



UFAM

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E LETRAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO EM GEOGRAFIA**

**CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NA
REGIÃO DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS NEGRO E
SOLIMÕES, AMAZÔNIA, BRASIL**

Thiago Pimentel Marinho

Manaus
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E LETRAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO EM GEOGRAFIA

THIAGO PIMENTEL MARINHO

**CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NA REGIÃO
DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS NEGRO E SOLIMÕES, AMAZÔNIA,
BRASIL**

Orientador: Naziano Pantoja Filizola Jr., PhD.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia: Amazônia – Território e Ambiente, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia. Área de concentração: Domínios da Natureza na Amazônia.

Manaus
2014

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M338c Marinho, Thiago Pimentel
Concentração de sedimentos em suspensão na região de confluência dos rios Negro e Solimões, Amazônia, Brasil / Thiago Pimentel Marinho. 2014
74 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Naziano Pantoja Filizola Junior
Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Hidrologia. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Sedimentos em Suspensão. 4. Rio Negro. 5. Rio Solimões. I. Filizola Junior, Naziano Pantoja II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



Poder Executivo
Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
ICHL/DEGEO/Programa de Pós-Graduação em Geografia
Aprovado pela Resolução nº 009 – CONSUNI de 17/08/95, credenciado pela CAPES em set/2000
Reconhecido através da Portaria N. 611-MEC, de 22 de junho de 2007



**“CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NA
REGIÃO DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS NEGRO E SOLIMÕES,
AMAZÔNIA, BRASIL”**

Thiago Pimentel Marinho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA/MESTRADO EM GEOGRAFIA (PPG-GEOG) DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E LETRAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS, NO DIA **23 DE JULHO DE 2014**, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM GEOGRAFIA.

Assinada por:

.....
Prof(a) Dr(a) Naziano Pantoja Filizola Jr

.....
Prof(a) Dr(a) Jean-Michel Martinez

.....
Prof(a) Dr(a) Rodrigo Augusto Ferreira de Souza



MANAUS, AM – BRASIL
JULHO DE 2014

Ao meu irmão Luiz Keliton e a Gisele Lopes

Dedico.

Á Deus;

Aos meus pais Raimundo e Lucilene e meu irmão Luiz Keliton que sempre acreditaram em mim;

A Gisele Lopes pela companhia, pela amizade e pelo amor;

Aos professores Bosco Brasil e Liliane Machado por ter me apresentado a Geografia por outro olhar;

A Tatiana Schor mais do que pelas orientações, pela amizade de todos esses anos;

Ao Naziano Filozola por ter me ensinado mais do que Hidrologia, me ensinado a missão do
mestre/educador;

Ao Jean-Michel Martinez pela coorientação;

Aos Elisa Armijos, André Martielli, Carlos Soares, Pauliane Sampaio e Raul Espinosa pela grande
ajuda no desenvolvimento desse trabalho;

Aos Jean-Michel, André Zumak, Bosco Alfenas, Elisa Armijos, Pascal Fraizy, Diego Aguiar, Gisele
Lopes, Carlos Soares, Fish, Heitor Pinheiro, Karla Arakaki e Moisés Tavares pela ajuda nas
campanhas;

A FINEP e o CNPq pelo financiamento a essa pesquisa;

As instituições parceiras: ORE-HYBAM, IRD, CPRM e SIPAM;

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFAM;

A todos os membros do Laboratório de Potamologia Amazônica (LAPA) agora também Grupo
Hidro(geo)logia e o Homem na Amazônia (H₂A) pelo espírito de grupo.

Agradeço.



Confluência dos Rios Negro e Solimões, Amazonas, Brasil.
Foto: Thiago Marinho, abril/2014 (Fotos 1 e 2) e fevereiro/2014 (Foto 3).

RESUMO

Este trabalho apresenta contribuições aos estudos voltados a Hidrologia Espacial, que se apresenta aqui como uma alternativa de monitoramento das concentrações de sedimentos em suspensão para a Bacia Amazônica. As análises foram direcionadas para o estudo da confluência dos rios Negro (Águas Negras) e Solimões (Águas Brancas) no Estado do Amazonas, Brasil. Esta confluência de rios com águas de cores e concentrações de sedimentos em suspensão distintas, apesar de conhecida nacional e internacionalmente, é pouco estudada do ponto de vista de seu funcionamento hidrológico e hidrossedimentológico. O objetivo desta pesquisa é monitorar a concentração de sedimentos em suspensão da confluência dos dois rios supracitados a partir de técnicas de sensoriamento remoto. Além disso, buscou-se analisar a dinâmica do transporte e concentração de sedimentos em suspensão na confluência dos rios Negro e Solimões a fim de contribuir para o melhor entendimento do papel de cada rio no ciclo hidrológico do Rio Amazonas.

Palavras-Chaves: Hidrologia, Sensoriamento Remoto, Sedimentos em Suspensão, Rio Negro, Rio Solimões, Amazônia.

ABSTRACT

This research presents contributions regarding studies focused Spatial Hydrology, which is presented here as an alternative for monitoring suspended sediment concentrations in the Amazon Basin. Analyses were directed to study the confluence of the Negro (Black Water) and Solimões (White Water) rivers in the state of Amazonas, Brazil. This confluence of rivers with water color and sediment concentrations suspension different, despite being internationally and national known is little studied from the viewpoint of the hydrological functioning and hydrosedimentological. The research objective is to monitor the concentration of suspended sediment at the confluence of two rivers from remote sensing. Furthermore, to sought to analyze the dynamics of the transport and concentration of suspended sediment at the confluence of the Negro and Solimões rivers in order to contribute to a better understanding of the role of each river in the hydrological cycle of the Amazon River.

Key Words: Hydrology, Remote Sensing, Suspended Sediment, Rio Negro, Rio Solimões, Amazon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Região de confluências dos rios Negro e Solimões, Amazônia, Brasil.	13
Figura 2 – A Bacia Amazônica com suas 4 principais unidades morfoestruturais (1 – Cadeia Andina; 2 – Escudo das Guianas; 3 – Escudo Brasileiro; e 4 – Planície Fluvial) e seus principais cursos d’água.	17
Figura 3 - Esboço geológico-tectônico da região de confluência dos rios Negro e Solimões (modificado de Igreja & Franzinelli, 2007).	18
Figura 4 – Esquemas típicos de formação de faixa de nebulosidade convectiva para cada banda latitudinal.	20
Figura 5 - Perfil de velocidade da região de confluência dos rios Negro e Solimões.	23
Figura 6 - Interação do raio de luz com o meio aquático. Nota-se que quando um raio de luz entra no meio aquático uma parte da luz é absorvida pelo meio (Φ_a) outra é espalhada (Φ_b) e outra é transmitida, sem variar sua direção (Φ_t).	27
Figura 7 – Rio Madeira e seus principais afluentes com as estações estudadas.	36
Figura 8 - Localização da grade hidrométrica na região de confluência dos Rios Negro e Solimões-Amazonas.	38
Figura 9 – a) Amostra de água superficial sendo colhida; b) Garrafas etiquetas com amostras de água superficial.	39
Figura 10 – Espectroradiômetros TriOS: a) RAMSES-ARC: medição da energia radiante refletida; b) RAMSES-ACC-VIS: medição da energia incidente.	40
Figura 11 – Espectroradiômetros TriOS realizado medições radiométricas.	41
Figura 12 – a) Rampa de filtração; b) Filtros com sedimentos antes de serem levados a estufa.	43
Figura 13 - Reflectância referente ao Rio Negro, Zona de Mistura e Rio Solimões-Amazonas.	44
Figura 14 - Reflectância referente ao Rio Negro e Zona de Mistura.	45
Figura 15 - Produto MOD09A1.005_500m da Imagem de 02 a 09 de fevereiro de 2014.	46
Figura 16 - Mapa de concentração de sedimentos na grade hidrométrica da área de confluência dos rios Negro e Solimões-Amazonas para o mês de maio de 2013.	54
Figura 17 - Mapas de concentração de sedimentos na grade hidrométrica da área de confluência dos rios Negro e Solimões-Amazonas.	56
Figura 18 - Valores mínimos de concentração de sedimentos em suspensão (mg/l) divididos pelas 5 linhas da grade hidrométrica.	58
Figura 19 – Representação dos dados de sedimentos em suspensão por amostra de água superficial.	69
Figura 20 - Representação dos dados de sedimentos em suspensão por espectrometria de campo.	69
Figura 21 - Representação dos dados de sedimentos em suspensão por espectrometria de campo.	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da reflectância normalizada com respeito ao ângulo de visada do sensor radiométrico (Lu).....	42
Gráfico 2 – Vazões mensais interanuais dos rios Negro e Solimões e cota mensal interanual da estação de Manaus para o período de 2000-2010.....	52
Gráfico 3 – Cotas mensais interanuais das estações de Manaus (Rio Negro) e Manacapuru (Rio Solimões) para o período de 2000-2010.....	53
Gráfico 4 - Correlação entre dados de concentração de sedimentos em suspensão e vermelho simulado de MODIS de espectrometria de campo: a) por ponto da grade hidrométrica; b) por total de amostras coletadas.	60
Gráfico 5 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da banda do vermelho simulado de MODIS de espectrometria de campo: a) por ponto da grade hidrométrica; b) por total de amostras coletadas.	60
Gráfico 6 - Correlação entre dados de concentração de sedimentos em suspensão e infravermelho próximo simulado de MODIS de espectrometria de campo: a) por ponto da grade hidrométrica; b) por total de amostras coletadas.	61
Gráfico 7 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e e dados estimados da banda do infravermelho próximo simulado de MODIS de espectrometria de campo: a) por ponto da grade hidrométrica; b) por total de amostras coletadas.	61
Gráfico 8 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da Banda do Vermelho MODIS: a) equação da espectrometria de campo processamento 01; b) equação da espectrometria de campo processamento 02.....	62
Gráfico 9 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da Banda do Infravermelho Próximo MODIS: a) equação da espectrometria de campo processamento 01; b) equação da espectrometria de campo processamento 02.	63
Gráfico 10 - Correlação entre dados de concentração de sedimentos em suspensão e reflectância dos pixels das imagens MODIS: a) Banda do Vermelho; b) Banda do Infravermelho Próximo.....	64
Gráfico 11 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da Banda do Vermelho MODIS: a) equação da reflectância simulada de MODIS da espectrometria de campo processamento 02; b) equação MODIS.	64
Gráfico 12 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da Banda do Infravermelho Próximo MODIS: a) equação da reflectância simulada de MODIS da espectrometria de campo processamento 02; b) equação MODIS.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características do sensor MODIS a bordo das plataformas Terra & Aqua.	32
Quadro 2 – Qualidade dos dados de reflectância de superfície das imagens MOD09A1.005_500m e MYD09A1.005_500m.....	47
Quadro 3 - Valores de incerteza para espectrometria de campo.	50
Quadro 4 - Valores de incerteza para imagens MODIS.	51
Quadro 5 - Amostras de concentração de sedimentos de suspensão e dados de reflectância das imagens MODIS correlacionados por campanha.	66

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
1.1 Fisiografia Geral.....	16
1.1.1 Geologia.....	16
1.1.2 Clima.....	18
1.1.3 Hidrologia.....	21
1.2 Sedimentos em Suspensão na Bacia Amazônica.....	24
1.3 Sensoriamento Remoto da Água.....	25
1.3.1 Propriedades Ópticas da Água.....	25
1.3.1.1 Grandezas radiométricas.....	26
1.3.1.2 Propriedades Ópticas Inerentes.....	26
1.3.1.3 Propriedades Ópticas Aparentes e Quase Inerentes.....	29
1.3.1.3.1 Distribuição da Radiância.....	29
1.3.1.3.2 Coeficiente Vertical de Atenuação Difuso (K).....	30
1.3.1.3.3 Reflectância.....	30
1.3.2 Satélites Terra & Aqua: Sensor MODIS.....	31
1.3.3 Análise dos sedimentos em suspensão por meio do sensoriamento remoto (Sensor MODIS): estudos de caso na Bacia Amazônica.....	33
CAPÍTULO II: MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
2.1 Determinação dos locais de amostragem.....	37
2.2 Metodologia de amostragem.....	37
2.2.1 Amostras de água superficial.....	39
2.2.2 Espectrorradiômetro.....	39
2.3 Frequência de amostragens.....	42
2.4 Procedimentos de obtenção e armazenamento dos dados finais.....	43
2.4.1 Amostras de água superficial.....	43
2.4.2 Espectrometria de campo.....	44
2.4.3 Imagens MODIS.....	45
2.5 Processamento e análise dos dados brutos.....	47
2.5.1 Amostras de Água Superficial & Espectrorradiômetro.....	47
2.5.2 Amostras de Água Superficial & Imagens MODIS.....	49
2.6 Análise de Incertezas.....	49
2.6.1 Amostra de Água Superficial.....	49
2.6.2 Espectrometria de Campo.....	50
2.6.3 Imagens MODIS.....	50
CAPÍTULO III: RESULTADOS & DISCUSSÕES.....	52
3.1 Amostras de Água Superficial.....	52
3.2 Dados de Sensoriamento Remoto.....	59
3.2.1 Amostras de Água Superficial & Espectrometria de Campo.....	59
3.2.2 Espectrometria & Imagens MODIS.....	61
3.2.3 Amostras de Água Superficial & Imagens MODIS.....	63
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
5. REFERÊNCIAS.....	71

INTRODUÇÃO

A confluência dos rios Negro e Solimões possui o nome de Encontro das Águas devido a diferença da cor da água dos dois rios. O Rio Negro possui água negra devido a grande concentração de matéria orgânica e o Rio Solimões de água branca com seus sedimentos em suspensão. Essa confluência, que marca a mudança de nome do Rio Solimões, que passa a se chamar Rio Amazonas, é conhecida nacional e internacionalmente e atrai turistas todos os anos para a cidade de Manaus (Figura 1).

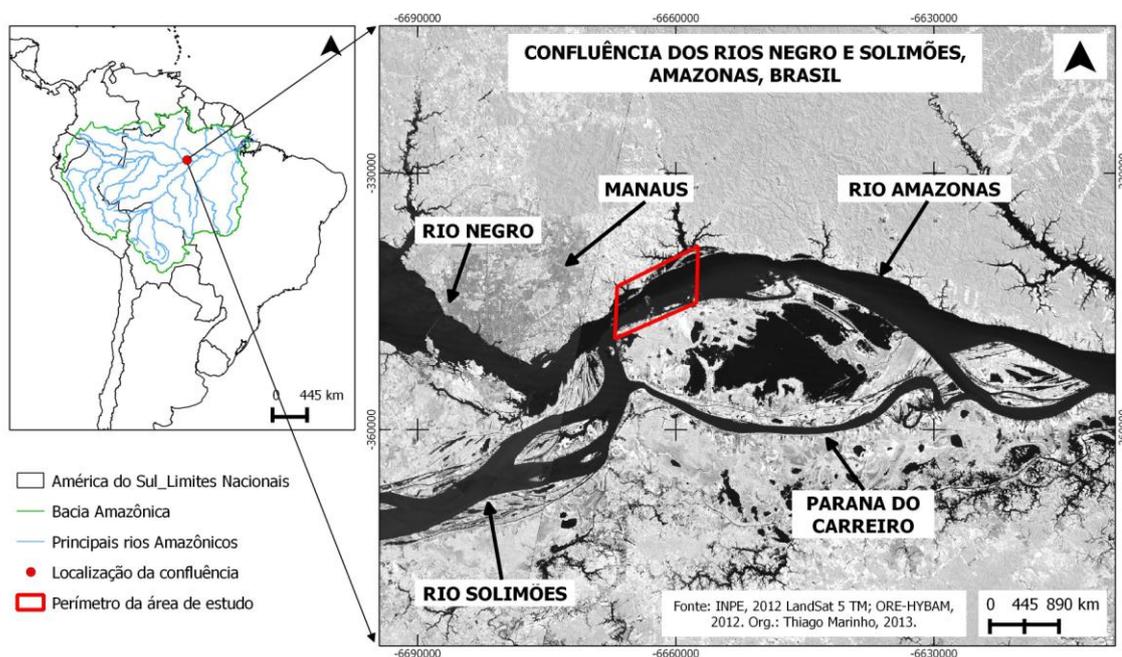


Figura 1 – Região de confluências dos rios Negro e Solimões, Amazônia, Brasil.
Org.: Thiago Marinho, 2013.

O presente estudo surgiu da necessidade de se compreender melhor a confluência dos rios Negro e Solimões do ponto de vista do fluxo de sedimentos em suspensão. O trabalho suscita discussões não somente sobre sua dinâmica hidrológica, mas também sobre a contribuição do sensoriamento remoto para o estudo dos rios Amazônicos.

Apesar da sua grande importância como fenômeno natural de grande expressividade na Amazônia, poucos estudos foram feitos sobre o ponto de vista hidrológico (FILIZOLA *et al.*, 2009; LARAQUE *et al.*, 2009). Assim esse estudo pretende contribuir para melhor compreensão hidrológica da confluência, assim como aos estudos voltados a Hidrologia Espacial nos rios da Bacia Amazônica.

Para tanto foi delimitada uma área de 10km para este estudo utilizando a metodologia proposta por Filizola *et al.* (2009) e Soares (2012). Esta consiste em uma grade hidrométrica com 40 pontos de amostragem com 500 metros de distância entre cada em sentido latitudinal e 2,5km de distância em sentido longitudinal.

A metodologia foi dividida em método tradicional (amostras de água superficial) e óptico (espectrometria de campo e imagens MODIS). A utilização das concentrações de sedimentos em suspensão e da espectrometria de campo (Radiômetros TriOS) tiveram o intuito de possibilitar uma fina calibração das imagens MODIS.

O objetivo é, a partir disso, gerar equações para a banda do vermelho e infravermelho próximo a serem utilizadas nos valores de reflectância dos pixels das imagens MODIS. Pretende-se, assim, monitorar a concentração de sedimentos em suspensão da confluência dos dois rios na área delimitada a partir de sensoriamento remoto.

Os resultados foram divididos em quatro momentos. No primeiro, foi feita uma análise dos dados de concentração de sedimentos em suspensão das amostras de água superficial distribuídos nos 40 pontos da grade hidrométrica revelando sua dinâmica durante os oito meses de coleta de dados. No segundo, os dados de amostras de água superficial foram correlacionados com os valores de reflectância de espectrometria de campo gerando equações para as bandas do vermelho e infravermelho próximo.

No terceiro momento, as equações geradas nas correlações da etapa anterior foram utilizadas para calcular a estimativa da concentração de sedimentos a partir dos pixels das imagens MODIS. No quarto momento foi feita uma correlação entre os dados de concentração de sedimentos em suspensão das amostras de água superficial e os valores de reflectância dos pixels das imagens MODIS. O objetivo também consistiu na geração de equações da banda do vermelho e infravermelho próximo a serem utilizadas no cálculo de estimativa de concentração de sedimentos em suspensão a partir dos valores de reflectância dos pixels das imagens MODIS.

A utilização de dois processos para análise da estimativa da concentração de sedimentos em suspensão a partir do sensoriamento remoto – o primeiro valendo-se dos dados de espectrometria de campo e o segundo fazendo uma relação direta entre os dados de amostras de água superficial e reflectância dos pixels das imagens MODIS – objetivou testar todas as possibilidades de análise e identificar a metodologia mais precisa para a área de estudo.

Analisar a dinâmica do transporte e concentração de sedimentos em suspensão na confluência dos rios Negro e Solimões tem a finalidade de contribuir para o melhor

entendimento do papel de cada rio no ciclo hidrológico do Rio Amazonas. Isso permite verificar como a confluência se transforma e se dinamiza em cada período do ciclo hidrológico.

Esta pesquisa foi financiada pelo Projeto IHESA (Iniciativa de Hidrologia Espacial na Amazônica – MCT/FINEP/CT-HIDRO 01/2010/2785) sobre gerencia do Laboratório de Potamologia Amazônica – LAPA da Universidade Federal do Amazonas. A pesquisa esta vinculada também ao Observatório ORE-HYBAM (Observatório de Pesquisa para o Meio Ambiente) e Projeto MEG-HYBAM (Monitoramento Espacial das Principais Bacias Hidrográficas do Brasil).

CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Fisiografia Geral

1.1.1 Geologia

A Bacia Amazônica se estende por cerca de 6.1 milhões de km², aproximadamente 5% das terras emersas do planeta. O Rio Amazonas, o rio principal da bacia e o maior do planeta em termos de área de drenagem e vazão, lança no Oceano Atlântico um volume de água que representa aproximadamente 15% a 20% do total das contribuições hídricas de todos os rios do mundo para os oceanos (MOLINIER *et al.*, 1994).

A Bacia Amazônica esta situada entre os 5° de latitude Norte e 20° de latitude Sul possuindo quatro grandes unidades morfoestruturais: a oeste a Cordilheira Andina (12% da área total), ao norte e ao sul os Escudos da Guiana e Brasileiro (44% da área total) e na faixa central a Planície Fluvial (44%).

Os principais rios formadores do Rio Amazonas possuem muitas características ligadas a essas grandes unidades. Os rios Marañón-Solimões e Madeira, ambos de origem andina, apresentam contribuições com águas carregadas de material particulado em suspensão. Por outro lado, o Rio Negro, que banha grandes áreas do escudo guianense e geologicamente pouco ativo em comparação com os Andes, possui águas com menor concentração de sedimentos em suspensão e mais matéria orgânica sob a forma dissolvida, dando uma cor preta aparente (MOLINIER *et al.*, 1994; FILIZOLA & GUYOT, 2011) (Figura 02).

Franzinelli (2011), ao descrever os aspectos morfológicos da confluência dos rios Negro e Solimões, afirma que na região afloram rochas clásticas da Formação Alter do Chão, do Cretáceo superior, caracterizadas como camadas espessas de argilas siltosas vermelhas, fortemente alteradas, com frequentes concreções lateríticas e bancos de arenitos argilosos, vermelhos ou esbranquiçados, localmente silicificados (Arenito Manaus).

A planície de inundação do Rio Amazonas, nessa região, está assentada sobre a Formação Alter do Chão. Esta planície, de idade holocênica, é constituída de depósitos de areias líticas, finas, bem selecionadas, alternadas com leitos de argilas cinzentas.

