UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

ELIETE DOS SANTOS SOUSA

Fluxo evasivo de CO2 em ambientes fluviais no sudoeste da Amazônia,

Acre, Brasil

Piracicaba 2013

ELIETE DOS SANTOS SOUSA

Fluxo evasivo de CO₂ em ambientes fluviais no sudoeste da Amazônia, Acre, Brasil

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Reynaldo Luiz Victoria

Piracicaba

2013

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Sousa, Eliete dos Santos

Fluxo evasivo de CO₂ em ambientes fluviais no sudoeste da Amazônia, Acre, Brasil / Eliete dos Santos Sousa; orientador Reynaldo Luiz Victoria. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013. 154 f.: il.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Biogeoquímica 2. Carbono 3. Ecossistemas aquáticos 4. Sazonalidade I. Título

CDU 574:550.47

Aos meus pais Maria do Socorro e José Santana E aos meus irmãos Eliane, Elison e Elson

Dedico

Mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças, subirão com asas como águias....

Isaías 40:31

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pela saúde e força pra alcançar este sonho;

A minha família, pela força, orações e apoio;

Aos meus orientadores: Dr. Alex Vladimir Krusche, Prof. Dr. Cleber Ibraim Salimon e Prof. Dr. Reynaldo Luiz Victoria, pela dedicação e confiança em mim depositadas;

Ao meu técnico de campo, Willians Aiache, pelo companheirismo, dedicação, cuidado e momentos de descontração durante as amostragens;

Aos motoristas da UFAC: Lira, Plínio e "Seu Sorriso", pelo apoio nas amostragens;

A Prof^a. Dr^a. Maria Rosélia Marques Lopes, pelo apoio através do Laboratório de Limnologia da UFAC;

Ao Profs. Drs. Lisandro Juno Soares Vieira e Elder Morato e ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da UFAC, pelo apoio logístico;

Aos amigos Nadir Dantas, Rodrigo Gomes e Daniele Souza, pelo companheirismo, dedicação e momentos de descontração durante as amostragens e análises de laboratório;

Aos amigos: Izaías, Ana, Rosângela, Renato, Lívia, Harumi, Joselaine, Márcia, Dione, Lidiany, Elinez, Jorgete, Lídia, Martinha e a todos os outros amigos do Acre, pela força e amizade, mesmo de longe;

Aos técnicos Alexandra (Xanda) e Gustavo (Gu) pelo apoio com as análises de laboratório no CENA;

Ao Programa de Pós-Graduação do CENA pela oportunidade de formação;

A FAPESP pela bolsa de estudo e auxílio à pesquisa;

Aos amigos: Nei, Giovana, Deise, Henrique, Fátima, Felippe, Andréia pela amizade companheirismo e sugestões no trabalho;

A Rosângela, secretária do LGPA, pela paciência com minhas notas fiscais e pela sua amizade;

A Prof^a Dr^a Maria Victoria Ballester, pelo apoio e acolhimento no LPGA;

Ao Dr. Fernando Piotto pela ajuda com o Programa R;

As minhas amigas e eternas "irmãs de república": Orjana, Luana, Natália, Michelle, Ludmila, Gisely e Elisângela pela amizade, compreensão, contas, bagunças, diversão, festas... vocês serão inesquecíveis!

A Família Petruchelli, pelo acolhimento em Piracicaba;

RESUMO

SOUSA, E.S. Fluxo evasivo de CO₂ em ambientes fluviais no sudoeste da Amazônia, Acre, Brasil. 2013. 155f. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

Na maior bacia hidrográfica do Planeta, o rio Amazonas transporta para os oceanos grande quantidade de carbono particulado e dissolvido. Esta visão tradicional dos rios, como carreadores de carbono para os oceanos, tem sido revista nas últimas décadas, em função de novos resultados que mostram emissões de CO₂ destes sistemas para atmosfera superiores ao transporte na descarga em até uma ordem de grandeza. Diversos trabalhos já foram realizados com o objetivo de avaliar os processos que controlam essas emissões. No entanto, os mesmos ainda permanecem como uma grande fonte de incertezas. O objetivo principal deste trabalho foi quantificar os fluxos de CO₂ em rios e igarapés do sudoeste da Amazônia (bacia do rio Purus, estado do Acre), levando em consideração as características químicas e físicas de cada sistema, bem como a sazonalidade da região e, assim, contribuir para melhorar as estimativas das emissões de carbono em toda a bacia Amazônica. Os resultados mostraram que durante o período de estiagem os rios apresentam águas com concentrações relativamente elevadas de bicarbonato, indicando a importância do intemperismo de carbonatos como fonte de carbono. Análises da composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido corroboraram estes resultados. Nos igarapés, no entanto, a principal fonte de carbono é a matéria orgânica do solo. A sazonalidade exerce forte influência na pCO_2 e, consequentemente, nos fluxos de CO_2 , com os maiores valores ocorrendo no período chuvoso. No entanto, não foi encontrada variabilidade sazonal nas taxas respiratórias o que mostra que, além da respiração, outros fatores também estão influenciando os fluxos de CO2. No período seco, o aumento significativo das concentrações de clorofila a pode indicar que processos fotossintéticos também desempenham um papel importante no balanço de C destes sistemas.

Palavras-chave: Fluxos de CO₂. Ambientes fluviais. Sudoeste da Amazônia.

ABSTRACT

SOUSA, E.S. **CO₂ flux in fluvial systems of Southwestern Amazonia, Acre, Brazil**. 2013. 155f. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

In the largest basin of the planet, the Amazon river carries large amounts of particulate and dissolved carbon to the oceans. This traditional view of rivers as carriers of carbon to the oceans has been reviewed in the last decades due to new results showing that CO_2 emissions to the atmosphere from these systems can surpass C transport in discharge in one order of magnitude. Several studies have been conducted to evaluate the processes controlling these emissions. However they still remain a major source of uncertainty. The main objective of this study was to quantify CO₂ evasive fluxes in rivers and streams of Southwestern Amazon (Purus river basin, Acre state), taking into account chemical and physical characteristics of each system, as well as seasonality in this region and, thus, contribute to improve estimates of carbon emissions throughout the Amazon basin. The results showed that during low water the rivers have relatively high bicarbonate concentrations, indicating that carbonate weathering is an important carbon source. Dissolved inorganic carbon isotopic composition corroborated these results. However, in streams the main carbon source is soil organic matter. Seasonality has a strong influence on pCO_2 and consequently on CO_2 fluxes, with the highest values occurring in the rainy season. However there was no seasonal variability in respiration rates, which shows that other factors than respiration are also influencing CO₂ fluxes. During the dry period, increases in chlorophyll a indicate that photosynthetic processes also play an important role in the C balance of these systems.

Keywords: CO₂ fluxes. Fluvial environments. Southwestern Amazonia.

LISTA DE TABELAS

Tabela A. Características físicas e químicas dos solos da Reserva Florestal Humaitá e Fazenda
Experimental Catuaba (Fonte: Departamento de Solos/ UFAC)
Tabela 1.1 – Concentrações médias e desvio padrão dos principais cátions e ânions (em μM) nos igarapés e rios amostrados
Tabela 1.2 – Concentrações médias do CID total e das suas frações (em µM) e valores de pH nos igarapés e rios amostrados
Tabela 2.1 – Dados de precipitação acumulada (em mm) gerados pelo MODIS para cada sub- bacia em cada período amostral. Os números em parênteses são dados do INMET em Rio Branco
Tabela 2.2 – Concentrações médias e desvio padrão das frações do CID (em µM) nos rios e igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Tabela 2.3 – Composição isotópica do CID (δ^{13} C do CID) para os rios e igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Tabela 3.1 – Concentrações dos principais nutrientes (Si em mg L^{-1} ; NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- e PO_4^{-3} em μ M) nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco

LISTA DE FIGURAS

Figura A – Mapa de solos do estado do Acre. Fonte ZZE
Figura B – Mapa da bacia do rio Purus, com a localização dos rios amostrados e pontos de coleta
Figura C – Mapa de localização da Reserva Florestal Humaitá e igarapé Escondido (bolinha preta)
Figura D – Mapa de localização da Fazenda Experimental Catuaba e igarapé Floresta (bolinha preta)
Figura 1.1 - Câmara flutuante usada para as medidas de fluxo de CO ₂ 41
Figura 1.2 - Equilibrador usado para as medidas diretas da pCO_2
Figura 1.3 – Valores de pH nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados
Figura 1.4 – Valores de condutividade elétrica (em μ S cm ⁻¹) nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados
Figura 1.5 – Diagrama ternário elaborado a partir das concentrações dos principais cátions nas amostras de água dos rios e igarapés
Figura 1.6 – Diagrama ternário elaborado a partir das concentrações dos principais ânions nas amostras de água dos rios e igarapés
Figura 1.7 – Concentrações de CID (em μM) nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados
Figura 1.8 – Contribuição percentual das frações de CID $(CO_3^{2^-}, HCO_3^{-} e CO_2 \text{ livre})$ nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados
Figura 1.9 – Composição isotópica do CID (δ^{13} C do CID) em ‰ para os rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados

Figura 1.10 – Pressão parcial do CO_2 (pCO_2) em µatm nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados
Figura 1.11– Correlação de Spearman (r) entre os valores de pH e pressão parcial do CO_2 (pCO_2) nos igarapés e rios amostrados
Figura 1.12 – Valores dos fluxos de CO ₂ (em μ mol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) nos rios (Rio Purus –RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados
Figura 1.13 – Valores do somatório de cargas positivas (TZ^+ em $\mu Eq L^{-1}$) nas águas dos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados
Figura 1.14 – Correlação de Spearman (r) entre as concentrações de cálcio e magnésio ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) e as concentrações de bicarbonato e carbonato ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$) nos igarapés e rios amostrados
Figura 1.15 – Correlação de Spearman (r) os valores da p CO_2 (em µatm) e os valores do T Z^+ (em µEq L^{-1}) nos igarapés e rios amostrados
Figura 1.16 – Correlação de Spearman (r) entre os valores de fluxo de CO_2 e a pCO_2 (A), ZT^+ (B), velocidade da corrente (C) e cota (cm)
Figura 2.1 – Dados de precipitação acumulada em mm gerados pelo MODIS para cada sub- bacia entre os anos de 2000 a 2011
Figura 2.2 – Dados de precipitação acumulada (em mm) para cada sub-bacia gerados pelo MODIS durante o período de amostragem. As setas indicam as datas de amostragem
Figura 2.3 – Precipitação acumulada (em mm) para a Fazenda Experimental Catuaba e para a Reserva Florestal Humaitá. Fonte: Acrebioclima
Figura 2.4 – Cotas fluviométricas (em cm) e vazão (em m ³ s ⁻¹) para os rios amostrados. Fonte: ANA e CEDEC/AC
Figura 2.6 – Concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD em mg.L ⁻¹) nos rios amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Figura 2.7 - Concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD em mg.L ⁻¹) nos igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Figura 2.8 - Concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID em µM) nos rios amostrados durante os períodos chuvoso e seco

Figura 2.9 - Concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID em µM) nos igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Figura 2.10 – Pressão parcial do CO_2 (pCO_2) em µatm nos rios amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Figura 2.11 – Pressão parcial do CO_2 (pCO_2) em µatm nos igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Figura 2.12 – Fluxos de CO ₂ (em μ mol CO ₂ m ⁻² s ⁻) ¹ nos rios amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Figura 2.13 – Fluxos de CO_2 (em µmol CO_2 m ⁻² s ⁻¹) nos igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco
Figura 2.14 – Correlação de Spearman (r) entre cota e concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) nos rios (RP – Rio Purus, RA – Rio Acre, RR – Riozinho do Rôla, RI – Rio Iaco, RC – Rio Caeté) e igarapés (IF – Igarapé Floresta, IE – Igarapé Escondido) amostrados
Figura 2.15 – Correlação de Spearman (r) entre cota e concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID) nos rios (RP – Rio Purus, RA – Rio Acre, RR – Riozinho do Rôla, RI – Rio Iaco, RC – Rio Caeté) e igarapés (IF – Igarapé Floresta, IE – Igarapé Escondido) amostrados
Figura 2.16 – Contribuição percentual das frações do CID (CO ₂ livre, $HCO_3^- e CO_3^{2-}$) e valores de pH nos rios e igarapés amostrados durante o período chuvoso (A) e seco (B) 108
Figura 2.17 – Correlação de Spearman (r) entre fluxos de CO_2 e cota, temperatura do ar e da água, velocidade da corrente e pCO_2 nos rios e igarapés amostrados
Figura 3.1 – Desenho esquemático das filtragens dos sedimentos em suspensão 123
Figura 3.2 – Concentrações de sedimentos em suspensão grossos (SSG) em mg L ⁻¹ nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco
Figura 3.3 – Concentrações de sedimentos em suspensão finos (SSF) em mg L^{-1} nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco
Figura 3.4 – Concentrações de oxigênio dissolvido (OD) em mg L ⁻¹ nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco
Figura 3.5 – Taxas respiratórias (TR) em μ M h ⁻¹ nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco
Figura 3.6 – Concentrações de CO ₂ livre em µM nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	
DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	25
REFERÊNCIAS	
1 VARIABILIDADE ESPACIAL NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NO FLU EVASIVO DE CO2 EM RIOS E IGARAPÉS NO SUDOESTE DA AMAZÔN	JXO IA35
RESUMO	
ABSTRACT	
1.1 INTRODUÇÃO	
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
1.3 HIPÓTESE	
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS	
1.4.1 Área de Estudo e Pontos de Amostragem	
1.4.2 Métodos Amostrais	40
1.4.2.1 Medidas de fluxo de CO ₂ e pCO ₂	40
1.4.2.2 Amostras de água	
1.4.2.3 Medidas auxiliares	43
1.4.3 Métodos Analíticos	43
1.4.3.1 Análise de íons maiores (com exceção de carbonatos) e nutrientes	43
1.4.3.2 Análise da concentração de CID	44
1.4.3.3 Análise da composição isotópica do CID (δ ¹³ CID)	44
1.4.4 Análise Estatística	45
1.5 RESULTADOS	45
1.5.1 Caracterização Química dos Rio e Igarapés	45
1.5.1.1 pH e condutividade elétrica	
1.5.1.2 Íons maiores	
1.5.2 Carbono Inorgânico Dissolvido (CID)	
1.5.2.1 Concentração de CID total	
1.5.2.2 Frações de CID	53
1.5.3 Composição Isotópica do CID (δ ¹³ C do CID)	55
1.5.4 Pressão Parcial do CO ₂ (pCO ₂)	56

1.5.5 Fluxos de CO ₂	59
1.6. DISCUSSÃO	61
1.6.1 Variabilidade na Composição Química da Água	61
1.6.2 Origem do CID	64
1.6.3 Variabilidade nos Fluxos	
1.7 CONCLUSÕES	70
1.8 REFERÊNCIAS	71
2 VARIABILIDADE SAZONAL NAS CONCENTRAÇÕES, FONTES E FLUX CARBONO EM RIOS E IGARAPÉS NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA	OS DE 75
RESUMO	75
ABSTRACT	76
2.1 INTRODUÇÃO	77
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	79
2.3 HIPÓTESE	79
2.4 MATERIAIS E MÉTODOS	79
2.4.1 Área de Estudo e Período de Amostragem	79
2.4.2 Métodos Amostrais	
2.4.2.1 Medidas de pCO ₂ e fluxo evasivo	
2.4.2.2 Amostras de água	
2.4.3.3. Medidas auxiliares	
2.4.4 Métodos Analíticos	
2.4.4.1 Análise de COD e CID	
2.4.4.2 Composição isotópica do CID (δ ¹³ C do CID)	
2.4.5 Análise Estatística	
2.5 RESULTADOS	
2.5.1 Comportamento Hidrológico	
2.5.1.1 Precipitação	
2.5.2.1 Cotas e vazões	
2.5.2 Carbono Dissolvido	91
2.5.2.1 Carbono orgânico dissolvido	
2.5.2.2 Carbono inorgânico dissolvido	
2.5.3 Composição Isotópica do CID	

2.5.4 Pressão parcial do CO ₂ e fluxos de CO ₂	
2.6 DISCUSSÃO	
2.6.1 Variabilidade sazonal do COD e do CID	
2.6.2 Variabilidade sazonal dos fluxos evasivos de CO ₂	
2.7 CONCLUSÕES	
2.8 REFERÊNCIAS	
3 TAXAS RESPIRATÓRIAS, NUTRIENTES E CONCENTRAÇÕES DE	
CLOROFILA <i>a</i> E RELAÇÕES COM O FLUXO DE CO ₂	
RESUMO	
ABSTRACT	
3.1 INTRODUÇÃO	
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
3.3 HIPÓTESES	
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	
3.4.1 Área de Estudo e Período de Amostragem	
3.4.2 Métodos Amostrais	
3.4.2.1 Amostras de água	
3.4.2.2 Fluxo de CO ₂	
3.4.2.3 Medidas auxiliares	
3.4.3 Métodos Analíticos	124
3.4.3.1 Oxigênio dissolvido	
3.4.3.2 Taxas respiratórias	
3.4.3.3 Pigmentos de clorofila a	
3.4.3.4 Nutrientes	
3.4.3.5 Concentrações de CO ₂ livre	
3.4.3.6 Sedimentos em suspensão grosso e fino	
3.4.4 Análise Estatística	
3.5 RESULTADOS	
3.5.1 Concentrações de Sedimentos em Suspensão	126
3.5.2 Concentrações de Oxigênio Dissolvido e Taxas Respiratórias	
3.5.3 Concentrações de CO ₂ livre	
3.5.4 Concentrações de Clorofila <i>a</i> e nutrientes	

3.5.5 Fluxos de CO ₂	
3.6 DISCUSSÃO	
3.6.1 Carga de Sedimentos	
3.6.2 Respiração e Fotossíntese	
3.6.3 Oxigênio Dissolvido e CO ₂ livre	
3.6.4 A relação com os fluxos de CO ₂	
3.7 CONCLUSÕES	
REFERÊNCIAS	
CONCLUSÕES FINAIS	

INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas, o papel dos rios na ciclagem de carbono tem sido revisto. Tradicionalmente considerados como transportadores de carbono e outros materiais do ambiente terrestre para os oceanos, atualmente seu o papel como emissores de carbono para atmosfera tem recebido maior atenção. Em 2002, por exemplo, estimou-se que a bacia Amazônica seja responsável pela emissão anual de 470 Tg C ano⁻¹ para a atmosfera, cerca de 13 vezes mais carbono do que é transportado para o oceano (RICHEY et al., 2002). Desde então, diversos trabalhos vem investigando a dinâmica fluvial do carbono na região, com o objetivo de descobrir as fontes e os fatores que controlam a emissão de CO_2 e outros gases de efeito estufa nos rios amazônicos.

Trabalhos já realizados na região indicam que a respiração da matéria orgânica de origem terrestre pode ser uma das principais fontes do carbono que é evadido pelos rios (RICHEY et al., 2002; MAYORGA et al., 2005; ELLIS et al., 2012). Calcula-se que 80% do carbono presente nos rios são de origem terrestre e que 75% desse carbono são respirados durante seu transporte através do rio (RICHEY et al., 2002). Os fluxos evasivos de CO₂ apresentam acentuada sazonalidade, demonstrando também a importância da hidrógrafa como fator controlador dos mesmos (RICHEY et al., 2002; RASERA et al., 2008; RASERA, 2010). Processos como respiração, turbulência e aporte de água do solo rica em CO₂ são intensificados durante o período de enchente e, em alguns rios, o fluxo durante a cheia chega a ser até 20 vezes maior do que no período de seca (RASERA, 2010).

A Bacia Amazônica tem cerca de 6 milhões de km^2 e possui a maior rede de drenagem do mundo. A estimativa de emissão de CO₂ para a bacia feita por Richey et al. (2002) apresenta muitas incertezas, uma vez que foi baseada em medidas feitas apenas nas desembocaduras dos principais tributários e ao longo do canal principal. Rasera (2010) também quantificou os fluxos evasivos de CO₂ em alguns grandes rios amazônicos, obtendo diferenças significativas de acordo com a tipologia das águas. No entanto, estudos em rios de pequeno e médio porte ainda são muitos escassos (JOHNSON et al., 2008; NEU, 2009), principalmente em rios que drenam a região sudoeste da bacia, onde são formados importantes tributários do rio Amazonas.

A fim de contribuir para suprir esta lacuna do conhecimento, o presente estudo teve como objetivo principal quantificar os fluxos de CO₂ em rios e igarapés da bacia do rio Purus (Acre), levando em consideração tanto o tamanho dos sistemas quanto suas características químicas e assim contribuir para as estimativas das emissões de carbono em toda a bacia Amazônica. Nossos objetivos específicos foram:

- Correlacionar as características químicas da água dos rios e igarapés com o fluxo de CO₂;
- Avaliar a influência das mudanças hidrológicas sazonais nas concentrações de carbono dissolvido, nas fontes de carbono inorgânico dissolvido e nos fluxos de CO₂ nos rios e igarapés;
- Quantificar as concentrações de sedimentos em suspensão, as taxas respiratórias e as concentrações de clorofila *a* nos rios e correlacionar esses valores aos fluxos de CO₂.

