintética da vegetação. Trata-se de uma razão de bandas normalizada entre as bandas das regiões na região espectral do verde e Blue. Os resultados também estão representados na Figura 5.3.16, onde foi utilizada uma *color ramp* que melhor destacasse as tendências da vegetação. A coloração azul, concentrada principalmente à W-SW da imagem, corrobora com a hipótese que as taxas fotossintéticas na região são menores.

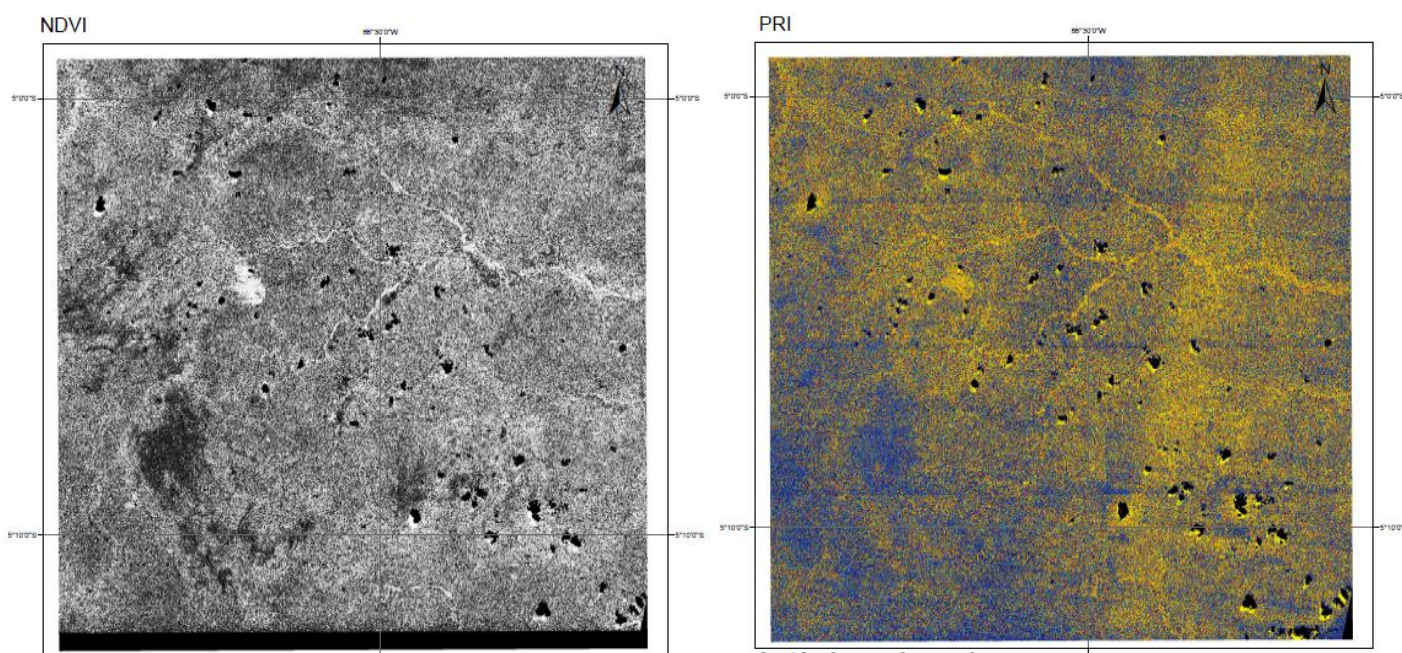


Figura 5.3.16 – Índices NDVI (esq.) e PRI (dir.) calculados para a cena 726 do sensor RapidEye.

Posteriormente, foi adotado o método de Crósta et al. (2016), que consiste na aplicação de PCAs sobre duas bandas da mesma região do espectro em duas datas distintas, com o objetivo de concentrar as informações redundantes na PC1 e as informações divergentes na PC2. Aplica-se, então, uma PCA no conjunto de PCs2 obtidos, sobre a qual se gera uma CCFC para ressaltar as variações entre as datas. Assim como nos processamentos anteriores, o método foi aplicado na cena 726 do sensor RapidEye, em imagens obtidas em 2014 e 2017. A Figura 5.3.17 apresenta os resultados obtidos, com a elaboração de uma CCFC RGB 432. Apesar de os resultados não serem ideais, pois a imagem obtida é bastante ruidosa, ainda assim é possível observar a tendência de comportamento anômalo na vegetação com orientação NE-SW, destacadas pela PC3 (coloração esverdeada), na forma de faixas estreitas e subparalelas localizadas à norte do alto topográfico, que por sua vez apresentou comportamento semelhante. Com o mesmo objetivo deste método, foi utilizada a técnica de elaboração de composições coloridas falsa-cor sobre pares da mesma banda em datas distintas. As composições coloridas elaboradas correspondem aos seguintes arranjos: NIR (RGB 5(2014) 5(2017) 5(2017)), *red edge* (RGB 4(2014) 4(2017) 4(2017)), e Red (RGB 3(2014) 3(2017) 3(2017)), conforme Figura 5.3.18. Os resultados mostraram diferenças importantes já observadas em outros processamentos. Na CCFC da banda Red, houve significativo aumento de reflectância deste comprimento de onda no ano de 2017 (durante o inverno). A área correspondente ao platô e arredores, no entanto, encontra-se esbranquiçada, o que indica que a reflectância no Red é constante na vegetação desta região, o que sugere senescência perene desta vegetação. Já para o *red edge*, não foi possível observar nenhuma região de grande contraste na vegetação, com exceção de que a porção leste da imagem parece ter maior reflectância neste comprimento de onda em 2017, enquanto a porção oeste possui reflectância em 2014. Por fim, a CCFC correspondente ao NIR apresentou as maiores variações, destacando a região do platô e arredores como possuindo menor reflectância em 2014 (início da primavera) e pouco maior no ano de 2017 (durante o inverno). Nas demais áreas da imagem, no entanto, o comportamento indica reflectância do NIR maior no ano de 2014.

O método sistêmico, desenvolvido por Almeida e Souza Filho (2004) foi aplicado para realçar os diferentes aspectos bioquímicos da vegetação, por meio da realização de diferentes *band ratios* (razões de banda) destinadas a realçar compostos da vegetação (clorofilas a, b e carotenos, por exemplo), aplicando-se posteriormente uma PCA sobre as razões que apresentaram melhores resultados. A imagem obtida está representada na Figura 5.3.19, por meio de uma CCFC RGB 341. Observa-se a existência de uma forte tendência à PC1, onde as informações tendem a se concentrar. Entretanto, a PC4 também retém uma quantidade considerável de informações espectrais. A imagem permite a interpretação de que as respostas espectrais dos índices utilizados na forma de *band ratios*

para elaboração da PCA tendem a ser mais altos nas regiões arrasadas do relevo, enquanto a área do platô e adjacências possui menores respostas, já que se apresentam como regiões de coloração mais escura. Idealmente, seria aplicada uma PCA sobre o NIR e SWIR da imagem, onde a PC1 apresentaria grande correlação com o albedo. Entretanto, a etapa não foi adotado por conta da ausência de bandas no SWIR nas imagens RapidEye.