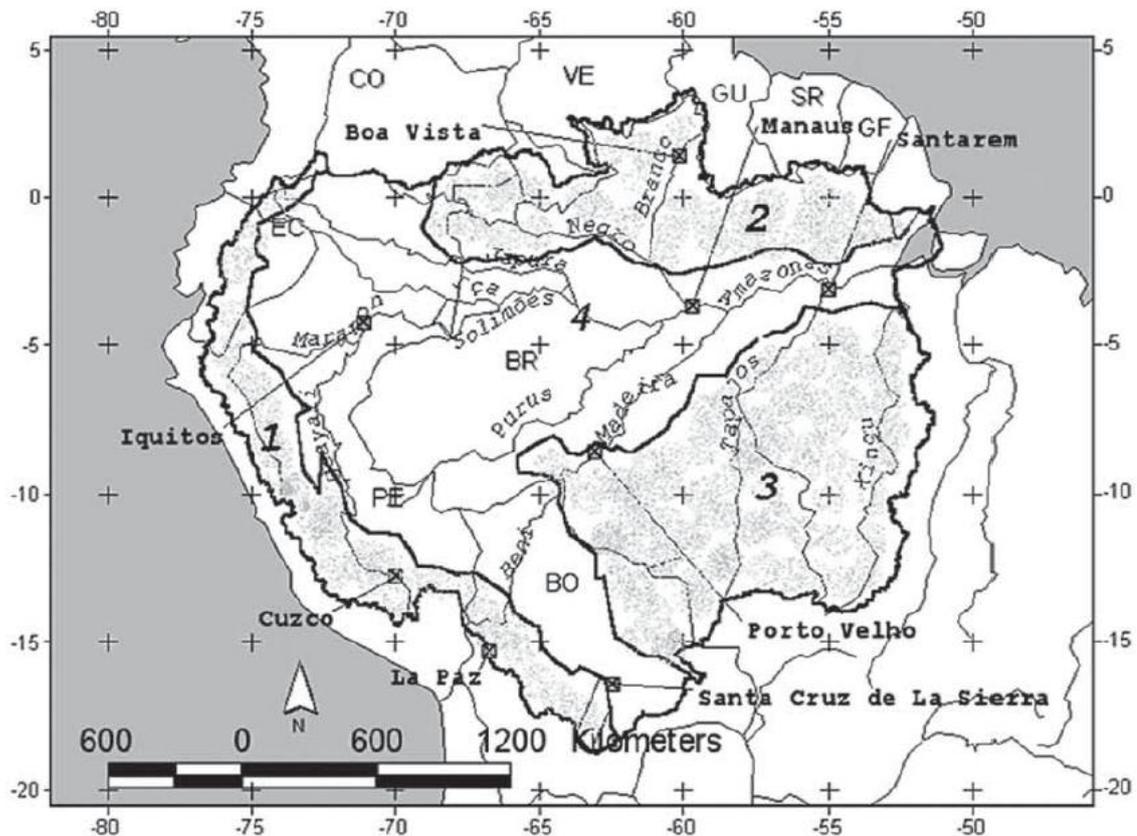


Figura 2 – A Bacia Amazônica com suas 4 principais unidades morfoestruturais (1 – Cadeia Andina; 2 – Escudo das Guianas; 3 – Escudo Brasileiro; e 4 – Planície Fluvial) e seus principais cursos d’água.
Fonte: FILIZOLA & GUYOT, 2011, p. 02.

O Rio Solimões, ao longo do seu trajeto, percorre tanto na planície por ele mesmo formada, quanto entre a margem da planície e as rochas da Formação Alter do Chão. A margem direita do Rio Solimões, a montante da confluência, está situada na planície de inundação. A margem esquerda, nas proximidades da cidade de Iranduba e ao oeste da Ilha Xiborena (Figura 3) é formada por bancos de arenitos grosseiros, alternados por camadas silte-argilosas.

A jusante de Iranduba, o terraço da Formação Alter do Chão recua dando lugar à várzea. O baixo curso do Rio Negro está fortemente influenciado pela neotectônica. A montante da confluência, a margem esquerda do Rio Negro é limitada pelas “barreiras vermelhas” da Formação Alter do Chão. Esta segue ao leste formando a margem esquerda do Rio Amazonas onde, logo após a confluência, forma terraço que alcança 90m acima do nível do mar. Na base do terraço ocorre a Ponta das Lajes, onde as rochas silicificadas da Formação Alter do Chão se estendem por dezenas de metros para dentro do canal, sendo descobertas somente nas estações de seca (FRANZINELLY, 2011).

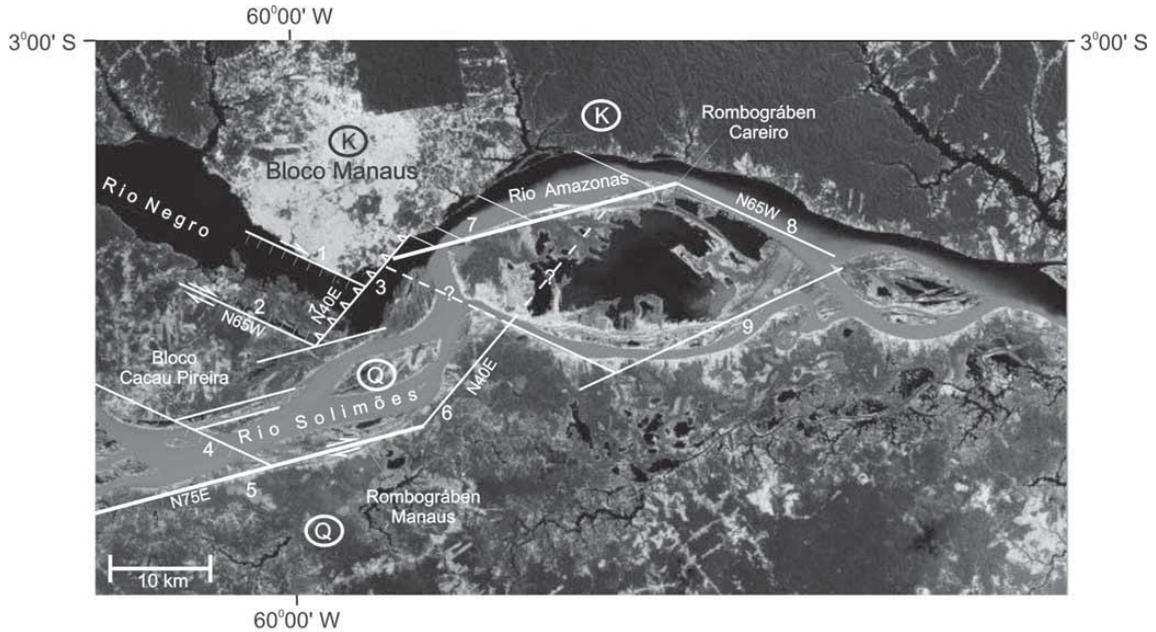


Figura 3 - Esboço geológico-tectônico da região de confluência dos rios Negro e Solimões (modificado de Igreja & Franzinelli, 2007).

Imagem original obtida no Google Earth em novembro de 2007. Q - Quaternário. Areias, siltes e argilas inconsolidadas da planície do Rio Solimões-Amazonas. K - Cretáceo Superior. Formação Alter do Chão. Arenitos e argilitos vermelhos, subordinadamente conglomeráticos, friáveis, associados a horizontes silicificados (Arenito Manaus). Lineamentos e Zonas de Falhas: 1 - Educandos, 2 - Paricatuba, 3 - Aleixo, 4 - Paciência Leste, 5 - Manaquiri, 6 - Curari, 7 - Terra Nova, 8 - Marimbá, 9 - Careiro.

Fonte: FRANZINELLY, 2011.

A jusante da Ponta das Lajes a Formação Alter do Chão recua para NE e a margem do Amazonas é formada por bancos tipo “restinga” de sedimentos modernos que limitam o Lago do Aleixo. A área de interflúvio, Ilha Xiborena, é constituída de feixes de bancos de sedimentos modernos, dispostos na direção N-S encurvados para W, definindo a direção do ângulo da confluência dos rios. As depressões entre os bancos são colmatadas. Algumas ainda na fase de colmatagem possuem canal navegável durante as cheias (Paraná da Xiborena e Furo de Paracuuba).

1.1.2 Clima

O clima de uma região é determinado por um conjunto de fatores ou controles climatológicos com áreas de atuação tanto global quanto regional. Os mais importantes são a circulação geral da atmosfera, a topografia local, a natureza da cobertura vegetal, o ciclo hidrológico e, se a região for costeira, a influência das correntes oceânicas (MOLION, 1987).

Na Amazônia, importantes sistemas influenciam a precipitação na região tanto em grande escala (Zona de Convergência Intertropical – ZCIT e Alta da Bolívia) quanto em

escala sinótica (Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS) e mesoescala (Linhas de Instabilidade – LI's).

Para os trópicos, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um dos mais importantes sistemas, fazendo parte da circulação geral da atmosfera. Em escala planetária, a ZCIT localiza-se no ramo ascendente da circulação de Hadley que, segundo Molion (1987), tem origem a partir da ZCIT. Nesta há predominância de baixas pressões, ocorrendo a convergência e ascensão do ar, produzindo condensação e conseqüentemente descensão em latitudes de 20° e 35°. Garcia (2010) destaca que a combinação de características oceânicas e atmosféricas forma uma região propícia para localização da ZCIT, como: a) zona de convergência dos alísios (de sudeste e de nordeste); b) região do cavado equatorial; c) zona de máxima Temperatura da Superfície do Mar (TSM); d) região de máxima convergência de massa; e e) banda de cobertura de nuvens convectivas.

A ZCIT possui um deslocamento norte-sul com ciclo de aproximadamente um ano, atingindo latitudes mais ao norte (aproximadamente 8°N) em agosto e setembro e latitudes mais ao sul (aproximadamente 1°N) nos meses de março a abril (GARCIA, 2010). Tal deslocamento caracterizará períodos de pluviosidade diferentes no norte e sul da bacia Amazônica.

A Alta da Bolívia é uma circulação de alta troposfera sobre a América do Sul. Ela é caracterizada por apresentar o desenvolvimento de um anticiclone em altos níveis (200 hPa) durante os meses de verão, associado com uma forte convecção da região Amazônica, resultado da convergência do ar mais aquecido e umidade nos baixos níveis (850 hPa) e divergência do ar que se resfria em altos níveis da atmosfera (200 hPa) com variação de sua posição tanto intrazonal quanto interanual (FISH *et al.*, 1998).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), estudada inicialmente por Oliveira (1986), é uma faixa persistente de nebulosidade no sentido noroeste-sudeste que se entende do sul da Amazônia ao Atlântico Sul Central. As ZCAS são decorrentes de interações entre Sistemas Frontais (SF's) e Convecção Tropical (CT's) bastante frequentes na Amazônia com SF's localizados ao longo da costa Atlântica entre os paralelos 20° e 35°S. O período do ano de maior frequência são nos meses de CT's mais intensas na superfície terrestre (outubro a março) com SF's localizados entre 20° e 25°S. Oliveira (1986) ainda caracterizou quatro bandas latitudinais distintas, definindo a variação sazonal da ZCAS (Figura 04).

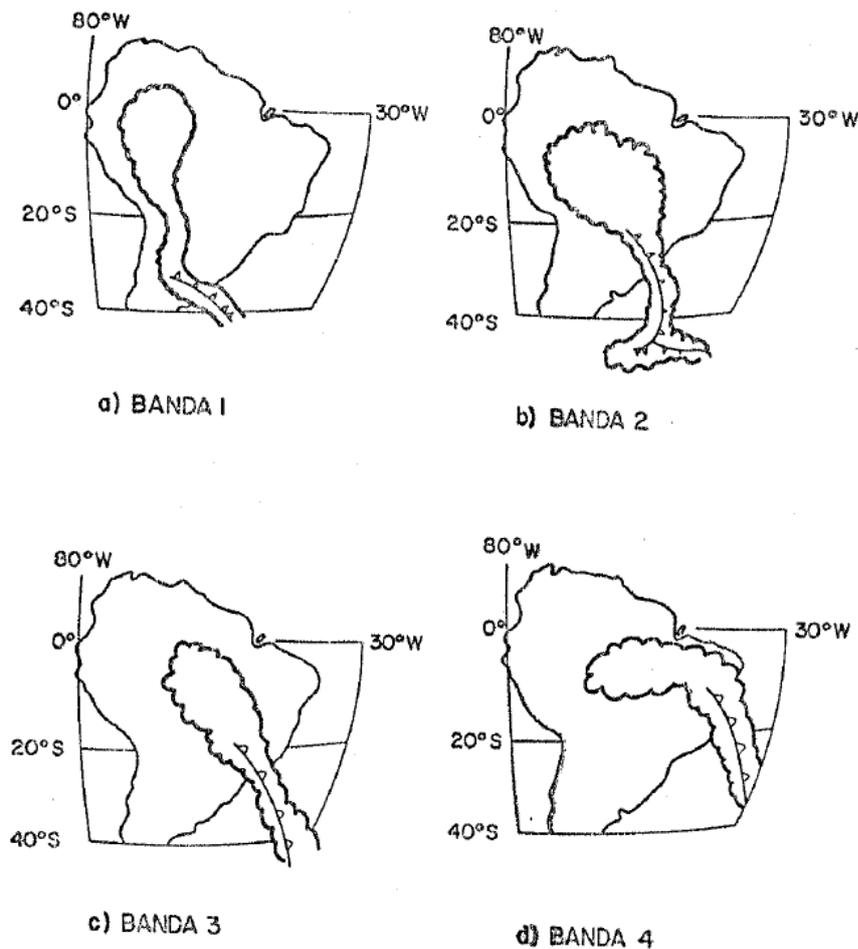


Figura 4 – Esquemas típicos de formação de faixa de nebulosidade convectiva para cada banda latitudinal. Banda I - 35° - 40° S – no verão, a associação entre os SF's e a convecção ao longo da Cordilheira dos Andes até o oeste da Amazônia; Banda II - 25° - 35° S – associação com o oeste e centro da Amazônia. Estende-se desde o rio da Prata até a região de Curitiba; Banda III - 20° - 25° S – De Curitiba até Cabo Frio/ RJ, região preferencial entre associação da CT na América Central e SF's na costa; Banda IV - Ao norte de 20° S – associação com parte oriental da Amazônia.
Fonte: OLIVEIRA, 1986, p. 26-27.

As Linhas de Instabilidade (LI's) são bandas de nuvens convectivas, não necessariamente contínuas, que se formam e se propagam continente adentro. A mais típica é a linha de *cúmulos nimbus* que se forma ao longo de uma ampla área de movimento descendente. As LI's se formam na costa norte-nordeste da América do Sul, da Guiana Francesa até o estado do Maranhão, associadas à circulação de brisa marítima junto à costa. Para o nordeste do estado do Pará as LI's chegam a representar 45% das chuvas da região (COHEN, 1989).

Na Amazônia, as regiões mais chuvosas encontram-se no delta do Amazonas e no Noroeste da Bacia (Colômbia, norte do Equador, nordeste de Peru e noroeste de Brasil) devido a sua exposição à ZCIT (>3.000 mm/ ano). As precipitações também são abundantes perto da posição média da ZCAS estabelecida durante o verão austral desde ao noroeste da

Bacia Amazônica ao sudeste nas costas do Atlântico Sul (CARVALHO *et al.*, 2004). As precipitações diminuem nas zonas tropicais a aproximadamente 2.000 mm/ano no sudeste do Brasil e menor que 1.500 mm/ano na planície peruano-boliviana e no estado de Roraima, no Brasil. Nos Andes, observam-se sobre os 3.000 metros sobre o nível do mar (m.s.n.m) precipitações de 1.000 mm/ano. Em uma menor elevação nota-se variabilidade espacial com precipitações entre 500 e 3.000 mm/ano.

1.1.3 Hidrologia

O Rio Amazonas nasce na Cordilheira do Andes peruana a montante do Rio Apurimac, acima de Cuzco. Este rio andino, que forma o Rio Ucayali, recebe os aportes do Rio Pachitea antes de sair dos Andes. Na planície Amazônica o Rio Ucayali recebe aportes sucessivos dos rios Marañon e Napo (também andinos) pela margem esquerda. A partir da confluência dos rios Ucayali-Marañon o rio passa a se chamar Amazonas no Peru e Solimões quando entra no Brasil (FILIZOLA *et al.*, 2002).

O Rio Solimões recebe os aportes dos rios Putumayo-Iça e Caquetá-Japurá (andinos provenientes da Colômbia) pela margem esquerda e Juruá e Purus (com nascentes situadas numa zona de antepaís na fronteira Peru-Brasil) na margem direita. Nas proximidades de Manaus o Rio Solimões encontra-se com o Rio Negro (Encontro das Águas). O Rio Negro tem sua nascente no Escudo das Guianas, inicialmente chamado de Guainia na Colômbia. Seus principais afluentes são os rios Branco e Vaupés (com nascente no Escudo das Guianas).

Quanto à variabilidade das alturas de água, o Rio Solimões, na estação de Teresina, apresenta um cotograma, característico de um regime equatorial, com um pico de cheia em dezembro-janeiro e um segundo, mais importante, em abril-junho. Na estação de Manacapuru, mais a jusante, o hidrograma se apresenta mais regular com um pico de cheia máxima de maio a agosto e um pico de cheia precoce em janeiro-fevereiro (FILIZOLA *et al.*, 2002).

No Rio Negro, as estações de Curicuriari e Barcelos apresentam hidrogramas bimodais com um primeiro pico de cheia em janeiro e um segundo, mais importante, em junho-setembro. Manaus possui um hidrograma que difere dos demais a montante e se assemelha com o de Manacapuru. Isso se deve, segundo Meade *et al* (1991), ao barramento hidráulico imposto pelo Rio Solimões. Filizola *et al* (2009) comenta que, por influência do barramento hidráulico, o Rio Negro apresenta um discreto período de cheia quando comparado com o período de vazante das águas. Isso demonstra uma dinâmica diferente entre a descarga líquida e os níveis de cota nessa região.

Os autores fizeram na região uma análise a partir da relação de descarga líquida, nível e velocidade da água estabelecendo comparações para cada período (seca, enchente, cheia e vazante). A diferença entre os rios Solimões e Negro, no que se refere aos seus parâmetros hidrométricos fundamentais, está provavelmente relacionada com a forte variação de inclinação entre os dois rios e também dentro do Rio Amazonas. O Rio Solimões, é média 2,5 vezes maior do que o Rio Negro em termos de descarga líquida e 3 vezes mais forte em termos de velocidade da água.

Laraque *et al.* (2009) descrevem a configuração espacial da zona de mistura dos rios Negro e Solimões analisando as características de cada um. As águas do Rio Negro apresentam velocidade de $0,3 \text{ ms}^{-1}$, condutividade de $8 \mu\text{S cm}^{-1}$ em 25°C , turbidez de 5 NTU e um pH ácido de 5,5. As águas do Rio Solimões, por sua vez, apresenta velocidade de 1 ms^{-1} , condutividade de $80 \mu\text{S cm}^{-1}$ em 25°C , turbidez de 80 NTU e um pH básico de 7,0.

Devido a maior densidade, as águas do Rio Solimões fluem sob as do Rio Negro enquanto que as águas do Rio Negro “flutuam” sobre as do Rio Solimões. O contato entre as águas dos dois rios apresentam um limite bem definido em sentido vertical onde o Rio Negro (lado esquerdo) e Solimões (lado direito) apresentam velocidades bem distintas aqui apresentadas na Figura 05. Nesta medição registrou-se uma vazão média de $169.844 \text{ m}^3/\text{s}$ com $2,80 \text{ m/s}$ de velocidade máxima, $1,65 \text{ m/s}$ de velocidade média e 57 m de profundidade máxima.

LOCALIZAÇÃO DO PERFIL DA MEDIÇÃO DE VAZÃO NA REGIÃO DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS NEGRO E SOLIMÕES, AMAZONAS, BRASIL

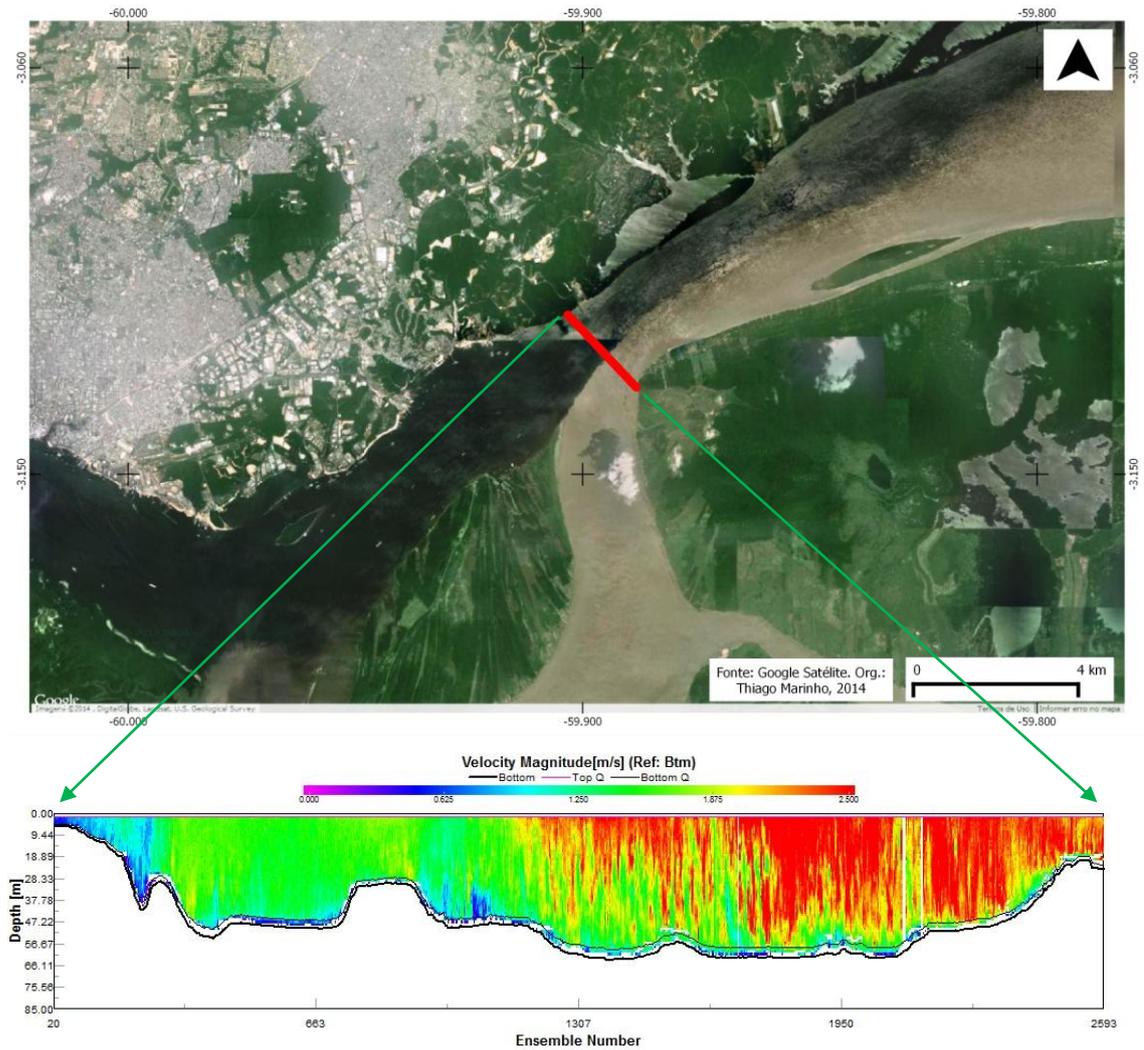


Figura 5 - Perfil de velocidade da região de confluência dos rios Negro e Solimões.