Para tal, foram escolhidos 5 rios de médio porte, rios o Purus, Acre, Iaco, Rôla e Caeté e 2 igarapés, Floresta e Escondido. As amostragens foram realizadas nos meses mais representativos dos dois principais períodos sazonais da região: **Período Chuvoso** (Dez/10 a Abr/11 e Dez/11 a Abr/12) e **Período Seco** (Jul/11 a Set/11). Foram realizadas medidas de fluxo de CO₂, pressão parcial do CO₂ (pCO₂), pH, condutividade elétrica, temperatura da água e do ar, velocidade da corrente, além de amostragens de água para as análises de carbono orgânico (COD) e inorgânico dissolvidos (CID), nutrientes, composição isotópica do CID (δ^{13} C do CID), clorofila *a* e oxigênio dissolvido. Para facilitar a apresentação e discussão dos resultados, os mesmos são organizados em 3 capítulos:

Capítulo I – Caracterização química dos rios e igarapés. Foram consideradas apenas as amostragens realizadas durante o período seco, quando os rios apresentam suas características químicas do fluxo de base. Essas características foram então correlacionadas com os fluxos de CO₂;

Capítulo II – Sazonalidade dos fluxos. Foram avaliadas as mudanças sazonais nos parâmetros físicos e químicos e os fluxos de CO_2 foram então correlacionados com esses parâmetros;

Capítulo III – Taxas respiratórias, concentrações de nutrientes e de clorofila a. Os padrões sazonais destas variáveis foram analisados. Esses valores foram correlacionados com os fluxos para verificar a influência destes processos na evasão de CO₂ nos rios amostrados.

Por fim, são apresentadas as considerações finais do trabalho, destacando os principais resultados obtidos e a importância dos mesmos para melhorar as estimativas das emissões de carbono em toda a bacia Amazônica.

DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

O Estado do Acre

O estado do Acre está situado no sudoeste da Amazônia brasileira, entre as latitudes de 07°07S e 11°08S, e as longitudes de 66°30 W e 74°W Gr. Sua área territorial é de 164.221,36 km², correspondente a 4% da Amazônia brasileira e a 1,9% do território nacional (ACRE, 2010). O estado faz fronteiras internacionais com o Peru e Bolívia e, nacionais com os estados do Amazonas e de Rondônia.

O estado se destaca por possuir uma das maiores biodiversidades da região e manter intactos ainda aproximadamente 85% de sua floresta nativa e por possuir aproximadamente 45% de seu território constituído de áreas naturais protegidas. Quanto à vegetação, predominam duas grandes Regiões Fitoecológicas: a Floresta Ombrófila Densa e a Floresta Ombrófila Aberta. Em uma pequena extensão existe também uma terceira Região Fitoecológica, a da Campinarana, restrita à parte noroeste do estado. Tanto no domínio da Floresta Ombrófila Densa quanto no domínio da Floresta Ombrófila Aberta, coexiste uma grande diversidade de formações vegetais, as quais são diferenciadas principalmente pela qualidade dos solos (ACRE, 2010).

Os solos do Acre (Figura A) apresentam características decorrentes de uma região de acúmulo de sedimentos oriundos da Cordilheira dos Andes, com solos que possuem argila de atividade alta e eutrofismo (solos ricos quimicamente), pouco comuns para a Amazônia. Segundo Amaral (2006) os principais solos do Acre em ordem decrescente de expressão territorial são: Argissolos (38,32%), Cambissolos (31,56%), Luvissolos (14,60%), Gleissolos (5,98%), Latossolos (3,15%), Vertissolos (3,04%), Plintossolos (2,21%) e Neossolos (1,16%).



Figura A - Mapa de solos do estado do Acre. Fonte ZZE

Do ponto de vista geológico, tratam-se de solos jovens, formados a partir de processos geológicos que ocorreram nessa região da Amazônia, quais sejam, diversas transgressões marinhas do último período interglacial, seguidas por períodos áridos, que possibilitaram o acúmulo de carbonatos e sulfatos de cálcio no solo, e processos erosivos associados à última fase da epirogêneses andina, que transportaram para o local materiais vulcânicos, trazidos por processos de erosão hídrica ou eólica (GAMA et al., 1992).

Quanto à hidrografia, o estado do Acre é drenado por extensos rios de direção geral Sudoeste-Nordeste, todos pertencendo à rede hidrográfica do rio Amazonas. Os rios apresentam forma meândrica com pequenos trechos retilíneos. Estes estão inseridos dentro das duas principais bacias hidrográficas do estado, a bacia do rio Juruá e a bacia do rio Purus (ACRE, 2010). Os rios selecionados para este estudo fazem parta da bacia do rio Purus, conforme mostra a Figura B.

Rio Purus

A nascente do rio Purus encontra-se em território peruano e sua bacia é compartilhada com os departamentos peruanos de Ucayali e Madre de Dios, e os estados do Acre e Amazonas. Sua área de drenagem dentro do território acreano cobre em torno de 43.897 km² (ACRE, 2012).

Os valores médios mensais das vazões do rio Purus, não ultrapassam os 2.000 m³ s⁻¹. No pico de cheia dos rios desta bacia, os valores médios oscilam entre 357 e 1923 m³ s⁻¹. No período de seca, os valores oscilam desde os 2 até cerca de 92 m³ s⁻¹. Quanto ao trimestre mais caudaloso, têm-se o período entre os meses de janeiro a março, com o mês de pico geralmente ocorrendo em fevereiro. Já o trimestre menos caudaloso situa-se entre os meses de julho a setembro, com uma forte tendência a que o mês de setembro seja aquele onde os rios ficam mais secos (ACRE, 2012).



Figura B – Mapa da bacia do rio Purus, com a localização dos rios amostrados e pontos de coleta.

A pedologia da bacia do rio Purus caracteriza-se pela presença de solos com argilas ativas e quimicamente férteis. Os Cambissolos se destacam nessa região com distribuição de 45% do território. Outro aspecto importante dessa região é a ocorrência dos Vertissolos, até então desconhecidos para as condições acreanas e pouco prováveis para o ambiente amazônico. Esses solos são típicos de clima árido, o que indica que em épocas mais remotas a região sofreu uma forte aridez e esses solos são evidências desde período. Essa ordem de solo predomina em Sena Madureira, com 9% da região. Também é preciso destacar os Argissolos, com 33% de toda a área, recobrindo grande parte desse município (ACRE, 2012).

Rio Acre e Riozinho do Rôla

O Rio Acre, afluente direto do rio Purus, nasce em território peruano com o nome de rio Eva, em cotas da ordem de 400 m, e corre na direção Oeste-Leste, deixando-o na altura do município de Iñapari, e segue fazendo fronteira com Brasil e Bolívia. Em território acreano, a bacia tem uma área equivalente a 27.263 km². Seu principal afluente é o Riozinho do Rôla, com uma área estimada de 7.606 km² (ACRE, 2012).

Rio Iaco e Rio Caeté

O rio Iaco também é afluente direto do rio Purus e tem uma área de drenagem de aproximadamente 18.000 km^2 . Seu principal afluente é o rio Caeté, com uma área estimada de 6.110 km² (ACRE, 2012).

Igarapés

O estudo também foi conduzido em dois igarapés, localizados na Reserva Florestal Humaitá (igarapé Escondido) e na Fazenda Experimental Catuaba (igarapé Floresta), áreas de pesquisa da Universidade Federal do Acre - UFAC.

A Reserva Florestal Humaitá (9° 45' 1,9'' S 67° 40'18,8'' W) possui uma área de 2.000 ha e está localizada a cerca de 33 km de Rio Branco, no município de Porto Acre (Figura C). O relevo na área é suave-ondulado e cortado por igarapés estreitos e profundos que alagam as regiões mais baixas do terreno durante o período chuvoso. A vegetação predominante é a Floresta Tropical Aberta em baixos platôs (SILVEIRA, 1999), mas existem áreas cobertas por floresta densa e floresta de várzea.

A Fazenda Experimental Catuaba (10° 04' S e 67° 37' W) está localizada na região leste do estado, a aproximadamente 23 km da cidade de Rio Branco (Figura D). Embora esteja localizada em uma região de domínio da Floresta Ombrófila Densa, a vegetação que cobre os 860 ha de terreno relativamente plano, é formada por um mosaico de manchas pequenas de floresta densa imersas em uma matriz de floresta aberta com bambu (SILVEIRA, 1999).

Além de apresentar diferenças quanto ao tipo de vegetação, essas duas áreas também apresentam tipologias de solo diferenciadas. A Tabela A mostra as características físicas e químicas do solo em ambas as áreas, onde é possível observar que na Reserva Florestal Humaitá o solo possui uma quantidade considerável de silte (53%), enquanto que na Fazenda Experimental Catuaba a predominância é de areia (62%). Os valores de pH também se distinguem, com um valor de 4,5 para Humaitá e 4,1 para Catuaba. O mesmo acontece para o conteúdo de carbono orgânico no solo, com valores de 15,65 e 8,56 g Kg⁻¹, respectivamente. Quanto às concentrações de nutrientes, Humaitá apresenta solos mais ricos em relação a Catuaba. Desta forma, o solo predominante na Reserva Humaitá é classificado como Argissolo, enquanto que na Fazenda Catuaba a predominância é de Latossolo.



Figura C – Mapa de localização da Reserva Florestal Humaitá e igarapé Escondido.



Figura D – Mapa de localização da Fazenda Experimental Catuaba e igarapé Floresta.

	Res. Flor. Humaitá		Faz. Exp.	Catuaba
	Horizonte A	Horizonte B	Horizonte A	Horizonte B
рН	4,5	4,6	4,1	4,0
Ca ²⁺	2,59±2,6	1,76±1,35	1,63±1,24	0,10±0,09
Mg^{2+}	2,66±1,76	2,69±1,44	0,67±0,44	0,40±0,29
\mathbf{K}^{+}	0,16±0,09	0,12±0,04	0,20±0,12	$0,08{\pm}0,04$
Na ⁺	0,09±0,06	0,06±0,04	0,05±0,03	0,05±0,04
Al^{3+}	1,79±1,35	8,31±5,63	0,82±0,96	2,49±1,05
Al + H	5,56±2,80	10,58±6,01	3,42±1,47	3,61±1,06
C.O.	15,65±4,21	2,11±0,95	8,56±3,33	2,30±0,69
Areia %	25	16	62	47
Silte %	53	36	19	19
Argila %	22	48	19	34

Tabela A. Características físicas e químicas dos solos da Reserva Florestal Humaitá e Fazenda Experimental Catuaba (Fonte: Departamento de Solos/ UFAC).

Nutriente em cmol_c/dm³ e C.O. em g/Kg

REFERÊNCIAS

ACRE. Governo do Estado do Acre. **Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do** Acre, Fase II (Escala 1:250.000): Documento Síntese. 2. ed. Rio Branco: SEMA, 2010.

ACRE. Governo do Estado do Acre. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Acre. Rio Branco: SEMA, 2012.

AMARAL, E. F. **Relatório sobre solos do estado do Acre.** Solos do Acre. Rio Branco: SEMA/IMAC, 2006. (Texto integrante do eixo Recursos Naturais do ZEE Fase II).

ELLIS, E. E.; RICHEY, J. E.; AUFDENKAMPE, A. K.; KRUSCHE, A. V.; QUAY, P. D.; SALIMON, C. I.; CUNHA, H. B. Factors controlling water-column respiration in rivers of the central and southwestern Amazon Basin. **Limnology and Oceanography**, Grafton, v. 57, p. 527–540, 2012. DOI: 10.4319/lo.2012.57.2.0527.

RASERA, M. F. F. L. Determinação dos fluxos de CO₂ e parâmetros físicos envolvidos nestes processos em diferentes ambientes fluviais da Amazônia. 2010. 125 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

RASERA, M. F. F. L.; BALLESTER, M. V. R.; KRUSCHE, A. V.; SALIMON, C. I.; MONTEBELO, L. A.; ALIN, S. R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. Estimating the superficial area of small rivers in the southwestern Amazon and their role in CO₂ outgassing. **Earth Interactions**, Washington, DC, v. 12, p. 1-16, 2008. DOI: 10.1175/2008EI257.1.

RICHEY, J. E.; MELACK, J. M.; AUFDENKAMPE, A. K.; BALLESTER, M. V. R.; HESS, L. L. From water to the atmosphere: carbon dioxide evasion from the Amazon River system. **Nature**, London, v. 416, p. 617-620, 2002.

MAYORGA, E.; AUFDENKAMPE, A. K.; MACIELLO, C. A.; KRUSCHE, A. V.; HEDGES, J. I.; QUAY, P. D.; RICHEY, J. E; BROWN, T. A. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. **Nature**, London, v. 436, p. 538-541, 2005. DOI: 10.1038/nature03880.

SILVEIRA, M. Ecological aspects of bamboo-dominate Forest in Southwestern Amazonia: an ethnoscience perspective. **Ecotropica**, Marburg, Germany, v. 5, p. 213-216, 1999.

103-106, 1992.
1 VARIABILIDADE ESPACIAL NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E NO FLUXO EVASIVO DE CO₂ EM RIOS E IGARAPÉS NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

RESUMO

Rios da região sudoeste da Amazônia ainda são pouco estudados quanto ao seu papel no ciclo regional do carbono, apesar de formarem dois dos principais tributários do rio Solimões/Amazonas, os rios Juruá e Purus. Este capítulo tem como objetivo principal contribuir para a caracterização química de cinco rios de médio porte (Rio Purus, Rio Acre, Rio Iaco, Rio Caeté e Riozinho do Rôla) e dois igarapés da bacia do rio Purus, relacionando-a com a evasão de CO₂ dos mesmos para a atmosfera. Para assegurar que as águas amostradas fossem oriundas apenas do fluxo de base, as coletas foram concentradas entre julho e setembro de 2011, período de seca na região. Foram quantificadas as concentrações de íons maiores, incluindo carbono inorgânico dissolvido (CID) e sua composição isotópica ($\delta^{13}C$ do CID). Também foram realizadas medidas de pH, condutividade elétrica, pressão parcial do CO_2 (pCO₂) e medidas de fluxos de CO₂. Os resultados mostraram que os rios estudados apresentam águas ricas em íons, principalmente Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} e HCO_3^{-} , e que as maiores concentrações destes íons são encontradas nos sistemas que drenam solos mais férteis. As concentrações de CID também foram altas nos rios, com a maior fração do mesmo na forma de HCO₃⁻. Nos igarapés foram observadas concentrações de CID muito inferiores, com sua maior fração da forma de CO2 livre. A composição isotópica do CID mostrou que nos rios há maior influência do intemperismo do que nos igarapés. Com relação aos fluxos de CO₂, os mesmos tiveram correlação com os valores de TZ⁺ apenas nos rios. Nos igarapés, os fluxos de CO₂ foram mais correlacionados com a velocidade da corrente.

ABSTRACT

Rivers of southwestern Amazon region are still poorly studied regarding their role in the regional carbon cycle, although they form the two main tributaries of the river Solimões/Amazonas, Juruá and Purus Rivers. In this chapter we characterize the chemical composition of five medium-sized rivers (Purus River, Acre River, Iaco River, Caeté River and Rôla River) and two streams of the Purus River basin, linking it to CO₂ evasion. To ensure that waters sampled were representative of base flow, they were collected between July and September 2011, during the dry t season in the region. We quantified major ions concentrations, including dissolved inorganic carbon (DIC) and its isotopic composition $(\delta^{13}$ CID). Additionally, we measured pH, electrical conductivity, partial pressure of CO₂ (pCO_2) and CO₂ fluxes. The results showed that rivers had ion-rich waters, particularly Ca²⁺, Na^+ , SO_4^{2-} and HCO_3^- , and that the highest concentrations were found in systems draining more fertile soils. DIC concentrations were also high in the rivers, with its largest fraction is the form of HCO_3 . In the streams, we observed lower DIC concentrations and the greater fraction in the form of free CO₂. δ^{13} CID in the rivers indicate a greater influence of weathering than in the streams. CO_2 fluxes were correlated with TZ^+ values only in the rivers. In the streams, CO₂ fluxes showed better correlations with current speed.

1.1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente considerados como transportadores de carbono e outros materiais do ambiente terrestre para os oceanos, recentemente os rios passaram a serem vistos como componentes mais relevantes dos ciclos regional e global do carbono. Estudos têm mostrado que a magnitude da evasão de carbono destes para a atmosfera, não somente na forma de dióxido de carbono (CO_2), mas também na forma de metano (CH_4), é muito maior do que aquela transportada para os oceanos na forma de carbono particulado e dissolvido. Em 2002, Richey et al. mostraram que só a Bacia Amazônica emite cerca de 470 Tg C ano⁻¹ para a atmosfera, uma quantidade de carbono cerca de 13 vezes maior do que é transportado pelo rio Amazonas para o mar. A partir de então, rios e áreas alagáveis da região passaram a ser investigados, com o objetivo de aprimorar as estimativas desses fluxos, a partir do emprego das mesmas metodologias de amostragem e analíticas em diferentes sistemas aquáticos da bacia Amazônica. Contudo, a maioria dos estudos está concentrada na região central da bacia, e em grandes rios. Estudos sobre a evasão de CO_2 em rios e igarapés no sudoeste da Amazônia, por exemplo, ainda são escassos.

A supersaturação de CO_2 observada nestas águas se deve principalmente aos processos de respiração da matéria orgânica de origem terrestre (RICHEY et al., 1990; RICHEY et al., 2002; MAYORGA et al., 2005). Desta forma, o ambiente terrestre constitui a principal fonte de carbono orgânico para o ambiente aquático. No período de estiagem, quando igarapés e rios são alimentados principalmente por água do solo e água subterrânea, a geologia de cada bacia também desempenha papel fundamental na dinâmica do carbono inorgânico dissolvido nesses sistemas.

A Bacia Amazônica ocupa cerca de 6 milhões de km², drenando diferentes regiões com características edáficas distintas, o que resulta em grande variedade das características químicas e físicas das suas águas superficiais. A primeira classificação das águas amazônicas foi feita por Sioli em 1950, e foi baseada na coloração da água. Os rios foram divididos em três categorias: (i) rios de águas claras, os quais transportam baixa concentração de sólidos em suspensão e matéria orgânica dissolvida, com pH próximo a neutralidade, (ii) rios de águas pretas, com grandes concentrações de material dissolvido, baixa concentração de sólidos em suspensão e pH ácido e (iii) rios de águas brancas, os quais transportam uma elevada concentração de sólidos em suspensão e matéria orgânica e pH próximo a neutralidade (SIOLI, 1985).

No entanto, a classificação feita por Sioli já se encontra muito defasada e explica pouco sobre os processos biogeoquímicos dos rios da região. Hoje já se sabe que há rios de água preta com características muito similares a rios de água branca e rios de água clara com características de rios de água preta. Ou seja, os rios amazônicos apresentam um grande espectro que variam de acordo com a geologia de cada bacia, com sistemas que drenam rochas recentes nos Andes, carregando muito sedimento e ricos em sais até sistemas que drenam rochas muito intemperizadas na planície amazônica, com águas pobres em sais e sedimentos em suspensão. Respectivamente tais águas possuem pHs próximos a neutralidade até valores ácidos.

Estudando diferentes rios considerados de porte médio para a região, Rasera (2010) observou diferenças nos fluxos e nas concentrações da CO_2 relacionadas com a tipologia das águas. Rios com baixa concentração de sedimentos em suspensão e disponibilidade de nutrientes, como Araguaia e Teles Pires, por exemplo, apresentaram fluxos negativos durante o período de seca, mostrando que a absorção de CO_2 nestes rios é bastante significativa, provavelmente pelas condições favoráveis à produtividade primária. Comparativamente, o rio Caxiuanã, com menores concentrações de íons e pH mais ácido, apresentou os maiores valores da pressão parcial de CO_2 (pCO_2). A autora observou que, apesar do rio Araguaia apresentar concentrações mais elevadas de carbono inorgânico dissolvido (CID), os maiores valores de pCO_2 ocorreram no rio Caxiuanã . A autora atribuiu esta dicotomia ao fato do pH ser mais ácido no rio Caxiuanã e, portanto, conter uma maior porcentagem de DIC na fração de CO_2O estudo citado não incluiu rios com concentrações mais elevadas de sedimentos em suspensão.

O tamanho dos rios também deve ser considerado, uma vez que sistemas de pequena ordem apresentam maior ligação com o ambiente terrestre em comparação a sistemas maiores. Rasera et al. (2008), mostraram que rios com menos de 100 m de largura são responsáveis por 82% da evasão total de CO₂ da bacia do rio Ji-Paraná. Os autores salientam ainda que esses valores são conservativos, uma vez que sistemas de 1^a e 2^a ordem não foram considerados e os mesmos desempenham papel substancial na evasão de CO₂, já que suas concentrações de CO₂ são elevadas devido à contribuição de água do solo rica em CO₂ durante o período de estiagem. De fato, Johnson et al. (2008), estudaram sistemas de primeira ordem em Mato Grosso e observaram valores da *p*CO₂ acima de 50000 ppmv. Considerando os dados destes autores e aqueles de Richey et al. (2002), a evasão total da bacia Amazônica excede os 580 Tg CO_2 -C ano⁻¹. Apesar dos estudos referentes à dinâmica do carbono em rios já serem realizados na Amazônia há mais de 30 anos, ainda existem regiões nas quais os mesmos ainda são escassos. Rios que drenam a região sudoeste da Amazônia ainda são pouco conhecidos quanto ao seu papel no ciclo regional do carbono. São rios importantes, uma vez que formam dois dos principais tributários do Solimões/Amazonas, os rios Juruá e Purus. Este capítulo tem como objetivo principal verificar se existem diferenças nos fluxos de CO₂ relacionadas com as principais características químicas de rios e igarapés de diferentes ordens da bacia do rio Purus. Para tal, as amostragens se concentraram no período seco (julho a setembro de 2011), quando os rios e igarapés apresentam características químicas provenientes do fluxo de base, sem influência de fatores como precipitação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as características químicas dos rios e igarapés;
- Quantificar as concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID);
- A partir da composição isotópica do CID, identificar as possíveis fontes do mesmo e;
- Quantificar a pressão parcial (pCO₂) e o fluxo evasivo de CO₂.