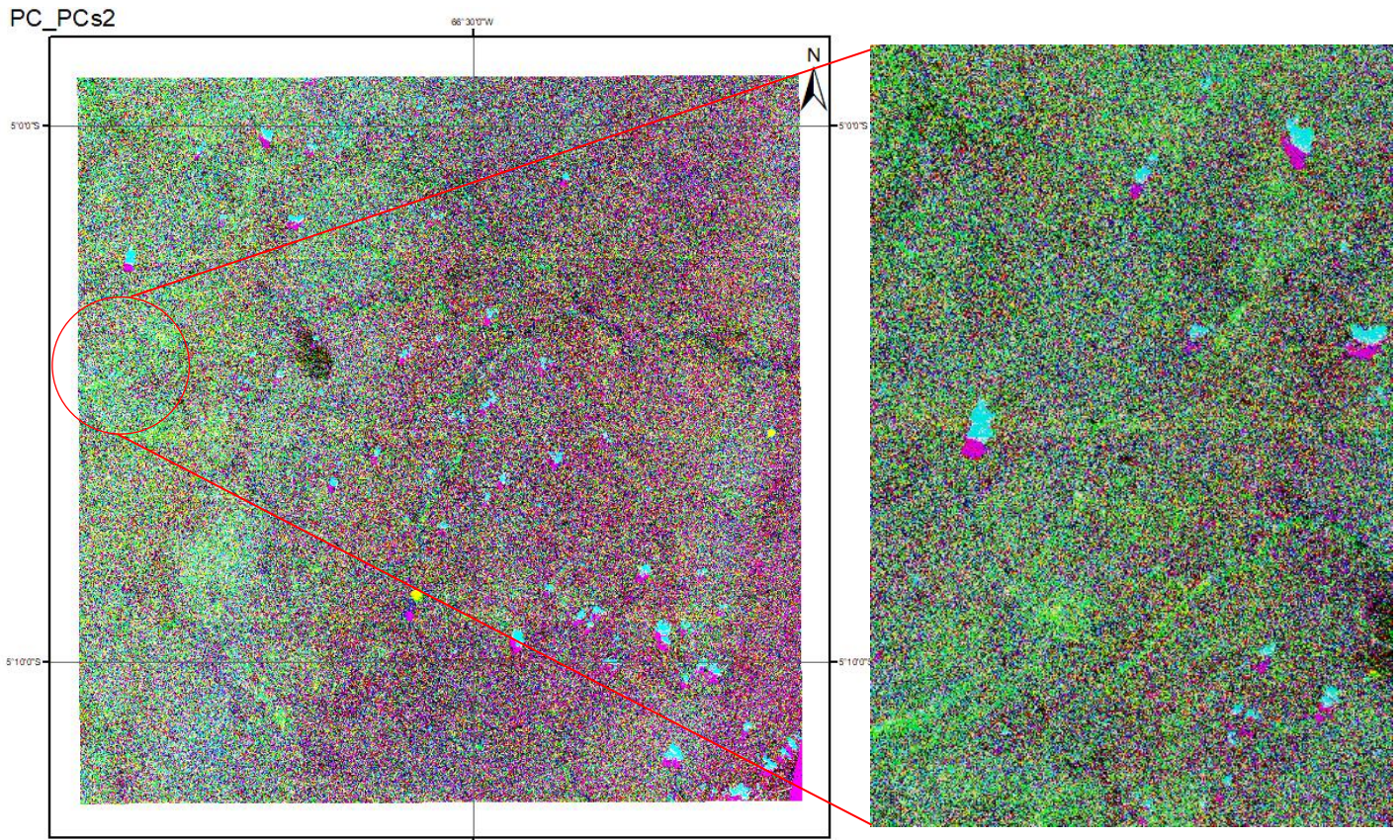


Figura 5.3.17 –CCFC RGB 432. Aplicação do método Crósta et al. (2016). Cena RapidEye 726 obtida em 2014. Zoom para faixas estreitas, alongadas, de orientação geral NE-SW (coloração esverdeada) localizadas acima da região do platô.

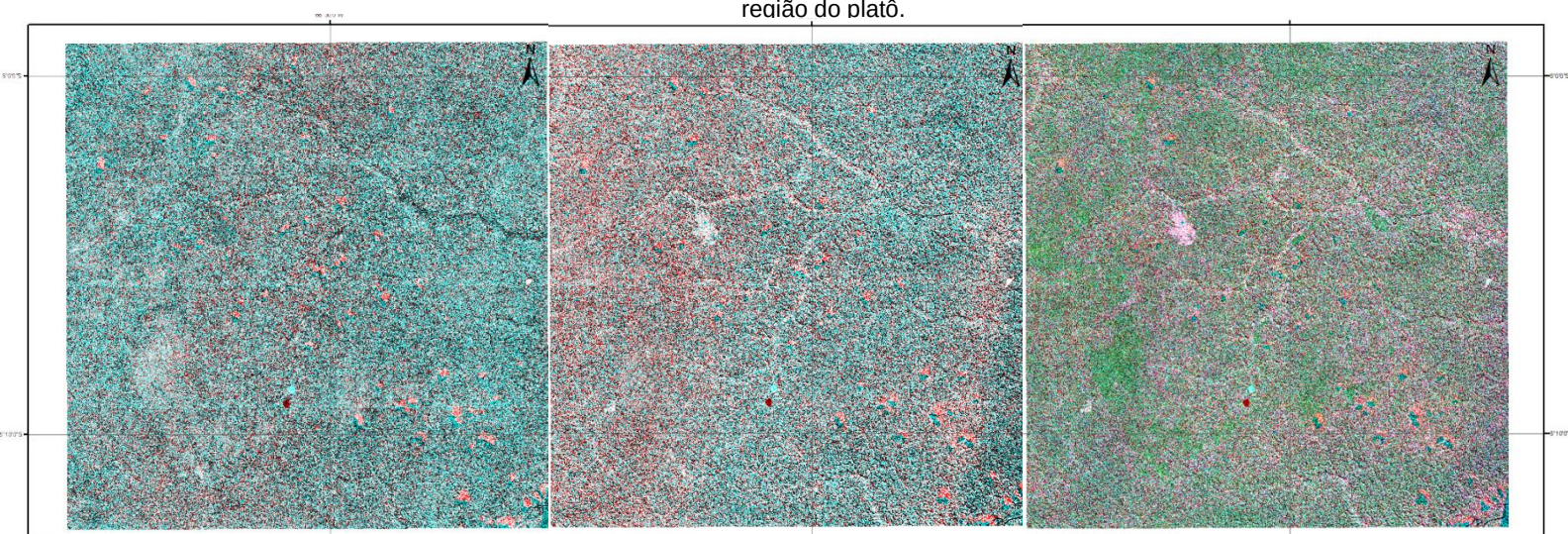


Figura 5.3.18 –CCFC RGB 2014-2017-2017. Composições referentes às bandas 3 (esq.), 4 (centro) e 5 (dir.).

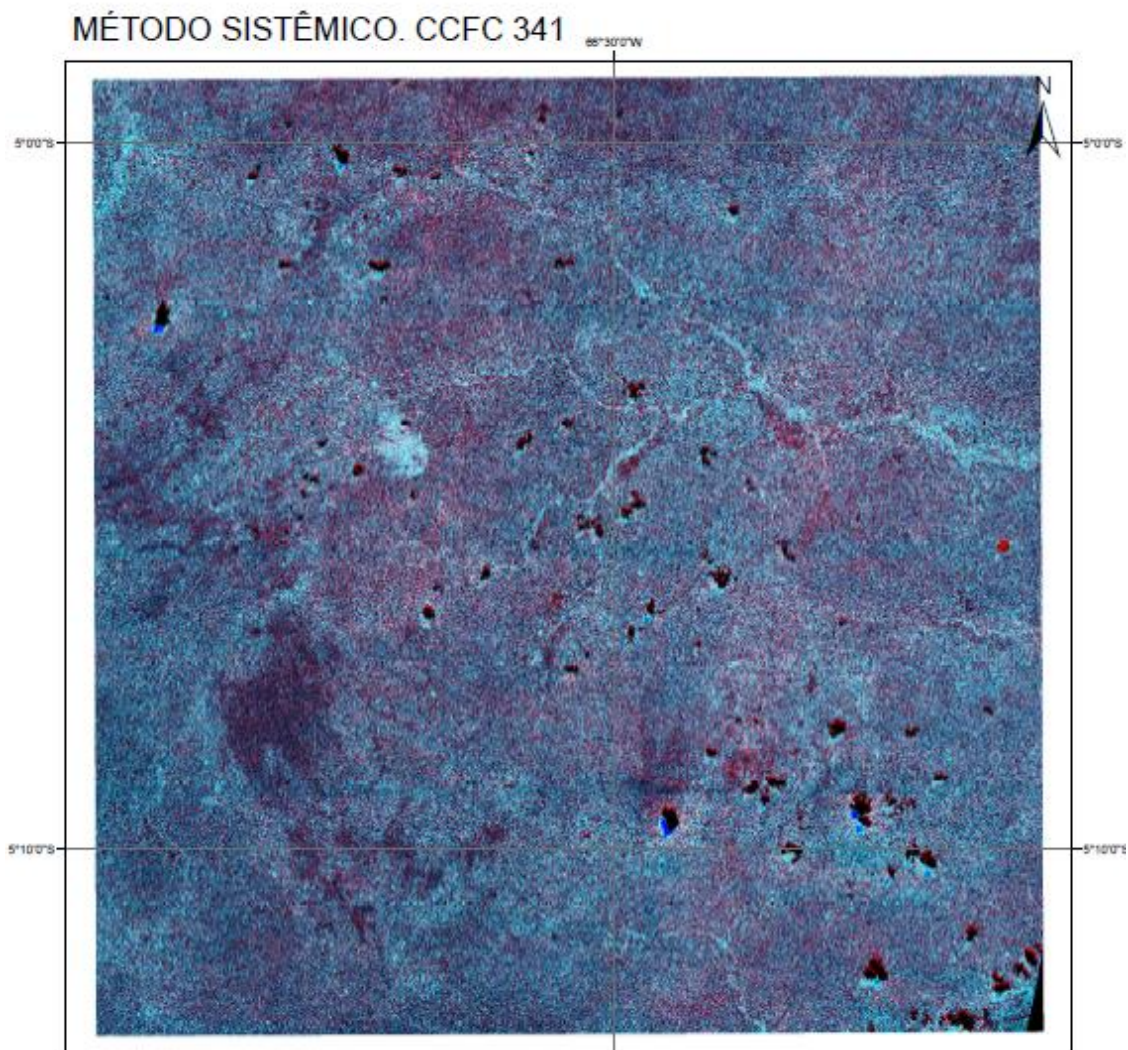


Figura 5.3.19 - .CCFC RGB 341. Resultados da aplicação do método sistêmico. É possível observar a tendência das menores concentrações de pigmentos (compostos bioquímicos) na região do platô e das faixas alongadas com direção NE-SW

Para avaliação dos aspectos aqui tratados sobre a vegetação, foi feita uma PCA com as bandas 1, 3, 4 e 5 da cena 726, obtida em 2014. Esta configuração de bandas foi adotado porque, segundo Rocchini (2007), a elaboração de uma PCA com bandas que possuem índices de correlação muito altos com as demais bandas, pode gerar uma resposta tendenciosa, voltada para aquele comprimento de onda. A banda 2 possui os maiores valores de correlação entre as demais, e por conta disso foi retirada na elaboração da nova PCA. O resultado da PCA sem a utilização da banda 2 é mostrado na Figura 5.3.20, por meio da CCFC RGB 431. De maneira análoga aos resultados encontrados anteriormente, as regiões mais escuras da imagem estão na região do platô localizado à W-SW da imagem, além das faixas estreitas subparalelas, de orientação NE-SW, que se localizam à norte do platô. Destacam-se, também, algumas regiões de comportamento similar presentes nas porções centro-leste da imagem, conforme mostrado nos retângulos vermelhos da Figura 5.3.20. Trata-se de áreas alongadas, com aproximadamente 2 km de extensão, normalmente associadas a drenagens atuais. Considera-se este resultado como o

que melhor ressaltou os contrastes das duas vegetações presentes na região, sendo elas a vegetação da região arrasada e a vegetação do platô, análoga à vegetação das faixas alongadas.