Fonte: Dados coletados em trabalho de campo da disciplina de Potamologia Amazônica no dia 29 de junho de 2012.

O perfil de velocidade revela o comportamento dos dois rios no início da confluência, tendo o Rio Solimões (lado esquerdo com valores em vermelho) uma velocidade duas vezes maior que a do Rio Negro (lado direito com valores em verde).

O transecto possui comprimento de 2.600km e, além disso, apresenta profundidades diferentes no leito. O lado esquerdo a profundidade máximo foi de 64 metros e no lado direito 53 metros.

1.2 Sedimentos em Suspensão na Bacia Amazônica

Determinar qual a descarga de sedimentos em suspensão no oceano oriundos da Bacia Amazônica não é uma tarefa simples. Isso é refletido no conjunto de publicações desde 1967 que tiveram como área de estudo tanto a estação de Óbidos, última estação hidrométrica do Rio Amazonas por onde passam cerca de 80% da descarga líquida da bacia, como a sua foz, com valores que variam desde 500 a $1.300 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹.

O primeiro trabalho a estimar a carga de sedimentos suspensos do Rio Amazonas em $500 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹ foi de Gibbs (1967). Publicações posteriores aumentaram esse valor para $600 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹ (OLTMAN, 1968), $900 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹ (MEADE *et al.*, 1979), $1.100 - 1.300 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹ (MEADE *et al.*, 1985), $550 - 1.000 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹ (NITTROUER *et al.*, 1986 e NITTROUER *et al.*, 1995).

Filizola (1999) retoma valores anteriores e estima a descarga como sendo $600 \cdot 10^6$ t.ano⁻¹. Posteriormente, Filizola & Guyot (2009) ampliaram a faixa de variação para valores entre $600 - 800 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹. Martinez *et al* (2009) utilizando dados de sensoriamento remoto (sensor MODIS) estimou em $800 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹.

Wittmann *et al* (2011), utilizando o método nuclídeos cosmogênicos de Be₁₀ para estimar a carga de sedimentos de longo prazo, obteve um valor de $610 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹. Finalmente, Guyot *et al.* (2011) estimaram uma descarga de sedimentos em $872 \cdot 10^6$ t. ano⁻¹. Essa variação de estimativas segundo Filizola *et al.* (2011) se deve por vezes aos diferentes métodos e abordagens utilizados, assim como também aos distintos períodos de medição e medida.

Fatores como quantidade de dados, qualidade das informações e temporalidade das coletas são os grandes desafios enfrentados pelos estudos de hidrologia na Amazônia. Estudos pontuais para um mesmo local, como os descritos anteriormente, revelam a importância dos dados de sensoriamento remoto auxiliado os dados de campo para uma melhor compreensão da dinâmica de uma determinada área.

O monitoramento de áreas da Amazônia já foi inviável pelo método tradicional. As principais causas disso eram o alto custo operacional, ausência de pessoal capacitado, manutenção das estações e dimensão geográfica da bacia. A utilização do sensoriamento remoto representa uma possibilidade de monitoramento e, conseqüentemente, contribui para uma melhor compreensão da dinâmica hidrológica na bacia como um todo.

Entretanto, é necessário maior clareza sobre os limites e as possibilidades dessa ferramenta nesse contexto. Nesse sentido, esse trabalho buscou analisar uma área de

confluência de dois rios com características distintas quanto a carga de sedimentos em suspensão utilizando sensoriamento remoto. Ressalta-se que se trata de um estudo inédito na Amazônia Brasileira, e por isso, pode representar contribuições importantes para o tema em questão.

1.3 Sensoriamento Remoto da Água

1.3.1 Propriedades Ópticas da Água

A Hidrologia Óptica estuda do comportamento da luz no meio aquático e tem por objetivo distinguir as propriedades ópticas da água pura e das águas naturais. As águas naturais nada mais são que mistura de água pura com diferentes compostos em suspensão ou dissolução que alteram de forma expressiva as propriedades ópticas.

Em geral, devido às variações destes compostos, as propriedades ópticas das águas naturais mostram grandes variações temporais e espaciais (BANNISTER, 1988). Nas águas puras, o intervalo de energia eletromagnética que tem interação volumétrica, vai de 400 nm a 700 nm. Dependendo dos elementos presentes em suspensão e dissolução a luz interage em outros comprimentos de onda se estendendo ao infravermelho próximo.

A grande variabilidade das propriedades ópticas das águas naturais pode, por um lado, dificultar a busca por dados precisos e facilmente processáveis. Mas por outro lado, é essa variabilidade de conexões entre as propriedades ópticas e os componentes químicos, biológicos e geológicos da água natural, no ambiente físico, que definem o papel crítico da óptica em pesquisa aquática.

As propriedades ópticas da água podem ser classificadas em duas: Propriedades Ópticas Inerentes (POI) e Propriedades Ópticas Aparentes (POA). As POI são aquelas que dependem, unicamente, das características biofísicas do corpo da água. As POI mais importantes são o coeficiente de absorção e o coeficiente de espalhamento por unidade de volume, além do coeficiente de atenuação e o albedo de espalhamento simples.

As POA são aquelas que dependem tanto das características do corpo d'água quanto da quantidade e a geometria do campo de luz. As principais POA são a reflectância, as funções de atenuação (funções K) e as médias dos cossenos, as quais mostram suficiente estabilidade e regularidade, e podem ser utilizadas como descritores das propriedades da água.

As POI são facilmente definíveis, contudo podem ser extremamente difíceis de medir. As POA são geralmente mais fáceis de medir, porém mais problemáticas para relacionar com

os parâmetros de interesse (material em suspensão, pigmentos fotossintéticos, matéria orgânica dissolvida colorida).

1.3.1.1 Grandezas radiométricas

As principais grandezas na radiometria são a irradiância e a radiância. A Irradiância (E) é a razão entre o fluxo de radiação irradiante por área em um elemento de superfície e sua unidade de medida é $W/m^2\lambda$. Ela pode ser caracterizada de duas maneiras. A primeira é a irradiância descendente E_d (downward irradiance) que representa a radiação descendente do hemisfério superior. A segunda é a irradiância ascendente E_u (upward irradiance) que representa a radiação ascendente do hemisfério inferior em razão a uma superfície horizontal. O E_d medido acima da superfície da água representa a quantidade de luz proveniente do céu que vai entrar na coluna da água.

A Radiância (L) é a razão entre a intensidade de radiação que deixa certo elemento de superfície, em uma determinada direção, e a área da projeção ortogonal deste elemento em um plano perpendicular à direção da radiação, sua unidade de medida é $W/(m^2\lambda)$.

Ou seja, a irradiância é o fluxo de energia por unidade de área, proveniente de todas as direções. A radiância é o fluxo de energia por unidade de área, proveniente de um determinado lugar no espaço (ângulo sólido).

1.3.1.2 Propriedades Ópticas Inerentes

Para melhor compreensão das POI, considera-se um volume de água infinitésimo ΔV , de espessura Δr , iluminado por um raio de luz de comprimento de onda λ , cuja densidade espectral de potência Φ é $\Phi_o(\lambda)$ com unidades (W/nm), representados na Figura 6. A quantidade do raio de luz que é absorvida no volume da água é indicado como $\Phi_a(\lambda)$. Outra parte é espalhada com um ângulo ψ em relação à direção do raio incidente $\Phi_b(\psi, \lambda)$. Denota-se $\Phi_b(\lambda)$ à quantidade espectral de energia espalhada. A energia restante, denominada $\Phi_t(\lambda)$, é aquela que é transmitida através do volume da água, sem sofrer trocas, em sua direção.

Essa teoria assume que a radiação luminosa é monocromática. As propriedades ópticas e as quantidades eletromagnéticas descritas têm um caráter espectral, expressando sua dependência com o comprimento de onda (λ).

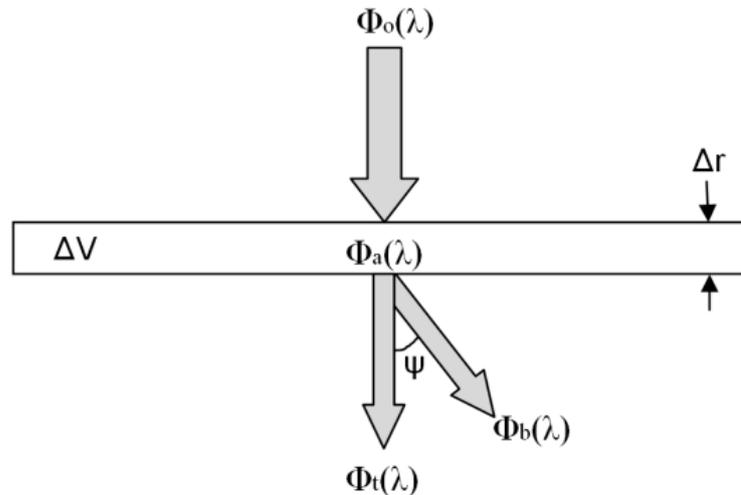


Figura 6 - Interação do raio de luz com o meio aquático. Nota-se que quando um raio de luz entra no meio aquático uma parte da luz é absorvida pelo meio (Φ_a) outra é espalhada (Φ_b) e outra é transmitida, sem variar sua direção (Φ_t).

Fonte: ESPINOSA, 2013, p.43.

Deste modo, tem-se os coeficientes de absorção (a) e o coeficiente de espalhamento (b) que é composto pelos coeficientes de retroespalhamento (b_b) e de espalhamento frontal (b_f). Se um raio de luz incidente é espalhado por uma partícula, o espalhamento da luz se dá em todas as direções, desta forma ela pode ser dividida em dois componentes: o espalhamento frontal b_f (forward scattering) referente à luz espalhada no mesmo sentido da luz incidente e o retroespalhamento b_b (backscattering), que é a luz espalhada no sentido contrário da luz incidente. Somando as duas ($b_f + b_b$) tem-se o espalhamento total.

Para expressar em caráter quantitativo a absorção espectral ou absorvância (A), toma-se a fração da potência incidente que é absorvida no volume da água, o espalhamento espectral (B) que é a fração da potência incidente que é espalhada no volume da água e a transmitância espectral (T) que é a fração que é transmitida. A soma de $A(\lambda)+B(\lambda)+T(\lambda)=1$.

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_o(\lambda)} \quad 1.1$$

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_b(\lambda)}{\Phi_o(\lambda)} \quad 1.2$$

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_o(\lambda)} \quad 1.3$$

Em alguns casos é confundida a absorbância com a densidade óptica $D(\lambda)$, que é medida por um espectrofotômetro (Kirk, 1983) e definida como:

$$D(\lambda) = -\text{Log}(1 - A(\lambda)) \quad 1.4$$

No caso do volume de água infinitesimal com uma espessura (Δr), os coeficientes de absorção e espalhamento são definidos por:

$$a = \frac{\Delta A}{\Delta r} \quad 1.5$$

$$b = \frac{\Delta B}{\Delta r} \quad 1.6$$

Sendo a e b frações do fluxo do raio de luz incidente que se perdem no volume da água. A soma da absorção e espalhamento é chamada de atenuância (C). O coeficiente de atenuação da luz é definido como c e representa a fração do fluxo de luz que é absorvido e espalhado por unidade de espessura do volume d'água.

$$c = a + b \quad 1.7$$

$$c = \frac{\Delta A}{\Delta r} + \frac{\Delta B}{\Delta r} \quad 1.8$$

$$c = \frac{\Delta C}{\Delta r} \quad 1.9$$

A determinação do coeficiente de absorção $a(\lambda)$ das águas naturais é complexo por muitas razões de modo que uma consideração cuidadosa deve ser feita reduzindo, no possível, os efeitos de espalhamento nas medidas de absorção. Os efeitos do espalhamento podem dominar a atenuação em todos os comprimentos de onda do visível, especialmente em águas com grande quantidade de material particulado.

1.3.1.3 Propriedades Ópticas Aparentes e Quase Inerentes

As propriedades ópticas aparentes (POA) da água dependem tanto do meio aquático quanto da estrutura direcional do campo de luz do ambiente: quantidades de luz, inclinação do sol, ângulo de visada, etc. As POA de um mesmo alvo podem variar, rapidamente, sem que variem suas POI (características físicas, biológicas, químicas, etc.). Se uma nuvem passa, se o ângulo de visada muda, ou se a superfície da água muda de rugosidade, por causa do vento, as POA, conseqüentemente, mudam.

O ideal é que a POA deveria ter variações sutis quanto às mudanças ambientais externas e apresentar variações significativas de um corpo d'água para o outro no que se refere à caracterização das propriedades ópticas. Diferente das POI, as POA não podem ser medidas em amostras d'água, haja vista que dependem da distribuição da luz ambiental encontrada no corpo da água em si.

As principais propriedades aparentes são: distribuição angular, coeficiente vertical de atenuação da luz, reflectância estimada a partir de um sensor remoto e reflectância irradiante de superfície.

1.3.1.3.1 Distribuição da Radiância

Para melhor entendimento do campo da luz, abaixo da superfície da água, faz-se necessário detalhar o conhecimento da distribuição angular do fluxo de luz, em todas as profundidades. Duas propriedades do campo de luz são, geralmente, usadas para descrever a distribuição angular do campo da luz: μ_d , o cosseno médio da irradiância descendente, e μ_u , o cosseno médio para a irradiação ascendente. Por definição μ_d é:

$$\mu_d = \frac{E_d}{E_{0d}} \quad 1.10$$

Onde E_d é a irradiância descendente em todas as direções (por unidade de área e recebido por um coletor plano) e E_{0d} é a irradiância escalar descendente (medido por um sensor esférico).

E μ_u pode ser estimado de forma semelhante, como a razão da irradiância ascendente sobre uma superfície plana e a irradiância escalar ascendente. Se o meio aquático fosse totalmente isotrópico, teríamos $\mu_u = \mu_d = 0,5$.

1.3.1.3.2 Coeficiente Vertical de Atenuação Difuso (K)

O coeficiente de atenuação difuso representa a taxa de perda de irradiação (E) com relação à profundidade do médio aquático (z). A atenuação pode ser da irradiação descendente (Ed) ou ascendente (Eu). Assim se define o coeficiente de atenuação difuso vertical descendente (Kd) e o coeficiente de atenuação difuso vertical ascendente (Ku). Estes coeficientes variam em função do comprimento de onda, definindo $K_d(\lambda)$ e $K_u(\lambda)$. Os valores de K podem ser estimados pelas Equações 1.11 e 1.12.

$$K_d = \frac{dE_d}{dz} \quad 1.11$$

$$K_u = \frac{dE_u}{dz} \quad 1.12$$

1.3.1.3.3 Reflectância

No sensoriamento remoto a reflectância é definida pela Equação 1.13.

$$R_{rs} = \frac{L_w(\theta, \phi, \lambda)}{E_d(\lambda)} \quad 1.13$$

Onde E_d é a irradiância descendente que chega à superfície da água, θ e ϕ são os ângulos polar e azimutal, respectivamente, λ é o comprimento de onda e L_w é a radiância espectral emergindo da água na direção θ e ϕ .

R_{rs} pode ser escrita como uma função da reflectância volumétrica (R^{-0}), que é definida como a razão E_u^{-0}/E_d^{-0} , onde E_u^{-0} e E_d^{-0} são a irradiância ascendente e descendente a uma profundidade infinitésima (-0). De acordo com Morel e Gentili (1993) temos:

$$R_{rs} = \frac{(1 - \rho) * (1 - \rho') * R^{-0}}{n^2 * (1 - r' R^{-0}) * Q} \quad 1.14$$

Onde R^{-0} é a reflectância volumétrica, ou seja, a reflectância do corpo d'água em si; ρ é a reflectância interna de Fresnel que depende da rugosidade da superfície, do ângulo zenital solar e da cobertura de nuvens; ρ' é a reflectância de Fresnel para a interface água-ar,

tipicamente estimada em 4% ou 5%; n é o índice de refração da água ($n = 1,34$); r' a reflexão da água-ar, da ordem de 0,48; Q é a razão de Eu-0/Lu-0, que para um campo ideal isotrópico seria π , mas em águas naturais varia entre 3,1 e 5,6 (MOREL e GENTILI, 1993).

1.3.2 Satélites Terra & Aqua: Sensor MODIS

O satélite Terra é o primeiro da plataforma EOS, lançado em 18 de dezembro de 1999 pela NASA. Essa plataforma tem a bordo os sensores: CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), MODIS e MISR (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*) da NASA; ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) do Japão; e MOPITT (*Measurement of Pollution in the Troposphere*) do Canadá (SOARES *et al.*, 2007).

O satélite Aqua é a segunda da plataforma EOS, lançado em 4 de maio de 2002. Essa plataforma tem a bordo os sensores: AIRS (*Atmospheric InfraRed Sounder*); AMSU-A (*Advanced Microwave Sounding Unit-A*); HSB (*Humidity Sounder for Brazil*); AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS*); MODIS CERES.

O sensor MODIS, a bordo dos dois satélites, possui resolução espectral de 12 Bits em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Sendo 2 bandas com resolução espacial de 250m, 5 de 500m e as demais 29 em 1Km. A varredura de 55° para cada lado na órbita de 705Km resulta numa faixa imageada de 2.330Km, com cobertura global de 2 dias (SOARES *et al.*, 2007).

Segundo NOVO *et al* (2007), apesar do MODIS não ter sido especificado para atender aplicações voltadas aos sistemas aquáticos continentais, contudo possui características que o tornam de grande utilidade para alguns tipos de uso, como análise de material em suspensão (Quadro 1).

CARACTERÍSTICAS		RELEVÂNCIA
Órbita	Heliossíncroma	Geometria de iluminação padronizada.
Altitude	705 Km	
Horário de Passagem (Equador)	10:30h / 13:30h	Resposta de curto prazo a forçantes climáticas tais como radiação, pressão e vento.
Bandas	36*	Quatro bandas para estudos da cor da água.
Resolução Espacial	250m/500m/1km	Limita as aplicações a grandes sistemas aquáticos – estudos regionais.
Resolução Temporal	1 ou 2 vezes ao dia **	Aumenta a probabilidade de aquisição de imagens sem cobertura de nuvens e a frequência de dados úteis.

Resolução Radiométrica	Quantização em 12 bits	Aumenta a capacidade de mudanças sutis na reflectância da água, aspecto fundamental tendo em vista a baixa radiação refletida pelos corpos d'água.
Largura da Faixa Imageada	2.330 Km	Permite o imageamento instantâneo de grandes corpos d'água, garantindo a aquisição de dados antes que haja modificação das propriedades do sistema.

Quadro 1 - Características do sensor MODIS a bordo das plataformas Terra & Aqua.

* As bandas de 1 a 7 são usadas para aplicações terrestres e as bandas de 8 a 36 foram projetadas, primeiramente, para estudos atmosféricos e oceanográficos.

** Considerando-se a existência de dois sensores idênticos nas duas plataformas passando em horários diferentes. A frequência de passagem sobre o mesmo ponto diminui nas baixas latitudes.

Fonte: NOVO *et al.*, 2007, p. 266.

A largura da faixa de recobrimento pelo sensor permite a aquisição instantânea de dados de grandes extensões de rios e lagos. Outros sensores, como o TM do satélite Landsat-5, possuem um pequeno campo de varredura. Isso prejudica a análise dos sistemas aquáticos que se modificam entre aquisições de imagens de diferentes dias.

A resolução radiométrica do MODIS de 12 bits permite registrar variações de intensidade de sinal discretizadas em 4.096 níveis. Assim, torna-se possível detectar variações de energia refletida pelos sistemas aquáticos, as quais se caracterizam por baixas intensidades de sinal. Com uma alta resolução radiométrica, torna-se possível que a amplitude de níveis digitais das imagens seja acomodada para o realce de feições sutis, não detectáveis em sensores com resolução radiométrica de 8 bits, como é o caso do sensor TM do satélite Landsat-5 (NOVO *et al.*, 2007).

Para o estudo de sistemas aquáticos continentais, as bandas mais adequadas, do ponto de vista de resolução espectral, seriam as utilizadas para aplicações oceânicas. Isso por que se apresentam em maior número e estão localizadas em regiões do espectro eletromagnético que permitem observar feições específicas de certos componentes opticamente ativos. Contudo, essas bandas possuem baixa resolução espacial o que compromete a análise de rios e lagos. Desse modo, as bandas de 1 a 7 são mais adequadas por possuírem resoluções espaciais de 250m (bandas 1 e 2) e 500m (bandas 3 a 7).

As imagens MODIS possuem ainda uma vantagem no seu processamento. Elas possuem vários dados de qualidade o que possibilita avaliar a possibilidade de uso ou não para as análises de reflectância na superfície d'água. Com isso possibilita a geração de séries temporais de imagens, cujas propriedades são comparáveis com menor dependência da variação de condições atmosféricas e da geometria de iluminação (NOVO *et al.*, 2007).

Para esta pesquisa, foram utilizados os produtos MODIS MOD09 e MYD09. Ambos possuem dois tipos de resolução espacial A1 (500m) e Q1 (250m). As imagens com resolução espacial de 500m são compostas por 7 bandas, com uma banda de qualidade com o ângulo zenital de visada, ângulo zenital do sol, azimute relativo, qualidade relativa das nuvens, sombra de nuvens e carga de aerossóis.

As imagens com resolução espacial de 250m possuem as bandas 1 e 2 (vermelho e infravermelho próximo) com qualidade geral contendo dados de ângulos e nuvens, sombra de nuvens e qualidade de aerossóis. As duas bandas possuem uma faixa menos larga em comparação com os sensores ETM (LANDSAT 6) e AVHRR (NOAA) gerando uma resolução radiométrica mais refinada e conseqüentemente com menos ruído.

As 7 bandas são:

- Banda 1 – Vermelho (620 – 670 nm)
- Banda 2 – Infravermelho próximo (841 – 876 nm)
- Banda 3 – Azul (459 – 479 nm)
- Banda 4 – Verde (545 – 565 nm)
- Banda 5 – Infravermelho médio 1 (1230 – 1250 nm)
- Banda 6 – Infravermelho médio 2 (1628 – 1652 nm)
- Banda 7 – Infravermelho médio 3 (2105 – 2155 nm)

Os produtos MOD09 e MYD09 geram imagens em modelo mosaico, sendo que o produto final é resultado de imageamentos de 8 dias. Cada pixel contém a melhor observação diária possível, para aquele período, e é selecionado com base na qualidade de observação, no baixo ângulo de visada, na ausência de nuvens ou sombras de nuvens.