1.3 HIPÓTESE

 A variabilidade espacial dos fluxos de CO₂ dos rios e igarapés apresenta estreita relação com as características químicas de suas águas.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1 Área de Estudo e Pontos de Amostragem

As amostragens foram realizadas em rios e igarapés pertencentes à bacia do rio Purus (Figura B). Foram escolhidos cinco rios, Purus - RP, Acre - RA, Iaco - RI Caeté - RC e Riozinho do Rôla – RR e dois igarapés, igarapé Floresta - IF e igarapé Escondido - IE. A descrição detalhada da área de estudo pode ser encontrada no item DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO, na página 25.

Foram feitas coletas de água e medidas diretas de parâmetros físicos e químicos nos rios e igarapés entre julho e setembro de 2011, meses que representam o período de estiagem na região.

1.4.2 Métodos Amostrais

1.4.2.1 Medidas de fluxo de CO₂ e pCO₂

O fluxo de CO_2 foi medido com câmara estática flutuante (Figura 1.1). A câmara é construída com Plexiglass[®] (área superficial de 0,1 m² e volume de 18,3 L), conectada a um circuito fechado de ar e acoplada a um equipamento de detecção de CO_2 por infravermelho, da marca LiCor, modelo 820. O ar circula através da câmara e do analisador de gás por infravermelho utilizando uma minibomba que mantém o fluxo de aproximadamente 150 mL min⁻¹. As paredes da câmara se estendem 2 cm dentro da coluna d'água. Em cada rio e igarapé, foram realizadas 4 réplicas, de aproximadamente 5 minutos cada.

O fluxo foi determinado pela variação da pCO_2 no ar atmosférico dentro da câmara ao longo do tempo amostral. Para seu cálculo, empregou-se a seguinte equação (FRANKIGNOULLE et al., 1998):

$$F = (\delta p CO_2 / \delta t) (V / RTA)$$

onde F é o fluxo (mol CO₂ m⁻² s⁻¹), ($\delta pCO_2/\delta t$) representa a mudança de concentração de CO₂ durante a medida e é dado pela inclinação da reta ($\mu atm s^{-1}$) calculada através da regressão linear entre o tempo e a pCO_2 no ar dentro da câmara, V é o volume (m³) do sistema (câmara, tubos e célula do analisador), R é a constante do gás (atm m³ mol⁻¹ K⁻¹), T a temperatura do ar e A é a área superficial de água na câmara (m²). O analisador de gás foi calibrado com padrões certificados (CO₂: 381±2 e 4057±8 µatm; White Martins) antes de cada período amostral.



Figura 1.1 - Câmara flutuante usada para as medidas de fluxo de CO₂.

As medidas da pressão parcial do CO_2 (pCO_2) na água foram feitas através de um equilibrador (Figura 1.2) similar ao desenvolvido por Frankignoulle et al. (2001), o qual consiste de um tubo vertical de Plexiglass[®] (altura de 80 cm e diâmetro de 8 cm) preenchido com esferas de vidro para aumentar a superfície de troca e reduzir o volume de ar. A água coletada a aproximadamente 30 cm de profundidade por uma bomba submersa passa pelo

tubo, de cima para baixo, em um fluxo constante de cerca de 1,5 L min⁻¹. Uma minibomba de ar promove um circuito fechado de ar $(0,8 \text{ L min}^{-1})$ que circula pelo equilibrador (de baixo para cima) passando por um '*trap*' de umidade (sílica), um filtro de ar e pelo mesmo analisador de gás infra-vermelho usado com a câmara flutuante. Foi realizada uma medida em cada rio e igarapé, com duração de aproximadamente 10 min, após o equilíbrio da *p*CO₂.



Figura 1.2 - Equilibrador usado para as medidas diretas da pCO_2 .

1.4.2.2 Amostras de água

Com o auxílio de uma bomba submersa, foram retiradas as seguintes alíquotas da água:

 uma amostra de 5 L, acondicionada em caixa térmica com gelo e levada ao Laboratório de Limnologia da UFAC, a qual foi filtrada com uma peneira de 60 µm. Dessa amostra foi retirada uma alíquota de 60 ml, novamente filtrada com filtro de acetato de celulose (porosidade de 0,45 μ m), e preservada com *thymol* para a determinação da concentração de carbono inorgânico dissolvido e nutrientes;

 3 amostras de 65 ml, coletadas sem filtração em frascos de DBO e fixadas com HgCl₂ para a determinação da composição isotópica do CID.

1.4.2.3 Medidas auxiliares

As medidas de pH foram feitas com peagômetro portátil Orion, modelo 290Aplus e a condutividade elétrica com um condutivímetro VWR, modelo 2052. As medidas foram feitas submergindo os eletrodos diretamente na coluna d'água, à aproximadamente 50 cm de profundidade.

Também foram realizadas medidas de velocidade do vento e temperatura do ar, com um anemômetro Instrumentium modelo THAL 300. As medidas de velocidade da corrente foram feitas com um medidor de fluxo Global Water, modelo FP 101.

1.4.3 Métodos Analíticos

1.4.3.1 Análise de íons maiores (com exceção de carbonatos) e nutrientes

A determinação das concentrações iônicas, à exceção dos carbonatos, empregou técnicas espectrométricas. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e SO_4^{2-} foram determinados por espectrometria de emissão ótica em sistema com indução por plasma (em inglês, ICP-OES) em equipamento Horiba Jobin-Yvon, modelo Ultima 2. NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^+ e Cl⁻ foram determinados por colorimetria no visível, em equipamento de análise por injeção em fluxo (do inglês FIA) da marca Foss Tecator, modelo FIASTAR 5000. Ambos os equipamentos foram calibrados com padrões externos e a cada análise sua performance avaliada por meio de amostra certificada (BigMoose-02, NWRI, Canada).

1.4.3.2 Análise da concentração de CID

As concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID) foram quantificadas na forma de CO_2 em um analisador por infravermelho não dispersivo (analisador de Carbono Orgânico Total, Shimadzu, modelo TOC-VCPH). A amostra é injetada e carreada para dentro de um recipiente com ácido, onde os carbonatos passam à forma de CO_2 , que é então carreado por um fluxo de ar sintético, passando por uma coluna de resfriamento, um desumidificador eletrônico, um removedor de gases halogenados e uma membrana de filtro até o detector (a detecção é feita em sensor de absorção no comprimento de onda do infravermelho), onde o CO_2 é quantificado. As concentrações foram determinadas por comparação com padrões externos e a performance averiguada com amostra certificada, como acima.

As concentrações de CO_2 livre, do bicarbonato (HCO_3^{-}) e do carbonato ($CO_3^{2^-}$) foram calculadas a partir das concentrações de carbono inorgânico dissolvido total, do pH e das temperaturas, empregando-se as equações de equilíbrio termodinâmico (STUMM; MORGAN, 1996).

1.4.3.3 Análise da composição isotópica do CID (δ^{13} CID)

A determinação da composição isotópica do CID foi feita por espectrometria de massas, em um espectrômetro de massa da marca Finnigan, modelo Delta Plus. O CID presente na amostra foi convertido em CO_2 por acidificação dentro de uma linha de alto vácuo, purificado em armadilhas de nitrogênio liquido e então injetado no espectrômetro de massas. A quantificação foi feita em relação a padrões externos certificados.

1.4.4 Análise Estatística

As variáveis foram primeiramente testadas quanto à sua homogeneidade de variância e também quanto à sua distribuição utilizando o teste de Shapiro-Wilks, sendo a normalidade rejeitada para p < 0,05. Para os parâmetros que não apresentaram distribuição normal, optouse por utilizar testes não paramétricos. O teste de Kruskall-Wallis, seguido do teste de Mann-Whitney U foram usados para testar as diferenças nas variáveis entre os diferentes sistemas estudados. A matriz de correlação entre as variáveis foi gerada utilizando-se a correlação de Pearson e Spearman. As análises foram feitas utilizando o programa R.

1.5 RESULTADOS

1.5.1 Caracterização Química dos Rio e Igarapés

1.5.1.1 pH e condutividade elétrica

A maioria dos rios apresentou pH acima do valor de neutralidade (Figura 1.3). Nos rios Purus e Iaco, os valores de pH foram iguais a 8,18 e 8,17, respectivamente. Rio Acre e rio Caeté apresentaram valores semelhantes (7,60 no rio Acre e 7,57 no rio Caeté), enquanto que o Riozinho do Rôla apresentou o valor mais baixo, 6,81. O igarapé Floresta apresentou o valor mais ácido (5,78), enquanto que o igarapé Escondido apresentou pH igual a 6,31. O teste de Kruskal-Wallis mostrou que existem diferenças significativa nos valores de pH entre os rios e igarapés (p < 0,05).



Figura 1.3 – Valores de pH nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados.

Santos e Ribeiro (1988) realizaram amostragens ao longo do rio Solimões/Amazonas e observaram uma variabilidade espacial nos valores de pH relacionada com a tipologia de água. No canal principal, os valores de pH estiveram entre 6,39 e 7,20 enquanto que nos afluentes e subafluentes, os valores estiveram entre 4,39 e 6,96. Os valores mais altos de pH no canal principal do rio Solimões foram observados à montante e foram diminuindo a medida que o rio recebia contribuição de afluentes com águas mais ácidas.

Este padrão também foi observado neste estudo, pois apesar de os rios amostrados serem todos classificados como rios de água branca, é possível observar que existem diferenças nos seus valores de pH. Essas diferenças podem estar relacionadas tanto com a geologia de cada sub-bacia (características do solo) quanto com o tamanho do sistema. Os valores mais baixos de pH, por exemplo, foram observados nos rios menores, como no Riozinho do Rôla e nos igarapés, ao passo que os valores mais altos foram observados nos rios maiores e que drenam solos mais ricos, como Purus e Iaco, cujos valores de pH estiveram acima de 8,0.

Para os valores de condutividade elétrica (Figura 1.4). O Iaco apresentou o valor mais alto, com uma condutividade elétrica de 460,2 \pm 44,1 μ S cm⁻¹. O rio Purus apresentou valor próximo (430,2 \pm 28,7 μ S cm⁻¹) e o rio Caeté apresentou um valor igual a 268,0 \pm 40,4 μ S cm⁻¹. Os rios Acre e Rôla apresentaram valores mais baixos, com 132,5 \pm 19,0 μ S cm⁻¹ no rio Acre e 125,4 \pm 22,5 μ S cm⁻¹ no Riozinho do Rôla. O igarapé Floresta apresentou valor de condutividade elétrica igual a 7,7 \pm 1,39 μ S cm⁻¹, enquanto que o igarapé Escondido apresentou valor igual a 48,2 \pm 10,1 μ S cm⁻¹. As diferenças entre os valores de condutividade elétrica entre os rios e igarapés foram significativas (p < 0,05).

A condutividade elétrica é determinada pelas concentrações dos chamados íons maiores, sódio (Na⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), potássio (K⁺), carbonatos (HCO₃⁻ e $CO_3^{2^-}$), cloreto (Cl⁻) e sulfato (SO₄²⁻). Leite (2004) observou que os valores de condutividade elétrica de rios da bacia do rio Ji-Paraná apresentam uma estreita relação características dos solos de cada sub-bacia, com as maiores concentrações observadas onde os solos são mais férteis.



Figura 1.4 – Valores de condutividade elétrica (em μS cm⁻¹) nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados.

1.5.1.2 Íons maiores

É possível observar a relação entre as características dos solos e as concentrações de íons nos rios e igarapés. Todos os rios amostrados apresentaram águas consideravelmente ricas em relação a outros rios da Amazônia. O cátion predominante foi o cálcio (Ca²⁺), com concentrações variando entre 317,1 ± 81,4 (no Riozinho do Rôla) e 541,4 ± 208 μ M (no Rio Purus). O segundo cátion mais importante foi o sódio (Na⁺), com concentrações variando entre 221,3 ± 77,2 (no Riozinho do Rôla) e 590,0 ± 198,5 μ M (no Rio Iaco).

A Figura 1.5 mostra o diagrama ternário dos principais cátions (Na⁺, Ca²⁺, K⁺ e Mg^{2+}). De acordo com Drever (1997), diagramas ternários servem para demonstrar os "tipos" de águas de maneira visualmente clara e para testar se a composição química das mesmas resulta da mistura de fontes distintas. Assim, podemos observar que com relação às concentrações de cátions, há uma mistura de duas fontes predominantes e com origens distintas. Leite (2004) também observou este mesmo padrão em rios da bacia do rio Ji-Paraná (RO).

O sulfato $(SO_4^{2^-})$ foi o ânion predominante nos rios (excluindo-se o bicarbonato que será discutido com as frações de CID) com concentrações variando de $104,2 \pm 15,2 \mu M$ no Rio Acre a $309,3 \pm 82,3 \mu M$ no Riozinho do Rôla. O segundo ânion predominante foi o cloreto (CI⁻), com concentrações entre $20,4 \pm 7,1$ (Rio Purus) e $32,0 \pm 14,2 \mu M$ (Riozinho do Rôla). A Figura 1.5 mostra o diagrama ternário para os principais ânions ($SO_4^{2^-}$, CI⁻ e HCO₃⁻). Observa-se a influência do sulfato e do bicarbonato na composição química das águas, principalmente nos rios.

Essa relação entre a fertilidade do solo e condutividade elétrica também foi observada nos igarapés. As maiores concentrações de íons foram encontradas no igarapé Escondido, o qual drena um terreno mais fértil (SOUSA et al., 2008). Neste igarapé, a predominância entre os cátions foi do Ca^{2+} (86,6 ± 11,1) seguido pelo K⁺ (60,2 ± 8,6 µM). Dentre os ânions, o Cl⁻ foi o mais importante, com uma concentração igual a 30,7 ± 3,9 µM, seguido pelo NO₃⁻, com uma concentração de 17,0 ± 2,5 µM. A Tabela 1.1 mostra as concentrações dos principais íons nos rios e igarapés amostrados.



Figura 1.5 – Diagrama ternário elaborado a partir das concentrações dos principais cátions nas amostras de água dos rios e igarapés.



Figura 1.6 – Diagrama ternário elaborado a partir das concentrações dos principais ânions nas amostras de água dos rios e igarapés.

 $Tabela \ 1.1 - Concentrações \ médias \ e \ desvio \ padrão \ dos \ principais \ cátions \ e \ anions \ (em \ \mu M) \ nos \ igarapés \ e \ rios \ amostrados.$

	Ca ²⁺	\mathbf{K}^{+}	Mg ²⁺	\mathbf{Na}^{+}	NH4 ⁺	SO ₄ ²⁻	PO ₃ ²⁻	CI.	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	HCO ₃ ⁻	CO3 ²⁻
			8				- 3	-	3	4	5	5
Ig. Floresta	10,59±1,60	15,60±5,56	7,36±0,23	8,08±1,51	2,22±0,77	25,85±24,77	0,34±0,18	9,30±2,94	9,41±1,26	1,19±0,45	23,2±10,7	0,00
Ig. Escondido	86,55±11,08	60,21±8,63	51,98±8,80	17,85±1,05	3,10±0,48	9,35±3,85	0,46±0,08	30,73±3,88	17,02±2,52	1,85±0,51	145,5±61,7	0,01±0,01
Rio Purus	541,44±207,98	88,20±11,71	390,02±18,50	575,23±87,05	0,99±0,40	115,67±7,83	4,07±0,39	20,41±7,09	4,98±1,01	1,99±0,67	4081,3±141,2	33,2±8,9
Rio Acre	351,90±90,93	96,38±9,08	150,28±36,13	224,78±45,94	1,56±0,48	104,23±15,22	0,73±0,22	30,33±13,48	5,89±1,94	1,91±0,45	888,3±207,4	1,72±0,73
Rio Iaco	536,96±188,47	112,33±17,90	520,61±167,02	590,01±198,46	51,03±0,57	118,82±95,65	1,03±0,20	30,34±7,78	8,91±2,78	2,25±0,88	4144,6±381,4	32,2±8,6
Rioz. do Rôla	317,07±81,37	72,35±9,11	156,54±24,67	221,27±77,18	2,01±0,61	309,29±82,26	0,54±0,59	32,14±14,23	14,44±11,05	51,96±0,41	422,0±81,6	0,19±0,12
Rio Caeté	503,43±180,10	103,76±40,91	302,56±82,71	306,79±89,36	1,23±0,35	173,80±146,35	50,36±0,11	27,97±7,27	5,05±0,44	1,73±0,58	1783,6±479,2	8,0±11,9

1.5.2 Carbono Inorgânico Dissolvido (CID)

1.5.2.1 Concentração de CID total

As concentrações mais altas de CID total (Figura 1.7) foram observadas nos rios Iaco e Purus, com valores iguais a 4.237,0 \pm 389,2 μ M e 4.175,0 \pm 148,8 μ M, respectivamente. O rio Caeté apresentou uma concentração intermediária (1927,3 \pm 393,7 μ mol), enquanto que os rios Acre e Riozinho do Rôla apresentaram as concentrações mais baixas, 941,5 \pm 206,8 μ M e 545,2 \pm 112,1 μ M, respectivamente. Nos igarapés, a concentração mais alta foi encontrada no igarapé Escondido, (313,5 \pm 146,6 μ M), enquanto que o igarapé Floresta apresentou uma concentração igual a 57,0 \pm 9,4 μ M. As diferenças nas concentrações de CID entre os sistemas foram significativas (p < 0,05).

As maiores concentrações foram encontradas nos rios que drenam solos mais férteis, assim como foi observado também nos igarapés, com as maiores concentrações encontradas no igarapé Escondido. Rasera (2005), estudando rios da bacia do Ji-Paraná (RO), também observou que as maiores concentrações foram encontradas nos pontos que drenam regiões de solos eutróficos, como nos rios Jaru (493 μ M), Rolim de Moura (609,8 μ M) e Urupá (524,2 μ M). As menores concentrações de CID foram observadas nos pontos que drenam regiões de solos distróficos, como na cabeceira dos rios Comemoração (37,3 μ M) e Pimenta Bueno (37,4 μ M).



Figura 1.7 – Concentrações de CID (em μM) nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados.

1.5.2.2 Frações de CID

Com relação às frações do CID (CO₂ livre, HCO_3^- e CO₃²⁻), observa-se que nos rios Iaco e Purus, a predominância do íon bicarbonato (HCO_3^-) é de 98%, seguido pelos rios Acre e Caeté, com predominâncias entre 94 e 92%, respectivamente. No Riozinho do Rôla, foi observada a menor predominância deste íon, 78%. Nos igarapés, as concentrações de CO₂ livre e do íon HCO_3^- foram bem similares. No igarapé Floresta, observou-se que cerca de 60% do CID estão na forma de CO₂ livre, enquanto que 40% estão na forma de HCO_3^- . No igarapé Escondido, 53% estão na forma de CO₂ livre e 47% na forma de HCO_3^- (Tabela 1.2; Figura 1.8). A distribuição das frações do CID tem estreita relação com os valores de pH. Segundo Devol e Hedges (2001) as espécies dominantes de CID nas águas da Amazônia são o bicarbonato (HCO_3^{-}) e o CO_2 dissolvido. No canal principal do rio Amazonas cerca de 80% do CID está na forma de bicarbonato, sendo que esta porcentagem cai para cerca de 60% nos tributários e 50% nas áreas de várzea, devido a uma diminuição do pH nestas águas. De fato, nos rios Purus e Iaco, por exemplo, onde os valores de pH foram acima de 8,0, a predominância deste íon foi de quase 100% no CID total. No igarapé Floresta, onde o pH está em torno de 5,78, a predominância passa a ser do CO_2 livre. Rasera (2005) também observou que nas cabeceiras dos rios Comemoração e Pimenta Bueno, onde o pH se manteve entre 4,6 e 5,9, a porcentagem de CO_2 livre foi igual a 91 e 81%, respectivamente.



Figura 1.8 – Contribuição percentual das frações de CID (CO₃²⁻, HCO₃⁻ e CO₂ livre) nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados.

	pН	CID total	CO ₂ livre	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻
Ig. Floresta	5,78	57,0±9,4	33,8±10,2	23,2±10,7	0
Ig. Escondido	6,31	313,5±143,6	168,5±87,9	145,5±61,7	0,01±0,01
Rio Purus	8,18	4175,0±148,8	60,6±21,9	4081,3±141,2	33,2±8,9
Rio Acre	7,60	941,5±206,8	51,5±4,0	888,3±207,4	1,72±0,73
Rio Iaco	8,17	4237,0±389,2	60,2±12,7	4144,6±381,4	32,2±8,6
Rioz. do Rôla	6,81	545,2±121,1	123,0±47,8	422,0±81,6	0,19±0,12
Rio Caeté	7,57	1927,3±393,7	135,7±104,3	1783,6±479,2	8,0±11,9

Tabela 1.2 – Concentrações médias do CID total e das suas frações (em μ M) e valores de pH nos igarapés e rios amostrados.