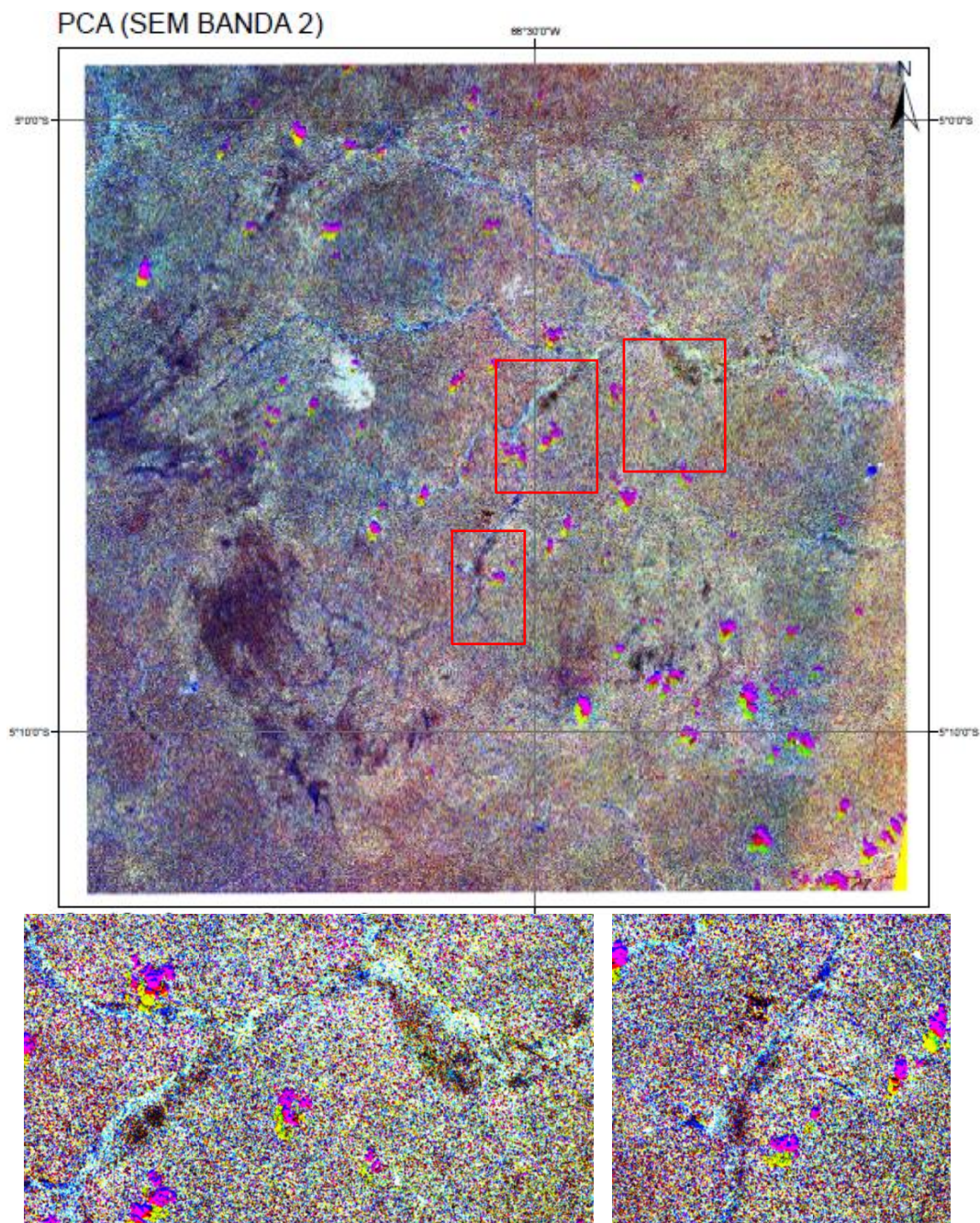


Figura 5.3.20 – CCFC RGB 431. Resultado da aplicação de PCA sobre as bandas 1, 3, 4 e 5. Destaca-se a área do platô e das faixas subparalelas estreitas, na porção W-SW da imagem. Os retângulos vermelhos ressaltam áreas vegetadas com as mesmas características espectrais da região do platô, normalmente associadas à drenagens e com orientação NE-SW e NW-SE.

Um último processamento utilizando análises por principais componentes (PCAs) foi feito, por meio da realização de um *layer stacking* de todas as bandas das imagens obtidas em 2014 e 2017, ambas da cena 726 das imagens RapidEye, para aplicação de uma PCA sobre o conjunto. Neste caso, no entanto, não foram utilizadas imagens com a correção atmosférica FLAASH, desnecessária para a aplicação do método. O resultado da aplicação da PCA está apresentado na Figura 5.3.21, em uma CCFC das PCs 146 em RGB. A matriz de correlação das bandas, por sua vez, está apresentada na Figura 5.3.22. Na imagem, é possível observar as mesmas alterações apontadas nos processamentos anteriores, como a vegetação de comportamento espectral distinto presente na região do platô e nas faixas alongadas de direção NE-SW (coloração azul), além de manchas com o mesmo comportamento espectral próximo às drenagens. Entretanto, destaca-se a existência de um terceiro tipo de vegetação que envolve o platô em forma de auréola, possuindo coloração verde-amarelada intensa nesta CCFC. Essa vegetação se estende, inclusive, para a região centro-sul da imagem.

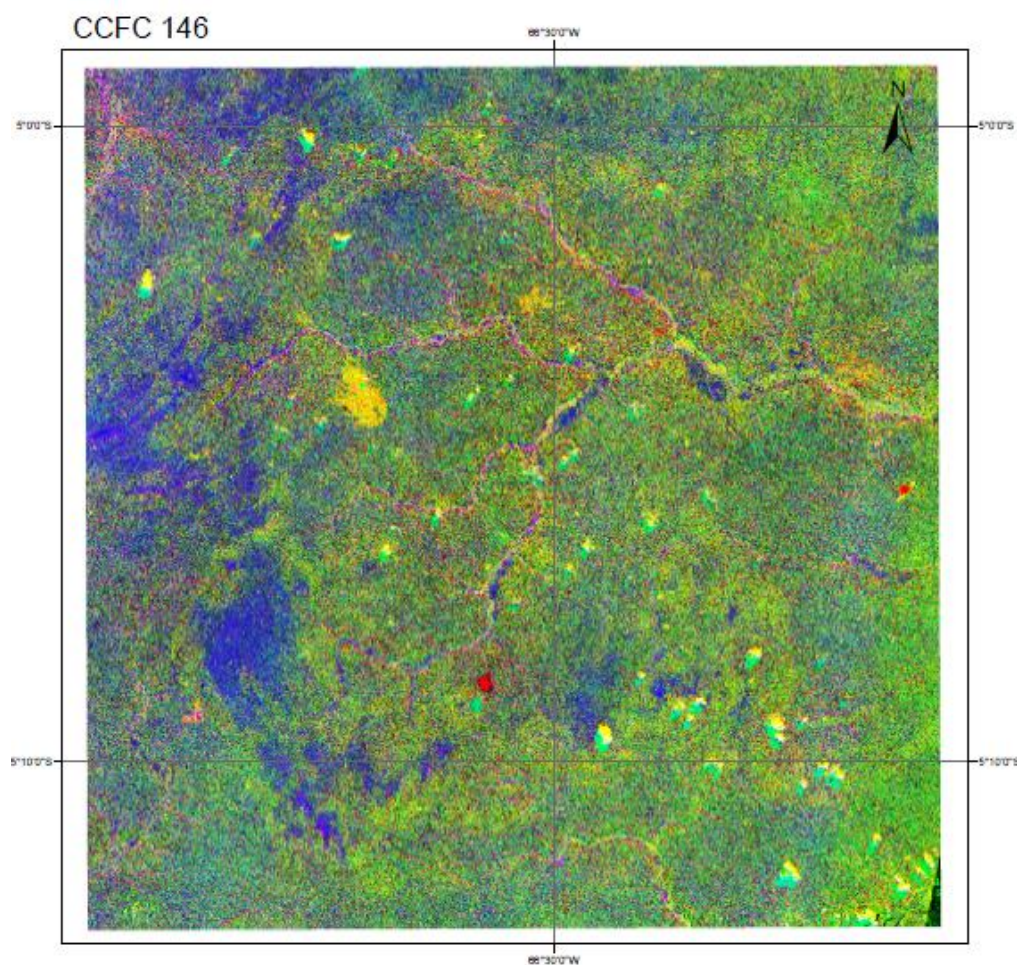


Figura 5.3.21 – CCFC RGB 431. Resultado da aplicação de PCA sobre todas as bandas do *layer stacking* feito entre as imagens de 2014 e 2017. Destaca-se a área que circunda o platô, onde ocorre uma vegetação com comportamento espectral diferente das demais (coloração amarelada)

A matriz de correlação das bandas demonstra, de uma maneira geral, a baixa correlação que existe entre elas. Este fator sugere que, se aplicada uma classificação supervisionada nesta PCA, aumenta a possibilidade dos resultados identificarem as possíveis anomalias espectrais causadas exsudações de HCs.