1.3.3 Análise dos sedimentos em suspensão por meio do sensoriamento remoto (Sensor MODIS): estudos de caso na Bacia Amazônica

Na bacia Amazônica o sensoriamento remoto representa uma boa opção para o monitoramento hidrológico, inclusive os sedimentos em suspensão em águas superficiais. Os métodos tradicionais de amostragem e análise apresentam pelo menos cinco problemas que estão interrelacionados (custo operacional, logística de operação, manutenção de estações, pessoal técnico-especializado e dimensão geográfica da bacia). Esses aspectos têm impactos tanto no planejamento quanto na operação propriamente dita dificultando a tomada de

decisões em grande parte dos casos. Nesse sentido, já existem alguns trabalhos que destacam a utilização do sensoriamento remoto, sensor MODIS, para análise de sedimentos em suspensão nos rios amazônicos.

Martinez *et al* (2009) analisaram o aporte de sedimentos em suspensão no Rio Amazonas, na estação de Óbidos. Este utilizou dados de amostras de campo a cada 10 dias desde 1995 (390 amostras disponíveis) do Projeto ORE/HYBAM e estimativas de sensoriamento remoto derivada do sensor MODIS (554 imagens disponíveis desde 2000). Os resultados mostram que os fluxos líquidos em escala de tempo interanual variaram pouco no período avaliado. Na média, a variabilidade pode inclusive ser desprezada. Porém no mesmo período registrou-se um aumento no fluxo de sedimentos da ordem de 20%, aproximadamente. Neste caso a variabilidade interanual é muito mais significativa para a descarga de sedimentos do que a vazão do rio.

Segundo Martinez *et al.* (2009), no período da pesquisa a descarga líquida em Óbidos apresentou uma fraca correlação com a concentração de sedimentos em suspensão durante o ciclo hidrológico anual. Assim, a descarga de sedimentos do rio foi avaliada multiplicando-se diariamente as medidas de descarga da água pela concentração média de sedimentos em suspensão em uma base mensal. As comparações de descargas anuais de sedimentos realizadas usando amostras de campo a dados de satélite mostraram uma boa correlação com uma diferença média inferior a 1%. Os dados de concentração de sedimentos do Rio Amazonas, tantos aqueles coletados em campo quanto os derivados do satélite, foram combinados para obter uma média mensal ininterrupta da descarga de sedimentos no período de 1995-2007 na estação de Óbidos.

Espinoza *et al* (2012a) utilizaram imagens de satélite, sensor MODIS, para construir uma série de dados de sedimentos em suspensão em uma estação mal calibrada. Foram analisados o caso das três estações perto da confluência dos rios Marañon e Ucayali que formam o Rio Amazonas na Amazônia Peruana. Duas estações apresentavam séries temporais completas de amostras de sedimentos em suspensão a cada 10 dias sendo utilizado o período de 2004-2008. Contudo, a terceira localizada ao longo do Rio Ucayali falhou em fornecer estimativas válidas de concentração de sedimentos em suspensão do rio.

Os dados das imagens de satélite serviram para substituir os registros perdidos a fim de avaliar a descarga de sedimentos do Rio Ucayali (até então não avaliada) e estender os registros das descargas de sedimentos ao longo das outras estações. A validação dos dados das imagens foi feita com as amostras de campo coletadas a cada 10 dias pelo Projeto ORE/HYBAM. Durante o período de 2004-2008 a correlação demonstrou uma boa

concordância, melhor do que 10%, para as duas estações com registros completos. Com os dados de sedimentos em suspensão obtidos por satélite, Espinoza *et al* (2012a) avaliaram uma série de 2000-2009 demonstrando que o balanço sedimentar do rio está fechado entre as estações a montante e a jusante.

Soares (2012) usou imagens de satélite, sensor MODIS, para estimar e analisar a variabilidade do fluxo de sedimentos em suspensão no Rio Solimões, na estação de Manacapuru. As amostras de água superficial foram coletadas por meio de uma grade hidrométrica com 33 pontos durante seis campanhas entre 2005-2008 (Filizola *et al.*, 2009). Revelou-se que a correlação de amostras de campo e as imagens de satélite funcionam melhor quando a variação de concentração de sedimentos é mais suave. Quando a variação de sedimentos oscila rapidamente no espaço a correlação espacial é fraca.

Apesar da estação de Manacapuru apresentar um caráter de heterogeneidade, ainda segundo Soares (2012), isso não chegou a afetar a detecção do sensor MODIS quando foram utilizados valores médios da concentração de sedimentos e de reflectância da superfície da água na seção vista pela imagem orbital. Os modelos de cálculo para estimar sedimentos foram gerados na banda no infravermelho próximo e apresentaram os mesmos resultados para o período de águas altas. Para o período de águas baixas o modelo apresentou melhor desempenho.

Espinoza *et al* (2012b) utilizaram imagens MODIS para analisar o processo de transporte de sedimentos em suspensão no Rio Madeira. Foram feitas medições de campo para coleta de amostras de água superficial, radiância espectral e granulometria durante 10 campanhas de 2007-2011. A relação entre a radiância espectral e a concentração de sedimentos em suspensão foi realizada utilizando tanto medições radiométricas de campo quanto dados de satélite. Além disso, foram utilizadas as amostras de sedimentos em suspensão coletadas a cada 10 dias e adquiridas pela rede de monitoramento do Projeto ORE/HYBAM, para realização de correlações com as imagens de satélite para o período de 2000-2011.

As estações analisadas foram as de Abunã, Porto Velho, Humaitá, Manicoré, Fazenda Vista Alegre e Foz do Madeira. Foram utilizadas mais de 900 imagens MODIS que foram processadas para monitorar a dinâmica do fluxo de sedimentos em suspensão no tempo e no espaço (Figura 7). Os dados de reflectância das imagens de satélite foram correlacionados com a concentração de sedimentos em suspensão. No entanto, uma dependência sazonal foi demonstrada sendo causada mais provavelmente por uma distribuição granulométrica variável

ao longo do ciclo anual. Para solucionar esse problema foi criada uma razão entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo para não depender da sazonalidade.

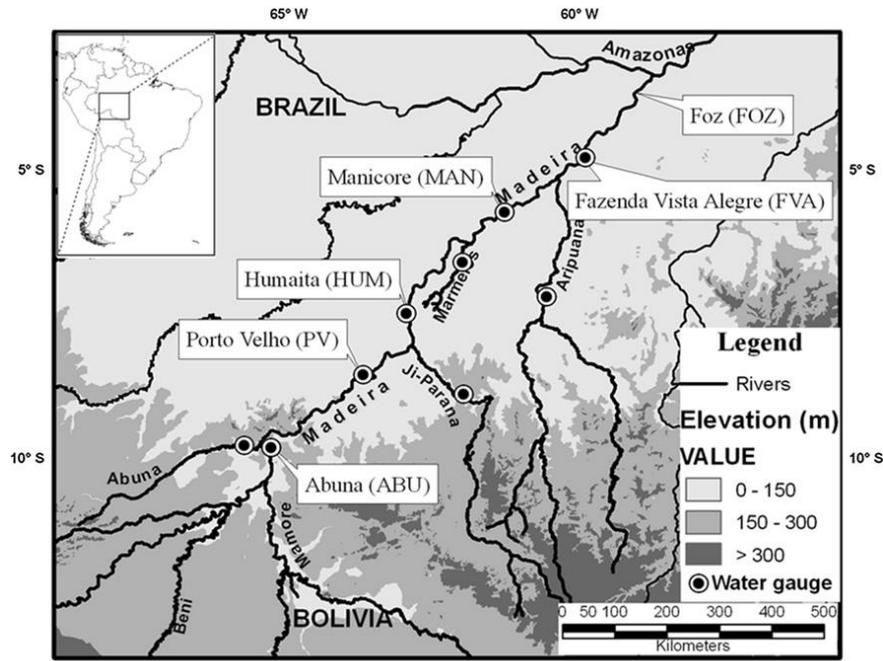


Figura 7 – Rio Madeira e seus principais afluentes com as estações estudadas.
Fonte: ESPINOZA *et al.*, 2012b, p. 02.

Espinoza *et al* (2012b) realizaram uma recuperação por meio das imagens de satélite da série temporal da concentração de sedimentos em suspensão que apresentou uma boa precisão durante o período de 11 anos em duas estações diferentes localizadas a uma distância de 800Km, entre si. Além disso, os dados de satélite serviram para analisar o padrão espaço-temporal da concentração de sedimentos em suspensão ao longo de todo o Rio Madeira demonstrando evidências de sedimentação significativa e ressuspensão.

CAPÍTULO II: MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Determinação dos locais de amostragem

A área de estudo possui 49.000km² iniciando no extremo oeste da Ilha do Carreiro da Várzea e seguindo 10km para jusante. Seu limite foi determinado por dois fatores. O primeiro em a ver com a região de águas rasas com rochas no fundo do leito a menos de 2km do limite da área de estudo indicada o que impediria a travessia do barco de uma margem a outra nesse trecho. O segundo é referente ao tempo necessário para realização do trabalho de campo que não deveria exceder 1 dia por questões de orçamento para a pesquisa. Como o trabalho precisou ser realizado entre 11:00h e 14:00h (justificado no item seguinte) a delimitação de uma área de estudo maior que a indicada ocasionaria consequentemente a necessidade de um segundo dia para a conclusão das atividades.

2.2 Metodologia de amostragem

Para o estudo foi considerada a metodologia proposta por Filizola *et al* (2009), também utilizada por Soares (2012). Filizola *et al* (2009) estabeleceram no Rio Solimões, na estação hidrológica de Manacapuru, uma grade de coleta de amostras de água superficial a fim de compreender melhor o comportamento horizontal do fluxo de sedimentos em suspensão nesta seção do rio.

Essa metodologia de coleta dos dados em grade atende aos objetivos da pesquisa, uma vez que dessa maneira é possível coletar um conjunto de amostras que representam as águas do Rio Negro, a zona de mistura e as águas do Rio Solimões. Isso permite avaliar tanto a variação temporal da zona de mistura quando os níveis de concentração de sedimentos no perímetro selecionado para análise.

A grade que inicia no extremo oeste da Ilha do Careiro da Várzea tem comprimento longitudinal de 10km e 2,5km de distância entre uma linha e outra. A distância entre os pontos é de 500m no sentido latitudinal para que não houvesse 2 pontos de coleta no mesmo pixel da imagem MODIS que é de 250m. No total, foram criados 40 pontos de coleta de amostras de água superficial e espectrometria de campo. As amostras coletadas e os dados do espectroradiômetro tiveram como objetivos validar os dados das imagens MODIS (Figura 8).

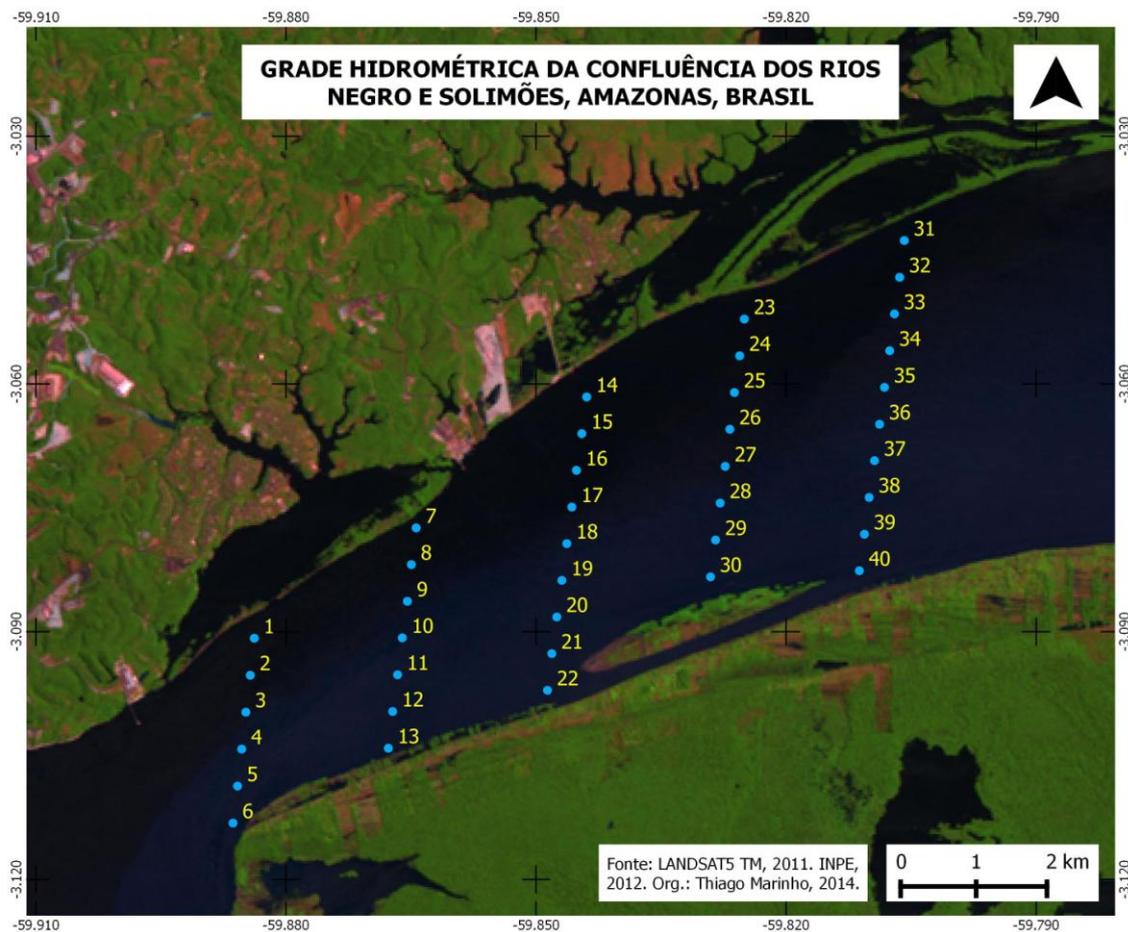


Figura 8 - Localização da grade hidrométrica na região de confluência dos Rios Negro e Solimões-Amazonas. Org.: Thiago Marinho, 2013.

As atividades de campo se iniciaram sempre por volta das 11:00h e com uma duração média de 3 horas. O horário estabelecido para a coleta de 11:00h a 14:00h foi determinado a fim garantir a qualidade dos dados referentes à espectrometria de campo e minimizar efeitos como o *sunlint* (brilho do Sol) e sombra do barco onde o sensor estava capturando informação.

Para o deslocamento do barco o comandante tinha apoio de um computador com o *shapefile*¹ dos pontos da grade lidos pelo software ArcGis e conectado a um GPS. Assim, ele poderia visualizasse o posicionamento do barco com maior precisão e identificar os pontos de coleta reduzindo a velocidade para captura dos dados.

¹ Shapefile é um formato de arquivo contendo dados geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas – SIG. Os shapefiles descrevem geometrias como pontos, linhas e polígonos. Cada item pode ter atributos que os descrevem a exemplo de nome, localidade, código de identificação e outros.

2.2.1 Amostras de água superficial

As amostras de água superficial foram coletadas nos 40 pontos da grade descrita anteriormente utilizando-se de garrafas com volume de 500ml cada. As mesmas foram etiquetadas com o número do ponto (Figuras 9 A e B). A coleta foi realizada com um balde no momento em que o barco atravessava os pontos de coleta em baixa velocidade e as amostras foram depositadas nas garrafas devidamente identificadas.



Figura 9 – a) Amostra de água superficial sendo colhida; b) Garrafas etiquetas com amostras de água superficial. Fotos: Thiago Marinho, 2013.

2.2.2 Espectrorradiômetro

A metodologia para espectrometria seguiu a proposta feita por Espinoza (2013) realizada com os espectrorradiômetro da marca TriOS, modelo RAMSES (Figura 10 A e B) que trabalham na faixa espectral do ultravioleta ao infravermelho próximo com as seguintes características ópticas:

- Região de comprimento de onda: 320-950 nm;
- Tipo de detector: 256 fotodiodos de silício;
- Amostragem espectral: 3,3 nm/pixel;
- Acurácia espectral: 0,3 nm;
- Canais usáveis: 190;
- Saturação típica (em 200 nm): $1\text{ W m}^{-2}\text{ nm}^{-1}\text{ sr}^{-1}$ detecção;
- Campo de visada: 7° .

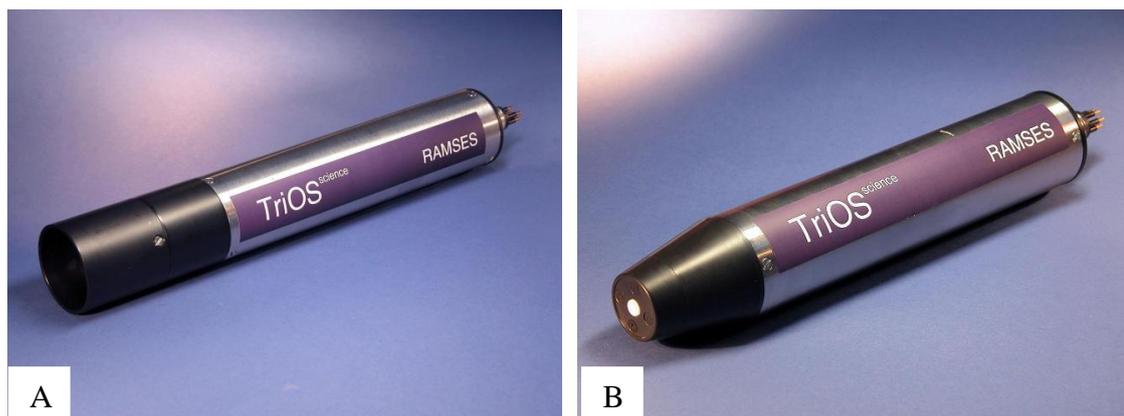


Figura 10 – Espectroradiômetros TriOS: a) RAMSES-ARC: medição da energia radiante refletida; b) RAMSES-ACC-VIS: medição da energia incidente.

Fonte: <www.trios.de>. Acesso em 04.02.2013.

As medições de espectrometria de campo tiveram a finalidade de comparar seus resultados tanto com as amostras de água superficial quanto com os dados radiométricos das imagens MODIS. A utilização desse equipamento possibilita elencar um conjunto de vantagens desta metodologia, tais como: a) melhor refinamento dos dados radiométricos. Enquanto que, por exemplo, em uma imagem MODIS há apenas uma banda para o infravermelho próximo (841 a 876nm) o radiômetro possui 12 bandas para a mesma faixa espectral; b) autonomia para realização de coleta de dados. Dependendo das condições climáticas, a coleta pode ser feita no dia, hora e local indicado pelo pesquisador; e c) a coleta de dados por ser feita minimizando interferências atmosféricas como nuvem, pois durante a atividade de campo é possível esperar a melhor condição para coleta dos dados caso seja necessário.

As medições de reflectância são utilizadas com três aparelhos colocados fora da água em uma distribuição geometricamente espacial. Colocando dois medidores de radiância sendo um deles a 30° off nadir e outro a 30° com o zênite e um sensor de irradiância colocado verticalmente a 90° . O sensor a 30° off nadir mede a radiância da água de forma direta (L_u). Dependendo do tamanho das ondas ele também mede uma pequena porção da luz do céu que é refletida pela água. O sensor a 30° com o zênite mede a radiância proveniente do céu que seria refletida pela água (L_d). O sensor colocado a 90° mede a irradiância que chega sobre o local (E_d) (Figura 11).



Figura 11 – Espectroradiômetros TriOS realizando medições radiométricas.
Foto: Thiago Marinho, 2013.

Para o cálculo de reflectância usa-se a equação:

$$Reflectância = \frac{Lu - f * Ld}{Ed} \quad 2.1$$

Onde f é um fator que depende do tamanho das ondas, geralmente usado 0,028 como sugere Mobley (1999) esse valor serve para corrigir uma pequena porção do azul do céu refletida pela água.

Espinoza (2013) a fim de mensurar a sensibilidade das medições à precisão da geometria testou os ângulos de visada calculando a reflectância em diferentes posições dos sensores. No Gráfico 1 observa-se que mudar o ângulo do sensor que mede a radiância para 60° (30° de diferença) pode representar uma variação de até 3 vezes o valor de reflectância para os comprimentos de onda menores, em 400 nm. Já para os comprimentos entre 500-750nm a variação pode ser mais de 20% e para valores maiores de 750 nm a variação não passa de 20%, sempre para o ângulo de 60° . Para uma variação da geometria leve (10°) a variação da reflectância será menor de 10% em todo o espectro vindo a confirmar a robustez da configuração.

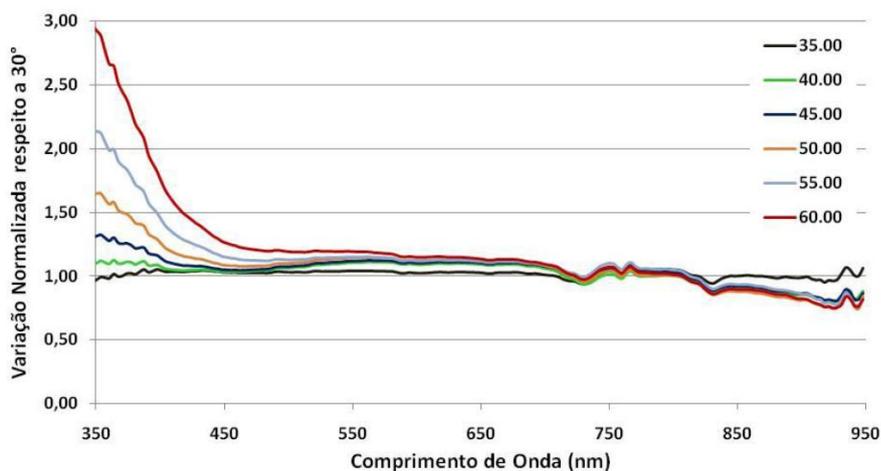


Gráfico 1 - Variação da refletância normalizada com respeito ao ângulo de visada do sensor radiométrico (Lu).
Fonte: ESPINOZA, 2013.

Além da geometria outro fator observado na coleta dos dados foi o posicionamento do sensor em relação ao Sol. Segundo Espinoza (2013) os sensores devem estar posicionados a 130° em relação ao Sol, como nesta pesquisa foram coletados dados utilizando uma grade e não apenas pontual a exemplo de outros trabalhos (MARTINEZ *et al.*, 2009; ESPINOZA *et al.*, 2012a; ESPINOZA *et al.*, 2012b; ESPINOZA, 2013).