1.5.3 Composição Isotópica do CID (δ^{13} C do CID)

Com relação à composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido (Figura 1.9), os valores do δ^{13} C do CID foram iguais a -12,9 ‰ no rio Acre e -15,4 ‰ no Riozinho do Rôla. No rio Iaco, o valor do δ^{13} C do CID foi igual a -13,1 ‰ e no rio Caeté -8,5 ‰. No rio Purus, o valor foi igual a -13,4 ‰. Nos igarapés, os valores do δ^{13} C do CID foram mais negativos, com -21,2 ‰ no igarapé Floresta e -22,1 ‰ no igarapé Escondido. Os rios e igarapés apresentaram diferenças significativas nos valores de δ^{13} C do CID entre si (p < 0,05).

Bolson (2006), estudando o rio Urupá em Rondônia, encontrou valores entre -16,9 e -7,6 ‰. O autor atribuiu essas diferenças nos valores do δ^{13} C do CID aos diferentes tipos e uso do solo na bacia do rio Urupá, com os valores mais negativos observados nas cabeceiras deste rio, onde há a ausência de rochas carbonatadas e uma presença quase exclusiva de plantas C3.



Figura 1.9 – Composição isotópica do CID (δ¹³C do CID) em ‰ para os rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados.

1.5.4 Pressão Parcial do CO₂ (pCO₂)

A pCO_2 nos rios variou entre 867±91,4 µatm no rio Acre e 2.260,4 ± 761,2 µatm no Riozinho do Rôla. Nos rios Iaco e Caeté, os valores variaram entre 1.318,4 ± 205,3 e 1.514,9 ± 573,8 µatm, respectivamente. No rio Purus, a pCO_2 foi igual a 1.128,9 ± 102 µatm. Nos igarapés, a pCO_2 foi de 1.941,3 ± 404,3 µatm no igarapé Floresta e 3.789,8 ± 152,6 µatm no igarapé Escondido (Figura 1.10). Houve diferenças significativas nos valores da pCO_2 entre os sistemas (p < 0,05).



Figura 1.10 – Pressão parcial do CO₂ (pCO₂) em μatm nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados.

Richey et al. (2002) encontraram valores médios anuais da pCO_2 em rios e áreas alagadas na região central da bacia Amazônica variando entre 4.350 ± 1.900 µatm no canal principal do rio Amazonas a 5.000±3.300 µatm na foz dos principais afluentes. Durante o período de seca, Rasera (2010) observou valores que variaram entre 310 ± 140 µatm no rio Teles Pires (MT) e 2.680±950 µatm no rio Curuá (PA).

Em sistemas de pequena ordem, esses valores são maiores. Johnson et al. (2008) encontrou valores da pCO_2 em nascentes iguais a 51.900 ± 1600 µatm. Valores muito semelhantes à pCO_2 do solo, que foi igual a 52.700 ± 1.400 µatm para perfil de solo entre 2-8 m. Neu (2009), estudando uma microbacia em Mato Grosso, observou uma média no valor da pCO_2 no período de seca igual a 9.656±2.171 µatm. Rosa (2007), estudando igarapés no sudoeste do Pará, observou maiores valores da pCO_2 nas nascentes dos mesmos em comparação aos demais trechos. No igarapé São João, por exemplo, a autora encontrou um valor médio de 23.805 µatm em sua nascente, enquanto que no trecho mais à jusante este valor caiu para 4.883 µatm. Como só tivemos um ponto de amostragem nos nossos igarapés, não foi possível observar esta variabilidade nos nossos resultados.

Este comportamento da pCO_2 está relacionado com a distribuição das frações do CID, que por sua vez tem estreita relação com os valores de pH. Tanto em grandes rios quanto nos sistemas de pequena ordem é possível observar esta relação. De fato, dentre os rios, o valor mais alto da pCO_2 foi observado no Riozinho do Rôla, o qual teve o pH mais baixo. A pCO_2 mais baixa foi observada no rio Acre, que apesar de não apresentar maiores valores de pH em relação ao demais rios, apresentou concentração de CID total mais baixa. Nos igarapés, a pCO_2 mais alta foi observada no igarapé Escondido, o qual teve pH um pouco mais alto em relação ao igarapé Floresta, no entanto apresentou maior concentração de CID total. A Figura 1.11 mostra a correlação entre os valores de pH e pCO_2 (r= -0,68 e p < 0,05).

Segundo Richey et al. (2002), os rios e áreas alagadas da região central da bacia amazônica apresentam concentrações de CO₂ dissolvido 10 a 30 vezes acima da concentração esperada para um equilíbrio com a atmosfera. Rasera (2005) também observou que nos rios da bacia do Ji-Paraná, as águas apresentaram-se sempre supersaturadas em CO₂ em relação à atmosfera, variando desde 1 até 23 vezes o valor esperado para o equilíbrio. Já Rasera (2010) observou valores da pCO_2 abaixo do equilíbrio com a atmosfera nos rios Araguaia e Teles Pires durante o período de seca. Nos nossos rios, essa proporção ficou entre 1 e 10 vezes acima da concentração atmosférica (para uma concentração de 387 μ atm). Vale ressaltar que os valores aqui apresentados são referentes ao período de seca, e que se os valores referentes ao período chuvoso forem considerados, essa proporção será consideravelmente maior.



Figura 1.11– Correlação de Spearman (r) entre os valores de pH e pressão parcial do CO₂ (*p*CO₂) nos igarapés e rios amostrados.

1.5.5 Fluxos de CO₂

Os fluxos nos rios variaram de 1,9 ±1,0 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no Riozinho do Rôla a 4,9 ± 3,2 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Iaco. O rio Caeté apresentou um valor igual a 4,1 ± 2,2 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹, enquanto que os rios Acre e Purus apresentaram valores iguais a 3,1 ± 0,8 e 3,41 ± 0,9 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹, respectivamente. Nos igarapés, os fluxos foram iguais a 6,5 ± 2,0 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no igarapé Floresta, enquanto que o igarapé Escondido apresentou um fluxo igual a 2,1 ± 1,0 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ (Figura 1.12). O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças significativas nos fluxos de CO₂ entre os sistemas (p < 0,05).

Em medidas realizadas em mais de 20 sistemas dentro da bacia Amazônica, Allin et al. (2010) encontraram valores de fluxos que variaram de 0,04 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ (canal principal do rio Tapajós) a 24,30 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ (igarapé na bacia do rio Negro). Na bacia do rio Ji-Paraná, Rasera (2008) encontrou valores variando entre 0,60 \pm 0,19 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no canal principal do rio Ji-Paraná e 12,63 \pm 1,49 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ em um igarapé de 3^a ordem. Estudando grandes rios Amazônicos, com diferentes topologias de águas, Rasera (2010) encontrou valores no período de seca que variaram entre -0,2 \pm 0,4 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Araguaia e 2,5 \pm 0,9 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Caxiuanã.



Figura 1.12 – Valores dos fluxos de CO₂ (em µmol CO₂ m⁻² s⁻¹) nos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados.

1.6. DISCUSSÃO

1.6.1 Variabilidade na Composição Química da Água

Baseado apenas nos valores de pH e condutividade elétrica já é possível se ter uma noção a cerca das características químicas dos rios e igarapés estudados e associá-las a diferenças nos fatores reguladores das mesmas.

O pH, além de fornecer informação a cerca das concentrações dos íons H⁺, também está diretamente relacionado com a distribuição das frações do CID, ou seja, apenas baseado nos valores de pH é possível saber quais das frações de carbonatos predominam em determinado sistema (ESTEVES, 1998). Esta relação foi bem pronunciada nos nossos rios e igarapés. Nos rios com pH acima de 7,0 (valor de neutralidade), a predominância foi do íon HCO_3^- . Já nos igarapés, que tiveram valores mais baixos, houve um equilíbrio entre as concentrações de CO_2 livre e de HCO_3^- . Sistemas com valores baixos de pH refletem a predominância de solos mais pobres e maior contribuição de água do solo rica em CO_2 (FINLAY, 2003; RASERA, 2005; JOHNSON et al., 2008).

Já a condutividade elétrica é resultado das concentrações de íons nos corpos d'água. Ambientes com águas mais 'ricas' tendem a ter valores elevados de condutividade elétrica. Este padrão foi observado no nosso estudo. O igarapé Floresta, por exemplo, teve uma condutividade elétrica de 7,7 enquanto que o rio Iaco teve uma condutividade igual a 460,2, ou seja, quase 60 vezes mais alta. Isto também é um reflexo da geologia de cada bacia. Durante o período de estiagem, os grandes rios são alimentados principalmente por água subterrânea, que dependendo do tipo de terreno, pode ser mais ou menos rica em íons (LEITE, 2004; BOLSON; 2006).

Stallard e Edmond (1983) desenvolveram um índice que permite classificar os corpos hídricos de acordo com o material de origem que os mesmos drenam. Este índice baseia-se no somatório dos íons maiores de carga positiva (TZ⁺) e na geologia, e estabelece quatro categorias: 1 – rios com águas com TZ⁺ <200 μ Eq L⁻¹ drenam terrenos mais intensamente intemperizados; 2 – rios com águas com 200 < TZ⁺ > 450 μ Eq L⁻¹ drenam terrenos ricos em silicatos; 3 – rios com águas com 450 < TZ⁺ > 3000 μ Eq L⁻¹ drenam terrenos dominados por carbonatos e possuem elevadas concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺, e SO₄²⁻; e 4 – rios com águas com TZ⁺ > 3000 μ Eq L⁻¹ drenam maciços de evaporitas.

A Figura 1.13 mostra os valores do somatório de cargas positivas para os rios e igarapés amostrados. Os igarapés, apesar de serem da mesma ordem, tem um TZ⁺ bastante diferente. Isto pode ser explicado pelo tipo de solo de cada bacia de drenagem. O igarapé Escondido, que drena solo mais fértil, apresentou um TZ⁺ quase 7 vezes superior ao do igarapé Floresta. Já os rios apresentaram valores bem superiores. Como é possível observar, os rios Acre e Riozinho do Rôla apresentam um TZ⁺ em torno de 1300 μ Eq L⁻¹, enquanto que os demais rios apresentaram valores acima de 2000 μ Eq L⁻¹ (rio Iaco apresentou um TZ⁺ igual a 3020,8 μ Eq L⁻¹). Essas diferenças no somatório de cátions, e consequentemente, nas concentrações de íons maiores, estão relacionadas também com a geologia das bacias de drenagem. As cabeceiras destes rios estão em terrenos onde as concentrações de íons são elevadas. Acre e Rola têm uma porcentagem de sua bacia em Latossolo, que são solos mais pobres em nutrientes, quando comparado com os Argissolos e Cambissolos do Iaco, Caeté e Purus.



Figura 1.13 – Valores do somatório de cargas positivas (TZ⁺ em μEq L⁻¹) nas águas dos rios (Rio Purus – RP, Rio Acre – RA, Rio Iaco – RI, Riozinho do Rôla – RR e Rio Caeté – RC) e igarapés (Igarapé Floresta – IF e Igarapé Escondido – IE) amostrados.

Em termos comparativos, é possivel afirmar que os valores aqui apresentados para TZ^+ são bem superiores daqueles encontrados em outros sistemas da bacia Amazônia. Krusche et al., (2005), encontrou valores de TZ^+ variando entre 25 e 729 µEq L⁻¹ em rios da bacia do rio Ji-Paraná (RO), enquanto que nossos valores estiveram entre 62,0 e 3020,8 µEq.L⁻¹. Mesmo que os autores tenham considerado concentrações em período sazonais diferentes e nossos resultados sejam apenas referentes período ao de seca (quando as concentrações de íons são mais elevadas em sistemas com rochas pouco intemperizadas), a diferença ainda pode ser bastante significativa.

Por drenar um solo mais pobre, o igarapé Floresta apresentou as menores concentrações de íons e teve como cátion mais abundante o K^+ , ao passo que, o igarapé Escondido teve como cátion mais abundante o Ca^{2+} , comportamento similar aos rios. Em igarapés próximos à Manaus, apesar de o Na⁺ ser o cátion mais abundante, Horbe et al. (2005) também encontraram concentrações significativas de K⁺, devido principalmente a predominância de Latossolos nas microbacias, tipo de solo também predominante na área de drenagem do igarapé Floresta. Com relação aos ânions, em ambos os igarapés houve a predominância de Cl⁻. O Cl⁻ também foi o ânion predominante no rio Ji-Paraná e em seus tributários (LEITE, 2004). De acordo com Gaillardet et al. (1997), a principal fonte de cloro nas águas naturais amazônicas é a água da chuva. De fato, estudos sobre a composição química da água da chuva na Amazônia mostram a predominância do Cl⁻ em relação aos demais ânions (FORTI et al., 2000; GERMER et al., 2007; LEITE, 2011). Essa entrada de cloro via precipitação é uma fonte direta deste íon para os igarapés e também indireta, pois parte desse cloro também é estocada no solo e transferida para os igarapés durante o período de estiagem via água de solo.

Nos rios, o Ca^{2+} e o Na^+ foram os cátions predominantes e o HCO_3^- e o SO_4^{2-} predominaram entre os ânions. Comparativamente, as concentrações destes íons nos nossos rios são bem superiores àquelas observadas para outros rios da Amazônia. Finlay (2003) encontrou uma forte correlação entre o $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ e o Ca^{2+} e associou este padrão com a grande contribuição do intemperismo para o CID nos rios estudados. Como os carbonatos também são de magnésio e as concentrações deste íon também foram significantes nos rios, realizamos uma correlação entre o $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ e o $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (Figura 1.14). O valor do r foi igual a 0,92 (p < 0,05), o que nos leva a considerar que o intemperismo seja uma das principais fontes de CID para os sistemas amostrados.



Figura 1.14 – Correlação de Spearman (r) entre as concentrações de cálcio e magnésio ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) e as concentrações de bicarbonato e carbonato ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$) nos igarapés e rios amostrados.

1.6.2 Origem do CID

A composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido em sistemas de água doce depende de vários processos. Dentre eles: (1) a oxidação da matéria orgânica, (2) a dissolução de minerais de carbonato (quando presentes) em solos, água subterrânea e águas superficiais; (3) as trocas com a atmosfera, tanto por invasão como por evasão de CO_2 , e (4) a atividade fotossintética de algas e macrófitas (HÈLIE et al., 2002; FINLAY, 2003; MAYORGA, 2004; BRUNET et al, 2005; DOCTOR et al., 2007). A matéria orgânica transportada pelos rios é primariamente fixada no ambiente terrestre. Podemos distinguir dois tipos principais de vegetação (C3 e C4), os quais apresentam distintas vias fotossintéticas. As plantas C3 absorvem CO₂ atmosférico com o fracionamento de cerca de -20 ‰, levando à sua assinatura isotópica perto -26 ‰. Para as plantas C4, o fracionamento durante a absorção do CO₂ é cerca de -4 ‰ e, consequentemente, seu δ^{13} C está entre -19 e -9 ‰, com uma média de -12 ‰ (MARIOTTI, 1991). No entanto, Cerling et al. (1991) mostraram um enriquecimento de gases no solo em +4,4 ‰ causado pela diferença do coeficiente de difusão dos dois isótopos de carbono (¹²C e ¹³C). Como resultado, o CO₂ do solo tem um δ^{13} C com uma média de -21 ‰ com plantas C3 e de -8 ‰ com plantas C4.

Esse padrão foi observado nos nossos igarapés, que tiveram um δ^{13} C do CID entre -21 e -22 ‰. Isso pode ser um indício de que o CID é proveniente principalmente da matéria orgânica do solo, e que há um contribuição maior de plantas C3, apesar que um dos igarapés (Escondido) tenha parte de seu trecho em área de pastatem. No entanto, Mayorga (2004) salienta que, durante os processos de transporte e respiração da matéria orgânica, as fontes do CO₂ podem ser isotopicamente indistinguíveis, em particular se esse carbono se origina de vegetação C3 sem contribuições significativas de intemperismo mineral. Na ausência de uma gradação signiticativa de C3 para C4 entre terra firme e mata ciliar ou comunidades de várzea, pode ser impossível obter a contribuição de cada fonte usando apenas isótopos de carbono. No sistema principal do rio Amazonas, Quay et al. (1992) realizaram incubações para determinar o δ^{13} C do CO₂ respirado e atribuiram que para o CO₂ com sinal isotópico de -22±3 ‰ a contribuição seria de 40% e 60% para plantas C4 e C3, respectivamente.

Ellis et al. (2012) encontraram valores variando de -28 a -33 ‰ para o CO₂ respirado em diferentes rios da Amazônia. Os autores atribuíram estes valores a contribuição da biomassa de algas como fonte de carbono durante o período seco. Outro aspecto dos rios amostrados é a expressante contribuição do bicarbonato durante o período de estiagem. Brunet et al. (2005) consideram que o δ^{13} C do CID dos íons bicarbonato é uma mistura entre a assinatura isotópica do CO₂ do solo (-21 ‰, no caso de uma vegetação C3) e daquela do CO₂ originado no intemperismo de rochas carbonáticas (0 ‰).

Diferente dos sistemas de pequena ordem, nos quais 95 % do seu curso d'água é oriundo da água do solo (JOHNSON et al., 2006), os rios têm seu fluxo de base apresentando um mistura entre água subterrânea e água de contribuição de seus tributários. Desta forma, a geologia desempenha papel importante na determinação das fontes de CID. Nos nossos rios, o

sinal isotópico do CID variou de -8,5 ‰ no rio Caeté a -15,4 ‰ no Riozinho do Rôla. Baseado na contribuição dos íons de bicarbonato, que foi mais alta nos rios do que nos igarapés, pressupõe-se que esse carbono tenha origem geológica. No caso do rio Caeté, que drena o solo mais fértil da bacia (Vertissolos), essa contribuição da geologia é ainda mais evidente. Bolson (2006) observou que no trecho final do rio Urupá (RO), onde há a presença de rochas calcárias e vegetação do tipo C4, o sinal isotópico do CID foi igual a -7,6 ‰.

Apesar de considerar que a composição isotópica do CID resultante de intemperismo de carbonatos é um reflexo do equílibrio deste com o CO_2 , Mayorga (2004) mostrou que nas cabeceiras dos rios Juruá e Purus, o sinal isotópico dos afloramentos de carbonáceos não é alterado pelo aporte do CO_2 do solo da floresta. No entanto, tal sinal isotópico deixa de ser evidente após a entrada de afluentes e pela respiração da matéria orgânica rio abaixo. O autor também considera a invasão por CO_2 atmosférico como fonte adicional de CO_2 . Aumentos nos valores da pCO_2 são acompanhados de uma depleção do sinal isotópico do carbono. Já Doctor et al. (2007) observaram que a composição isotópica do CID no rio Sleepers (EUA) aumentou entre 3-5 ‰ em um trecho de 500 metros, concomitante com aumento do pH e diminuição da pCO_2 e atribuiu este aumento à evasão do CO_2 para a atmosfera.

1.6.3 Variabilidade nos Fluxos

Neste estudo, o carbono inorgânico dissolvido (CID) foi uma das variáveis que apresentou maior variabilidade entre os sistemas estudados, não só quanto a sua concentração total como também na distribuição de suas frações (HCO_3^- , CO_3^{2-} e CO_2 livre). Essa distribuição apresentou relação direta com os valores de pH e, como foi mostrado, os sistemas com valores de pH mais baixos apresentaram maiores valores da *p*CO₂.

Rasera (2008) observou que para a bacia do rio Ji-Paraná os maiores valores da pCO_2 foram encontrados nos rios que drenam solos eutróficos. Não observamos esta mesma relação nos valores da pCO_2 para os nossos rios. Pelo contrário, observamos uma correlação negativa entre os valores de TZ⁺ e a pCO_2 (r = -0,42 e p < 0,05; Figura 1.15). O Riozinho do Rôla, por exemplo, que drena solos menos ricos que os demais rios e que apresentou um TZ⁺ em torno de 1300 µEq L⁻¹, apresentou o maior valor da pCO_2 . Já com relação aos igarapés, os maiores

valores da pCO_2 foram observados no igarapé Escondido, que drena um terreno com solo mais rico do que o igarapé Floresta.



Figura 1.15 – Correlação de Spearman (r) os valores da pCO_2 (em µatm) e os valores do TZ^+ (em µEq L^{-1}) nos igarapés e rios amostrados.