Correlation	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10
Band 1	1.000000	0.896002	0.839018	0.640100	0.217080	0.065937	0.061265	0.091981	0.052860	0.018310
Band 2	0.896002	1.000000	0.849921	0.801729	0.376762	0.091050	0.134209	0.138008	0.136474	0.100444
Band 3	0.839018	0.849921	1.000000	0.684270	0.157017	0.118514	0.117725	0.194669	0.098351	0.035104
Band 4	0.640100	0.801729	0.684270	1.000000	0.684829	0.107216	0.179019	0.144023	0.218262	0.219679
Band 5	0.217080	0.376762	0.157017	0.684829	1.000000	-0.007223	0.089944	-0.001615	0.185885	0.323366
Band 6	0.065937	0.091050	0.118514	0.107216	-0.007223	1.000000	0.574482	0.663254	0.422125	0.187121
Band 7	0.061265	0.134209	0.117725	0.179019	0.089944	0.574482	1.000000	0.678131	0.805812	0.596383
Band 8	0.091981	0.138008	0.194669	0.144023	-0.001615	0.663254	0.678131	1.000000	0.554650	0.258135
Band 9	0.052860	0.136474	0.098351	0.218262	0.185885	0.422125	0.805812	0.554650	1.000000	0.818301
Band 10	0.018310	0.100444	0.035104	0.219679	0.323366	0.187121	0.596383	0.258135	0.818301	1.000000

Figura 5.3.22 – Matriz de correlação resultante da aplicação de PCA sobre todas as bandas do *layer stacking* feito entre as imagens de 2014 e 2017

Objetivando o mapeamento das exsudações, portanto, foi feita uma classificação supervisionada, elencando diversas ROIs (*regions of interest*) sobre a PCA com a informação multitemporal (2014 e 2017). As classes adotadas levaram em consideração as nuvens, a vegetação geral, a vegetação anômala que ocorre no platô, a vegetação de várzea e a vegetação rasteira. Por fim, a classe das anomalias foi definida por meio da seleção de pixels que circundavam os pontos de anomalia para o $\log C_2/C_3$. Os pixels selecionados não ultrapassaram o limite de um pixel vizinho (5 m na resolução espacial das imagens RapidEye), tendo em vista a restrição de tamanho das exsudações de HCs, segundo Noomen et al. (2012). O resultado da classificação supervisionada está apresentado na Figura 5.2.23. Observa-se que o algoritmo produziu uma boa compartimentalização dos diferentes tipos de vegetação que se distribuem em larga escala ao longo de toda a imagem. A região do platô (em azul) é bastante demarcada, e os principais correspondentes deste mesmo tipo de vegetação foram bem mapeados no restante da imagem, como nas faixas alongadas da porção norte e nas regiões de várzea dos rios. É possível distinguir, ainda, a auréola que ocorre ao redor do platô (coloração verde água), onde a vegetação possui um comportamento espectral distinto, e se distribui até a porção central da imagem. Estão presentes, ainda, as vegetações rasteiras em menor escala (coloração rosa), e as vegetações de várzea (em amarelo). Com relação às regiões de possíveis anomalias relacionadas às exsudações de HCs, que se definem a um nível muito mais detalhado (poucos pixels), a classificação perde a precisão. Os pixels representativos das possíveis anomalias (coloração verde-azulada, representados na cena inferior) se distribuem em uma nuvem esparsa de pontos, sem padrões de distribuição nem agrupamentos preferenciais.

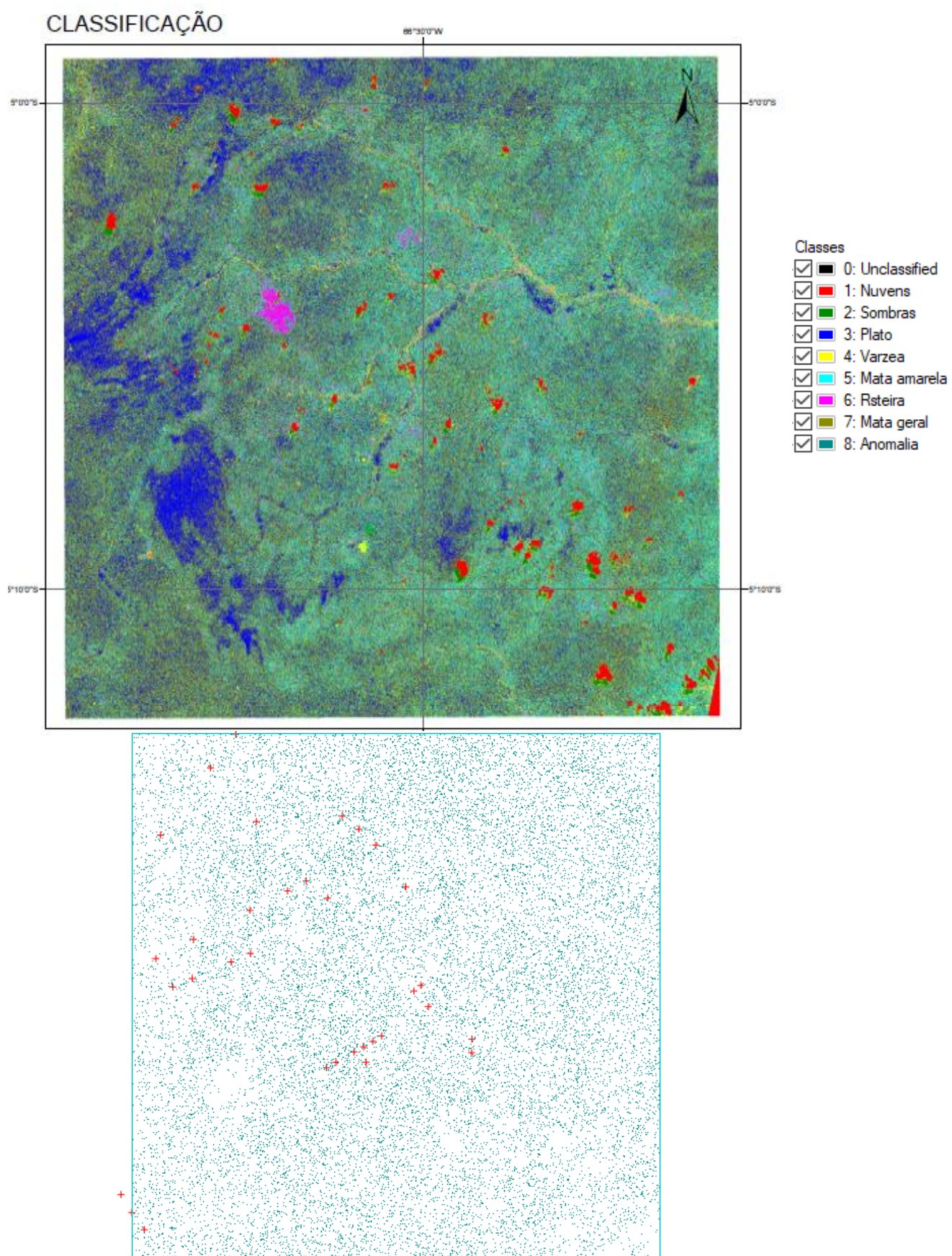


Figura 5.3.23 – Classificação supervisionada aplicada sobre PCA das bandas de 2014 e 2017 (sup.). Cena RapidEye 726. Nuvem de pontos (azul-esverdeados) classificada como possíveis anomalias espectrais causadas por exsudações de HCs (inf.).

Os processamentos realizados até o momento levaram em consideração toda a extensão da cena RapidEye de interesse (726, obtida em 2014). Esperava-se encontrar, utilizando este conjunto de processamentos, tendências de alteração na resposta espectral da vegetação, possivelmente causadas por exsudações HCs, levando em consideração informações da topografia, estruturas geológicas regionais e o levantamento geoquímico disponível. Entretanto, como apontado por Noomen et al. (2012), a extensão das alterações geradas por exsudações de hidrocarbonetos em áreas vegetadas é da ordem de poucos metros. Portanto, fez-se necessária a análise dos pixels circundantes dos pontos de geoquímica anômalos para o índice $\log C_2/C_3$.

Assim, foi verificada a resposta espectral dos pixels referentes às maiores anomalias de $\log C_2/C_3$, com valores variando de 0,33 a 0,49. Considerando a resolução espectral das imagens RapidEye, pode-se avaliar variações nas respostas relativas à clorofila b+carotenoides, carotenoides e clorofilas a+b. Foram feitas as composições coloridas das bandas 543, 521 e 321 em RGB, conforme as Tabelas 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.3. Considerando o pixel e sua vizinhança próxima e a inesperada baixa resposta no infravermelho próximo, foram observadas as tonalidades abaixo e sua interpretação.

Tabela 5.3.1 – Tabela com a coloração dos pixels associados a cada anomalia, em uma CCFC RGB 543.

	543 RGB	Interpretação
1	Amarelo/rosa; verde	Blue shift
2	Indistinto	-
3	Amarelo	Blue shift
4	Ciano	Blue shift e perda de clorofila
5	Azul escuro	Possivelmente água
6	Azul escuro	Possivelmente água
7	Verde	Blue shift
8	Azul, verde	Perda de clorofila, Blue shift
9	Azul	Perda de clorofila
10	Azul	Perda de clorofila
11	Ciano	Perda de clorofila, Blue shift
12	Azul	Perda de clorofila
13	Azul	Perda de clorofila

Tabela 5.3.2 – Tabela com a coloração dos pixels associados a cada anomalia, em uma CCFC RGB 521.

	521 RGB	Interpretação
1	Amarelo, vermelho	-

2	Indistinto	-
3	Vermelho, rosa, magenta	Perda de clorofila
4	Azul	Perda de clorofila b
5	Azul escuro	Perda de clorofila b
6	Azul	Perda de clorofila b
7	Ciano, verde	Perda de clorofila b e carotenoides
8	Azul	Perda de clorofila b
9	Negro (azul)	-
10	Azul, magenta, negro	Clorofilas
11	Ciano	Clorofila b + carotenos
12	Azul	Perda de clorofila b
13	Verde, azul	-

Tabela 5.3.1 – Tabela com a coloração dos pixels associados a cada anomalia, em uma CCFC RGB 321.