Durante as atividades de campo o espectroradiômetro foi instalado na proa do barco e configurado para coleta de dados a cada 10seg capturando informações durante todo o percurso de forma ininterrupta, em média 1.200 dados por campanha. No momento em que havia coleta da amostra de água superficial registrava-se pelo menos 5 coletas de espectrometria e se anotava o horário a fim de fosse possível correlacionar posteriormente as duas fontes de dados.

2.3 Frequência de amostragens

Como a proposta da pesquisa era realizar um monitoramento horizontal de uma parte da seção de confluência dos dois rios (Solimões e Negro), fez-se necessário a construção de um banco de dados com amostras mensais. O objetivo era de se produzir um acompanhamento das variações das concentrações dos sedimentos em suspensão durante pelo menos um ciclo hidrológico.

Deste modo, práticas de campo tiveram início em março de 2013. Este mês serviu de campo teste a fim de realizar ajustes finais na grade e fazer o treinamento prático da coleta das amostras de água e da espectrometria de campo assim como os procedimentos laboratoriais. Em maio de 2013 iniciaram-se efetivamente as coletas e seguiram até fevereiro de 2014,

totalizando 9 meses com dados, pois não houve atividade de campo nos meses de abril, setembro e outubro². Contudo, apesar da pesquisa não ter totalizado 12 meses de coleta de dados, os meses em que houve coleta conseguiram representar a dinâmica do fluxo de sedimentos em suspensão na área de estudo, como poderá ser visto no Capítulo Resultados & Discussões.

2.4 Procedimentos de obtenção e armazenamento dos dados finais

2.4.1 Amostras de água superficial

As amostras foram todas processadas no Laboratório de Geografia Física do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Amazonas. Os filtros utilizados foram de acetato de celulose de 46mm de diâmetro com malha de 45 μ m. Antes de serem postos na unidade de filtração foram pesados (Pi) em balança de precisão (no mínimo dois algarismos significativos) e seu peso registrado. A filtração foi por meio de unidades de filtração por gravidade, conectadas em uma rampa horizontal de tubos de PVC acompanhada por uma bomba de vácuo de baixa pressão (Figura 12 A e B).

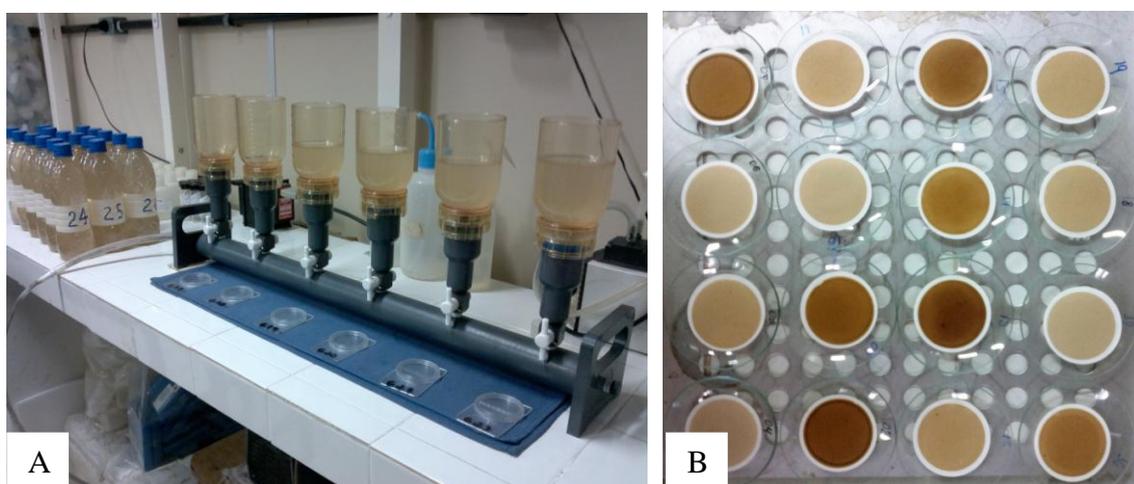


Figura 12 – a) Rampa de filtração; b) Filtros com sedimentos antes de serem levados a estufa.
Fotos: Thiago Marinho, 2013.

Os filtros foram secos em uma estufa a uma temperatura em 105°C durante uma hora e em seguida pesados novamente (Pf). A diferença entre Pi e Pf é a concentração do sedimento em suspensão para o respectivo volume de amostra (500ml) que será convertido para 1.000ml a fim de se obter a concentração em mg/l (CARVALHO *et al.*, 2000).

² Os meses de abril, setembro e outubro não tiveram atividade de campo por conta de fatores logísticos.

Os dados foram armazenados em planilhas formato XLS contendo todas as especificações em colunas de uma planilha eletrônica de cálculo: número da amostra, peso inicial, peso final, volume, peso total (Pf-Pi) e concentração em mg/l.

4.4.2 Espectrometria de campo

O pré-processamento dos dados foi feito pelo próprio software do espectroradiômetro (MSDA-XE) e dividido em duas etapas. A primeira é a filtragem dos dados por meio do valor de irradiância. Trabalhos anteriores (MARTINEZ *et al.* 2009; ESPINOZA 2012a; ESPINOZA 2012b) indicam que valores de irradiância inferior a 1.200 $\text{mw}(\text{m}^2\text{nm})$ devem ser descartados, pois podem comprometer a confiabilidade dos valores de reflectância. Depois de identificados esses dados os valores de reflectância gerados a partir deles são excluídos.

A segunda filtragem é a exclusão dos dados de reflectância coletados com falhas referentes ao posicionamento do equipamento em relação ao Sol ou o ambiente com presença de nuvens. Nesta parte do pré-processamento foi preciso identificar as três respostas de sinais de reflectância referentes ao Rio Negro, a Zona de Mistura e o Rio Solimões-Amazonas (Figuras 13 e 14).

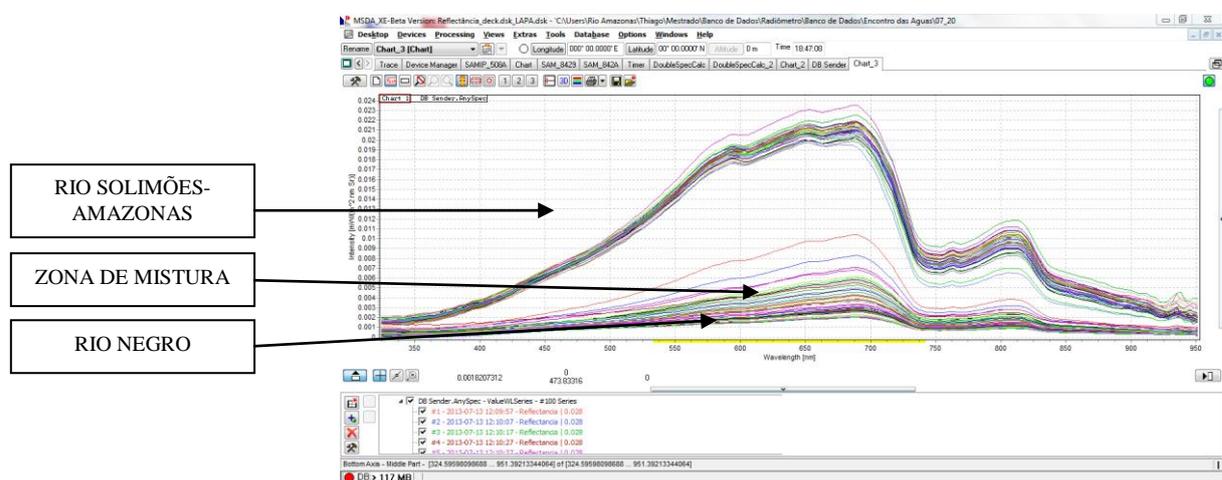


Figura 13 - Reflectância referente ao Rio Negro, Zona de Mistura e Rio Solimões-Amazonas.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

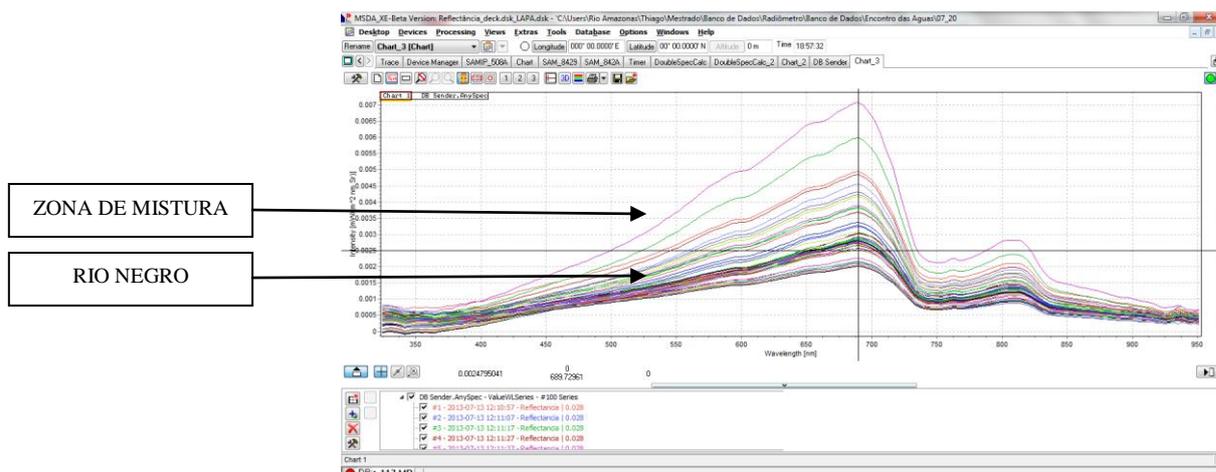


Figura 14 - Reflectância referente ao Rio Negro e Zona de Mistura.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

Após a filtragem, os dados de reflectância variaram entre 800 e 600 1/sr por campanha. Finalizado o processo o arquivo foi exportado em formato XLS e separado por mês de campanha.

2.4.3 Imagens MODIS

A metodologia de pré-processamento, processamento e análise dos dados das imagens MODIS seguiu a proposta de Soares (2012). As imagens MODIS foram baixadas no site da NASA (https://lpdaac.usgs.gov/get_data/data_pool). A princípio todas as imagens dos meses que houve campanha foram baixadas tanto MOD09 quanto MYD09.

Depois de adquiridas as imagens, foram feitas a conversão de formato. As imagens MODIS possuem formato original HDF (Hierarchical Data Format) e com projeção SIN (Sinusoidal). Por meio do software ModisTool (adquirido gratuitamente também no site da NASA) são convertidas para o formato TIF e reprojctadas para Coordenadas Geográficas e Datum WGS-84.

Em seguida iniciou-se o processo de seleção da melhor imagem de cada mês realizado no software ENVI 4.7. O ideal é escolher a imagem do período em que foi feita a campanha, mas como nem sempre isso foi possível optou-se por utilizar imagens com 15 dias antes ou depois do dia de campanha do mês. Os primeiros produtos analisados foram o MOD09A1.005_sur_refl_state_500m e o MYD09A1.005_sur_refl_state_500m. Utilizando o “Cursor Localition/Value”, foi anotado o tom de cinza de cada ponto e posteriormente convertido o valor para binário a fim de análise pelo controle de qualidade da imagem fornecido pela NASA (Figura 15).

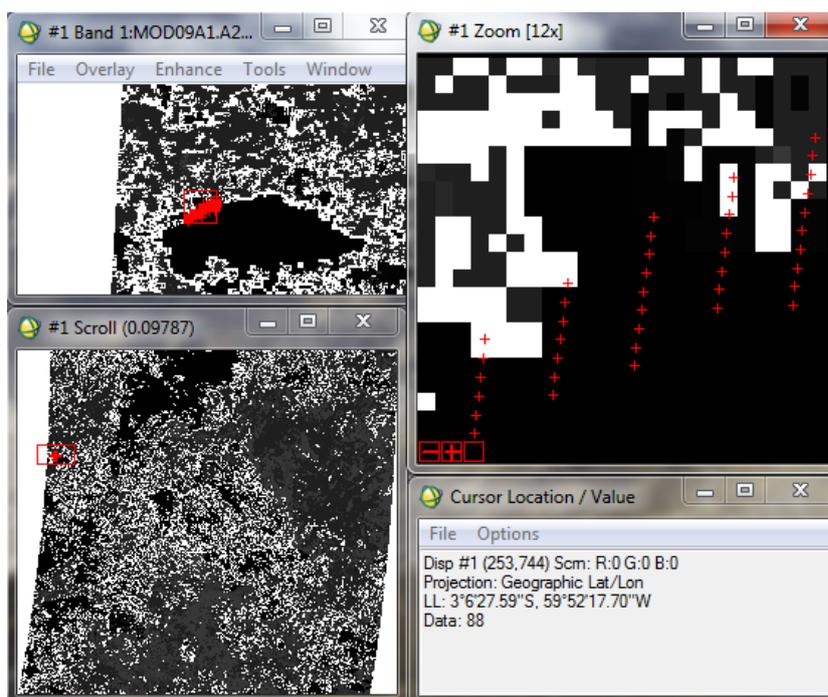


Figura 15 - Produto MOD09A1.005_500m da Imagem de 02 a 09 de fevereiro de 2014.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

Com o valor de cada ponto convertido para binário o mesmo era analisado em um quadro de qualidade dos dados de reflectância. Seguindo como exemplo o valor 88 indicado na Figura 14 seu valor em binário é 1011000. Esse valor é fragmentado da direita para a esquerda e seguindo da tabela ele ficará dessa maneira:

Nº de Bit	6-7	3-5	2	0-1
Tom de cinza em binário	1	011	0	00

Depois de dividido o valor binário³, o quadro indica as características da imagem e é possível saber se o valor do ponto se encontra na situação ideal (em verde), aceitável (em amarelo) ou comprometida (em vermelho) por interferências atmosféricas (Quadro 2). Os valores de tom de cinza presentes nas imagens analisadas que passaram na qualidade foram: 80, 88, 144 e 152. Toda imagem com 51% dos pontos comprometidos foi eliminada automaticamente, das demais se escolhia as que possuíam a menor presença de pontos comprometidos para fazer a correlação com os dados de concentração de sedimentos em suspensão e espectrometria de campo.

³ Valores binários superior a 10 dígitos foram automaticamente desconsiderados devido possuírem características que evidenciam alta presença de nuvens e aerossóis ou ruídos na obtenção dos dados.

Nº Bit	PARÂMETRO	Bit	MOD09A1.005 e MYD09A1.005 _sur_refl_state_500m
15	Algoritmo interno de neve	1	Sim
		0	Não
14	BRDF correção realizada	1	Sim
		0	Não
13	Pixel adjacente a nuvem	1	Sim
		0	Não
12	MOD35 neve/gelo	1	Sim
		0	Não
11	Algoritmo interno de fogo	1	Fogo
		0	Não há fogo
10	Algoritmo interno de nuvem	1	Nuvem
		0	Nenhuma nuvem
8-9	Cirrus detectado	0	Não
		1	Pequenas
		10	Média
		11	Alta
6-7	Quantidade de Aerossóis	0	Climatologia
		1	Baixa
		10	Média
		11	Alta
3-5	Terra pavilhão de água	0	Águas rasas
		1	Terra
		10	Litoral do oceano e lago
		11	Águas interiores superficiais
		100	Água efêmera
		101	Águas profundas no interior
		110	Mar continental/moderada
111	Oceano profundo		
2	Sombra de nuvem	1	Sim
		0	Não
0-1	Nuvem	0	Claro
		1	Nublado
		10	Mistas
		11	Não definido, assumiu clara

Quadro 2 – Qualidade dos dados de reflectância de superfície das imagens MOD09A1.005_500m e MYD09A1.005_500m.

Fonte: SOARES, 2012, p. 66.

2.5 Processamento e análise dos dados brutos

2.5.1 Amostras de Água Superficial & Espectroradiômetro

Os dados de espectrometria de campo passaram por dois momentos na fase de processamento. O primeiro foi simular os valores de reflectância de espectrometria de campo

de acordo com a localização e distribuição das bandas do MODIS. Como se havia dito anteriormente, o radiômetro coleta os dados em bandas espectrais mais detalhadas, enquanto que, por exemplo, em uma imagem MODIS há apenas uma banda para o infravermelho próximo (841 a 876nm) o radiômetro possui 12 bandas para a mesma faixa espectral.

Diante disso, para que fosse possível correlacionar os dois dados (espectrometria de campo e MODIS) foi feita uma média dos dados de reflectância da espectrometria de campo do vermelho e do infravermelho utilizando um simulador específico para essa análise (ESPINOZA, 2013). Assim os valores de reflectância da espectrometria de campo passaram a ter apenas uma banda para o vermelho e uma para o infravermelho apresentado valores simulados de MODIS.

As análises de correlação entre os dados de concentração de sedimentos em suspensão e reflectância simulada de MODIS da espectrometria de campo, foram feitas de duas maneiras a fim de identificar a que melhor se adaptava à área de estudo. Uma opção (Processamento 01) utilizada foi selecionar os dados de reflectância para serem correlacionados com os valores de concentração de sedimentos em suspensão de cada ponto da grade.

Optou-se por utilizar dados coletados três minutos antes e depois da hora de coleta da amostra de água superficial. Quando não havia a possibilidade de correlação entre os dois dados devido à forte diferença entre estes nenhum valor de reflectância foi associado aos valores de concentração de sedimentos em suspensão. Desta maneira, todos os valores por ponto de todas as campanhas foram utilizados para produzir a equação das duas bandas.

Outra opção (Processamento 02) foi utilizar todos os dados de reflectância já pré-processados. Deste modo, foi produzida uma média mensal dos dois dados e desses valores gerou-se a equação para a Banda do Vermelho e do Infravermelho Próximo.

Para que os dados de reflectância da espectrometria de campo tivessem valores correspondentes aos da imagem MODIS estes foram multiplicados por 1.000 e por Pi (π). Isso se deve ao fato das medidas de reflectância do MODIS serem dadas por unidades de área e as de espectrometria de campo por unidade de ângulo sólido (stereo-radiano).

As equações geradas a partir da correlação com os dados de concentração de sedimentos e reflectância da espectrometria de campo foram utilizadas para estimar a concentração de sedimentos em suspensão a partir dos dados de reflectância dos pixels das imagens MODIS.

2.5.2 Amostras de Água Superficial & Imagens MODIS

As correlações entre concentração de sedimentos em suspensão das amostras de água superficial e os dados de reflectância de espectrometria de campo, como dito no item anterior, serviram para produzir as equações do vermelho e do infravermelho próximo a serem utilizadas nas imagens MODIS. Contudo também foram realizadas correlações entre a concentração de sedimentos em suspensão e os dados de reflectância dos pixels das imagens MODIS. O objetivo foi analisar qual dos dois cenários melhor se adaptava as condições da área de estudo.

Os dados de reflectância dos pixels das imagens MODIS já pré-processados e os valores de concentração de sedimentos em suspensão foram analisados por meio de média mensal e desses valores geraram-se as equações para a Banda do Vermelho e do Infravermelho Próximo.

2.6 Análise de Incertezas

2.6.1 Amostra de Água Superficial

Para as concentrações de sedimentos em suspensão das amostras de água superficial as principais fontes de incerteza produzida nas medições de amostragem em campo são: a) incerteza na amostragem de superfície; e b) incerteza na linha de amostragem. Foram utilizadas 10 amostras aproximadamente no mesmo lugar e nas mesmas condições.

No laboratório as seguintes fases são consideradas como uma fonte de incerteza: a) peso dos filtros; b) determinação do volume e c) filtragem das amostras. Na pesagem dos filtros e determinação do volume levou-se em consideração o valor de precisão da balança.

O calculo de incerteza foi feito pela Equação 2.2 (ARMIJOS, 2010):

$$S_{(x)} = + \frac{S_{(x)}}{\sqrt{n}} \quad 2.2$$

Onde S_x é o desvio padrão e n o número de amostras. Deste modo, o valor calculado para incerteza foi de 2,7%.

2.6.2 Espectrometria de Campo

Para as estimativas de concentrações de sedimentos em suspensão a partir da espectrometria de campo, as principais fontes de incerteza produzida nas medições de amostragem em campo foram: a) incerteza das condições atmosféricas; b) incerteza na geometria dos sensores; e c) incerteza do posicionamento dos sensores em relação ao Sol.

No pré-processamento as seguintes fases são consideradas como uma fonte de incerteza: a) incerteza na seleção na filtragem pelos valores de irradiância; b) incerteza na filtragem dos valores de reflectância e c) incerteza na correlação dos valores de irradiância com os de concentração de sedimentos em suspensão.

O calculo de incerteza foi feito pela Equação 2.3 (ESPINOZA, 2013):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x - y)^2}{n}} \quad 2.3$$

Onde x é o valor de sedimentos em suspensão estimado pela espectrometria de campo e y o valor de sedimentos em suspensão da amostra de água superficial e n o número de amostras. No quadro 3 estão os valores de incerteza para as Bandas do Vermelho e Infravermelho Próximo para o Processamento 01 e 02.

EQUAÇÃO UTILIZADA	BANDA	INCERTEZA (mg/l)	INCERTEZA (%)
Processamento 01	Vermelho	4,12	14,39
	Infravermelho	8,51	15,11
Processamento 02	Vermelho	9,26	15,75
	Infravermelho	6,36	10,79

Quadro 3 - Valores de incerteza para espectrometria de campo.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

2.6.3 Imagens MODIS

Para as estimativas de concentrações de sedimentos em suspensão das imagens MODIS as principais fontes de incerteza produzida são: a) incerteza do tamanho do pixel e b) incerteza de ruídos atmosféricos como efeito de vizinhança.

No pré-processamento, as seguintes fases são consideradas como uma fonte de incerteza: a) incerteza na escolha de imagens de semana diferentes da data do trabalho de campo; b) incerteza na filtragem pelo controle de qualidade das imagens; e c) incerteza na obtenção dos valores de tom de cinza dos pontos da grade hidrométrica.

O cálculo de incerteza foi feito pela Equação 2.3 e no Quadro 4 estão os valores de incerteza para as Bandas do Vermelho e Infravermelho Próximo para as equações da espectrometria de campo (Processamento 01 e 02) da própria imagem MODIS.