A distribuição das frações de CID pode explicar os valores mais baixos da pCO_2 nos nossos rios. Como vimos, nos rios Purus e Iaco, as concentrações do HCO_3^- representaram quase 100% do CID total, caindo para 92% no rio Caeté. Se compararmos os valores da pCO_2 destes três rios, podemos observar que o rio Caeté apresentou o maior valor. Da mesma forma, se considerarmos apenas os rios Acre (que teve 94% do CID na forma de HCO_3^-) e o Riozinho do Rôla (que teve 78% do CID na forma de HCO_3^-), observamos que o maior valor da pCO_2 é no Riozinho do Rôla. Assim, podemos afirmar que os rios que drenam solos mais férteis e com maiores concentrações de CID total apresentam os menores valores da pCO_2 . Rasera (2010) relacionou as concentrações de CID total com os valores da pCO_2 entre os rios Araguaia (rio com elevada concentração de íons) e Caxiuanã (rio com baixa concentração de íons). A autora concluiu que, apesar de o rio Caixuanã apresentar baixa concentração de CID e ser menos rico quimicamente em relação ao Araguaia, o mesmo apresentou os maiores valores da pCO_2 , uma vez que este rio apresenta valores de pH mais ácidos e praticamente todo o CID total está na forma de CO₂. No entanto, para os valores de fluxo, estes rios apresentaram valores similares.

Richey et al. (2002) mostraram que a bacia Amazônica estaria emitindo certa de 470 Tg de carbono anualmente para a atmosfera apenas na forma de CO₂. No entanto, esta estimativa foi baseada em dados obtidos apenas na região central da bacia e extrapolada para toda a região. Diferenças na química das águas e no tamanho dos sistemas não foram levadas em consideração. Em 2008, Rasera et al. estimaram a magnitude dos fluxos de CO₂ para a bacia do rio Ji-Paraná, considerando sistemas com características químicas e tamanhos distintos, e concluíram que apenas esta bacia, com cerca de 75.400 km², estaria emitindo para a atmosfera cerca de 308 \pm 188 Gg C ano⁻¹. Os autores salientaram ainda que, na bacia do rio Ji-Paraná, 82% dessa emissão são oriundos de canais com menos de 100 m de largura, e que esse percentual sobe para 88% durante o período de seca.

Nossos resultados mostraram que os fluxos de CO₂ nos nossos rios são maiores do que aqueles observados em outros estudos (SALIMON, 2005; RASERA et al., 2008; ALIN et al., 2011). Os rios Acre e Riozinho do Rôla, que drenam solos menos férteis, apresentaram fluxos entre 1,9 e 3,1 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹, respectivamente, Enquanto nos rios Purus, Iaco e Caeté, os fluxos variaram entre 3,4 e 4,9 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹. De uma forma geral, podemos dizer que os rios quimicamente mais ricos apresentaram fluxos um pouco mais elevados. Já nos igarapés os maiores fluxos observados no igarapé Floresta, que drena um terreno menos rico. É importante salientar que este igarapé apresentou fluxos maiores até mesmo que os rios (6,5 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹), mostrando a importância dos fluxos de sistemas de pequena ordem, já mencionada em outros trabalhos (LEHMANN et al., 2004; JOHNSON et al., 2008; RASERA et al., 2008).

Este alto fluxo observado no igarapé Floresta pode estar relacionado com os valores elevados da pCO_2 e também com fatores físicos, como velocidade da corrente. Em sistemas de pequena ordem, cerca de 95% do fluxo de base é alimentado por água do solo rica em CO_2 . Johnson et al. (2008) mostraram que 77% do carbono transportado em pequenos igarapés é resultado do processo de respiração no solo e 90% deste carbono é evadido para a atmosfera.

No entanto, Rasera et al. (2008) comentam que, além das altas concentrações de CO₂ oriundas da respiração do solo, fatores físicos também contribuem para a alta evasão de CO₂ em sistemas de pequena ordem. Alin et al. (2011) consideram que a velocidade da corrente em pequenos rios e igarapés seja a principal forçante da alta variabilidade dos valores k_{600} (que é o coeficiente de troca gasosa entre a água e o ar) e consequentemente, responsável pelos altos fluxos em sistemas de pequena ordem.

A Figura 1.16 mostra a Correlação de Spearman (r) entre os fluxos e os valores da pCO_2 (A), TZ⁺ (B) e velocidade da corrente (C) nos rios e igarapés. É possível observar que não existe uma correlação entre os fluxos e essas variáveis. No entanto, se os valores de fluxo e essas variáveis foram correlacionados para rios e igarapés separadamente, a relação entre TZ⁺ e fluxos se torna negativa e significativa nos igarapés (r = - 0,75 e p < 0,05 e positiva e significativa nos rios (r = 0,44 e p < 0,05 nos rios). A relação entre velocidade da corrente e os fluxos também passa a ser positiva nos igarapés e significativa (r = 0,68 e p<0,05), ou seja, o igarapé Floresta apresenta águas menos ricas quimicamente, mas a velocidade da corrente contribui para que seus fluxos sejam maiores do que no igarapé Escondido. As demais variáveis, porém, não tiveram correlação com os valores de fluxo. Isto pode significar que, durante o período seco, os fluxos em cada sistema podem ser controlados por diferentes tipos de interações entre essas variáveis.



Figura 1.16 – Correlação de Spearman (r) entre os valores de fluxo de CO_2 e a pCO_2 (A), TZ^+ (B), velocidade da corrente (C) e cota (cm).

1.7 CONCLUSÕES

- Os rios estudados apresentam águas relativamente ricas em nutrientes, com valores diferentes no somatório de cátions (TZ⁺) e os fluxos apresentaram correlação positiva com esses valores.
- Por outro lado, os igarapés apresentaram uma correlação positiva com a velocidade da corrente.
REFERÊNCIAS

ALIN, S. R.; RASERA, M. F. F. L.; SALIMON, C. I.; RICHEY, J. E.; HOLTGRIEVE, G. W.; KRUSCHE, A. V.; SNIDOVONGS, A. Physical controls on carbon dioxide transfer velocity and flux in low-gradient river systems and implications for regional carbon budgets. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 116, p. 1-17, 2011. DOI: 10.1029/2010JG001398.

BOLSON, M. A. A biogeoquímica do rio Urupa, Rondônica. 2006. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BRUNET, F.; GAIERO, D.; PROBST, J. L.; DEPETRIS, P. J.; GAUTHIER, F.; STILLE, P. δ^{13} C tracing of dissolved inorganic carbon sources in Patagonian rivers (Argentina). **Hydrological Processes**, Glasgow, v. 19, p. 3321-3344, 2005. DOI: 10.1002/hyp.5973.

CERLING, T. E.; SOLOMON, D. K.; QUADE, J.; BOWMAN, J. R. On the isotopic composition of carbon in soil carbon-dioxide. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, New York, v. 55, p. 3403-3405, 1991.

DEVOL, A. H.; HEDGES, J. I. Organic matter and nutrients in the mainstem Amazon river. In: MCCLAIN, M. E.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. (Ed.). **The biogeochemistry of the Amazon basin**. New York: Oxford University Press, 2001. p. 275-306.

DOCTOR, D. H.; KENDAL, C.; SEBESTYEN, S. D.; SHANLEY, J. B.; OHTE, N.; BOYER, E. W. Carbon isotope fractionation of dissolved inorganic carbon (DIC) due to outgassing of carbon dioxide from a headwater stream. **Hydrological Processes**, Glasgow, v. 22, p. 2410-2433, 2008. DOI: 10.1002/hyp.6833.

DREVER, J. I. The geochemistry of natural waters. New Jersey: Prentice-Hall, 1997. 436 p.

ELLIS, E. E.; RICHEY, J. E.; AUFDENKAMPE, A. K.; KRUSCHE, A. V.; QUAY, P. D.; SALIMON, C. I.; CUNHA, H. B. Factors controlling water-column respiration in rivers of the central and southwestern Amazon Basin. **Limnology and Oceanography**, Grafton, v. 57, p. 527–540, 2012. DOI:10.4319/lo.2012.57.2.0527.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 1998. 602 p.

FINLAY, J. C. Controls of streamwater dissolved inorganic carbon dynamics in a forested watershed. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 62, p. 231–252, 2003.

FORTI, M. C.; MELFI, A. J.; ASTOLFO, R.; FOSTIER A. H. Rainfall chemistry composition in two ecosystems in the northeastern Brazilian Amazon (Amapá, State). **Journal Geophysical Research**, Washington, DC, v. 105, p. 28895–28905, 2000.

FRANKINGNOULLE, M.; BORGES, A.; BIONDO, R. A new design of equilibrator to monitor carbon dioxide in highly dynamic and turbid environments. **Water Research**, New York, v. 35, p. 1344-1347, 2001.

FRANKINGNOULLE, M.; ABRIL, G.; BORGES, A.; BOURGE, I.; CANON, C.; DELILLE, B.; LIBERT, E.; THÉATE, J. M. Carbon dioxide emission from European estuaries. **Science**, Washington, DC, v. 282, p. 434-436, 1998.

GAILLARDET, J.; DUPRÉ, B.; ALLÉGRE, J.; NÉGREL, P. Chemical and physical denudation in the Amazon river basin. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 142, p. 141-173, 1997.

GERMER, S.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; GOUVEIA-NETO, S. C.; ELSENBEER, H. Seasonal and within-event dynamics of rainfall and throughfall chemistry in an open tropical rainforest in Rondônia, Brazil. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 86, p. 155–174, 2007. DOI: 10.1007/s10533-007-9152-9.

HÈLIE, J. F.; HILLAIRE-MARCEL, C.; RONDEAU, B. Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River—isotopic and chemical constraint. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 186, p. 117–138, 2002.

HORBE, A. M. C.; GOMES, I. L. F.; MIRANDA, S. F.; SILVA, M. S. R. Contribuição à hidroquímica de drenagens no Município de Manaus – AM. Acta Amazônica, Manaus, v. 35, p. 119-124, 2005.

JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; COUTO, E. G.; NOVAES FILHO, J. P.; RIHA, S. J. DOC and DIC in flowpaths of Amazonian headwater catchments with hydrologically contrasting soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 81, p. 45-57, 2006. DOI: 10.1007/s10533-006-9029-3.

JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; RIHA, S. J. CO₂ efflux from Amazonian headwater stream represents a significant fate for deep soil respiration. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 35, 2008. DOI: 10.1029/2008GL034619.

KRUSCHE, A. V.; BALLESTER, M. V. R.; VICTORIA, L. R.; BERNARDES, M. C.; LEITE, N. K.; HONADA, L.; VICTORIA, D. C.; TOLETO, A. M.; OMETTO, J. P.; MOREIRA, M. Z.; GOMES, B. M.; BOLSON, M. A.; GOUVEIA NETO, S. C.; BONELLI, N.; DEEGAN, L.; NEIL, C.; THOMAS, S.; AUFDENKAMPE, A. K.; RICHEY, J. E. Efeitos das mudanças no uso da terra na biogeoquímica dos corpos d'água na bacia do rio Ji-Paraná, Rondônia. Acta Amazônica, Manaus, v. 35, p. 197-205, 2005. DOI.org/10.1590/S0044-59672005000200009.

LEHMANN, J.; JOHNSON, M. C.; COUTO, E.; RIHA, S.; RODRIGUES, L. C. M.; ABDO, M.; SELVA, E. C.; FERNANDES, E. C. M. **Carbon, biogeochemistry, and hydrology**: from terrestrial to aquatic systems. In: LBA SCIENTIFIC CONFERENCE, 3., 2004, Brasília, DF. The Large –Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in the Amazonia. Abstract 373.

LEITE, N. K. **A biogeoquímica do rio Ji-Paraná, Rondônica**. 2004. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LEITE, N. K. Fluxo de nutrientes em um fragmento de mata ciliar no estado de Rondônia, Brazil. 2011. 136 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MAYORGA, E. Isotopic constraints on sources and cycling of riverine dissolved inorganic carbon in the Amazon Basin. 2004. 227 f. Thesis (PhD) - University of Washington, Washington, DC, 2004.

MAYORGA, E.; AUFDENKAMPE, A. K.; MACIELLO, C. A.; KRUSCHE, A. V.; HEDGES, J. I.; QUAY, P. D.; RICHEY, J. E; BROWN, T. A. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. **Nature**, London, v. 436, p. 538-541, 2005. DOI: 10.1038/nature03880.

NEU, V. **O ciclo do carbono na bacia do Alto Xingu**: interações entre ambientes terrestre, aquático e atmosférico. 2009. 113 p. Tese (Doutorado em Ciências) Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

QUAY, P. D.; WILBUR, D. O.; RICHEY, J. E.; HEDGES, J. I.; DEVOL, A. H.; VICTORIA, R. L. Carbon cycling in the Amazon River: implications from the 13C compositions of particles and solutes. **Limnology and Ocenanography**, Grafton, v. 37, p. 857-871, 1992.

RASERA, M. F. F. L. **O papel das emissões de CO₂ para a atmosfera, em rios da bacia do Ji-Paraná (RO), no ciclo regional do carbono**. 2005. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

RASERA, M. F. F. L. Determinação dos fluxos de CO₂ e parâmetros físicos envolvidos nestes processos em diferentes ambientes fluviais da Amazônia. 2010. 125 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

RASERA, M. F. F. L.; BALLESTER, M. V. R.; KRUSCHE, A. V.; SALIMON, C. I.; MONTEBELO, L. A.; ALIN, S. R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. Estimating the superficial area of small rivers in the southwestern Amazon and their role in CO_2 outgassing. **Earth Interactions**, Washington, DC, v. 12, p. 1-16, 2008. DOI: 10.1175/2008EI257.1.

RICHEY, J. E.; HEDGES, J. I.; DEVOL, A. H.; QUAY, P. D.; VICTORIA, R. L.; MARTINELLI, L. A.; FORSBERG, B. R. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. Limnology and Oceanography, Grafton, v. 35, p. 352-371, 1990.

RICHEY, J. E.; MELACK, J. M.; AUFDENKAMPE, A. K.; BALLESTER, M. V. R.; HESS, L. L. From water to the atmosphere: carbon dioxide evasion from the Amazon River system. **Nature**, London, v. 416, p. 617-620, 2002.

ROSA, M. B. S. **Dinâmica do carbono em pequenas bacias de drenagem sob uso de agricultura familiar na Amazônia Oriental**. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/2928.

SALIMON, C. I. Fluxos de carbono em ambientes fluviais e suas origens na Amazônia Ocidental. Piracicaba: CENA/USP, 2005. 25 f. (Relatório Científico Pós-Doutorado).

SANTOS, U. M.; RIBEIRO, M. N. G. A hidroquímica do Rio Solimões, Amazonas. Acta Amazônica, Manaus, v. 18, p. 145-172, 1988.

SIOLI, H. Amazônia: Fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais. Petrópolis: Editora Vozes, 1985.

SOUSA, E. S.; SALIMON, C. I.; VICTORIA, L. R.; KRUSCHE, A. V.; ALIN, S. R.; LEITE, N. K. Dissolved inorganic carbon and *p*CO2 in two small streams draining different soils types in Southwestern Amazonia, Brazil. **Revista Ambi-água**, Taubaté, v. 3, p. 37-50, 2008.

STALLARD, R. F.; EDMOND, J. M. Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment of dissolved –load. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 14, p. 9671-9688, 1983.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry**: chemical equilibrium and rates in natural waters. New York: John Wiley & Sons, 1996. 1022 p.

2 VARIABILIDADE SAZONAL NAS CONCENTRAÇÕES, FONTES E FLUXOS DE CARBONO EM RIOS E IGARAPÉS NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA

RESUMO

As mudanças hidrológicas sazonais são o principal fator de controle das emissões de carbono, tanto em ambientes terrestres quanto em ambientes aquáticos. O presente estudo avaliou os efeitos das mudanças sazonais sobre as concentrações, fontes e fluxos de carbono em rios e igarapés da bacia do rio Purus. Foram realizadas amostragens nos dois principais períodos sazonais da região: Período Chuvoso (Dez/10 a Abr/11 e Dez/11 a Abr/12) e Período Seco (Jul/11 a Set/11). Foram quantificadas as concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD), carbono inorgânico dissolvido (CID) e sua composição isotópica (δ^{13} CID). Também foram realizadas medidas da pressão parcial do CO₂ (pCO₂) e fluxos de CO₂. Os resultados mostraram que os rios apresentam suas maiores concentrações de COD durante o período chuvoso (com exceção do rio Caeté que não apresentou diferenças significativas), enquanto que as maiores concentrações de CID são observadas durante o período seco, com concentrações elevadas de bicarbonato (HCO₃) neste período. Nos igarapés essas diferenças não foram significativas, com exceção das concentrações de COD no igarapé Escondido. A pressão parcial do CO₂ e, consequentemente, os fluxos foram mais altos nos rios durante o período chuvoso. Nos igarapés não houve diferenças nos valores de pCO₂ entre os períodos sazonais. No entanto, as diferenças entre os fluxos foram significativas.

ABSTRACT

Seasonal hydrological changes are the main factor controlling carbon emissions, both in terrestrial and aquatic environments. The present study evaluated the effects of seasonal changes on the concentrations, sources and carbon fluxes in rivers and streams in the Purus River basin. Sampling was carried out in two main seasons: Rainy Season (Dec/10 and Dec/11 to Apr/11 the abr/12) and Dry Season (Jul/11 Sep/11). We quantified dissolved organic carbon (DOC) concentrations, dissolved inorganic carbon (DIC) concentrations and its isotopic composition (δ^{13} DIC). We also measured partial pressure of CO₂ (*p*CO₂) and CO₂ fluxes. The results show that the rivers have their highest DOC concentrations during the rainy season (except the Caeté river, which presents no significant differences), whereas the highest DIC concentrations are observed during the dry season, with the highest bicarbonate concentrations (HCO₃⁻) in this season. In streams these differences were not significant, except for DOC concentrations in Escondido stream. The *p*CO₂ and, consequently, CO₂ fluxes were higher in the rainy season in the rives. In streams there were no differences in *p*CO₂ values between seasons. However, differences in CO₂ fluxes were significant.

2.1 INTRODUÇÃO

Por seu tamanho e complexidade, a Amazônia apresenta uma dinâmica pluvial bastante heterogênea. A região possui uma precipitação média de aproximadamente 2300 mm por ano, embora existam regiões (na fronteira entre Brasil e Colômbia e Venezuela, por exemplo) em que o total anual atinge até 3500 mm. Nestas regiões não existe período de seca. Estes valores de precipitação elevada são encontrados próximo à Cordilheira dos Andes e devem-se à ascensão orográfica da umidade transportada pelos ventos alísios de leste da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Na região costeira (no litoral do Pará ao Amapá), a precipitação também é alta e sem período de seca definido, devido à influência das linhas de instabilidade que se formam ao longo da costa litorânea durante o período da tarde e que são forçadas pela brisa marítima. Já as áreas com menores taxas de precipitação encontram-se no sul e leste da Amazônia, com uma área que se estende do norte até além do médio e baixo rio Amazonas, onde as precipitações podem ficar abaixo de 2.000 mm e as estações chuvosa e seca são bem definidas (FISCH et al., 1998).

A distribuição espacial e temporal das chuvas na Amazônia foi detalhadamente estudada por Figueroa e Nobre (1990), utilizando-se de 226 estações pluviométricas, e por Marengo (1995), que usou dados de convecção (Radiação de Ondas Longas) do International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP). O período de chuvas ou forte atividade convectiva na região Amazônica é compreendido entre novembro e março, sendo que o período de seca (sem grande atividade convectiva) ocorre entre os meses de maio e setembro. Os meses de abril e outubro são meses de transição entre um regime e outro. A distribuição de chuva no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro (DJF) apresenta uma região de precipitação alta (superior a 900 mm) situada na parte oeste e central da Amazônia, em conexão com a posição geográfica da Alta da Bolívia. Por outro lado, no trimestre junho-julho-agosto (JJA), o centro de máxima precipitação deslocou-se para o norte e situa-se sobre a América Central. A região Amazônica, principalmente na parte central, está sobre o domínio do ramo descendente da Célula de Hadley, induzindo um período seco bem característico (HOREL et al., 1989).

Esta sazonalidade na precipitação da região tem forte influência na dinâmica de todo da bacia e, consequentemente, na ciclagem de seus principais nutrientes. Estudos mostram que os fluxos de carbono acima da cobertura da floresta também respondem às mudanças do ciclo hidrológico. Em estudo realizado no Mato Grosso, no qual se avaliou as trocas líquidas de CO_2 por meio de uma torre, com base no sistema de correlação de vórtices turbulentos, Gallon et al. (2006) observaram que durante a estação chuvosa os fluxos de CO_2 foram superiores aos observados durante a estação seca, tanto no período diurno quanto no período noturno. Gatti et al. (2010) também observaram maiores fluxos durante a estação chuvosa na Floresta Nacional do Tapajós, no leste do Pará. Os autores sugerem que as variações nas estações úmida e seca estejam relacionadas com as condições hídricas, como precipitação, umidade do ar e conteúdo de água no solo, que afetam principalmente a respiração total da floresta.

Essas mudanças no ciclo hidrológico também influenciam a dinâmica do carbono em sistemas aquáticos. Concentrações de carbono orgânico particulado e dissolvido são mais elevadas durante o período chuvoso. Esse aporte de carbono é principalmente de origem terrestre e é carreado para os sistemas fluviais durante os eventos de precipitação (GOUVEIA NETO, 2006; JOHNSON et al., 2006; NEU, 2009; LEITE, 2011). O aumento do aporte de água do solo e da chuva, geralmente mais ácidas que as águas dos rios, faz com que as concentrações de CO_2 livre também sejam mais elevadas do que durante o período de seca, quando a maior parte do CID está na forma de bicarbonato (RASERA, 2005; RASERA, 2010). Consequentemente, durante o período chuvoso, os valores de pressão parcial do CO_2 são elevados, aumentando também a evasão de CO_2 a partir destes sistemas (RICHEY et al., 2002; RASERA et al., 2008).