	321 RGB	Interpretação
1	Verde	Perda de carotenoides
2	Rosa, magenta	Perda de clorofilas a + b
3	Azul, magenta	Perda de clorofilas a + b
4	Magenta cinza	Perda de clorofilas a + b
5	Magenta	Perda de clorofilas a + b
6	Azul	Perda de clorofila b
7	Verde	Perda de carotenoides
8	Azul	Perda de clorofila b
9	Vermelho, negro	Água
10	Magenta	Perda de clorofilas a + b
11	Ciano acinzentado	Perda de clorofila b
12	Magenta	Perda de clorofilas a + b
13	Magenta, marrom	Perda de clorofilas a + b

As interpretações foram feitas com base na ausência ou presença de determinada coloração (ou combinação de colorações), em comparação com as colorações esperadas em áreas com vegetação saudável, tendo em vista as regiões do espectro em que os pigmentos em questão (clorofila a, b, carotenoides etc.) possuem maior reflectância. O resultado das observações, conforme as colunas de interpretação das tabelas

apresentadas, indicam tendência na perda de pigmentos na vegetação ao redor das maiores anomalias de $\log C_2/C_3$. Este fenômeno é esperado em áreas com vegetação sob estresse de HCs, conforme resultados obtidos por Mora (2014), em experimentos feitos na floresta amazônica. Ocorre, entretanto, que a variabilidade no comportamento espectral da floresta implica na ocorrência destes desvios em muitas situações, o que explica o insucesso da classificação como indicador de áreas potencialmente associadas a exsudações onde não houve estudo de gasometria, o que significaria um avanço muito importante. Não menos importante para este insucesso foi a pobreza espectral do único sensor com resolução espacial adequada para detectar as pequenas áreas de vegetação possivelmente afetada pelas exsudações. Para minimizar o problema adotou-se o conjunto de bandas obtido em duas datas sazonalmente distintas e, por fim, testar classificar nas componentes principais geradas a partir das bandas das duas datas, também sem sucesso.

5.4. Dificuldades encontradas e alterações nos objetivos iniciais

O maior empecilho para realização do trabalho foi a obtenção de imagens ópticas multiespectrais adequadas para os processamentos propostos. As imagens dos sensores ópticos que seriam utilizados (sensores ASTER, Landsat TM, OLI, Sentinel 2 e RapidEye) usualmente possuem uma disponibilidade grande de dados, com vasta variedade de datas de obtenção. Entretanto, a região do município de Carauari - AM está muito próxima ao equador, onde os climas tendem a ser muito úmidos e, por consequência, a cobertura de nuvens muito intensa. Por conta disso, mesmo nos meses em que a cobertura de nuvens deveria ser mais amena, como em Junho e Agosto, as imagens disponíveis na região possuem uma cobertura de nuvens ou névoa muito intensa, tornando as imagens inutilizáveis. Outro fenômeno que ocorre com frequência é o comportamento espectral anômalo observado nas bandas do infravermelho. Em algumas imagens Landsat TM, por exemplo, observa-se grandes regiões vegetadas (florestas) onde praticamente não há reflectância na região do NIR. Sabe-se o comportamento contrário é esperado para grandes áreas vegetadas, como em florestas densas. Estes dados, portanto, não foram utilizados. Observe-se, entretanto, que mesmo com a disponibilidade de imagens destes sensores resultados positivos seriam dificilmente atingidos, pois a área de vegetação afetada mais intensamente é pequena em relação às resoluções espaciais.

Na análise das imagens Rapid Eye identificou-se uma grande área com a vegetação tendo um comportamento espectral marcadamente diferenciado do restante da cena, diferença mais marcante na imagem de seca mais extrema. Pelo tamanho e forma da área não se cogitou se relacionar com exsudações. Buscando entender analisou-se o MDS, que

mostrou ser aquela floresta uma área ao menos dez metros mais elevada que a região do entorno. No NW da imagem RapidEye do tile 726 foram identificadas faixas estreitas e alongadas, com cerca de 7 km de vegetação anômala, segundo a direção NE, direção concordante com a tectônica e grandes transcorrências ocorridas na bacia. Estas feições foram cuidadosamente estudadas e mostraram de fato comportamento espectral diferente do entorno, indicando diferenças tanto na área foliar como nos pigmentos foliares. E diferenças de altitude não foram observadas. Analisando as anomalias em relação ao comportamento espectral, mas também ao contexto geológico e geomorfológico e da rede de drenagens, terminou-se por concluir tratar-se de florestas crescidas sobre paleodrenagens. Considerando o tempo considerável dispendido com estas feições elas estão presentes na monografia.

Outro problema encontrado está relacionado com os dados geoquímicos disponibilizados pela HRT Participações em Petróleo. O levantamento feito em 2011 era destinado a prospecção de óleo condensado e gás natural e, por este motivo, foram levantados índices geoquímicos como o Y_0 , $\log C_2/C_3$ e $\log iC_4/nC_4$. O ideal para uma análise de exsudações de hidrocarbonetos, no entanto, seria o dado de C_1 , C_2 , C_3 e C_4 sem processamentos.

Por fim, as imagens disponíveis para a realização do trabalho se limitaram ao sensor RapidEye, que possui resolução espacial adequada mas apenas 5 bandas espectrais. A maioria dos trabalhos que avaliam a existência de exsudações de HCs em áreas vegetadas utiliza sensores hiperespectrais, com índices próprios para a prospecção destas anomalias. A limitação da quantidade de bandas torna difícil a adaptação dos índices para utilização em sensores multiespectrais e ainda mais na possibilidade de aplicar métodos de classificação com sucesso.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tratando-se inicialmente dos dados geoquímicos (gasometria), o índice $\log C_2/C_3$ foi selecionado como representante para caracterizar as anomalias geoquímicas de interesse. O parâmetro geoquímico indica que os HCs analisados foram gerados por craqueamento secundário do óleo, com origem em regiões de maiores pressões e temperaturas, conforme indicado pelos trabalhos de Mendes (2014), Neto et al. (2007), Prinzhofer & Huc (1995) e Lorrant et al. (1998). Foi feita, então, a seleção de 8 subáreas de interesse, levando-se em consideração a densidade de amostragem e as malhas de coleta. Por fim, foi selecionada a área-alvo de trabalho (Área 5), conforme disponibilidade de imagens da constelação de satélites RapidEye. Nesta área, foi utilizada a interpolação por vizinhanças naturais, conforme foi mostrado na Figura 5.1.4. Os resultados indicaram certa tendência de aumento dos valores de $\log C_2/C_3$, variando de 0,33 a 0,49, na direção NE-SW. Ressalta-se, no entanto, que a amostragem geoquímica não foi feita em malhas regulares ao longo de todo polígono de interesse. Conclui-se, portanto, que as tendências e aparente orientação das anomalias geoquímicas não são reais. Apesar de nenhuma estrutura óbvia ter sido encontrada na área-alvo, a estruturação da Amazônia Ocidental é caracterizada por falhas inversas e transcorrentes, de direção NE-SW e NW-SE, geradas por neotectônica durante o Cenozoico conforme Bezerra & Ribeiro (2015), o que pode estar correlacionado com a orientação aparente das anomalias e certamente com as coletas de gás feitas. A Figura 6.1 mostra as estruturas mapeadas no estado do Amazonas e disponibilizadas pela CPRM. Nota-se que não há muitas estruturas mapeadas na região de estudo, mas que existe tendência clara a lineamentos com direções NE-SW e NW-SE.

As análises geomorfométricas, por sua vez, foram realizadas inicialmente com técnicas de sensoriamento remoto bastante comuns, utilizando Modelos Digitais de Elevação (DEM) provenientes dos satélites SRTM e ALOS PALSAR. Objetivando a aplicação das proposições apresentadas por Berger (1994), foram elaborados mapas hipsométricos, de *slope* e *hillshades*, além de ter sido feita a extração de redes de drenagem com diferentes ordens de Strahler (1957). Os resultados mostraram que a área estudada é extremamente arrasada, com bacias de drenagem definidas e poucos divisores de água ou anomalias topográficas. As drenagens não possuem nenhum padrão preferencial, principalmente com relação aos padrões radiados esperados para a detecção, em subsuperfície, de estruturas dômicas. Os *hillshades* elaborados, com diferentes angulações de iluminação, evidenciaram apenas as regiões de várzea, os canais de drenagem e os contatos da Formação Içá com os terraços fluviais. Não foram observadas estruturas

lineares de grande porte, ou intumescências no relevo que pudessem indicar anomalias topográficas positivas. O mapa de *slope* (declividade) mostrou que a região não possui variações rápidas e importantes na topografia, ou seja, não existem áreas muito íngremes na região. O mapa hipsométrico, por sua vez, evidenciou a variação de altitudes da região que, apesar de existir e ser importante para o controle de espécies de vegetação, não ultrapassa a ordem de grandeza das poucas dezenas de metros, variando em amplas áreas de baixa declividade.