EQUAÇÃO UTILIZADA	BANDA	INCERTEZA (mg/l)	INCERTEZA (%)
Espectrometria de campo - Processamento 01	Vermelho	15,26	27,29
	Infravermelho	38,62	51,11
Espectrometria de campo - Processamento 02	Vermelho	7,08	11,68
	Infravermelho	28,00	42,16
Imagem MODIS	Vermelho	6,63	11,22
	Infravermelho	8,43	20,49

Quadro 4 - Valores de incerteza para imagens MODIS.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

CAPÍTULO III: RESULTADOS & DISCUSSÕES

3.1 Amostras de Água Superficial

Antes da apresentação dos dados de concentração de sedimentos em suspensão a partir da grade hidrométrica, é necessário um entendimento da dinâmica do ciclo hidrológico dos rios Negro e Solimões na região de confluência dos dois rios.

O Rio Negro possui em terço da vazão⁴ do Rio Solimões. Os meses de julho a agosto apresentam os maiores valores de vazão e os meses de novembro a janeiro os menores valores. No Rio Solimões, os meses de maio a junho apresentam os maiores valores de vazão e os meses de outubro a novembro os menores valores.

Observa-se o barramento hidráulico do Rio Solimões frente ao Rio Negro no início do período de enchente no mês de dezembro. Esse barramento perdura por oito meses e se pode observar que durante esses meses a cota do porto de Manaus aumenta seguindo o regime hidrológico do rio Solimões (Gráfico 2). A relação cota/vazão do Rio Negro é válida somente para os meses de julho a novembro.

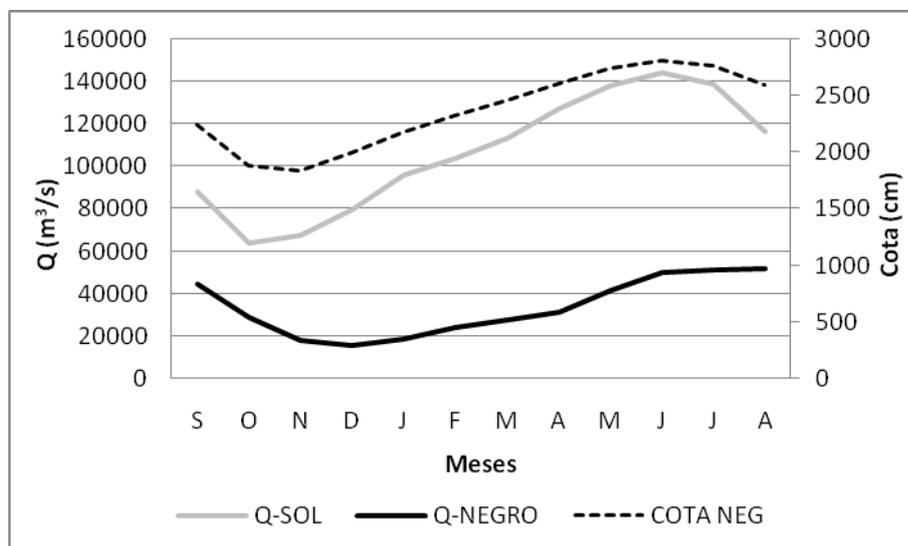


Gráfico 2 – Vazões mensais interanuais dos rios Negro e Solimões e cota mensal interanual da estação de Manaus para o período de 2000-2010.

Fonte: ORE-HYBAM, 2014.

⁴ Devido à estação de Manaus não possuir uma curva de calibração a vazão foi obtida por meio da diferença da descarga do rio Solimões (Manacapuru) e Amazonas (Jatuarana e Carreiro) para o período de 2000-2010.

Utilizando as cotas medias interanuais das duas estações e realizando a normalização pode-se observar que são similares somente nos meses de julho para outubro e que elas diferem o que coincide com os meses de barramento do Solimões (Gráfico 3).

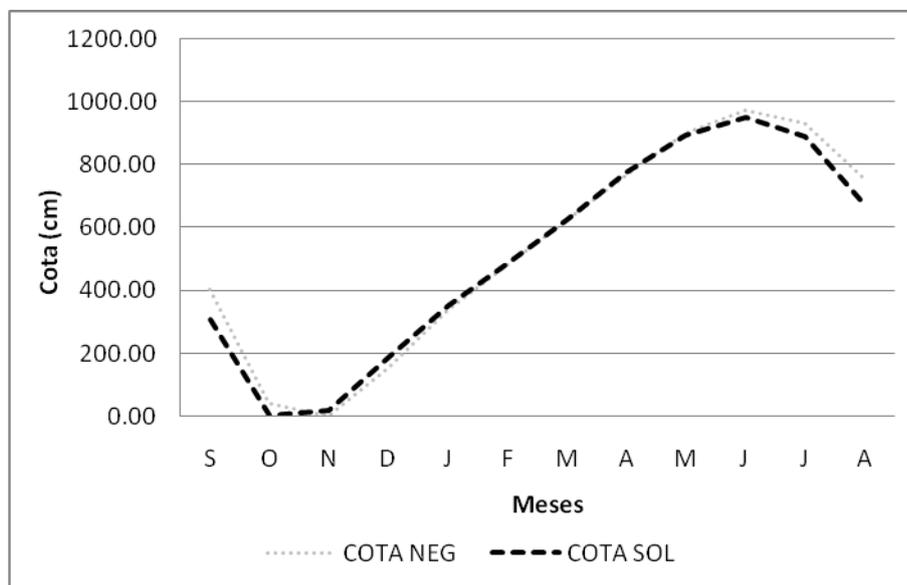


Gráfico 3 – Cotas mensais interanuais das estações de Manaus (Rio Negro) e Manacapuru (Rio Solimões) para o período de 2000-2010.

Fonte: ORE-HYBAM, 2014.

O entendimento do ciclo hidrológico a partir dos valores de vazões dos rios Negro, Solimões e Amazonas é fundamental para a compreensão da dinâmica dos valores de concentração de sedimentos em suspensão na grade hidrométrica nos 8 meses descritos abaixo⁵. O barramento hidráulico explica a variabilidade das concentrações de sedimentos em suspensão na região de confluência dos dois rios.

Tomando como exemplo o mapa do mês de maio. Este se encontra configurado da seguinte maneira: o canto superior esquerdo possui o gráfico de cota da estação de Manaus por média diária interanual para o período de 1983-2013 identificando o mês do mapa no gráfico que inicia em janeiro e termina em dezembro. Os valores de concentração de sedimentos em suspensão por ponto da grade foram distribuídos em cinco grupos, essa distribuição permitiu uma melhor visualização das transições dos valores de sedimentos em suspensão na grade (Figura 16).

⁵ Nos meses de abril, setembro e outubro não houve realização de trabalho de campo por conta de fatores de logística. No mês de março foi realizado o primeiro trabalho de campo e serviu como campo teste, inclusive para a consolidação da grade hidrométrica. Desse modo, em março os pontos da grade hidrométrica foram posicionados em locais diferentes dos empregados nos demais meses e por isso optou-se por não utilizá-los nessa análise devido a dificuldade de correlacionar as informações espaciais dessa campanha com o restante.

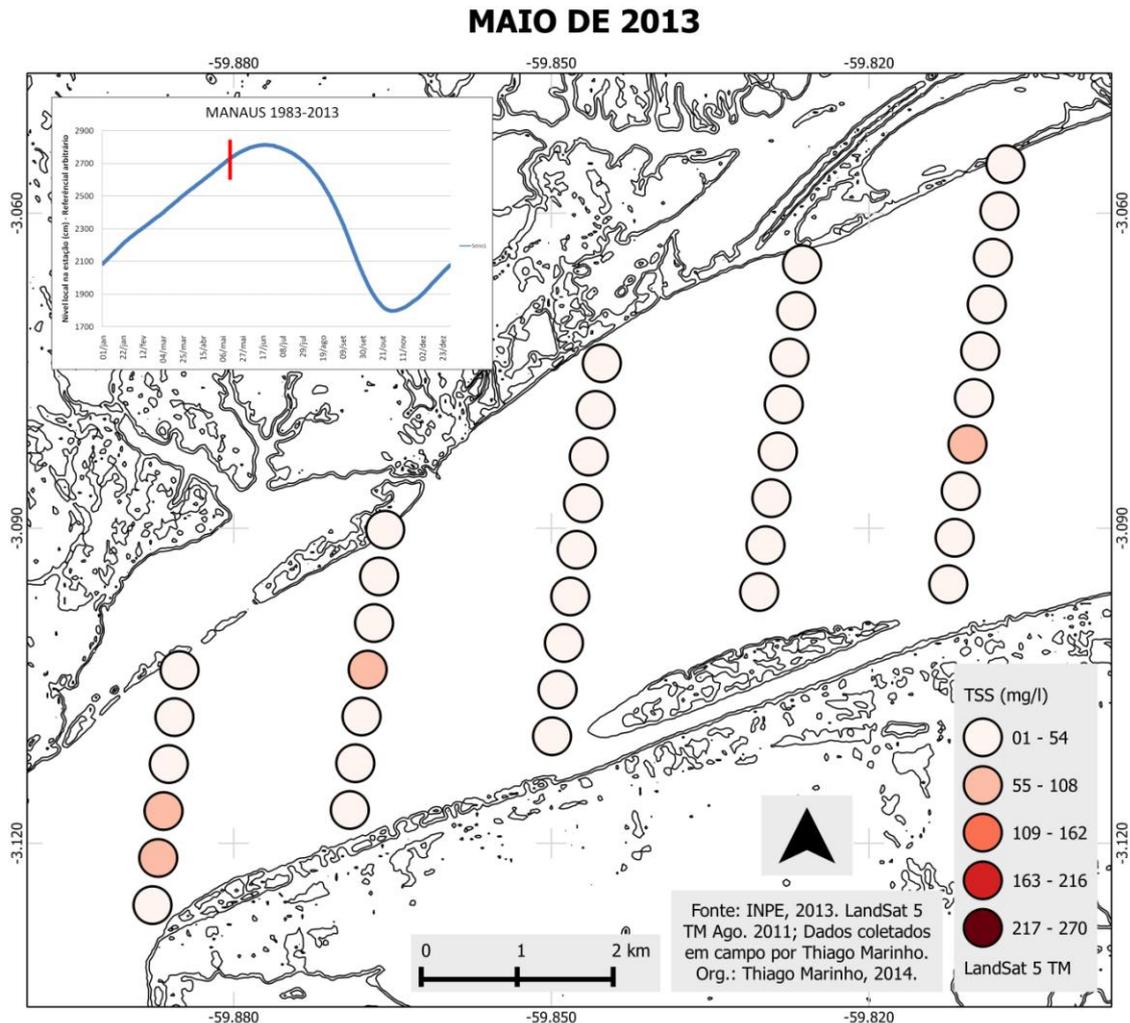
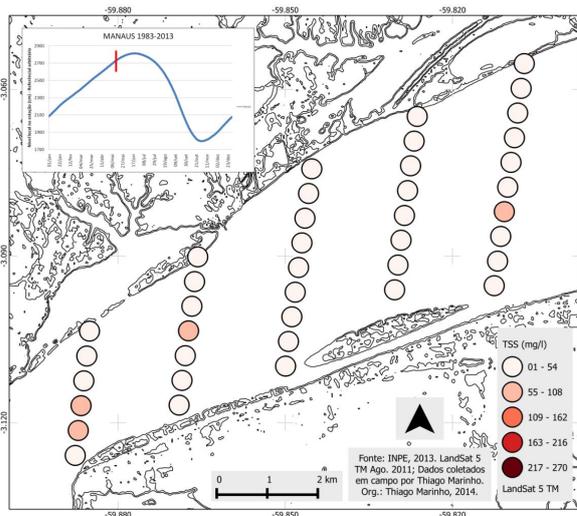


Figura 16 - Mapa de concentração de sedimentos na grade hidrométrica da área de confluência dos rios Negro e Solimões-Amazonas para o mês de maio de 2013. Org.: Thiago Marinho, 2014.

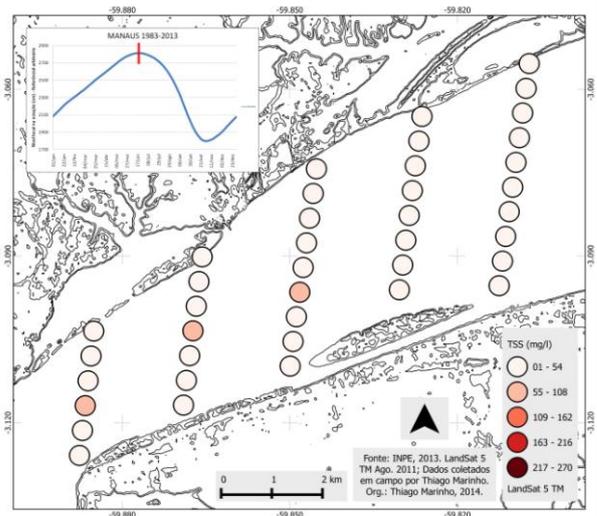
O conjunto de mapas inicia no mês de maio de 2013, primeiro mês com coleta dos dados com a grade hidrométrica consolidada, e termina no mês de fevereiro de 2014. Nessa ordem a análise começa com o mês de menor concentração média de sedimentos em suspensão e termina com o mês de maior concentração (Figura 17).

Desde modo, nos meses de maio e junho há um predomínio de concentração de sedimentos em suspensão até 54 mg/l, tendo em maio 10% e junho 7,5% dos pontos da grade valores entre 55-108mg/l. Nesse período há uma presença maior, na região de confluência, das águas do rio Negro com suas baixas concentrações de sedimentos variando entre 2 a 9 mg/l em pontos na margem esquerda do canal.

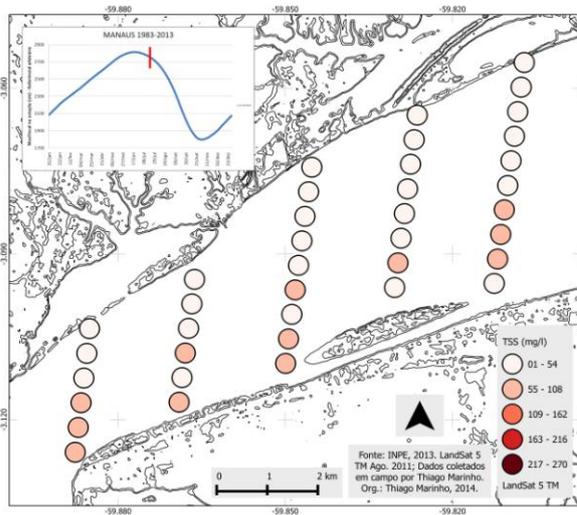
MAIO DE 2013



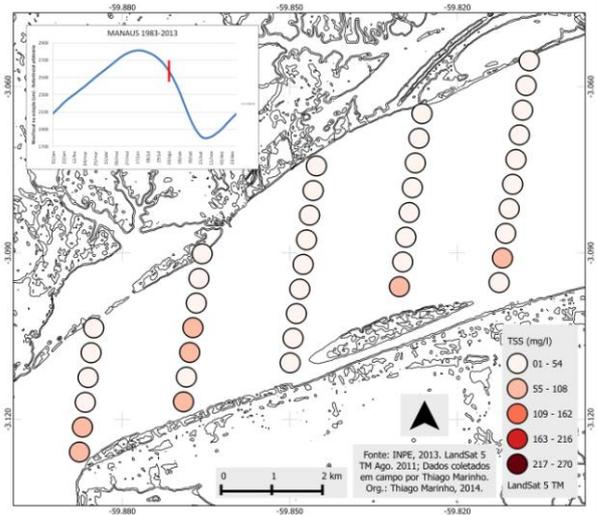
JUNHO DE 2013



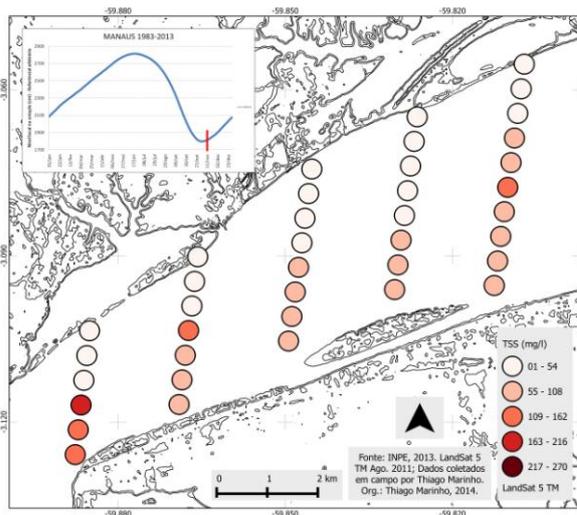
JULHO DE 2013



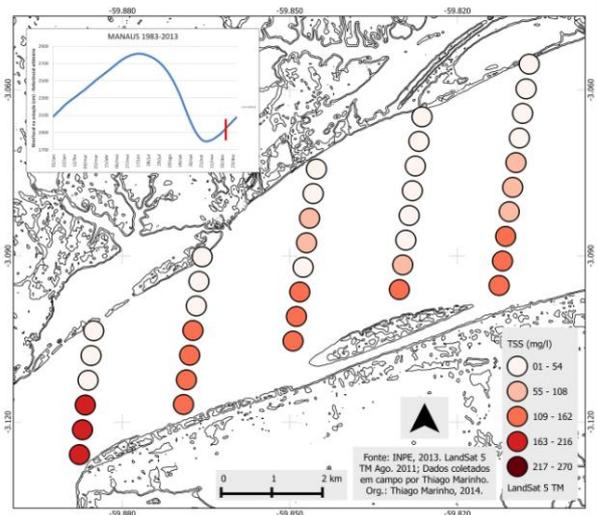
AGOSTO DE 2013



NOVEMBRO DE 2013



DEZEMBRO DE 2013



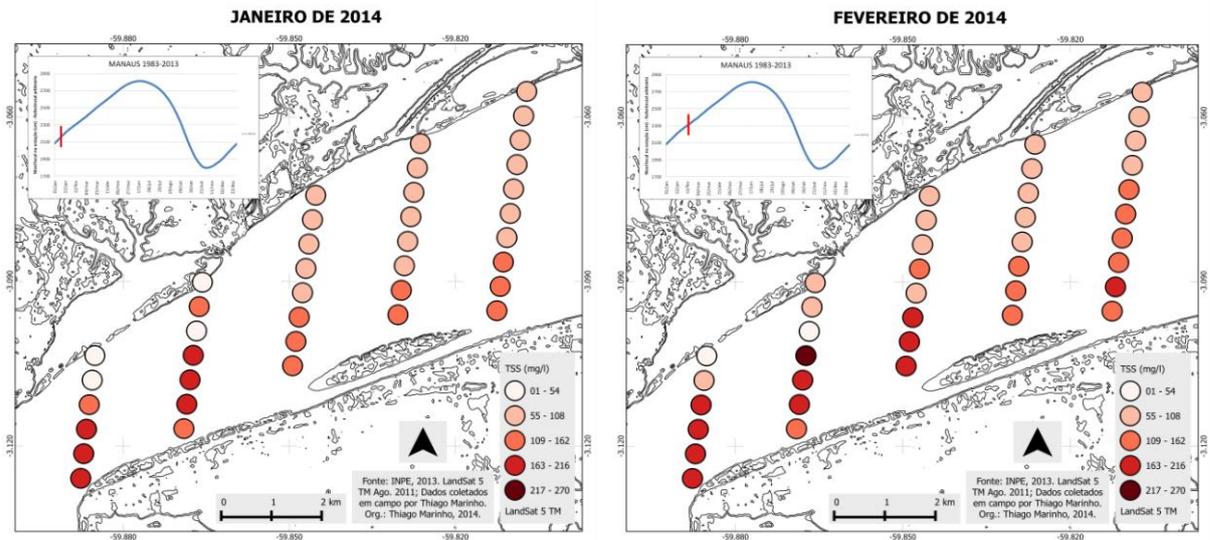


Figura 17 - Mapas de concentração de sedimentos na grade hidrométrica da área de confluência dos rios Negro e Solimões-Amazonas.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

A justificativa da presença significativa das águas do Rio Negro referente aos níveis de concentração de sedimentos em suspensão e se deve ao fato de que o Rio Solimões encontra-se em seu período de cheia com valores baixos de concentração de sedimentos em suspensão. Isso faz com que não haja forte interferência de valores mais altos na margem esquerda no canal.

Nos meses de julho e agosto os valores de concentração de sedimentos em suspensão entre 55-108mg/l começam a ser mais evidentes na margem direita do canal, em julho com 30,7% e agosto com 17,5%. Esses dois meses apresentaram características próximas aos meses anteriores e juntos formam um quadrimestre em que a área de confluência possui as menores concentrações de sedimentos em suspensão.

O quadrimestre que representa a maior concentração de sedimentos em suspensão na área de confluência inicia no mês de novembro e segue até fevereiro, quando se apresentam os maiores valores anuais. Entre os meses de novembro e dezembro é o período em que se apresenta de forma mais definida a diferença dos valores de concentração de sedimentos dos dois rios.

Em novembro, 45% dos pontos da grade possuem valores de concentração até 54mg/l posicionados na margem esquerda do canal. Na margem direita há um predomínio de valores entre 55-108 mg/l (40%) e em menor escala entre 109-162mg/l (10%) e 163-216mg/l (5%).

O mês de dezembro segue a tendência demonstrada em novembro com 48,7% dos pontos da grade possuem valores de concentração até 54mg/l posicionados na margem esquerda do canal. No meio do canal apresenta pontos com concentrações entre 55-108mg/l

(15,3%) e na margem direita há um predomínio de valores entre 109-162 mg/l (28,2%) e em menor escala entre 163-216mg/l (7,6%).

Os meses de janeiro e fevereiro se destacam como o período de maiores concentrações de sedimentos em suspensão. Nesses meses há um domínio das águas do Rio Solimões na grade hidrométrica.

Em janeiro, 10,2% dos pontos possuem valores até 54mg/l e estão posicionados no início grade na margem esquerda no canal. No restante da margem esquerda os pontos apresentam valores entre 55-108mg/l (46,1%). Na margem direita há valores entre 109-162mg/l (28,2%) e 163-216 (15,3%).

O mês de fevereiro segue a mesma tendência apresentada em janeiro com 5,1% dos pontos da grade possuindo valores até 54mg/l posicionados no início grade na margem esquerda no canal. No restante da margem esquerda os pontos apresentam valores entre 55-108mg/l (41%). Na margem direita há predominância de valores entre 109-162mg/l (25,6%) e 163-216 (25,6%) e em menor escala 217-270mg/l (2,5%).

Esses dois domínios de baixa (de maio a agosto) e alta (de novembro a fevereiro) concentração de sedimentos em suspensão na área de estudo podem ser evidenciados também pelos valores máximos e mínimos de cada linha transversal da grade hidrométrica, sendo a linha 01 a mais a montante e a linha 05 a mais a jusante do canal (Figura 18).