A região sul da Amazônia apresenta períodos secos e úmidos bem definidos. Em uma análise do regime pluviométrico em várias localidades da Amazônia, Ribeiro et al. (1996) verificaram que nesta região o período seco tem seu início no mês de maio e se estende até o mês de setembro. Os autores também concluíram que o período chuvoso é maior que o período seco em pouco mais de um mês. Consequentemente, os rios desta região apresentam forte sazonalidade nas vazões. O presente estudo avaliou os efeitos das mudanças sazonais sobre as concentrações, fontes e fluxos de carbono em rios e igarapés da bacia do rio Purus e assim contribuir para o balanço regional do carbono em toda a bacia Amazônica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento hidrológico dos rios e igarapés;
- Quantificar as concentrações do carbono dissolvido;
- Identificar as fontes do carbono inorgânico dissolvido e;
- Quantificar a *p*CO₂ e os fluxos evasivos de CO₂.

2.3 HIPÓTESE

 Os fluxos evasivos de CO₂ em rios e igarapés do Sudoeste da Amazônia seguem o mesmo padrão sazonal de outros rios da região, com maiores emissões durante o período chuvoso.

2.4 MATERIAIS E MÉTODOS

2.4.1 Área de Estudo e Período de Amostragem

A descrição detalhada da área de estudo e das principais características dos rios e igarapés bem como sua localização encontram-se no item DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO (p. 25). As amostragens foram realizadas durante os meses mais representativos de cada período sazonal: (a) Período Chuvoso, de Dez/10 a Abr/11 e de Dez/11 a Abr/12 e, (b) Período Seco, de Jul/11 a Set/11. Foi necessária a amostragem de um segundo período chuvoso por dois motivos: (1) problemas de logística, devido à falta de transporte e (2) diminuição do no volume de chuvas.

2.4.2 Métodos Amostrais

2.4.2.1 Medidas de pCO₂ e fluxo evasivo

Foram realizadas medidas diretas de fluxo de CO_2 e pressão parcial do CO_2 . As medidas de fluxo foram realizadas com câmara flutuante e as medidas da pCO_2 foram realizadas com um equilibrador. A descrição detalhada dos dois métodos está no Capítulo I, item 1.4.2.1, p. 35.

2.4.2.2 Amostras de água

Com o auxílio de uma bomba submersa, foi coletada uma amostra de água de 5 L, a qual foi acondicionada em caixa térmica com gelo e levada ao Laboratório de Limnologia da Universidade Federal do Acre, onde foi filtrada (em uma peneira com malha de 63 µm) para a retirada das seguintes alíquotas:

- 3 (três) alíquotas de 25 ml (filtradas com filtro de quarzto com porosidade nominal de 0,7 µm), preservadas com HCl, para a determinação do carbono orgânico dissolvido;
- 1 (uma) alíquota de 60 ml (filtrada com filtros de acetato de celulose com porosidade nominal de 0,47 μm), preservada com *thymol*, para a determinação da concentração de carbono inorgânico dissolvido

As amostras de água foram armazenadas em geladeira e enviadas ao CENA/USP para análise.

Ainda no campo também foram retiradas 3 amostras de água (65 ml), acondicionadas em frascos de DBO, e preservadas com HgCl₂ para a determinação da composição isotópica do CID.

2.4.3.3. Medidas auxiliares

Medidas de pH foram feitas com peagômetro portátil Orion modelo 290A Plus. As medidas foram feitas submergindo o eletrodo diretamente na coluna d'água, à aproximadamente 50 cm de profundidade.

Também foram realizadas medidas de velocidade do vento e temperatura do ar, com um anemômetro Instrumentium modelo THAL 300. As medidas de velocidade da corrente foram feitas com um medidor de fluxo Global Water, modelo FP 101.

Dados de precipitação para a cidade de Rio Branco foram obtidos no site do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia (www.inmet.gov.br). Para extrapolar a precipitação em cada sub-bacia, foram gerados dados a partir do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Cotas e vazões dos rios foram obtidas no site da Agência Nacional de Águas – ANA (hidroweb.ana.gov.br) e junto à Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Estado do Acre (CEDEC/AC).

2.4.4 Métodos Analíticos

2.4.4.1 Análise de COD e CID

As concentrações de COD e CID total foram analisadas em um analisador de Carbono Orgânico Total da marca Shimadzu, modelo TOC-VCPH. O princípio analítico é baseado na absorção de CO₂ no comprimento de onda do infravermelho. A alíquota para a determinação de carbono orgânico dissolvido é previamente acidificada até pH 1,0, borbulhada com ar sintético para a remoção da fração inorgânica do carbono (convertida em CO₂ pela acidificação), e então injetada no equipamento, onde é queimada à 680 °C e carreada para o detector na forma de CO₂. As concentrações são determinadas por comparação com padrões externos. No caso do carbono inorgânico dissolvido, não há pré-acidificação nem queima. A amostra injetada é carreada para dentro de um recipiente com ácido e o CO₂ gerado é carreado para o detector. As concentrações de CO_2 livre, bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato ($CO_3^{2^-}$) foram calculadas a partir das concentrações de carbono inorgânico dissolvido total, do pH e das temperaturas, empregando-se as equações de equilíbrio termodinâmico (STUMM & MORGAN, 1996).

2.4.4.2 Composição isotópica do CID ($\delta^{13}C$ do CID)

A determinação da composição isotópica (δ^{13} C) do CID foi feita por espectrometria de massas de razão isotópica, em um equipamento da marca Finnigan, modelo Delta Plus. A amostra foi injetada no aparelho na forma de CO₂ após extração em linha de alto vácuo. A quantificação foi feita em relação a padrões externos certificados.

2.4.5 Análise Estatística

As variáveis foram primeiramente testadas quanto à sua homogeneidade de variância (teste de Bartlett) e também quanto à sua distribuição utilizando o teste de Shapiro-Wilks, sendo a normalidade rejeitada para p < 0,05. Para os parâmetros que não apresentaram distribuição normal, foram utilizados testes não paramétricos. O teste de Mann-Whitney U foi usado para a comparação das médias entre os períodos sazonais. A matriz de correlação entre as variáveis foi gerada utilizando-se a correlação de Pearson e Spearman. As análises foram feitas utilizando o programa R.

2.5 RESULTADOS

2.5.1 Comportamento Hidrológico

2.5.1.1 Precipitação

.

A Figura 2.1 mostra os dados de precipitação, gerados a partir do MODIS, para cada uma das sub-bacias estudadas, no período entre 2000 e 2011. Os valores anuais de precipitação foram de aproximadamente 2000 mm, considerada a média da precipitação anual para a região (RIBEIRO et al. 1996; DUARTE, 2005; DUARTE, 2006). No entanto, é possível observar que para alguns anos esses valores estão acima ou abaixo da média.

Para testar a confiabilidade dos dados gerados pelo MODIS, foi realizado teste estatístico (teste t) entre a precipitação mensal gerada pelo MODIS para a bacia do rio Acre e a precipitação mensal obtida no INMET para a cidade de Rio Branco. O resultado do teste mostrou que não há diferenças significativas (p = 0,77) entre os valores, portanto os dados gerados pelo MODIS são representativos.

A Figura 2.2 mostra os valores mensais de precipitação gerados pelo MODIS para cada sub-bacia entre 2010 e 2012 e as setas indicam os meses nos quais foram concentradas as amostragens. Podemos observar que o primeiro período chuvoso (Dez/10 a Abr/11, 1200 mm) apresentou menores valores de precipitação do que o segundo período chuvoso (Dez/11 a Abr/12, 1500 mm). No período seco (Jul/11 a Set/11), os valores de precipitação acumulada ficaram em torno de 160 mm (Tabela 2.1).



Figura 2.1 – Dados de precipitação acumulada em mm gerados pelo MODIS para cada sub-bacia entre os anos de 2000 a 2011.



Figura 2.2 – Dados de precipitação acumulada (em mm) para cada sub-bacia gerados pelo MODIS durante o período de amostragem. As setas indicam as datas de amostragem.

 Tabela 2.1 – Dados de precipitação acumulada (em mm) gerados pelo MODIS para cada sub-bacia em cada período amostral. Os números em parênteses são dados do INMET em Rio Branco.

	Purus	Iaco	Acre	Caeté	Rioz. do Rôla			
Período Chuvoso I								
dez/10	183,4	194,4	217,63 (237,4)	193,6	220,4			
jan/11	184,0	241,7	199,81 (209,9)	180,6	222,9			
fev/11	287,6	236,4	216,92 (176,4)	291,2	194,9			
mar/11	274,2	247,5	281,80 (263,3)	225,2	336,7			
abr/11	238,7	210,7	195,48 (213,5)	216,6	177,6			
Total	1167,9	1130,7	1111,6	1107,2	1152,6			
Período Seco								
jul/11	18,63	15,02	3,78 (1,8)	15,84	3,74			
ago/11	25,18	33,40	40,0 (30,9)	31,75	62,87			
set/11	108,79	107,78	126,1 (135,8)	120,73	102,37			
Total	152,6	156,2	169,9	168,3	168,9			
Período Chuvoso II								
dez/11	338,9	334,9	288,2 (127,2)	262,9	257,4			
jan/12	378,1	404,9	361,0 (404,4)	367,5	368,3			
fev/12	432,2	425,3	505,7 (452,4)	424,4	422,9			
mar/12	247,5	287,3	216,8 (316,8)	280,9	235,2			
abr/12	160,4	143,0	167,3 (162,5)	155,7	168,1			
Total	1557,1	1595,4	1539,0	1491,4	1451,9			

Para as áreas das duas microbacias foram utilizados dados de estações meteorológicas da Universidade Federal do Acre. Na Fazenda Experimental Catuaba (Igarapé

Floresta) existe um pluviômetro dentro da área de estudo e para a Reserva Florestal Humaitá (Igarapé Escondido) foram utilizados dados de um pluviômetro instalado a aproximadamente 29 km da área de estudo. Os dados são mostrados na Figura 2.3 e as setas indicam os meses nos quais foram concentradas as amostragens. No período chuvoso, a precipitação total foi de 936 mm na Fazenda Catuaba e 1063 mm na Reserva Humaitá. Para o período seco, os totais acumulados foram iguais a 108 e 161,4 mm, respectivamente. Apesar dessas diferenças nos valores de precipitação nas duas áreas, o teste *t* mostrou que as mesmas não são significativas (p = 0,78).



Figura 2.3 – Precipitação acumulada (em mm) para a Fazenda Experimental Catuaba e para a Reserva Florestal Humaitá. **Fonte: Acrebioclima**

2.5.2.1 Cotas e vazões

A Figura 2.4 mostra os valores médios mensais de cota e vazão para os rios estudados. Os dados referentes aos rios Purus, Iaco, Caeté e Acre foram obtidos no site da Agência Nacional de Águas (ANA) e dos dados referentes ao Riozinho do Rôla foram obtidos na Coordenadoria Estadual de Defesa Civil do Estado do Acre (CEDEC/AC).

Os rios apresentam sazonalidade bastante significativa. O início de subida das águas dá-se no mês de outubro e, a partir de dezembro, a maioria dos rios já está acima dos 8 m de profundidade, atingindo picos acima de 12 m nos meses de fevereiro e março. A partir de abril, o nível das águas começa a descer, podendo atingir menos de 2m nos meses de agosto e setembro. Podemos observar que durante o primeiro período chuvoso todos os rios apresentam cotas mais baixas (abaixo de 6 m em janeiro). Já no segundo período chuvoso, para o mesmo mês, todos os rios apresentaram cotas acima de 10 m. As maiores descargas estão entre os meses de dezembro a março e menores descargas entre os meses de junho a outubro.

A Figura 2.5 mostra a profundidade dos igarapés, medida no dia em que eram realizadas as amostragens. O igarapé Floresta apresentou uma profundidade quase constante de 20 cm, com um pico de 80 cm observados na coleta realizada no dia 02/04/2011. O igarapé Escondidos apresentou profundidade relativamente maior e também maior variabilidade sazonal. Durante o período chuvoso, a profundidade deste igarapé variou de 30 cm (20/01/2011) a 120 cm (09/04/11). Durante o período seco, a profundidade variou de 36 cm (07/09/2011) a 58 cm (16/08/2011).



Figura 2.4 – Cotas fluviométricas (em cm) e vazão (em m³ s⁻¹) para os rios amostrados. Fonte: ANA e CEDEC/AC



Figura 2.5. Profundidade (em cm) dos igarapés Floresta (A) e Escondido (B) medidas nos dias das amostragens.

2.5.2 Carbono Dissolvido

2.5.2.1 Carbono orgânico dissolvido

A Figura 2.6 mostra as concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) para os períodos seco e chuvoso. No período seco as concentrações médias variaram de 3,2 ± 1,1 (rio Acre) a 8,0 ± 0,11 mg L⁻¹ (rio Caeté),enquanto no período chuvoso, foram de 5,8 ± 1,1 (rio Purus) a 8,7 ± 1,0 mg L⁻¹ (Riozinho do Rôla). De acordo com o teste Mann-Whitney U, todos os rios apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as concentrações de COD de cada período (p < 0,05), com exceção apenas do rio Caeté (p = 0,82). Nos igarapés (Figura 2.7), as concentrações de COD no período seco foram de 1,3±0,2 mg L⁻¹ no igarapé Floresta e 4,5 ± 1,6 mg L⁻¹ no igarapé Escondido, enquanto no período chuvoso variaram de 1,7 ± 0,5 a 3,2 ± 1,0 mg L⁻¹, respectivamente. No igarapé Floresta não houve diferenças significativa entre os períodos seco e chuvoso (p = 0,34), mas o igarapé Escondido apresentou concentrações mais altas durante o período seco (p < 0,05).

Ertel et al. (1986) quantificaram as concentrações de COD em tributários do rio Negro e do rio Amazonas e observaram que as maiores concentrações foram encontradas nos tributários do rio Negro (concentrações entre 5,87 e 7,37 mg L⁻¹), enquanto os tributários do rio Amazonas apresentaram concentrações entre 3,58 e 3,83. Segundo estes autores, tais resultados estão relacionados com o tipo de solo das bacias de drenagem. Os rios da bacia do rio Negro drenam solos mais arenosos, onde há maior permeabilidade e os processos de decomposição são favorecidos, e mais material dissolvido é carregado para dentro do sistema, ao passo que os tributários do rio Amazonas drenam solos com maiores concentrações de silte e argila, o que causa pouca permeabilidade. Em termos sazonais, a maioria dos rios da Amazônia apresenta concentrações de COD mais elevadas durante o período de chuvas e, segundo Rasera (2010) e outros autores (JOHNSON et al., 2006; NEU, 2009; LEITE, 2011), isto se deve principalmente ao transporte de matéria orgânica via escoamento superficial durante os eventos de chuva.



Figura 2.6 – Concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD em mg.L⁻¹) nos rios amostrados durante os períodos chuvoso e seco.



Figura 2.7 - Concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD em mg.L⁻¹) nos igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco.

2.5.2.2 Carbono inorgânico dissolvido

As concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID) nos rios apresentaram padrão inverso daquele observado para as concentrações de COD, com concentrações mais elevadas durante o período de seca (Figura 2.8). Nos rios, durante este período, as concentrações de CID variaram de 4.237,0 \pm 389,2 μ M no rio Iaco e 545, 2 \pm 112,1 μ M no Riozinho do Rôla. Nos igarapés (Figura 2.9), a concentração mais alta neste período foi encontrada no igarapé Escondido, (313,5 \pm 143,6 μ M), enquanto que o igarapé Floresta apresentou uma concentração igual a 57,0 \pm 9,4 μ M. Durante o período chuvoso, as concentrações de CID total foram mais baixas. Nos rios, o CID total apresentou concentrações que variaram entre 887,6 \pm 290,0 (rio Purus) e 234,8 \pm 73,3 μ M (Riozinho do Rôla). Todos os rios apresentaram diferenças estatisticamente significativas nas concentrações de CID total entre os períodos (p < 0,05). Nos igarapés, as concentrações de CID total para o período chuvoso foram iguais a 220,0 \pm 75,5 μ M e 63,1 \pm 9,8 μ M no Escondido e no Floresta, respectivamente. O teste de Mann-Whitney U mostrou que as concentrações de CID total nos igarapés não apresentaram diferenças significativas entre os períodos (p = 0,28 para Floresta e p = 0,15 para Escondido).

Quanto à distribuição das frações do CID (Tabela 2.2), podemos observar que durante o período seco a predominância nos rios foi do íon bicarbonato. Nos rios Iaco e Purus,

essa predominância chegou a 98% do CID total, com a menor contribuição observada no Riozinho do Rôla (78%). Durante o período chuvoso, houve predominância do íon bicarbonato apenas nos rios Iaco e Purus, com 61% e 64%, respectivamente. Nos demais rios, a predominância deste íon esteve abaixo de 50%. Nos igarapés, a predominância do CO_2 durante o período chuvoso foi de 89% e 72% para igarapé Floresta e Escondido, respectivamente (Figura 2.8).

Em rios da bacia do Ji-Paraná, Rasera (2005) também observou uma variabilidade sazonal na contribuição das frações de CID e mostrou que esta variabilidade está associada com os valores de pH. Em rios como o Comemoração, que teve um pH médio de 4,6, a predominância foi do CO₂, contribuindo com 95% e 91% do CID total, nos períodos de cheia e seca, respectivamente. Já no rio Urupá, que apresentou pH mais próximo à neutralidade, a contribuição do CO₂ para o CID total foi de apenas 24% na cheia e 8% na seca. Nos nossos rios, os maiores valores de pH também foram observados no período de seca, fator que contribuiu para a predominância do íon bicarbonato.



Figura 2.8 - Concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID em µM) nos rios amostrados durante os períodos chuvoso e seco

•



Figura 2.9 - Concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID em μM) nos igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco.

amostrados durante os períodos chuvoso e seco.									
	CID	CID Total		CO ₂ livre		HCO ₃ -		CO_{3}^{2}	
	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	
Rio Purus	887,6±300,0	4175,0±148,8	257,6±164,4	60,6±21,9	629,5±386,5	4081,3±141,2	0,48±0,63	33,2±8,9	
Rio Acre	298,7±147,5	941,5±206,8	147,5±73,4	51,5±4,0	151,1±79,0	888,3±207,4	0,03±0,04	1,72±0,73	
Rioz. do Rôla	234,8±73,3	545,2±121,1	146,6±47,2	123,0±47,8	88,2±57,3	422,0±81,6	0,01±0,01	0,19±0,12	
Rio Iaco	536,8±241,5	4237,0±389,2	173,6±68,8	60,2±12,7	363,8±268,4	4144,6±381,4	0,20±0,32	32,2±8,6	
Rio Caeté	324,7±73,0	1927,3±393,7	161,8±60,9	135,7±104,3	162,9±88,1	1783,6±479,2	0,03±0,03	8,0±11,9	
Ig. Floresta	63,1±9,8	57,0±9,4	56,2±8,3	33,8±10,2	6,9±4,8	23,2±10,7	0	0	
Ig. Escondido	220,0±17,5	313,5±143,6	159,3±51,5	168,5±87,9	60,7±41,0	145,5±61,7	0	0,01±0,01	

Tabela 2.2 – Concentrações médias e desvio padrão das frações do CID (em µM) nos rios e igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco.

2.5.3 Composição Isotópica do CID

Com relação à composição isotópica do carbono inorgânico dissolvido (Tabela 2.3), os valores de δ 13C do CID nos rios durante o período seco variaram de -15,4 ± 0,2 ‰ no Riozinho do Rôla a -8,5 ± 0,5 ‰ no rio Caeté. Nos igarapés, os valores de δ 13C do CID foram mais negativos, com -21,2 ± 0,4 ‰ no igarapé Floresta e -22,1 ‰ no igarapé Escondido. Já durante o período chuvoso, os valores do δ 13C do CID nos rios variaram de -16,7 ± 2,5 ‰ no rio Purus a -21,2 ± 0,9 ‰ no rio Caeté. Nos igarapés, estes valores foram iguais a -17,1 ± 1,6 ‰ no Escondido e -21 ± 3,4 ‰ no Floresta. Em função de problemas com o equipamento de análise, não foi possível efetuar esta medida em todas as amostras e os dados aqui apresentados se referem ao primeiro período chuvoso e apenas parte do período seco. Portanto, não foi possível realizar uma análise estatística robusta para comparar os dois períodos. Ainda estamos aguardando o conserto do equipamento e assim dar sequência ao restante das análises.

Bolson (2006) encontrou valores mais negativos na composição isotópica do CID durante o período de cheia no rio Urupá (RO). O autor relaciona estes resultados com a influência dos aportes provenientes do escoamento superficial, mostrando a maior contribuição da cobertura e uso solo nos valores da composição isotópica do carbono presente nos rios durante o período de chuvas.