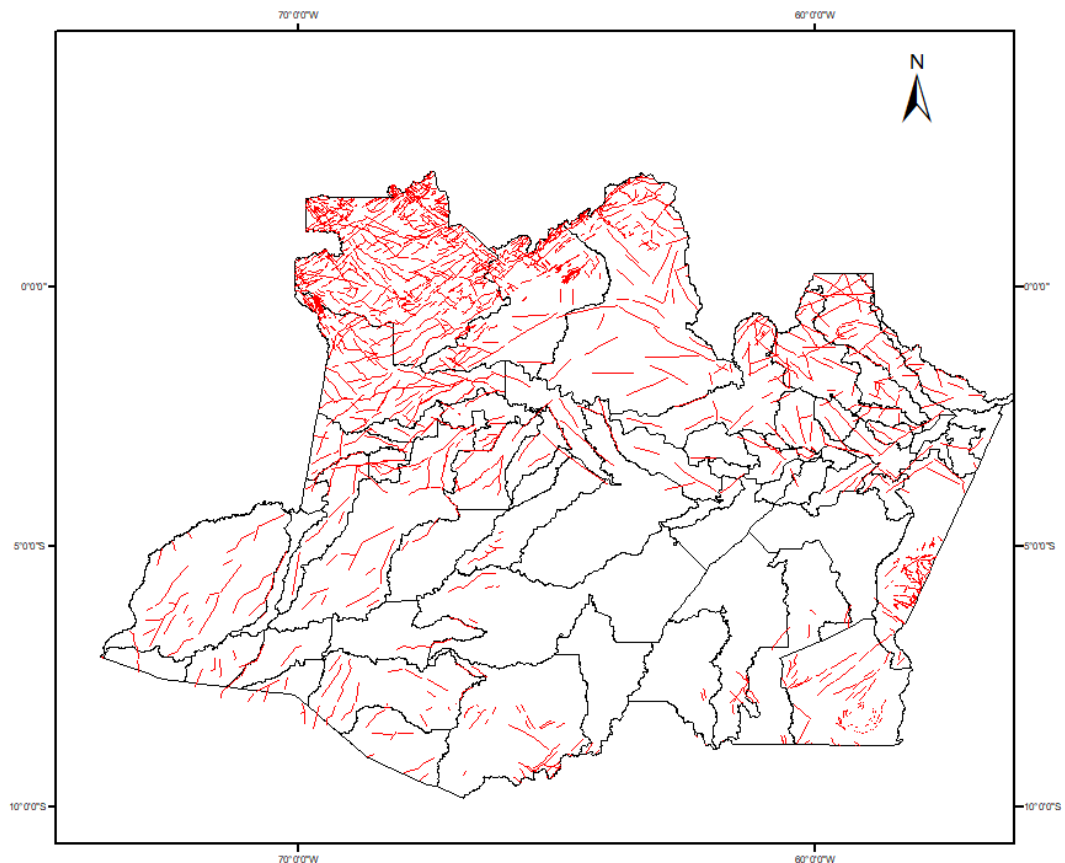


Figura 6.1 – Estado do Amazonas com as estruturas plotadas em vermelho. Observa-se tendência de *trend* estrutural NE-SW e NW-SE, principalmente na porção da Amazônia Ocidental. Fonte: Geobank da CPRM.

O *software* TecDEM, por sua vez, foi utilizado conforme proposto nos objetivos iniciais. Alguns produtos gerados pelo *software*, como o mapa hipsométrico e o mapa de drenagens extraídas do Modelo Digital de Elevação, apresentaram resultados muito concordantes com aqueles obtidos pelos métodos tradicionais, obtidos pelo *software* ArcGIS. Os demais produtos, como os mapas de isobase, de incisão e *vertical dissection*, serviriam como indicadores para possíveis estruturas ou formas de relevo originadas por tectônica ou erosão. Analisando-se os mapas, fica clara a tendência da região em possuir topografia extremamente arrasada, sem grandes variações nas altitudes e nas declividades. O mapa de isobase, no entanto, apresenta uma região relativamente mais elevada em sua porção oeste, o que poderia indicar uma estruturação tectônica ou uma feição de relevo

gerada por processos erosivos. Devido as informações da literatura, principalmente presentes em Bezerra & Ribeiro (2015) e Reis et al. (2006), sabe-se que os regimes neotectônicos que atuaram sobre a região durante o Cenozoico soergueram os depósitos pertencentes à Formação Içá que, posteriormente, foram erodidos. Portanto, a hipótese mais plausível é de que a região de topografia mais alta evidenciada pelos mapas hipsométrico e de isobase tenha sido gerada por processos erosivos. Considere-se ainda que a instalação de longo período erosivo, a arrasar o relevo, seguido pelas coberturas pleistocênicas das formações Solimões e Içá, decerto colaboraram para obliterar a presença de relevo indicador de estruturas na bacia

A análise geobotânica foi iniciada com o comparativo entre as bandas espectrais presentes no sensor RapidEye, para as cenas 726 e 725, obtidas nas datas de 01/09/2014 e 09/07/2017. Observou-se na cena 726, que há uma região de aproximadamente 7 km de extensão, localizada na porção W-SW da imagem, onde as bandas do visível (RGB) possuem uma reflectância significativamente mais alta que os arredores. Além disso, ficou claro pelos *greyscales* das bandas espectrais que a vegetação ali presente possui menor reflectância na região do NIR. Estes efeitos de contraste são mais evidentes na imagem coletada em setembro de 2014, início da primavera, que na imagem coletada em julho de 2017, no inverno. A cena 725, no entanto, não mostrou grandes alterações relacionadas às reflectâncias de suas bandas espectrais, com exceção de faixas difusas de orientação NE-SW na porção norte da imagem, e uma queda relevante do NIR na imagem de 2014. Mora (2014) mostra que áreas vegetadas sob estresse tendem a aumentar a reflectância no visível e diminuir a reflectância do NIR, por conta de danos causados às estruturas das plantas.

Foram elaboradas composições coloridas falsa-cor RGB 543, para as cenas RapidEye 726 coletadas em 2014 e 2017. Distinguem-se, nestas imagens, alguns fenômenos importantes, dentre eles: (i) a imagem de 2014 possui uma quantidade significativamente maior de coloração amarela (Red+Green), o que indica maiores reflectâncias nas regiões do NIR e *red edge* na vegetação geral; (ii) a área que apresentou maiores reflectâncias na região do visível na primeira análise, localizada na porção W-SW da imagem, possui menores reflectâncias no NIR e *red edge*, mesmo na imagem de 2014, onde há aumento na reflectância destes dois comprimentos de onda; (iii) existem faixas alongadas e estreitas, de orientação NE-SW que possuem características de reflectância semelhantes à anomalia detectada, com menor reflectância nas regiões do NIR e *red edge* e maior reflectância no visível.

Com a investigação dos motivos que poderiam condicionar este comportamento anômalo na vegetação, observou-se que a área de coloração azulada na CCFC RGB 543

está localizada sobre um platô, que representa uma variação de altitude na ordem de 10-15 m com relação às áreas adjacentes. Este fator poderia condicionar as mudanças no comportamento espectral da vegetação, tendo em vista que os aspectos fitossociológicos de uma determinada região podem variar com a altitude. A Figura 6.2 mostra o mapa hipsométrico com os polígonos gerados pela delimitação das áreas com comportamento espectral anômalo. É possível observar clara tendência de correlação entre as duas informações.

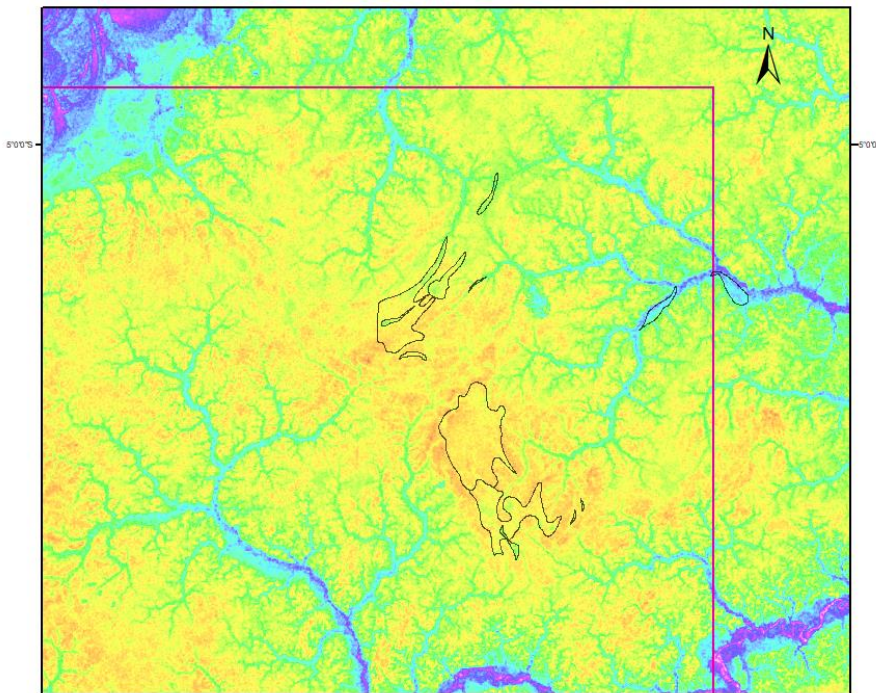


Figura 6.2 – Mapa hipsométrico mostrando a correlação das áreas altas (em vermelho) com as áreas de vegetação com comportamento anômalo (delimitadas nos polígonos pretos).