No período entre maio e agosto, os valores de máximo e mínimo em todas as linhas se mantêm constantes. Nos valores mínimos praticamente não há mudança. Isso demonstra que no sentido de montante para jusante nesse período os valores se mantiveram constantes sem grandes alterações.

Esse cenário se transforma quando analisado o período entre novembro e fevereiro. De montante para jusante há um aumento de valores mínimos. Isso significa que no início da confluência as baixas concentrações de sedimentos em suspensão características da água do Rio Negro ainda são encontradas. Contudo, à medida que se estende a zona de mistura as águas do Rio Solimões se diluem aumentando a carga de sedimentos na margem direita do canal.

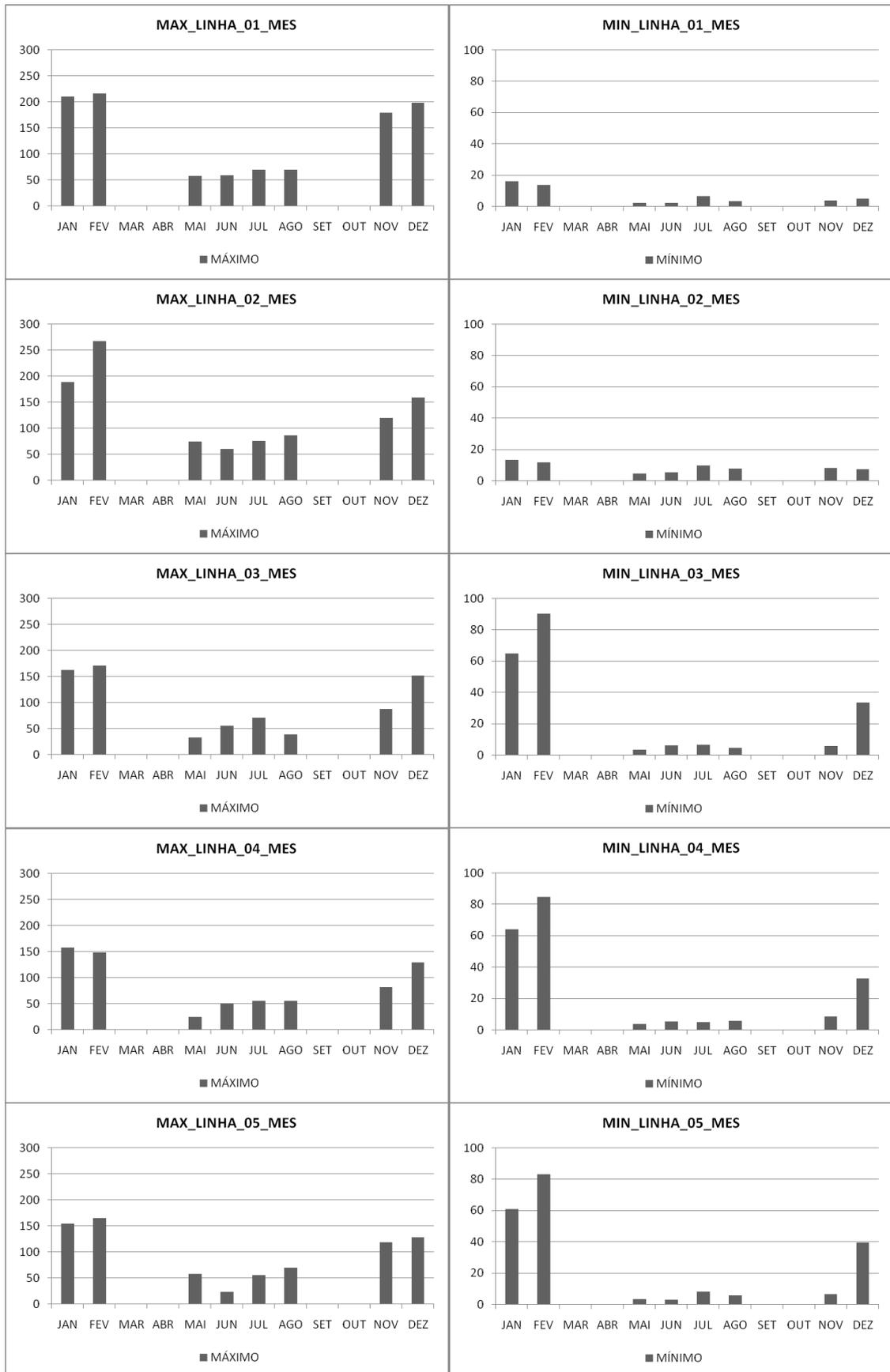


Figura 18 - Valores mínimos de concentração de sedimentos em suspensão (mg/l) divididos pelas 5 linhas da grade hidrométrica.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

De fato a grade hidrométrica releva que há não apenas uma diluição das águas do Rio Solimões-Amazonas de montante para jusante, mas também que os valores de diluição variam em relação ao período do ano. Além disso, a zona de mistura também não é constante tendo o período entre novembro a fevereiro forte domínio das águas do rio Solimões-Amazonas em detrimento as águas do Rio Negro.

3.2 Dados de Sensoriamento Remoto

As análises voltadas a correlação das concentrações de sedimentos em suspensão e os valores de reflectâncias (espectrometria de campo e imagens MODIS) foram divididos nos itens descritos abaixo a fim de exaltar os resultados de cada etapa do processamento.

O item 3.2.1 apresenta a comparação dos dados das amostras de água superficial com os valores de reflectância calculada a partir das medições de espectrometria de campo. Esses dados são utilizados para gerar as equações reflectância/concentração de sedimentos em suspensão que serão depois utilizadas com os dados de satélite.

O item 3.2.2 apresenta os resultados dos valores estimados de concentração de sedimentos em suspensão a partir dos pixels das imagens MODIS utilizando as equações provenientes das correlações descritas no item anterior.

Finalmente, o item 3.2.3 compara as relações reflectância/concentração de sedimentos calculadas a partir dos dados de radiometria de campo (item 3.2.1) e de satélite para discutir as diferenças no uso de cada conjunto de dado.

3.2.1 Amostras de Água Superficial & Espectrometria de Campo

Os dados de espectrometria de campo, como detalhado no item “Processamento e análise dos dados brutos”, passaram por dois tipos de processamento. No Processamento 01 utilizaram-se apenas os dados referentes aos 40 pontos da grade de amostragem e os demais foram descartados. No Processamento 02 foram utilizadas todas as amostras coletadas durante cada campanha e feita uma média mensal. O objetivo era identificar qual dos processos apresentaria os melhores resultados.

No gráfico 4A, referente ao Processamento 01, apresenta correlação entre os valores de concentração de sedimentos em suspensão e os dados de reflectância da banda simulado do

vermelho MODIS, seu R^2 é de 0,88. Destaca-se que há uma saturação nos valores em torno de 100mg/l.

No gráfico 4B, referente ao Processamento 02, seu R^2 é de 0,93. O fato de calcular uma média tira os valores extremos (baixo e alta concentração) e faz com que a saturação fique de difícil detecção. Os gráficos 5A e 5B comparam as concentrações médias medidas em cada campanha com as estimativas a partir dos dados de radiometria utilizando as equações apresentadas no 4A e 4B.

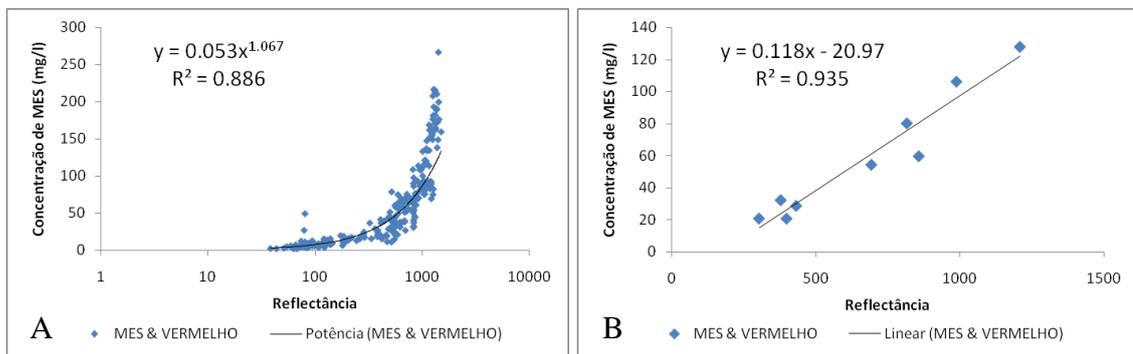


Gráfico 4 - Correlação entre dados de concentração de sedimentos em suspensão e vermelho simulado de MODIS de espectrometria de campo: a) por ponto da grade hidrométrica; b) por total de amostras coletadas. Org.: Thiago Marinho, 2014.

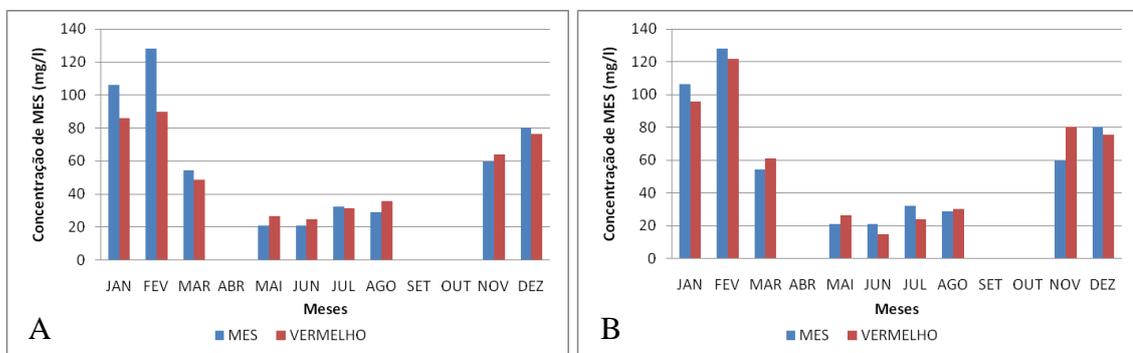


Gráfico 5 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da banda do vermelho simulado de MODIS de espectrometria de campo: a) por ponto da grade hidrométrica; b) por total de amostras coletadas. Org.: Thiago Marinho, 2014.

O gráfico 6A, referente ao Processamento 01, compara os valores de concentração de sedimentos em suspensão e os dados de reflectância da Banda do Infravermelho Próximo. A relação linear com R^2 0,97 revela que a equação não apresenta saturação, conseguindo manter uma boa correlação até os valores mais altos de concentração de sedimentos em suspensão.

O gráfico 6B, referente ao Processamento 02, apresenta uma resposta semelhante ao Processamento 01 quanto à boa correlação. Nos gráficos 7A e 7B percebe-se que a banda

infravermelha permite seguir muito bem as variações de concentrações encontradas durante todas as campanhas, mesmo em caso de alta concentração.

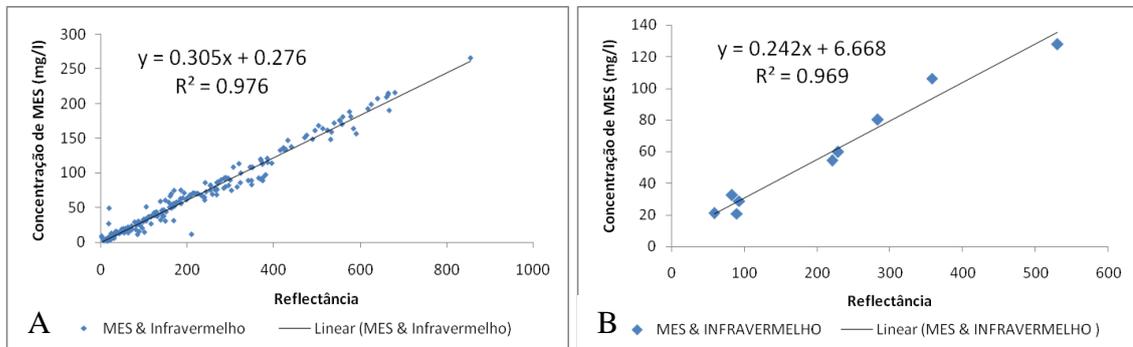


Gráfico 6 - Correlação entre dados de concentração de sedimentos em suspensão e infravermelho próximo simulado de MODIS de espectrometria de campo: a) por ponto da grade hidrométrica; b) por total de amostras coletadas.

Org.: Thiago Marinho, 2014.

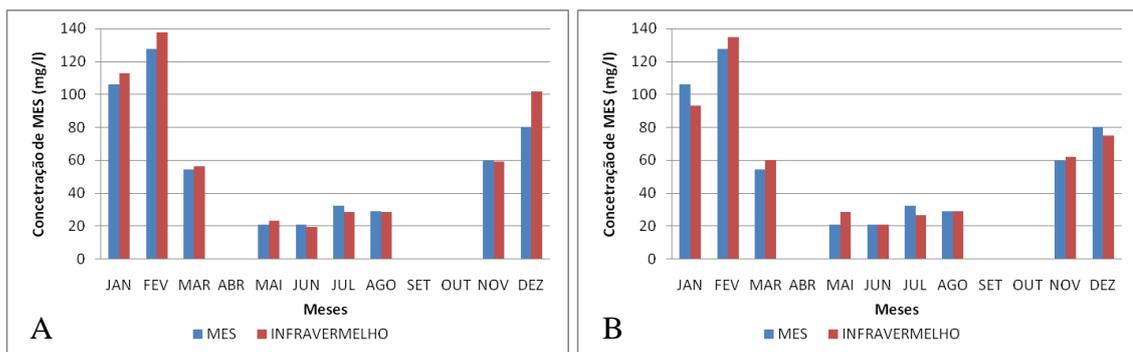


Gráfico 7 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da banda do infravermelho próximo simulado de MODIS de espectrometria de campo: a) por ponto da grade hidrométrica; b) por total de amostras coletadas.

Org.: Thiago Marinho, 2014.

3.2.2 Espectrometria & Imagens MODIS

As equações geradas pela correlação dos dados de concentração de sedimentos em suspensão e reflectância simulada de MODIS da espectrometria de campo, tanto do processamento 01 quanto do processamento 02, foram utilizadas para estimar os valores de sedimentos em suspensão para a Banda do Vermelho e do Infravermelho Próximo das imagens MODIS⁶.

⁶ O mês de maio não houve análise referentes a imagem MODIS devido nenhuma imagem tanto dos produtos MOD09Q1.005 quanto MYD09Q1.005 terem passado na qualidade, apresentando valores comprometidos em mais da metade da grade hidrométrica em todas as imagens.

O gráfico 8A, utilizando a equação da espectrometria de campo de processamento 01, revela na Banda do Vermelho uma saturação a partir de 100mg/l evidenciados nos meses de janeiro e fevereiro.

O gráfico 8B, utilizando a equação da espectrometria de campo de processamento 02, revela também uma saturação a partir de 110mg/l. As duas equações para a Banda do Vermelho não conseguiram estimar com maior precisão concentrações referentes aos meses de janeiro e fevereiro, período que apresenta os maiores níveis de sedimentos em suspensão na área de estudo. Para os demais meses do ano, a equação gerada pelo processamento 02, utilizando todos os dados de reflectância coletados em campo, apresentou uma resposta mais positiva com maior nível de precisão.

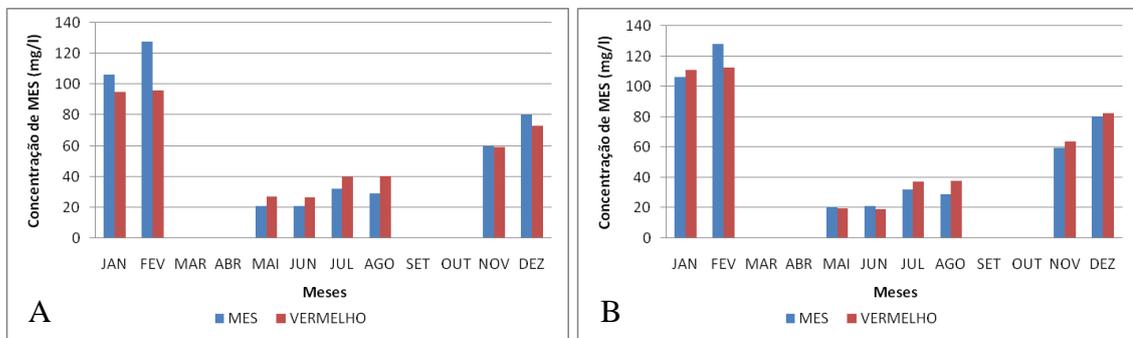


Gráfico 8 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da Banda do Vermelho MODIS: a) equação da espectrometria de campo processamento 01; b) equação da espectrometria de campo processamento 02.

Org.: Thiago Marinho, 2014.

O gráfico 9A, utilizando a equação da espectrometria de campo de processamento 01, revela que os valores de sedimentos em suspensão estimados usando a Banda do Infravermelho Próximo alcançaram, na maioria dos meses, valores duas vezes maiores que os dados de amostra de água superficial. O gráfico 9B, utilizando a equação da espectrometria de campo de processamento 02, também apresenta o mesmo cenário com valores superestimados em todos os meses, exceto o mês de maio.

Trabalhos anteriores (MARTINEZ *et al.*, 2009; ESPINOZA *et al.*, 2012a; ESPINOZA *et al.*, 2012b; ESPINOZA, 2013) já destacavam a dificuldade da Banda do Vermelho em estimar valores de sedimentos em suspensão superior a 100mg/l e que para concentrações superiores a esse valor a Banda do Infravermelho Próximo é mais recomendável.

Contudo, para a área de estudo os valores estimados pelas imagens MODIS com as equações geradas pela espectrometria de campo apresentaram valores superestimados. Isso pode estar relacionado às características de cada conjunto de dados.

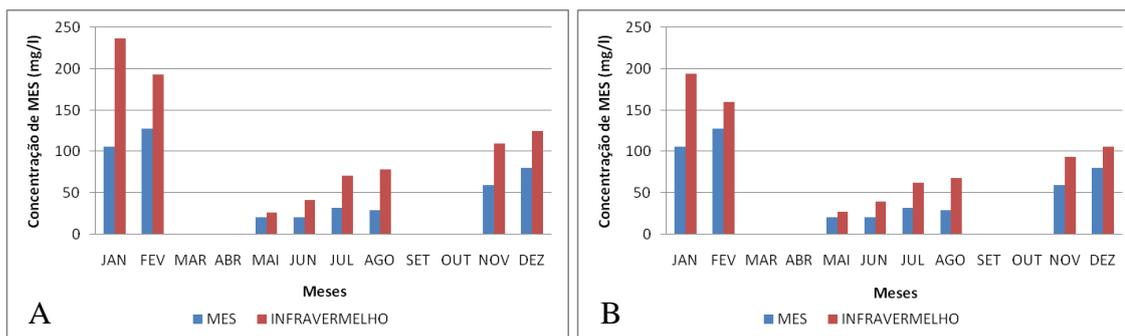


Gráfico 9 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da Banda do Infravermelho Próximo MODIS: a) equação da espectrometria de campo processamento 01; b) equação da espectrometria de campo processamento 02.

Fonte: Thiago Marinho, 2014.

Enquanto o dado radiométrico de campo não está sendo afetado pela atmosfera (os sensores estão colocados alguns metros acima da superfície de água), os dados de satélite estão dependentes da situação atmosférica. Isso demanda o desenvolvimento de correções complexas e que estão já integradas nas imagens utilizadas (produtos MOD09 e MYD09).

A robustez positiva das correções atmosféricas dos sensores MODIS é algo reconhecido. Porém em situações de baixas refletâncias, como as águas que retroespalham pouca luz no infravermelho, a precisão das correções pode ser menor.

Outro fator que pode contribuir ao resultado ruim no infravermelho é o processo de adjacência que faz com que fótons de luz oriundo das margens (floresta, zona urbana) podem se misturar com os fótons oriundos da superfície de água. Esse processo gera um ruído, particularmente em situação de baixa refletância, que pode alterar os valores de refletância do satélite acima da água.

Assim, mesmo que os dados radiométricos sejam mais precisos, o uso direto das relações obtidas *in situ* para o satélite devem ser manipuladas com cuidado. Na seguinte seção, comparamos o uso de relações concentração em sedimento/refletância a partir de dados *in situ* ou de satélite.

3.2.3 Amostras de Água Superficial & Imagens MODIS

Além das análises utilizando os dados de espectrometria de campo, foi feito correlações diretas entre os valores de concentração de sedimentos em suspensão e os dados de reflectância dos pixels das imagens MODIS para as bandas do vermelho e infravermelho próximo (Gráfico 10 A e B).

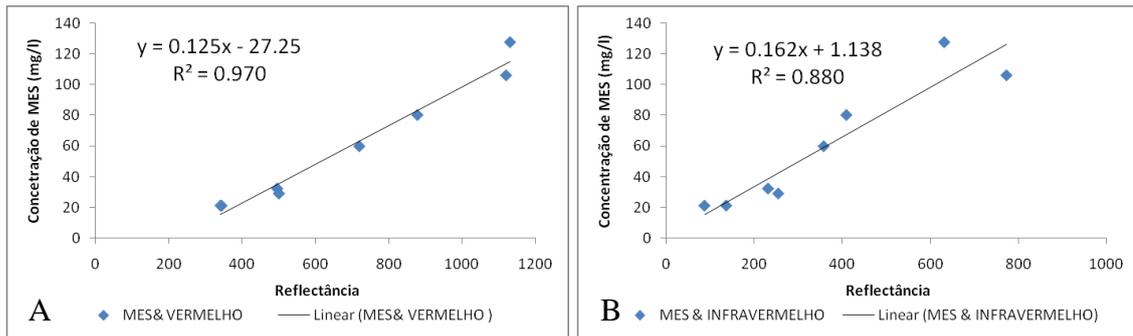


Gráfico 10 - Correlação entre dados de concentração de sedimentos em suspensão e reflectância dos pixels das imagens MODIS: a) Banda do Vermelho; b) Banda do Infravermelho Próximo.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

Na Banda do Vermelho, ao comparar os valores estimados de sedimentos em suspensão das imagens MODIS da equação de espectrometria de campo de processamento 02 (Gráfico 11A) e da equação da imagem MODIS (Gráfico 11B), os resultados são muito semelhantes com uma sutil superioridade da equação da espectrometria de campo que alcançou melhor correlação em valores de concentração mais baixos apresentados nos meses de maio de julho com 20mg/l.

Na Banda do Infravermelho Próximo, comparado os valores estimados de sedimentos em suspensão das imagens MODIS da equação de espectrometria de campo de processamento 02 (Gráfico 12A) e da equação da imagem MODIS (Gráfico 12B) esta ultima apresenta uma resposta de correção melhor, contudo os meses janeiro e fevereiro apresentaram valores divergentes.