Para observar o comportamento na região espectral do Red Edge e sua posição, foram feitas duas *band ratios* (razões de banda) utilizando as bandas na mesma faixa do espectro e em datas distintas, nos arranjos *Red Edge* (2014)/*Red Edge* (2017) e *Red* (2014)/*Red* (2017). Os resultados mostraram que as variações nos valores (pixels) das razões de banda foram muito sutis. Ainda assim, é possível observar regiões onde os valores das razões de banda *Red* (2014)/*Red* (2017) foram menores. Estas variações ocorreram na região do platô, o que indica que a vegetação possivelmente sofreu um *blue shift*, conforme previsto pela literatura para áreas vegetadas sob estresse. Outras razões de banda e índices de vegetação foram utilizados, como o NDVI e o PRI, e os resultados seguiram a mesma tendência dos demais processamentos. Existe uma queda significativa da reflectância na região do NIR e na região espectral do Red Edge na região do platô e nas faixas orientadas na direção NE-SW. A eficiência fotossintética destas regiões é menor, conforme evidenciado pelo índice PRI, além de a área foliar ser reduzida, conforme indicado pelo NDVI.

A aplicação de PCAs abrangeu algumas técnicas distintas. Primeiramente, foi aplicado o método proposto por Crósta et al. (2016), com o objetivo de ressaltar variações temporais. As imagens obtidas evidenciaram as diferenças de reflectância nas duas vegetações – sendo elas a vegetação do platô e as de “terra firme” –, porém as variações temporais não se mostraram tão evidentes, devido aos ruídos presentes nos resultados. As CCFCs elaboradas no arranjo RGB 2014-2017-2017, para as bandas 5, 4 e 3 das imagens RapidEye, no entanto, se mostraram um pouco mais eficientes para ressaltar tais variações. A CCFC elaborada para a banda na região espectral do vermelho, por exemplo, mostrou alta reflectância na região do platô nas duas datas. Já a CCFC elaborada para o NIR, mostrou maior reflectância no platô em 2017. A região do *red edge*, no entanto, permaneceu praticamente constante nas duas datas. A aplicação do método sistêmico, por sua vez, resultou em uma CCFC pouco colorida, mas que permitiu inferir que as regiões com comportamento espectral anômalo possuem menores quantidades de pigmento, como clorofila a, clorofila b e carotenoides, já que estas regiões se apresentaram com uma coloração muito escura na PCA resultante. A PCA aplicada às bandas 1, 3, 4 e 5 (sem a banda 2) resultou em uma CCFC bastante interessante, com muito contraste entre as diferentes vegetações, sendo possível distinguir regiões alongadas próximas às drenagens, com orientação NE-SW e NW-SE, de comportamento espectral semelhante aos do platô e adjacências.

A técnica da Análise por Principais Componentes foi utilizada, ainda, sobre as 10 bandas das imagens de 2014 e 2017, juntas por um *layer stacking*. Os resultados evidenciam, de maneira inédita, um terceiro tipo de vegetação, que tende a circundar a região do platô e a porção centro-sul da imagem. Tendo em vista que a tabela de correlações entre bandas dessa PCA apresentou valores baixos, significando bandas pouco correlacionadas entre si e, por consequência, mais contrastantes, decidiu-se aplicar uma classificação supervisionada sobre esta composição. Desta forma, levando-se em consideração os resultados obtidos por Noomen et al. (2012) com relação ao tamanho restrito das exsudações de HCs, adotou-se os pixels vizinhos às anomalias de $\log C_2/C_3$ como uma classe ou ROI (*region of interest*). As demais classes foram definidas pelas informações de nuvens, da vegetação geral, da vegetação anômala que ocorre no platô, da vegetação de várzea e da vegetação rasteira. Consideram-se bons os resultados obtidos pela classificação no geral, excetuando-se os pixels relacionados às possíveis anomalias causadas por exsudações de hidrocarbonetos. O resultado foi uma nuvem de pontos esparsos sem nenhum agrupamento preferencial ao longo de toda a imagem. Portanto, a classificação supervisionada não se mostrou adequada para o mapeamento das possíveis exsudações da região, neste nível de detalhe, utilizando o sensor RapidEye em uma abordagem multitemporal.

Uma última análise foi feita, utilizando três composições coloridas falsa-cor RGB 321, 543 e 521. Nestas imagens, foram analisados os pixels que sobrepujam os pontos de anomalia geoquímica do $\log C_2/C_3$. Os resultados das colorações dos pixels foram, então, interpretados e foi possível chegar a algumas conclusões quanto à bioquímica da vegetação próxima às regiões com maiores concentrações de HCs. Há perda, principalmente, de pigmentos como clorofila *a* e clorofila *b*. Existem pontos com perdas de carotenoides também, mas são menos expressivos. Além disso, é possível notar tendência ao *blue shift*, corroborando a hipótese levantada pela razão de bandas, com o deslocamento da posição na região espectral do Red Edge em direção ao blue.

7. CONCLUSÕES

A região de estudo apresenta grande dificuldade para a aplicação de sensoriamento remoto óptico por diversos motivos. Em primeiro lugar, a atmosfera constantemente úmida afeta enormemente os dados ópticos. A larga maioria das imagens obtidas não tinham condições de uso por nuvens. Mesmo as imagens aparentemente sem nuvens, classificadas como tal no motor de buscas, apresentavam névoa irregularmente espalhada de modo a impossibilitar seu uso. Em segundo lugar a região esteve em erosão do Permiano ao Terciário e estruturas passíveis de identificação por geomorfometria foram inicialmente arrasadas e a superfície posteriormente recoberta por sedimentos das formações Içá e Solimões. Não houve também o auxílio na identificação de áreas propícias à presença de exsudações, como zonas de fraturas e falhas diversas, em geral presentes nas imagens como lineamentos. Em terceiro, os dados geoquímicos disponíveis eram índices pré-processados e não dados brutos. Finalmente, as altas pluviosidade e diversidade deixam complexa a geração de anomalias de vegetação.

Apesar de todo este quadro negativo, pode-se dizer que, a partir das anomalias geoquímicas disponíveis, encontrou-se comportamentos anômalos da vegetação compatíveis com o registrado na literatura. Mas estas diferenças não foram suficientes para permitir sua classificação e, assim, o reconhecimento de prospectos em áreas não abrangidas pela geoquímica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adler-Golden, S. M., Matthew, M. W., Bernstein, L. S., Levine, R. Y., Berk, A., Richtsmeier, S. C., Acharya, P. K., Anderson, G. P., Felde, G., Gardner, J., Hoke, M., Jeong, L. S., Pukall, B., Mello, j., Ratkowsky, A., Burke, H. H. (1999). Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN 4. SPIE Proceeding, Imaging Spectrometry V, 3753, 61-69.

Almeida, T. I. R., Souza Filho, C. R. (2004). Principal component analysis applied to feature-oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies. *International Journal of Remote Sensing*, 25(22), 5005-5023.

Almeida, T. I. R., Souza Filho, C.R., Juliani, C., Branco, F.C. (2009). Application of Remote Sensing to Geobotany to Detect Hydrothermal Alteration Facies in Epithermal High Sulfidation Gold Deposits in the Amazon Region. In: Bedell R., Simmons S., Grunsky E., Crósta A. (Orgs.). *Special Publication on Remote Sensing and Spectral Geology*. New York: Society of Economic Geologists, 135-142.

Barata, C. F., Caputo, M. V. (2007). Geologia do Petróleo da Bacia do Solimões. O “Estado da Arte”. 4º PDPETRO. Campinas.

Berger, Z. (1994). *Satellite Hydrocarbon Exploration: Interpretation and Integration Techniques*. Springer-Verlag.

Bezerra, P. E. L. (2003). Compatimentação tectônica do interflúvio Solimões – Negro. Belém, Centro de Geociências, Universidade federal do Pará, 235p. Tese (Doutorado em Geologia).

Bezerra, P. E. L., Ribeiro, D. T. (2015) – Evolução tectônica Cenozoica da Amazônia Ocidental. 13º Simpósio de Geologia da Amazônia. Contribuições às Geologia da Amazônia. 139-155.

Caputo, M. V.; Silva, O. B. (1990). Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões. In: *Origem e evolução de bacias sedimentares*. 1ª. ed. Rio de Janeiro: CENPES. p. 169-192.

Carter, G.A. (1994). Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* 15, 697–703.

Chang, H. K. (1992). Conceitos de análise de bacias e sua aplicabilidade no estudo de sequências sedimentares proterozoicas. São Paulo, *Revista Brasileira de Geociências*, 22(4): 437-448.

Cho, M. A., Skidmore, A. K. (2006). A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: the linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment* 101, 181– 193.

Cox, R. T. (1994). Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi

Embayment. Bulletin of the Geological Society of America 106, 571–581.

Crósta, A. P., Almeida, T. I. R., Paradella, W. R., Silva, S. M. P., Meneses, P. R. (2016). Sensoriamento Remoto em Exploração Mineral no Brasil. In: Melfi A. J., Misi A., Campos D. A., Cordani U. G. (orgs), Recursos Minerais no Brasil Problemas e Desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências. 190-208.

Cunha, F. M. B. (1988). Controle Tectônico Estrutural na Hidrografia na Região da Calha do Alto Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém. Anais. Belém, SBG. V.5, p. 2267-2277.

Day, M. J. (1979). Surface roughness as a discriminator of tropical karst styles. Zeitschrift fuer Geomorphologie 32 (Suppl.), 1–8.

Demarez, V. & Gastellu-Etchegorry, J.P. 2000, "A modelling approach for studying forest chlorophyll content", Remote Sensing of Environment, vol. 71, pp. 226-238.

Eiras, J. F. (1996). Influência tectônica do arco de Carauari na sedimentação fanerozóica da Bacia do Solimões, Norte do Brasil. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 39, Salvador. Anais 1: 50-53. Eiras J.

Eiras, J. F. (2005). Cenário Geológico das Bacias Sedimentares do Brasil. In: Apostila sobre Prospecção e Desenvolvimento de Campos de Petróleo e Gás (Schlumberger) – Projeto Multimin Tecnologia. Parte II - Tectônica, Sedimentação e Sistemas Petrolíferos da Bacia Solimões, Estado do Amazonas. <http://acd.ufrj.br/multimin/mmp/textos/index.htm>.

Evans, I.S., 1972. General geomorphometry derivatives of altitude and descriptive statistics. In: Chorley, R.J. (Ed.), Spatial Analysis in Geomorphology. Harper and Row, London, pp. 17–90.

Filosofov, V. P. (1960). Brief Guide to Morphometric Methods in Search of Tectonic Features. Saratov University Publishing House, Saratov, Russia (in Russian).

Gamon, J. A.; Peñuelas, J.; Field, C. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. Remote Sens. Environ. 41, 35–

Golts, S., Rosenthal, E. (1992). Morphotectonic methods to infer groundwater flow under conditions of scarce hydrogeological data — the case of northern Arva, Israel. Applied Hydrogeology 3 (1), 5–19.

Grohmann, C. H. (2004). Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R. Computers & Geosciences 30 (9–10), 1055–1067.

Gustafson, F. (1950). Is the American Elm (*Ulmus Americana*) injured by natural gas. Plant Physiology, vol. 25, no. 422, pp. 440.

Gutierrez, G. M. (2017). Análise da geologia e da mineralização aurífera de Castelo dos Sonhos, sudoeste do estado do Pará, utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento. Trabalho de Formatura. São Paulo. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.

Guyot, G., Baret, F. (1988). Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'etat des couverts vegetaux. Proceedings 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, pp. 279–286.

Ibanez, D. M.(2012). Análise do relevo da Amazônia Central com emprego de Modelo Digital de Elevação e Geometria Fractal. Tese (Doutorado). São Paulo. Instituto de Geociências – USP

Khan, S. D., Jacobson, S. (2008). Remote sensing and geochemistry for detecting hydrocarbon microseepages. *GSA Bulletin*; 120 (1-2): 96–105.

Kirby, E., Whipple, K. (2001). Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology* 29 (5), 415–418.

Li, L., Ustin, S. L., & Lay, M. (2005). Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 94(1), 1-16.

Lieberman, M., Lieberman, D., Hartshorn, G. S., & Peralta, R. (1985). Small-scale altitudinal variation in lowland wet tropical forest vegetation. *The Journal of Ecology*, 505-516.

Link, W. K. (1952). Significance of Oil and Gas Seeps in World Oil Exploration. *A.A.P.G. Bull*, 36:1505-1540.

Lorant, F. Prinzhofer, A., Behar, F., Huc, A. Y. (1998) Carbon isotopic and molecular constraints on the formation and the expulsion of thermogenic hydrocarbon gases. *Chem. Geol.*, 147:249-264.

Magoon, L. B.; Dow, W. G. (1994). Hydrocarbon migration and its near surface expression: AAPG Memoir 66, Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists, pp 27-37.

Maia, R.G.N., Godoy, H.K., Yamaguti, H.S., Moura, P.A., Costa, F.S.F., Holanda, M.A. de, Costa, J. de A. (1977). Projeto Carvão no Alto Solimões. Ministério de Minas e Energia. DNPM/CPRM, Manaus. 11v.

Mello, M. R.; Koutsoukos, E. A. M.; Mohriak, W. U.; Bacoccoli, G. (1994). Selected petroleum systems in Brazil. In: The petroleum system - from source to trap. AAPG Memoir 60. Tulsa: MAGOON, L. B.; DOW, W. G. (Ed.). p. 499-512. Hydrocarbon migration and its near surface expression: AAPG Memoir 66, Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists, pp 27-37.

Melo, M. R., Concalves, F. T., Babinski, N. A. & Miranda, F. P. (1996). Hydrocarbon prospecting in the Amazon rainforest: application of surface geochemical, microbiological, and remote sensing methods. In Hydrocarbon migration and its near-surface expressions, eds. D. Schumacher & M.A. Abrams, American Association of Petroleum Geologists, AAPG, pp. 01-411.

Mendes, F. de S. (2014). Geobotânica por sensoriamento Remoto: Avaliação do

Método para a identificação de exsudações potenciais na Bacia do Solimões utilizando dados TERRA/ASTER. Dissertação de Mestrado. Campinas. Instituto de Geociências, UNICAMP.

Mora, P. N. A. (2014). Hyperspectral remote sensing for detecting vegetation affected by hydrocarbons in the Amazon forest. Tese de doutoramento. College of Science and Engineering – Department of Geography.

Neto, E. V. S. (2007). Caracterização geoquímica de gases naturais a aplicações na prospecção geoquímica. In: Alicht, O. A. B.; Mello, C. S. B. de; Silva, C. R. da (Org.). Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás. Rio de Janeiro: Ed. SBGq/CPRM, p. 345-372.

Noomen, M. F., Skidmore A. K., Van Der Meer, F. D., Prins, H. H. (2006). Continuum removed band depth analysis for detecting the effects of natural gas, methane and ethane on maize. *Remote Sensing of Environment* 105, 262–270.

Noomen, M. F., Smith, K. L., Colls, J. J., Steven, M. D., Skidmore, A. K., Van Der Meer, F. D. (2008). Hyperspectral indices for detecting changes in canopy reflectance as a result of underground natural gas leakage. *International Journal of Remote Sensing* 29 (20), 5987–6008.

Noomen M. F., van der Werff H. M. A., van der Meer F. D. (2012). Spectral and spatial indicators of botanical changes caused by long-term hydrocarbon seepage. *Ecological Informatics*, 8, pp. 55-64.

Peñuelas, J.; Filella, I.; Gamon, J. A. (1995) Assessment of photosynthetic radiation use efficiency with spectral reflectance. *New Phytol.* 131, 291–296.

Perrotta, M. M., de Almeida, T. I. R., de Andrade, J. B. F., de Souza Filho, C. R., Rizzotto, G. J., dos Santos, M. G. M. (2008). Geobotânica por sensoriamento remoto e aerogamaespectrometria aplicados ao mapeamento geológico da Amazônia: um estudo comparativo no vale do Guaporé (MT). *Revista Brasileira de Geociências*, 38(1), 153-166.

Pike, R. J., Evans, I. S., Hengl, T. (2008). Geomorphometry: a brief guide. In: Hengl, T. Reuter, H. I. (Ed.). *Geomorphometry: concepts, software, application*. New York: Elsevier, 33, 1-28.

Prinzhofer, A. A., Huc, A. Y. (1995). Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases. *Chemical Geology* 126 (1995) 281-290.

Reis, N. J., Almeida, M. E., Riker, S. L., Ferreira, A. L. (2006). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas*. Manaus. CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

Rocchini, D. (2007). Effects of spatial and spectral resolution in estimating ecosystem α -diversity by satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 111 (2007) 423–434.

Segal, D.B., Ruth, M.D. and Merin, I.S. (1986). Remote detection of anomalous mineralogy associated with hydrocarbon production, Lisbon valley, Utah. *Mountain Geologist*, 23, 51±62.

Segal, D.B. and Merin, I.S. (1987). Successful use of Landsat Thematic Mapper data for mapping hydrocarbon microseepage-induced mineralogic alteration, Lisbon Valley, Utah. *Photogramm. Engng Remote Sens.*, 55, 1137±1145.

Shahzad, F., Gloaguen, R. (2010). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis. In: *Computers & Geosciences* 37 (2011) 250–260.

Shahzad, F., Gloaguen, R. (2010). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis. In: *Computers & Geosciences* 37 (2011) 261–271.

Schoenbohm, L., Whipple, K., Burchfiel, B., Chen, L. (2004). Geomorphic constraints on surface uplift, exhumation, and plateau growth in the Red River region, Yunnan Province, China. *Bulletin of the Geological Society of America* 116 (7–8), 895–909.

Schumacher D. (1996). Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments, In: Schumacher D. & Abrams M.A. (eds.) *Hydrocarbon Migration and its Near Surface Expression*. AAPG 19 Memoir 66, p. 71-89.

Sibson, R. (1981). A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. Chapter 2 in: *Interpolating Multivariate Data*. New York: John Wiley & Sons. 21–36.

Souza Filho, C. R., Augusto, V. A., Oliveira, W. J., Lammoglia, T (2008). Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no remanso do fogo (MG). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, p. 228-243.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union* 8 (6), 913–920.

Thenot, F., Méthy, M., & Winkel, T. (2002). The Photochemical Reflectance Index (PRI) as a water-stress index. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5135-5139.

Thompson C.K., Saunders D.F. & Burson K.R. (1994). Model advanced for hydrocarbon microseepage, related alterations. *Oil Gas J.*, 14:95-99.

Tuomisto, H.; Poulsen, A. D.; Yli-Halla, M. (2003). Dispersal, environment and floristic variation of Western Amazonian forests. *Science*, v. 299, p. 241-244.

Valeriano, M. de M. (2003). *Reflectância espectral de culturas agrícolas anuais (I): espectrorradiometria*. São José dos Campos – SP, Brasil. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

van der Meer F., Van Dijk P., Van der Werff H., Yang, H. (2002). Remote Sensing and Petroleum Seepage: a review and case study. *Terra Nova*, 14 (1): 1-17.

van der Meer, F., Yang, H. & Kroonenberg, S. (2006). Imaging spectrometry and petroleum geology. In: *Imaging Spectrometry*, eds. F. van der Meer & S.M. de Jong, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 219-241.

Yang, H. (1999). *Imaging Spectrometry for Hydrocarbon Microseepage*, Delf

University of Technology.

Zacchi, É. N. P., Silva, A. M., Rolim, V. K. (2010). Análise integrada de dados multifonte e sua aplicação no mapeamento geológico das formações ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(4), 643-656