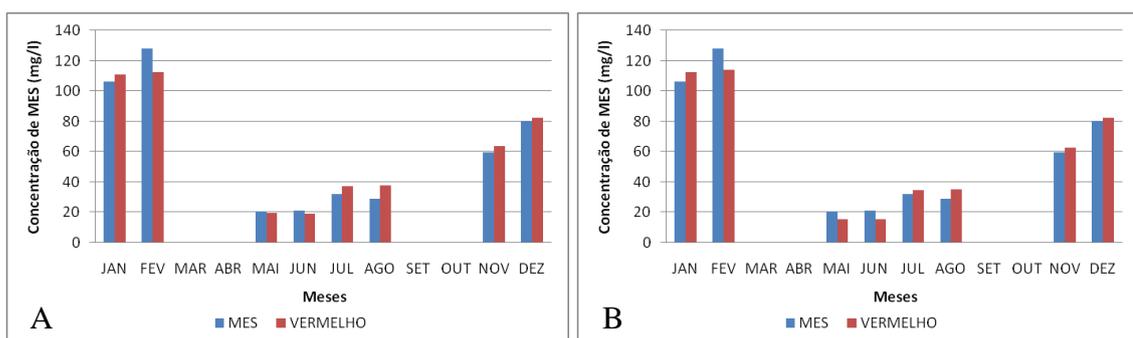


Gráfico 11 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da Banda do Vermelho MODIS: a) equação da reflectância simulada de MODIS da espectrometria de campo processamento 02; b) equação MODIS.
Org.: Thiago Marinho, 2014.

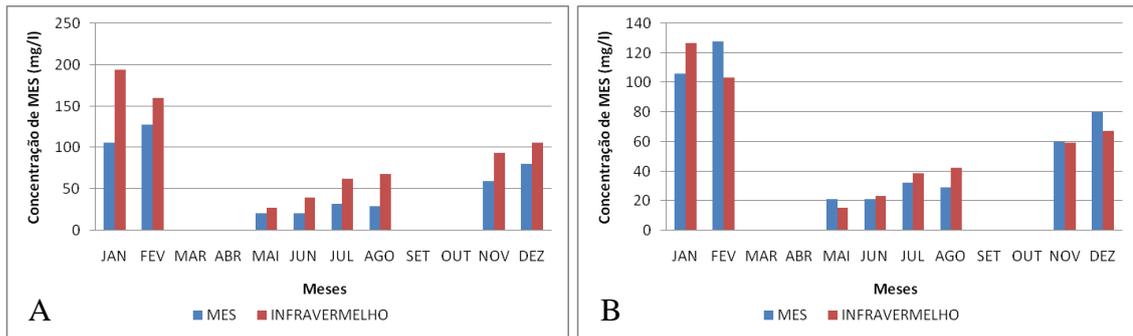


Gráfico 12 - Concentrações mensais de sedimentos em suspensão e dados estimados da Banda do Infravermelho Próximo MODIS: a) equação da reflectância simulada de MODIS da espectrometria de campo processamento 02; b) equação MODIS.

Org.: Thiago Marinho, 2014.

O quadro 05 exemplifica melhor outro fator determinante a análise do fluxo de sedimentos em suspensão para a área de estudo. Como já discutido anteriormente, a heterogeneidade nos valores de concentração de sedimentos em suspensão na região de confluência dos rios Negro e Solimões-Amazonas faz com que cada ponto da grande hidrométrica seja crucial para o cálculo do valor médio da área. Nos meses de janeiro e fevereiro houve uma intensificação do regime de chuvas na região o que comprometeu 100% das imagens, em níveis diferenciados.

A ausência de pontos da grade para o cálculo da concentração média de sedimentos em suspensão, adicionado com problemas atmosféricos decorrentes dos pixels brancos que interferem nos valores dos pixels vizinhos, pode ocasionar valores tanto superestimados quanto subestimados de concentração das imagens MODIS como ocorreu para nos meses de janeiro e fevereiro.

PONTO	MAI	JUN	JUL	AGO	NOV	DEZ	JAN	FEV
01								
02								
03								
04								
05								
06								
07								
08								
09								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
Total por Campanha	36	38	39	40	39	39	26	26

Quadro 5 - Amostras de concentração de sedimentos de suspensão e dados de reflectância das imagens MODIS correlacionados por campanha.

Org.: Thiago Marinho, 2014.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores de concentração de sedimentos das amostras de água superficial das oito campanhas se configuraram em dois cenários. O período entre maio e agosto foi marcado por menores valores de concentração e de novembro a fevereiro foram registrados os maiores valores de concentração de sedimentos em suspensão.

Esses dois domínios (de baixa e alta concentração de sedimentos em suspensão na área de estudo) foram evidenciados pelo conjunto de mapas produzidos e pelos valores máximos e mínimos de cada linha transversal da grade hidrométrica, sendo a linha 01 a mais a montante e a linha 05 a mais a jusante do canal.

No período entre maio e agosto, os valores de máximo e mínimo em todas as linhas se mantêm constantes. Nos valores mínimos praticamente não há mudança. Isso demonstra que, no sentido de montante para jusante nesse período, os valores se mantiveram constantes sem grandes alterações.

Esse cenário se transforma quando analisado o período entre novembro e fevereiro. De montante para jusante há um aumento de valores mínimos. Isso significa que no início da confluência as baixas concentrações de sedimentos em suspensão características da água do Rio Negro ainda são encontradas. Contudo, à medida que se estende a zona de mistura das águas do Rio Solimões estas se diluem aumentando a carga de sedimentos na margem direita do canal.

De fato a grade hidrométrica releva que há não apenas uma diluição das águas do Rio Solimões-Amazonas de montante para jusante, mas também que os valores de diluição variam em relação ao período do ano. Além disso, a zona de mistura também não é constante tendo no período entre novembro e dezembro forte domínio das águas do rio Solimões-Amazonas em detrimento as águas do Rio Negro.

Ao utilizar a equação da espectrometria de campo com valores de reflectância simulado de MODIS para estimar a concentração de sedimentos em suspensão pelos valores de reflectância das imagens MODIS, revelou-se uma saturação da Banda do Vermelho a partir de 100mg/l nos meses de janeiro e fevereiro. Esse período é exatamente o que apresenta os maiores níveis de concentração de sedimentos em suspensão na área de estudo. Nos demais meses do ano a equação se apresentou robusta com maior nível de precisão.

A Banda do Infravermelho Próximo utilizando a equação da espectrometria de campo com valores de reflectância simulados de MODIS apresentou os valores de concentração de sedimentos em suspensão superestimados em todos dos meses, exceto para o mês de maio. A

causa dessa superestimação sistemática deve estar relacionada com a baixa reflectância das águas nessa faixa do espectro fazendo com que os impactos das correções atmosféricas e da adjacência sejam relativamente maiores do que para a faixa do vermelho.

Para confirmar esse argumento, observou-se que as equações geradas pela correlação de concentrações de sedimentos em suspensão e os valores de reflectância dos pixels das imagens MODIS na Banda do Vermelho são muito semelhantes com as da equação da espectrometria de campo.

Na Banda do Infravermelho Próximo, comparando os valores estimados de sedimentos em suspensão das imagens MODIS da equação de espectrometria de campo e da equação da imagem MODIS esta última apresentou uma resposta de correção melhor. Contudo os meses de dezembro, janeiro e fevereiro apresentaram valores divergentes. Nesse caso, as equações geradas pela correlação de concentrações de sedimentos em suspensão e os valores de reflectância foram nitidamente diferente.

A fim de apresentar os resultados finais de maneira visual foi feito três representações, uma para cada tipo de dado: amostras de água, espectrometria de campo e imagens MODIS (Figuras 18, 19 e 20). O retângulo representa a área de estudo sendo a parte superior a área mais a montante onde com o encontro dos Rios Solimões e Negro. Os 40 pontos da grade hidrométrica estão dispostos de maneira semelhante a grade realizada no trabalho. As cores representam a variação da mancha d'água para três períodos do ano (maio a agosto, novembro a dezembro e janeiro a fevereiro). As zonas brancas com borda pontilhada são os pontos da grade que por um determinado período do ano não tiveram dados por conta de condições metrológicas.

A área de estudo com suas especificidades demonstrou grandes desafios à metodologia. Entretanto, pode-se perceber que, mesmo para uma área de confluência de dois rios com concentrações de sedimentos em suspensão distintos, as imagens MODIS apresentaram uma resposta positiva podendo estimar valores de sedimentos em suspensão para todo período do ano.

O trabalho apresentado para a área de confluência dos rios Negro e Solimões deve servir de base para estender a análise em toda a sua extensão, de Manaus até Itacoatiara, usando series temporais de imagens MODIS.

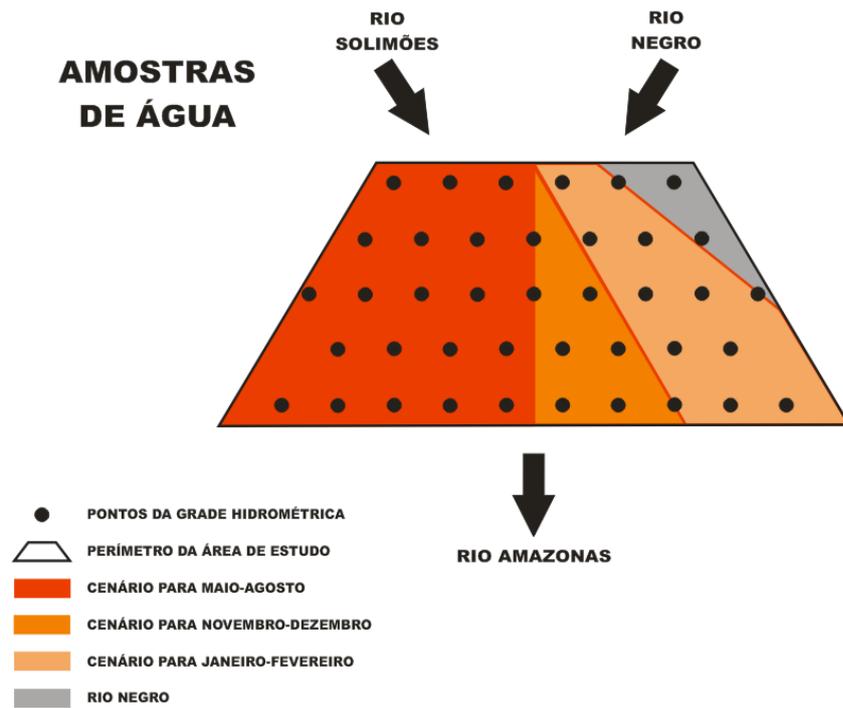


Figura 19 – Representação dos dados de sedimentos em suspensão por amostra de água superficial.
Fonte: Thiago Marinho, 2014.

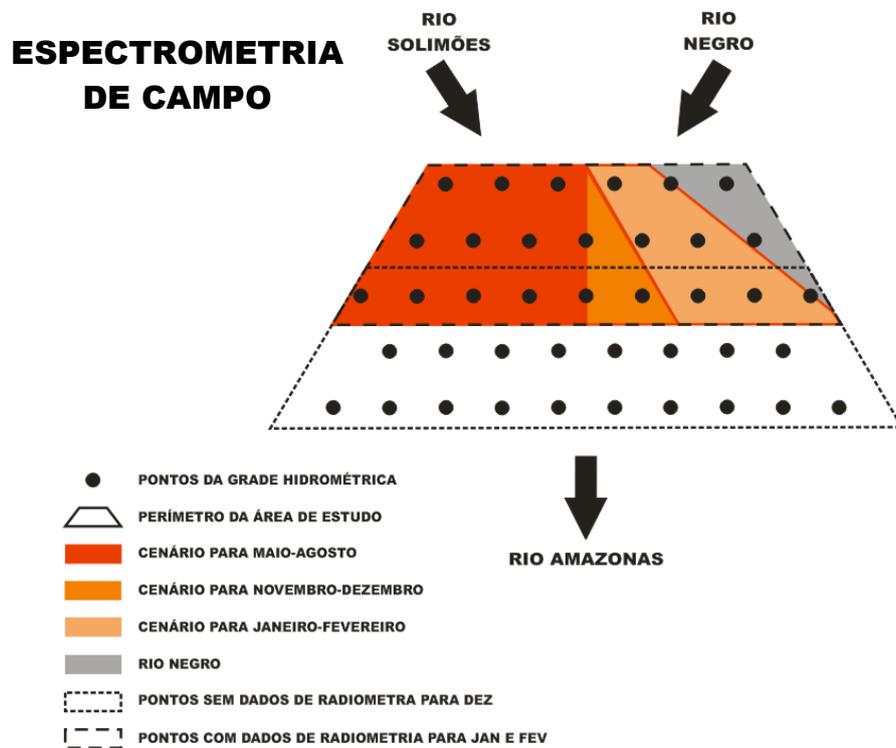


Figura 20 - Representação dos dados de sedimentos em suspensão por espectrometria de campo.
Fonte: Thiago Marinho, 2014.

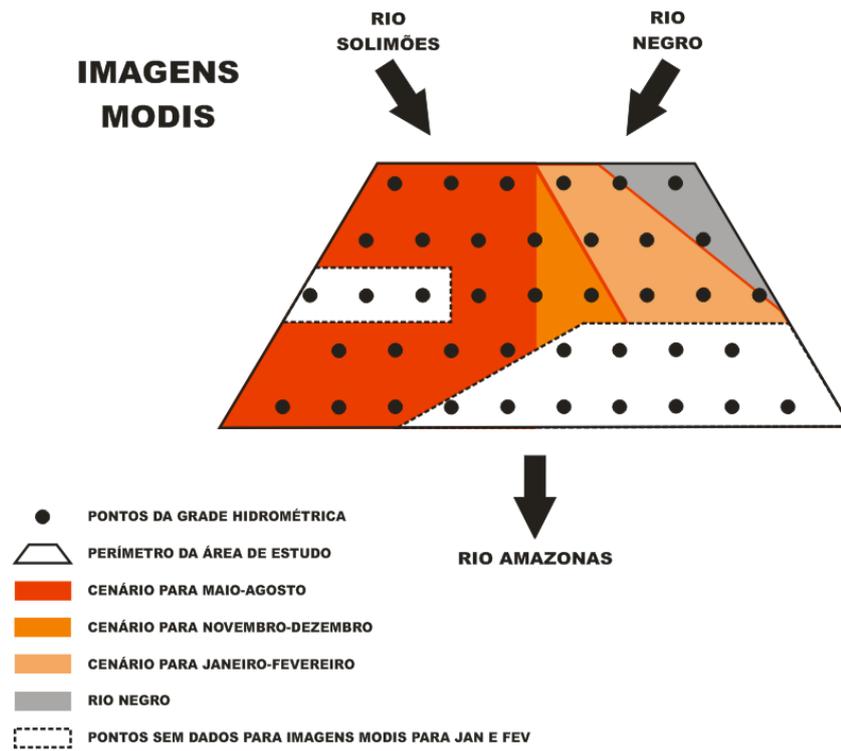


Figura 21 - Representação dos dados de sedimentos em suspensão por espectrometria de campo.
 Fonte: Thiago Marinho, 2014.

5. REFERÊNCIAS

ARMIJOS, Elisa. *Cuantificación de Flujos Sedimentarios de las Cuencas Amazónicas del Peru*. Dissertação de Mestrado. Lima, Peru: Universidad Nacional Agraria la Molina, 2010.

BORDAS, M. P.; SEMMELMAN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. IN: TUCCI, C. E. M. (org.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2012.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA, N. P.; SANTOS, P. M. C. *Guia de práticas sedimentométricas*. Brasília, DF: ANEEL, 2000.

Carvalho, L. M. V., Jones C., Liebmann, B. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, Vol. 17, 2004, p. 88-108.

COHEN, J. C. P. *Um estudo observatório de linhas de instabilidade na Amazônia*. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Especiais: Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, 1989.

ESPINOZA, R. *Monitoramento das dinâmicas espaciais e temporais dos fluxos sedimentares na Bacia Amazônica a partir de imagens de satélite*. Tese de Doutorado. Brasília-DF: Universidade de Brasília: Instituto de Geociências. 2013.

ESPINOZA R.; MARTINEZ, J.M.; GUYOT, J.G.; FRAIZY, P.; ARMIJOS, E.; CRAVE, A.; BAZÁN, H.; VAUCHEL, P.; LAVADO, W. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *Journal of Hydrology*. Vol. 444 – 445, 2012, p. 221-228.

ESPINOZA R.; MARTINEZ, J.M.; TEXIER, M.; GUYOT, J.G.; FRAIZY, P.; MENEZES, P.; OLIVEIRA, E. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. N., 2012, p. 1-10.

ESTATÍSTICA, Instituto Brasileiro de Geografia e. *Censo Demográfico de 2010*.

FILIZOLA, N. P. *O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Bacia Amazônica brasileira*. Brasília, DF: ANEEL, 1999.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J-L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol. 41, N. 4, 2011, p. 566-576.

_____. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. *Hydrological Process*. Vol. 23, 2009, p. 3207 – 3215.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J-L; MOLINIER, M.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E.; FREITAS, M. A. Caracterização hidrológica da bacia Amazônica. IN: RIVAS, A; FREITAS, C. (org.). *Amazônia uma perspectiva interdisciplinar*. Manaus: EDUA, 2002, p. 33-53.

FILIZOLA, N.; SEYLER, F.; MOURÃO, M. H.; ARRUDA, W.; SPÍNOLA, N.; GUYOT, J. L. Study of the variability in suspended sediment discharge at Manacapuru, Amazon River,

Brazil. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*. Vol. 16. N. 02, 2009, p. 93-99.

FILIZOLA, N.; SPÍNOLA, N.; ARRUDA, W.; SEYLER, F.; CALMANT, S. The Rio Negro and Rio Solimões confluence point – hydrometric observations during the 2006/2007 cycle. IN: *River, Coastal, Estuarine Morphodynamics: RCEM-2009*. Santa Fé: RECEM, 2009. London: Taylor & Francis Group, 2009, Vol. 02, p. 1003-1006.

FISH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazônica*. Vol. 28, N. 2, 1998, p. 121-126.

FRANZINELLI, Elena. Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*. Sociedade Brasileira de Geologia. Vol.44. N. 4, 2011, p. 587-596.

GARCIA, S. R. *Sistema de Monção na América do Sul: início e fim da estação chuvosa e sua relação com a Zona de Convergência Intertropical do Atlântico*. Tese de Doutorado. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Especiais: Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, 2010.

GIBBS, R. J. The Geochemistry of the Amazon River System. Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 78, 1967, p. 1203-1232. Gosse and Phillips (2001).

JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. Tradução de José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) et al. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

KIRK, J. T. O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. New York: Cambridge University Press, 1994.

LARAQUE, A.; GUYOT, J-L; FILIZOLA, N. Mixing processes in the Amazon River at the confluences of the Negro and Solimões River, Encontro das Águas, Manaus, Brazil. *Hydrological Processes*. Vol. 23, N. , 2009, p. 3131-3140.

LATRUBESSE, E.; STEVAUX, J.; SINHA, R. Tropical Rivers. *Geomorphology*. Vol. 70, N. 03, 2005, p. 187-206.

LEPSCH, I. F. *Formação e conservação dos solos*. 2ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S. The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface waters. *Journal of the American Water Resources Association*. Vol. 33, N. 1, 1997, p. 111-117.

MARTINEZ, J. M.; GUYOT, J. L.; FILIZOLA, N. P. SONDAG, F. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena*. Vol. 79, 2009, 257-264.

MEADE, R. H. Suspended Sediment in the Amazon River and its Tributaries in Brazil during 1982-1984. *U.S. Geological Survey Open File Report 85-492*, Denver, 1985, p. 39.

MEADE, R. H.; DUNNE, T.; RICHEY, J. E.; SANTOS, U. M.; SALATI, E. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. *Science*. Vol. 228, 1985, p. 448-490.

MEADE, R. H.; RAYOL, J. M.; CONCEIÇÃO, S. C.; NATIVIDADE, J. R. G. Backwater effects in the Amazon river basin of Brazil. *Environmental Geology and Water Sciences*. Vol. 18, N. 2, 1991, p. 105-114.

MEADE, R. H., NORDIN, C. F., CURTIS, W. F., COSTA RODRIGUES, F. M., DO VALE, C. M., EDMOND, J. M. Sediment loads in the Amazon River. *Nature* Vol. 278, 1979, p. 161-163.

MILLIMAN J. D., MEADE R. H. World-wide delivery of river sediment to the oceans. *The Journal of Hydrology*, Vol. 91, N. 1, 1983, p. 1-21.

MOLINIER, M.; GUYOT, J-L; GUIMARÃES, V. Hidrologia da bacia do Rio Amazonas. Rio de Janeiro: CPRM. *A Água em Revista*. Vol. 02, N. 3, 1994, p. 31-36.

MOLION, L. C. B. Climatologia dinâmica da região Amazônica: mecanismos de precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia*. Vol. 02, 1987, p. 107-117.

NITTROUER, C. A.; KUEHL, S. A.; STERNBERG, R. W.; FIGUEIREDO, A. G.; FARIA, L. E. C. Na introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*. Vol. 125, 1995, p. 177-192.

NITTROUER, C.A.; CURTIN, T. B.; DE MARTER, D. J. Concentration and flux of suspended sediment on the Amazon continental shelf. *Continental Shelf Research*. Vol. 6. N. 1, 1986, p. 151-174.

NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C.; FREITAS, R. M. Sistemas Aquáticos Continentais. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. *Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil*. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007. Cap. 19, p. 265-275.

OLIVEIRA, A. S. *Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia*. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Especiais: Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, 1986.

OLTMAN, R. E. Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon. *U. S. Geological Survey Circ.*, 552, 1968, 16 p.

SIOLI, H. Amazon tributaries and drainage basins. IN: HASLER, A. D. (ed.). *Coupling of Land and Water Systems*. New York: Springer Verlag, 1975, p. 199-213.

SOARES, C. B. S. S. *Estimativas da concentração de sedimentos em suspensão na estação hidrométrica de Manacapuru – Rio Solimões – por meio de imagens do sensor MODIS*. Tese de Doutorado. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia/Universidade Estadual do Amazonas: Programa de Pós-Graduação Clima e Ambiente, 2012.

SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Histórico e descrição. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. *Sensor MODIS e suas*

aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007. Cap. 01, p. 01-21.

WITTMANN, H.; VON BLANCKENBURG, F.; MAURICE, L.; GUYOT, J-L.; FILIZOLA, N.; KUBIK, P. W. Sediment production and delivery in the Amazon River basin quantified by in situ-produced cosmogenic nuclides and recent river loads. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 123, 2011, p. 934-950.