CID) em ‰ amostrados	para os durante	rios e os	igarapés períodos
Chu	IV0S0	S	eco
-16,7 9	‰ ± 1,9	-13,3	‰ ± 0,9
-17,4 9	‰ ± 4,1	-12,9	‰ ± 0,1
ola -21 %	$00 \pm 3,2$	-15,49	‰ ± 0,2
-16,7 9	‰ ± 2,5	-13,1	‰ ± 0,3
	CID) em ‰ amostrados chuvoso e sec Chu -16,7 9 -17,4 9 da -21 % -16,7 9	CID) em % para os amostrados durante chuvoso e seco. Chuvoso $-16,7 \% \pm 1,9$ $-17,4 \% \pm 4,1$ da $-21 \% \pm 3,2$ $-16,7 \% \pm 2,5$	CID) em ‰ para os rios e amostrados durante os chuvoso e seco. Chuvoso S $-16,7 \% \pm 1,9 -13,3 \%$ $-17,4 \% \pm 4,1 -12,9 \%$ da $-21 \% \pm 3,2 -15,4\%$ $-16,7 \% \pm 2,5 -13,1 \%$

 $-21,2\% \pm 0,9$ $-8,5\% \pm 0,5$

 $-21\% \pm 3,4$ -21,23%

 $-17,1\% \pm 1,6$ $-22,1\% \pm 0,4$

Tabela 2.3 – Composição isotópica do CID (δ^{13} C do

2.5.4 Pressão parcial do CO₂ e fluxos de CO₂

Rio Caeté

Ig. Floresta

Ig. Escondido

A Figura 2.10 mostra os valores da pressão parcial do CO_2 (pCO_2) nos rios. Durante o período seco, a pCO₂ variou de 867 \pm 91,4 µatm no rio Acre a 2.260,4 \pm 761,2 µatm no Riozinho do Rôla. Nos igarapés (Figura 2.11), a pCO_2 foi de 1.941,3 ± 404,3 µatm no Floresta a $3.789.8 \pm 152.6$ µatm no Escondido. No período chuvoso, estes valores foram mais elevados. Nos rios, o valor mais baixo foi observado no rio Acre (4.197,4 \pm 1405 µatm) enquanto que o valor mais alto foi observado no Riozinho do Rôla (5563,1 \pm 1094,2 µatm). Nos igarapés, a pCO₂ foi igual a 4450,3 \pm 2272,4 µatm no Floresta e 3143,5 \pm 1020,7 µatm no Floresta. Todos os rios apresentaram diferenças estatisticamente significativas nos valores da pCO_2 entre os períodos do ano (p < 0,05). Já nos igarapés não houve diferenças significativas (Igarapé Floresta p = 0,54 e igarapé Escondido p = 0,43).

Os fluxos de CO₂ nos rios durante o período seco variaram de $1.9 \pm 1.0 \mu mol CO_2 m^{-1}$ ² s⁻¹no Riozinho do Rôla a 4,9 \pm 3,2 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Iaco. Nos igarapés, o Floresta apresentou um valor de 6,5 \pm 2,0 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ e o Escondido de 2,1 \pm 1,0 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹. Assim como a pCO₂, os fluxos também foram mais elevados no período chuvoso. Nos

rios, os valores variaram de 12,7 \pm 5,9 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Caeté a 25,6 \pm 13,3 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Iaco. Nos igarapés de 10,1 \pm 5,7 a 16,8 \pm 9,7 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no Escondido e no Floresta, respectivamente (Figura 2.12). Todos os rios e igarapés apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os fluxos do período chuvoso e o de secas (p < 0,05).

Alin et al. (2011) encontraram valores de fluxos na Amazônia que variaram de 0,04 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ (canal principal do rio Tapajós) a 24,30 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ (igarapé na bacia do rio Negro). Na bacia do rio Ji-Paraná, Rasera (2008) encontrou valores variando entre 0,60 \pm 0,19 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ no canal principal do rio Ji-Paraná e 12,63 \pm 1,49 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ em um igarapé de 3^a ordem. Rasera (2010) observou maiores fluxos e maiores valores de *p*CO₂ durante o período de cheia nos rios Araguaia e Caxiuanã. A maior variabilidade no fluxo foi observada no rio Araguaia, que apresentou fluxos no período de cheia cerca de 20 vezes maiores que no período de seca. No rio Caxiuanã a variabilidade foi de apenas 1,7 vezes. Em relação aos valores de *p*CO₂, Rasera (2005) encontrou valores até 8 vezes mais altos no período de cheia em rios e igarapés da bacia do rio Ji-Paraná (RO). Nos rios do presente estudo, a maior variabilidade nos fluxos entre os períodos do ano foi observada no Riozinho do Rôla, que apresentou valores cerca de 10 vezes mais altos durante o período de seca.



Figura 2.10 – Pressão parcial do CO₂ (pCO₂) em µatm nos rios amostrados durante os períodos chuvoso e seco.



Figura 2.11 – Pressão parcial do CO₂ (pCO₂) em µatm nos igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco.



Figura 2.12 – Fluxos de CO_2 (em μ mol CO_2 m⁻² s⁻)¹ nos rios amostrados durante os períodos chuvoso e seco



Figura 2.13 – Fluxos de CO_2 (em µmol CO_2 m⁻² s⁻¹) nos igarapés amostrados durante os períodos chuvoso e seco.

2.6 DISCUSSÃO

2.6.1 Variabilidade sazonal do COD e do CID

O carbono orgânico dissolvido (COD) é considerado o segundo maior reservatório de carbono em sistemas aquáticos (DEVOL & HEDGES, 2001). As concentrações de COD presente nos rios é um reflexo do tipo de solo de cada bacia de drenagem. Rios que drenam um relevo mais plano e com solos arenosos tendem a apresentar baixas concentrações de sedimentos e elevadas concentrações de COD, que resultam também em água mais ácidas, enquanto que rios que drenam terrenos mais acidentados e com solos mais argilosos tendem a transportar elevadas concentrações de sedimentos e baixas concentrações de COD (ERTEL et al., 1986; KUCHLER et al., 1994; KUCHLER et al., 2000).

Os rios aqui analisados têm elevada carga de sedimentos. Consequentemente, as concentrações de COD foram baixas. Com relação à variabilidade sazonal, observamos o mesmo padrão descrito em outros estudos na região, com maiores concentrações durante o período chuvoso. A exceção foram os igarapés. O igarapé Floresta não apresentou diferenças significativas nas concentrações de COD entre os períodos e o igarapé Escondido apresentou

menores concentrações durante o período de seca, um comportamento distinto daquele descrito para outros igarapés da região (NEU, 2005; GOUVEIA NETO, 2006; ROSA, 2007). Igarapés respondem mais rápido aos eventos de chuva do que rios maiores. Isto pode explicar essas diferenças nos igarapés, pois nem sempre os mesmos eram amostrados logo após cada evento de chuva e é possível que não tenhamos capturado toda a variabilidade existente na composição dos mesmos. A Figura 2.14 mostra a correlação de Spearman (Rs) entra as concentrações de COD e cota (nível). Com exceção dos rios Iaco e Caeté, que não apresentaram correlação significativa (r = 0,46 e p = 0,06 para o rio Iaco e r = -0,16 e p = 0,55 para o rio Caeté), todos os demais rios apresentaram correlação positiva entre as concentrações de COD e suas cotas (p < 0,05). Com relação aos igarapés, apenas o Floresta apresentou correlação positiva e significativa entre estas variáveis (r = 0,69 e p < 0,05).

O COD presente nos rios é de origem principalmente terrestre (GUYOT; WASSON, 1994; RICHEY et al., 2002; MAYORGA et al., 2005), e grande parte deste carbono chega ao leito dos rios durante os eventos de chuva, através do escoamento superficial (GOUVEIA NETO, 2006; NEU, 2009). Johnson et al. (2006) encontraram uma concentração média de COD igual a 19,6±1,7 mg L⁻¹ no escoamento superficial em microbacias no Mato Grosso. Já Leite (2011) observou uma concentração média de 5,4 mg L⁻¹ no escoamento superficial em uma área de floresta ripária na bacia do rio Urupá, em Rondônia. Nas duas microbacias estudadas, Gomes (dados não publicados) encontrou concentrações de COD no escoamento superficial iguais a 4,63 mg L⁻¹ (igarapé Escondido) e 5,58 mg L⁻¹ (igarapé Floresta). Essas diferenças podem estar relacionadas ao tipo de solo, tipo de vegetação e também à duração e intensidade da chuva.

Já o carbono inorgânico dissolvido (CID) apresenta padrão inverso, com maiores concentrações observadas durante o período de seca. No entanto, como mostrado por Rasera (2005), esse padrão também depende de características químicas de cada bacia de drenagem. A autora observou que rios que drenam solos quimicamente ricos apresentam concentrações de CID maiores no período de seca, enquanto que rios que drenam solos quimicamente pobres apresentam maiores concentrações de CID durante o período de cheia.



Figura 2.14 – Correlação de Spearman (r) entre cota e concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) nos rios (RP – Rio Purus, RA – Rio Acre, RR – Riozinho do Rôla, RI – Rio Iaco, RC – Rio Caeté) e igarapés (IF – Igarapé Floresta, IE – Igarapé Escondido) amostrados.

O CID é composto por três frações (CO₂ livre, HCO_3^- e CO_3^{2-}) e as reações de equilíbrio químico entre essas frações são dependentes dos valores pH. Rios com pH mais elevado tendem a ter maiores concentrações de HCO_3^- e CO_3^{2-} , enquanto que em rios com pH mais ácido a predominância é do CO₂ livre. Dentre os principais processos que determinam a concentração de CID nos rios estão a respiração do solo, que enriquece em CO₂ as águas de percolação e do lençol freático, a respiração dentro dos canais dos rios, as trocas com o CO₂ atmosférico e o intemperismo de rochas (TELMER; VEIZER, 1999; COLE; CARACO, 2002; FINLAY, 2003; HOPE et al., 2004).

Mudanças hidrológicas sazonais podem alterar esses processos. Durante o período de chuvas, as taxas de respiração no solo são mais elevadas (SALIMON et al., 2004; DAVIDSON; TRUMBORE, 2002; DIAS, 2006; HAREN, 2011) e mais CO₂ é então

transportado para dentro dos rios; além disto, há maior aporte de matéria orgânica para dentro dos rios, o que eleva a taxa respiratória e consequentemente as concentrações de CO_2 . Mesmo com a intensificação desses processos, as concentrações de CID foram menores durante o período chuvoso, provavelmente em decorrência da predominância do intemperismo de rochas calcáreas como fonte de CID nestes rios. A Figura 2.15 mostra a correlação de Spearman (r) entre as concentrações de CID e a cota dos rios e dos igarapés. Todos os rios apresentaram correlação negativa e significativa (p < 0,05) entre estas variáveis, enquanto que nos igarapés não houve correlação.

Embora as concentrações de CID sejam menores durante o período chuvoso, a contribuição do CO_2 para o CID total foi maior nesse período. Durante o período de seca nos rios Purus e Iaco, por exemplo, a predominância do CO_2 foi de apenas 2% enquanto que durante o período chuvoso ficou em torno de 40%. Nos igarapés, a predominância do CO_2 durante o período chuvoso foi de 89% e 72% para igarapé Floresta e Escondido, respectivamente (Figura 2.16).

Essas mudanças nas fontes de CID foram observadas também na variabilidade de sua composição isotópica (δ^{13} C). Observamos que nos rios o δ^{13} C do CID foi mais enriquecido durante o período de seca, mostrando que neste período o intemperismo de carbonatos constitui a fonte primária de CID, enquanto que durante o período de chuva o δ^{13} C do CID se tornou mais negativo, refletindo assim a contribuição da decomposição da matéria orgânica de origem terrestre (principalmente plantas C3). Nos igarapés, no entanto, não foram observadas diferenças significativas entre os períodos, o que indica que a principal fonte de CID para estes sistemas é a decomposição da matéria orgânica de origem terrestre.


Figura 2.15 – Correlação de Spearman (r) entre cota e concentrações de carbono inorgânico dissolvido (CID) nos rios (RP – Rio Purus, RA – Rio Acre, RR – Riozinho do Rôla, RI – Rio Iaco, RC – Rio Caeté) e igarapés (IF – Igarapé Floresta, IE – Igarapé Escondido) amostrados.



Figura 2.16 – Contribuição percentual das frações do CID (CO₂ livre, HCO₃⁻ e CO₃²⁻) e valores de pH nos rios e igarapés amostrados durante o período chuvoso (A) e seco (B).

Estudos sobre a composição isotópica do CID em rios amazônicos ainda são escassos. Mayorga et al. (2005) analisaram a composição do CID e das três frações do carbono orgânico (carbono orgânico particulado grosso, carbono orgânico particulado fino e carbono orgânico dissolvido) em rios da Amazônia. Para a fração orgânica os autores concluíram que a principal fonte é uma mistura, em razões variadas, de plantas do tipo C3 e C4. Para o DIC há uma contribuição dessa fração orgânica que é respirada, bem como contribuição da dissolução de carbonatos nos rios mais próximos ao Andes. No entanto, os autores não avaliaram mudanças sazonais no sinal isotópico desse carbono. No rio Urupá (RO), Bolson (2006) observou uma dinâmica similar a que encontramos no AC, com valores mais negativos na composição isotópica do CID durante o período das chuvas, indicando também maior contribuição da respiração da matéria orgânica neste período.

2.6.2 Variabilidade sazonal dos fluxos evasivos de CO2

Em geral, os rios amazônicos apresentam clara sazonalidade, decorrente do regime pluviométrico regional. Como já mostrado, a dinâmica de subida e descida das águas acarreta tanto mudanças físicas, quanto químicas e biológicas, dentro do leito dos rios e assim, a ciclagem de nutrientes nesses sistemas também assume padrão sazonal. Com relação aos fluxos evasivos de CO₂ essa dinâmica não é diferente. Diversos trabalhos têm mostrado que as emissões de carbono a partir de rios, igarapés e áreas alagadas na Amazônia são mais elevadas durante o período de águas altas (RICHEY et al., 2002; RASERA et al. 2008; RASERA, 2010, SALIMON et al. 2012).

Rasera et al. (2008) observaram este comportamento em rios e igarapés da bacia do rio Ji-Paraná. Os autores salientam que os fluxos de CO₂ nestes rios são regulados, em grande parte, pela pCO₂ que, por sua vez, é influenciada pela hidrógrafa. Segundo os mesmos, o aumento da pCO₂ no período chuvoso decorre da entrada de água do solo rica em CO₂, da contribuição da água da chuva, com pH mais ácido que a água do rio e do aumento das concentrações de matéria orgânica, o que eleva as taxas respiratórias. No entanto, os autores complementam que, apesar dos fluxos serem maiores no período de cheia, o fluxo líquido neste período não chega a ser maior que os demais períodos, devido ao tempo de duração do mesmo em relação ao restante da hidrógrafa. Ou seja, mesmo que no período de seca sejam observados os menores fluxos, por esse período ser mais longo, a evasão se torna similar ao período de cheia.

A correlação de Spearman (Figura 2.17) mostra a dependência dos fluxos de CO₂ da pCO_2 (r = 0,70 e p < 0,05) e, em menor grau, da velocidade da corrente (r = 0,41 e p < 0,05), enquanto outras variáveis, como temperatura da água e do ar não apresentam correlação significativa. Rasera et al. (2010) obtiveram resultados similares em relação a pCO_2 e Alin et al. (2011) também salientam a importância da velocidade da corrente no controle dos fluxos evasivos de CO₂ em rios com menos de 100 m de largura.

Durante o período de seca os rios são alimentados principalmente por água subterrânea relativamente mais rica em sais. Apesar das concentrações de CID serem mais elevadas nesta época, grande parte desse carbono está na forma de bicarbonato, o que resultou em baixos valores da pCO_2 e, consequentemente, baixos fluxos de CO₂. Fluxos negativos durante o período de seca foram observados por Rasera (2010) no rio Araguaia, mostrando que a produção primária em águas com disponibilidade de nutrientes e baixas concentrações

de sedimentos em suspensão também deve ser levada em consideração no balanço anual de C dos sistemas fluviais. Nos nossos rios não foram observados valores negativos. Contudo, este fato não indica que a produção primária seja insignificante e, de fato, observou-se coloração esverdeada nas águas de alguns rios durante o período da seca, um indicativo da presença de algas e de um assunto que merece investigações mais detalhadas.

Nos igarapés os fluxos também foram mais altos durante o período chuvoso, com valores absolutos semelhantes aos fluxos dos rios maiores. Durante o período seco, o igarapé Floresta chegou a apresentar fluxos mais altos que os rios. Este igarapé, apesar de apresentar baixas concentrações de CID, apresenta elevados valores de pCO_2 , o que pode explicar estes altos fluxos, mesmo durante o período de seca. Johnson et al. (2008) estudaram microbacias no Mato Grosso e observaram que 77% do carbono transportado por igarapés de pequena ordem está na forma de CO_2 e é originado da respiração no solo, e que mais de 90% desse carbono é então evadido para a atmosfera a partir destes sistemas. Ou seja, sistemas de pequena ordem também são potenciais emissores de carbono para a atmosfera.

•



Figura 2.17 – Correlação de Spearman (r) entre fluxos de CO_2 e cota, temperatura do ar e da água, velocidade da corrente e pCO_2 nos rios e igarapés amostrados.

2.7 CONCLUSÕES

- Os rios apresentaram um padrão sazonal nos fluxos de CO₂ similar ao padrão observado para outros rios da bacia Amazônia, com os maiores fluxos observados durante o período chuvoso;
- Quanto aos igarapés, apenas um deles (igarapé Escondido) apresentou comportamento semelhante aos rios maiores, com maiores fluxos também ocorrendo durante o período chuvoso.

REFERÊNCIAS

ALIN, S. R.; RASERA, M. F. F. L.; SALIMON, C. I.; RICHEY, J. E.; HOLTGRIEVE, G. W.; KRUSCHE, A. V.; SNIDOVONGS, A. Physical controls on carbon dioxide transfer velocity and flux in low-gradient river systems and implications for regional carbon budgets. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 116, p. 1-17, 2011. DOI:10.1029/2010JG001398.

COLE, J. J.; CARACO, N. F. Carbon in catchments: connecting terrestrial carbon loss with aquatic metabolism. Marine and Freshwater Research, Melbourne, v. 53, p. 101-110, 2001.

BOLSON, M. A. A biogeoquímica do rio Urupa, Rondônia. 2006. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. E. Gas diffusivity and production of CO_2 in deep soils of the eastern Amazon. **Tellus B**, Copenhagen, v. 47, p. 550-565, 2002.

DEVOL, A. H.; HEDGES, J. I. Organic matter and nutrients in the mainstem Amazon river. In: MCCLAIN, M. E.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. (Ed.). **The biogeochemistry of the Amazon basin**. New York: Oxford University Press, 2001. p. 275-306.

DIAS, J. D. Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de floresta nativa da Amazônia. 2006. 87f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

DOCTOR, D. H.; KENDAL, C.; SEBESTYEN, S. D.; SHANLEY, J. B.; OHTE, N.; BOYER, E. W. Carbon isotope fractionation of dissolved inorganic carbon (DIC) due to outgassing of carbon dioxide from a headwater stream. **Hydrological Processes**, Glasgow, v. 22, p. 2410-2433, 2008. DOI: 10.1002/hyp.6833.

DUARTE, A. F. Variabilidade e tendências das chuvas em Rio Branco, Acre, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 37-42, 2005.

DUARTE, A. F. Aspectos da climatologia do Acre, Brasil, com base no intervalo 1971-2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 21, n. 3b, p. 96-15, 2006.

ERTEL, J. R.; HEDGES, J. I.; DEVOL, A. H.; RICHEY, J. E.; RIBEIRO, M. N. G. Dissolved humic substances of the Amazon River system. Limnology and Oceanography, Grafton, v. 31, 739-754, 1986.

FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America. Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática, São José dos Campos, v. 5, p. 36-45, 1990.

FINLAY, J. C. Controls of streamwater dissolved inorganic carbon dynamics in a forested watershed. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 62, p. 231–252, 2003.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. Acta Amazônica, Manaus, v. 28, p. 101–126, 1998.

GALLON, M. M. P.; SANCHES, L.; DE PAULO, S. R. Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel de uma floresta tropical de transição amazônica. Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v. 21, p. 291-300, 2006.

GATTI, L. V.; MILLER, J. B.; D'AMELIO, M. T. S.; MARTINEWSKI, A.; BASSO, L. S.; GLOOR, M. E.; WOFSY, S.; TANS, P. Vertical profiles of CO_2 above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balanced biosphere between 2000 and 2009. **Tellus B**, Copenhagen, v. 62, p. 581-594, 2010. DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00484.x.

GOUVEIA NETO, S. C. G. **Concentrações e balanços de carbono orgânico dissolvido em duas bacias do estado de Rondônia**: uma comparação entre floresta e pastagem. 2006. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

GUYOT, J. L.; WASSON, J. G. Regional pattern of riverine dissolved organic carbon in the Amazon drainage basin of Bolivia. **Limnology and Oceanography**, Grafton, v. 39, p. 452-458, 1994.

HOREL, J. D.; HAHMANN, A. N.; GEISLER, J. E. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. **Journal of Climate**, Boston, v. 2, p. 1388-1403, 1989.

HOPE, D.; PALMER, S. M.; BILLETT, M. F.; DAWSON, J. J. D. Variations in dissolved CO₂ and CH₄ in a first-order stream and catchments: an investigation of soil-stream linkages. **Hydrological Processes**, Glasgow, v. 18, p. 3255-3275, 2004.

JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; COUTO, E. G.; NOVAES FILHO, J. P.; RIHA, S. J. DOC and DIC in flowpaths of Amazonian headwater catchments with hydrologically contrasting soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 81, p. 45-57, 2006. DOI: 10.1007/s10533-006-9029-3.

JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; RIHA, S. J. CO₂ efflux from Amazonian headwater stream represents a significant fate for deep soil respiration. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 35, 2008. DOI: 10.1029/2008GL034619.

KÜCHLER, I. L.; MIEKELEY, N.; FORSBERG, B. R. Molecular mass distributions of dissolved organic carbon and associated metals in waters from Rio Negro and Rio Solimões. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 156, p. 207-216, 1994.

KÜCHLER, I. L.; MIEKELEY, N.; FORSBERG, B. R. A Contribution to the chemical characterization of rivers in the Rio Negro Basin, Brazil. Journal of the Brazilian Chemistry Society, São Paulo, v. 11, p. 286-292, 2000.

LEITE, N. K. Fluxo de nutrientes em um fragmento de mata ciliar no estado de Rondônia, Brazil. 2011. 136 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MARENGO, J. A. Interannual variability of deep convection in the tropical South American sector as deduced from ISCCP C_2 data. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 15, p. 995-1010, 1995.

MAYORGA, E.; AUFDENKAMPE, A. K.; MACIELLO, C. A.; KRUSCHE, A. V.; HEDGES, J. I.; QUAY, P. D.; RICHEY, J. E; BROWN, T. A. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. **Nature**, London, v. 436, p. 538-541, 2005. DOI: 10.1038/nature03880.

NEU, V. **O ciclo do carbono na bacia do Alto Xingu**: interações entre ambientes terrestre, aquático e atmosférico. 2009. 113 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

RASERA, M. F. F. L. **O papel das emissões de CO₂ para a atmosfera, em rios da bacia do Ji-Paraná (RO), no ciclo regional do carbono**. 2005. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

RASERA, M. F. F. L. Determinação dos fluxos de CO_2 e parâmetros físicos envolvidos nestes processos em diferentes ambientes fluviais da Amazônia. 2010. 125 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

RASERA, M. F. F. L.; BALLESTER, M. V. R.; KRUSCHE, A. V.; SALIMON, C. I.; MONTEBELO, L. A.; ALIN, S. R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. Estimating the superficial area of small rivers in the southwestern Amazon and their role in CO_2 outgassing. **Earth Interactions**, Washington, DC, v. 12, p. 1-16, 2008. DOI: 10.1175/2008EI257.1.

RICHEY, J. E.; MELACK, J. M.; AUFDENKAMPE, A. K.; BALLESTER, M. V. R.; HESS, L. L. From water to the atmosphere: carbon dioxide evasion from the Amazon River system. **Nature**, London, v. 416, p. 617-620, 2002.

SALIMON, C. I.; DAVIDSON, E. A.; VICTORIA, R. L.; MELO, A. W. CO₂ flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p. 833–843, 2004. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2003.00776.

SALIMON, C. I.; SOUSA, E. S.; ALIN, S. R.; KRUSCHE, A. V.; BALLESTER, M. V. R. Seasonal variation in dissolved carbon concentrations and fluxes in the upper Purus River, southwestern Amazon. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 111, 2012. DOI: 10.1007/s10533-012-9806-0.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry**: chemical equilibrium and rates in natural waters. New York: John Wiley & Sons, 1996. 1022 p.

TELMER, K.; VEIZER, J. Carbon fluxes, pCO_2 and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: carbon isotope perspectives. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 159, p. 61-86, 1999.

VAN HAREN, J. L. N. Spatial and temporal variability of soil CO_2 and N_2O fluxes in tropical forest soils: the influence of three species, precipitation, and soil texture. 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado) - University of Arizona, Arizona, 2011.

3 TAXAS RESPIRATÓRIAS, CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA *a* E RELAÇÕES COM O FLUXO DE CO₂

RESUMO

Rios do sudoeste da Amazônia são conhecidos por transportarem elevadas cargas de sedimentos. Esta característica favorece a respiração da matéria orgânica, a qual é transportada adsorvida a este material, principalmente na fração fina. Durante o period de seca, no entanto, quando a carga de sedimentos é baixa e há aumento da disponibilidade de nutrientes e maior penetração de luz, a atividade fotossintética é favorecida. O presente trabalho teve como objetivo principal quantificar as taxas respiratórias e as concentrações de clorofila a e correlacionar estes valores com os fluxos de CO₂ em cinco rios da bacia do rio Purus. Foram realizadas amostragens nos dois principais períodos sazonais da região: Período Chuvoso (Dez/10 a Abr/11 e Dez/11 a Abr/12) e Período Seco (Jul/11 a Set/11). Foram realizadas medidas de fluxo de CO₂ e demais parâmetro e realizadas amostragens de água para quantificação de sedimentos em suspensão, oxigênio dissolvidos (com amostras incubadas por 24 h para quantificação das taxas respiratórias), nutrientes, carbono dissolvido e clorofila a. Os resultados mostraram que há uma forte sazonalidade nas concentrações de sedimentos finos e grossos, com as maiores concentrações encontradas durante o período chuvoso. As taxas respiratórias, no entanto, não apresentaram diferenças significativas entre os períodos sazonais. As concentrações de clorofila a e oxigênio dissolvido foram mais altas durante o período seco, evidenciando a atividade fotossintética neste período. Com relação aos fluxos de CO2, os mesmo não apresentaram correlação com as taxas respiratórias, porém apresentaram correlação negativa com as concentrações de clorofila a.

ABSTRACT

Rivers of southwestern Amazon are known to carry high sediment load. This feature contributes to increase organic matter respiration rates processes, which is adsorbed to the particulate material, specially the fine fraction. During the dry period, however, low sediment loads, increasing nutrients and light penetration favor photosynthesis. This study aimed to quantify respiration rates and chlorophyll a concentrations and correlate these values with the CO₂ fluxes in five rivers in the Purus basin. Samples were carried out in two main seasons in this region: Rainy Season (Dec/10 to Apr/11 and Dec/11 to Apr/12) and Dry Season (Jul/11 to Sep/11). We measured of CO_2 fluxes and other physic-chemical parameters in the field and took samples for the analysis of suspended sediments, dissolved oxygen (with samples incubated for 24 h to quantify respiration rates), nutrients, chlorophyll a and dissolved carbon concentrations. The results showed that there is a strong seasonality in coarse and fine sediments concentrations, with the highest concentrations found during the rainy season. Respiration rates, however, showed no significant differences between seasons. Chlorophyll a and dissolved oxygen concentrations were higher during the dry season, indicating photosynthetic activity during this period. CO₂ fluxes were not correlated with respiration rates, but negatively correlated with chlorophyll a concentrations.

3.1 INTRODUÇÃO

A evasão total de carbono da bacia Amazônica para a atmosfera foi estimada em cerca de 0,5 Gt C ano⁻¹ primeiramente por Richey et al. (2002). Os autores atribuíram à respiração *in situ* da matéria orgânica de origem terrestre como a principal fonte do carbono emitido pelos rios. De fato, Mayorga et al. (2005) demonstraram, através de análises isotópicas de δ^{13} C e C¹⁴, que o carbono respirado nos rios é de origem principalmente terrestre e que o tempo em que esse carbono foi fixado e então respirado gira em torno de 5 anos.

Rios do sudoeste da Amazônia são conhecidos por transportar elevada carga de sedimentos em suspensão, por terem altas concentrações de íons e baixas concentrações de carbono orgânico dissolvido. A carga de sedimentos transportada por esses rios tem sua origem na base dos Andes e contribui nas características geoquímicas do rio Amazonas e suas planícies de inundação (McCLAIN; NAIMAN, 2008). Leite et al. (2011) encontraram uma concentração média de sedimentos em suspensão equivalente a 402 mg L⁻¹ no rio Madeira, com máximas que chegaram a 1.645 mg L⁻¹ em período de alta descarga. Juntamente com esse material, consideráveis concentrações de material orgânico particulado também transportado. Richey et al. (1990) demonstraram que 90% do carbono orgânico particulado transportado pelo rio Amazonas tem origem Andina.

Esta forte associação da matéria orgânica com o sedimento favorece os processos respiratórios nos rios. Cogo (2005) estudou a relação entre a concentração de sedimentos em suspensão e o consumo de oxigênio em rios da bacia do rio Ji-Paraná, em Rondônia. A autora observou uma correlação positiva entre as concentrações de sedimentos e as taxas respiratórias e concluiu que alterações no consumo de oxigênio (O_2) sugerem que as concentrações de sedimentos em suspensão são fatores determinantes no metabolismo de rios. Ellis et al (2012) estudaram o metabolismo em vários rios das regiões central e sudoeste da Amazônia e encontraram taxas respiratórias variando entre 0,03 e 1,8 µmol L⁻¹ h⁻¹. Estes autores concluíram, baseados em dados sobre a composição isotópica do CO₂, que em rios de água branca a respiração contribui com 93% do CO₂ que é evadido para a atmosfera.

O consumo de CO_2 ocorre principalmente na produção primária, podendo diminuir o fluxo evasivo de CO_2 nos rios, como foi observado por Rasera (2010) no rio Araguaia. A autora chegou a observar fluxos negativos durante o período de seca e atribuiu este fato ao aumento da produção primária, decorrente do menor aporte de sedimentos em suspensão, que permite a maior penetração da luz na coluna d'água e da disponibilidade de nutrientes. No

entanto, para rios com elevada carga sedimentar Wissmar et al. (1981) consideram que a produtividade primária seja limitada, devido à baixa penetração de luz e também às baixas concentrações de nutrientes. Sem que haja consumo, esses ambientes se tornam supersaturados em CO_2 , o que ocasiona numa maior evasão para a atmosfera.

Estudos visando entender o papel da produção primária e do consumo de O_2 com na evasão de CO_2 para a atmosfera em rios da Amazônia ainda muito são escassos. O objetivo principal deste capítulo é fornecer informações adicionais a respeito destes processos, através da quantificação das taxas respiratórias (oxigênio consumido) e da produção primária (baseada nas concentrações de clorofila *a*) e da relação destes dois processos com os fluxos de CO_2 em rios (rio Purus, rio Acre, Riozinho do Rôla, rio Iaco e rio Caeté) pertencentes à bacia do rio Purus.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar as concentrações de sedimentos em suspensão;
- Quantificar as concentrações de oxigênio dissolvido e as taxas respiratórias;
- Quantificar as concentrações de CO₂;
- Quantificar as concentrações de Clorofila a e dos principais nutrientes e;
- Quantificar os fluxos de CO₂.

3.3 HIPÓTESES

- Aumentos nos fluxos de CO₂ em rios são decorrentes do aumento nas taxas respiratórias.
- A produtividade primária em rios de água branca é significativa.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Área de Estudo e Período de Amostragem

A descrição detalhada da área de estudo e das principais características dos rios está no item DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO, na página 25. A rede hidrográfica e os pontos de amostragem poder ser visualizados na Figura B, p. 22. As amostragens foram realizadas durante os meses mais representativos de cada período sazonal: (a) **Período Chuvoso, de** Dez/10 a Abr/11 e de Dez/11 a Abr/12 e, (b) **Período Seco,** de Jul/11 a Set/11.

3.4.2 Métodos Amostrais

3.4.2.1 Amostras de água

Com o auxílio de uma bomba submersa, foi coletada uma amostra de água de 5L, que foi acondicionada em caixa térmica com gelo e levada para o Laboratório de Limnologia da UFAC, onde foram feitas filtragens do sedimento em suspensão. Primeiramente, a amostra foi filtrada com uma peneira com malha de 63 µm, para a retenção do sedimento grosso. A partir dessa amostra já filtrada, também foi retirada uma subamostra de 60 ml, filtrada com filtros de acetato de celulose com porosidade nominal de 0,47 µm e preservadas com *Thymol* para a determinação da concentração dos principais nutrientes e do CID total. As análises foram realizadas no CENA/USP. A Figura 3.1 mostra detalhadamente o processo de filtragem do sedimento em suspensão.

Ainda no campo e com o auxílio da bomba submersa (a 30 cm de profundidade), foram retiradas amostras de água para determinar:

 Concentração de oxigênio dissolvido: 5 (cinco) réplicas coletadas em frascos de 60 ml de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), preservadas no campo (iniciais);

- Taxa respiratória: 5 (cinco) réplicas coletadas em frascos de 60 ml de DBO, incubadas em caixa térmica escura por 24h (finais);
- Concentração de Clorofila a: 1 (uma) amostra de 300 ml coletada, acondicionada em caixa térmica com gelo. No Laboratório de Limnologia, esta amostra foi filtrada com filtro de fibra de vidro (GF/F) e os filtros acondicionados em freezer até o momento da análise.

3.4.2.2 Fluxo de CO₂

O fluxo de CO_2 foi medido através de câmara flutuante. A descrição detalhada do método está no Capítulo I, item 1.4.2.1 (pág. 35).

3.4.2.3 Medidas auxiliares

As medidas de pH e temperatura da água foram feitas com peagômetro portátil Orion modelo 290Aplus e a condutividade elétrica com um condutivímetro VWR 2052. As medidas foram feitas submergindo os eletrodos diretamente na coluna d'água, à aproximadamente 50 cm de profundidade. Também foram realizadas medidas de transparência da água, utilizando um disco de Secchi. Também foram feitas amostragens de água para análise da concentração de COD e CID. A descrição do método de coleta e das análises estão do item 2.4.4.1, pg. 77.



Figura 3.1 - Desenho esquemático das filtragens dos sedimentos em suspensão.

3.4.3 Métodos Analíticos

3.4.3.1 Oxigênio Dissolvido

As concentrações de oxigênio dissolvido foram determinadas empregando-se o Método de Winkler, descrito por Wetzel & Likens, 1991.

3.4.3.2 Taxas Respiratórias

As taxas respiratórias foram calculadas através da mudança na concentração de oxigênio nos frascos incubados no escuro (finais) comparados aos frascos preservados em campo (iniciais).

3.4.3.3 Pigmentos de Clorofila a

Após a filtragem da amostra contendo a biomassa algal, os filtros foram imersos em solvente orgânico (etanol 95%) para extração dos pigmentos. Após a extração, procedeu-se a leitura da densidade óptica das soluções contendo os pigmentos em um espectrofotômetro. O cálculo da concentração final foi feito através de fórmulas específicas (MARKER et al, 1980; SARTORY; GROBBELLAR, 1984).

Clor-a (
$$\mu$$
g.L⁻¹) = (Eb-Ea).(R/R-1).K.v_
V.L

Onde,

Eb = absorbância do extrato a 665nm, antes da acidificação, menos a absorbância a 750nm.

Ea = absorbância do extrato a 665nm, após a acidificação, menos a absorbância a 750nm. **R** = 1,72 (razão de rendimento da clorofila *a* não acidificada para acidificada, conforme) **R/R-1** = 2,39 **K** = coeficiente de absorção da clorofila a = 1000/87 = 11,49 (para etanol)

 \mathbf{v} = volume do solvente utilizado (etanol) **em ml** (usualmente 10 ml)

 $\mathbf{L} =$ comprimento da cubeta em cm (=1)

 \mathbf{V} = volume da água filtrada **em litros**

3.4.3.4 Nutrientes

As análises de concentrações de NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- e PO_4^- foram feitas por injeção de fluxo (FIA, do inglês "Flow Injection Analysis"). A descrição detalhada deste método está no Capítulo I, item 1.4.3.1, página 38.

3.4.3.5 Concentrações de CO₂ livre

A determinação das concentrações de CO_2 livre seguiu a mesma metodologia utilizada por Rasera (2005), calculando-se as frações de carbonatos a partir das equações de equilíbrio termodinâmico, com base nas concentrações de CID total, pH e temperatura (STUMM; MORGAN, 1996).

3.4.3.6 Sedimentos em Suspensão Grosso e Fino

Antes da amostragem, os filtros de acetato de celulose foram secos em estufa a 60°C até o peso constante (~72 horas). Os filtros foram então resfriados em dessecador e pesados. Após a coleta de sedimentos no campo e no laboratório, esses filtros foram novamente submetidos a este processo. A diferença entre o peso final e o peso inicial corresponde à concentração de sedimentos (FISP, 2000).

3.4.4 Análise Estatística

As variáveis foram primeiramente testadas quanto à sua homogeneidade de variância (teste de Bartlett) e também quanto à sua distribuição utilizando o teste de Shapiro-Wilks, sendo a normalidade rejeitada para p < 0,05. Para os parâmetros que não apresentaram distribuição normal, optou-se por utilizar testes não paramétricos. O teste de Mann-Whitney U foi usado para a comparação de médias entre os períodos sazonais e o teste de Kruskall-Wallis foi usado para a comparação entre os sistemas. A matriz de correlação entre as variáveis foi gerada utilizando-se a correlação de Pearson e Spearman. As análises foram feitas utilizando o programa R.

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Concentrações de Sedimentos em Suspensão

Os rios Acre, Iaco e Caeté não apresentaram diferenças significativas nas concentrações de sedimentos grossos (SSG) entre os períodos do ano. O Riozinho do Rôla e o rio Purus apresentaram maiores concentrações durante o período chuvoso (p < 0,05). As concentrações variaram de 0,97 \pm 1,77 mg L⁻¹ no rio Caeté a 28,63 \pm 24,55 mg L⁻¹ no rio Purus durante o período chuvoso e entre 0,10 \pm 0,05 mg L⁻¹ no Riozinho do Rôla a 4,96 \pm 3,08 mg L⁻¹ no rio Acre durante o período seco (Figura 3.2). Existem diferenças estatisticamente significativas nas concentrações de SSG entre os rios amostrados (p < 0,05) e apenas os rios Acre e Caeté não apresentaram diferenças nas concentrações de SSG entre os períodos sazonais (p > 0,05).

Em relação às concentrações de sedimentos finos (SSF), todos os rios apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os períodos sazonais, com exceção do Riozinho do Rôla (p = 0,75). Durante o período chuvoso, as concentrações variaram de $122,52 \pm 53,15 \text{ mg L}^{-1}$ no Riozinho do Rôla a $626,40 \pm 287,96 \text{ mg L}^{-1}$ no rio Iaco. Durante o período seco as concentrações foram mais baixas, variando de $44,13 \pm 15,20 \text{ mg L}^{-1}$ no rio Acre a $71,18 \pm 20,22 \text{ mg L}^{-1}$ no Riozinho do Rôla (Figura 3.3). O teste de Kruskal-Wallis

mostrou que existem diferenças estatisticamente significativas nas concentrações de SSF entre os rios amostrados (p = < 0.05).



Figura 3.2 – Concentrações de sedimentos em suspensão grossos (SSG) em mg L⁻¹ nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco.



Figura 3.3 -Concentrações de sedimentos em suspensão finos (SSF) em mg L⁻¹ nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco.

3.5.2 Concentrações de Oxigênio Dissolvido e Taxas Respiratórias

As concentrações de oxigênio dissolvido (OD) foram mais altas durante o período seco (Figura 3.4), quando variaram de 5,36 \pm 0,36 mg L⁻¹ no rio Acre a 7,53 \pm 1,04 mg L⁻¹ no rio Caeté. Durante o período chuvoso, as concentrações médias variaram entre 3,99 \pm 1,32 mg L⁻¹ no Riozinho do Rôla e 4,46 \pm 1,06 mg L⁻¹ no rio Acre. Não foram encontradas diferenças significativas nas concentrações de OD entre os rios amostrados (p = 0,34), porém todos os rios apresentaram diferenças entre os períodos sazonais. Em outro estudo sobre taxas respiratórias em rios da Amazônia, Rasera (2010) encontrou concentrações de OD iguais a 6,2 mg L⁻¹ no rio Negro (Amazonas) e 3,8 mg L⁻¹ no rio Curuá (Pará).

As taxas respiratórias (Figura 3.5) não apresentaram diferenças significativas entre os períodos do ano, apesar das taxas mais elevadas serem observadas durante o período seco, quando variaram de $0,59 \pm 0,62 \mu$ M h⁻¹ no rio Iaco a $0,95 \pm 0,69 \mu$ M h⁻¹ no rio Caeté. Durante o período chuvoso, apresentaram valores de $0,41 \pm 0,36 \mu$ M h⁻¹ no rio Purus a $0,72 \pm 0,46 \mu$ M h⁻¹ no Riozinho do Rôla. Também não houve diferenças significativas nas taxas respiratórias entre os rios amostrados (p = 0,48). Rasera (2010) observou taxas respiratórias iguais a 0,82 μ mol h⁻¹ no rio Negro e 0,63 no rio Curuá μ M h⁻¹. Ellis et al. (2012) encontraram taxas respiratórias variando de 0,03 μ M h⁻¹ no igarapé Barro Branco (Amazonas) a 1,78 μ M h⁻¹ no rio Acre (Acre).



Figura 3.4 – Concentrações de oxigênio dissolvido (OD) em mg L⁻¹ nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco.



Figura 3.5 – Taxas respiratórias (em μ M h⁻¹) nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco.

3.5.3 Concentrações de CO₂ livre

Durante o período seco, as concentrações médias do CO₂ nos rios variaram entre $14,0 \pm 1,1\mu$ M no rio Acre e 37,0 ± 28,4 µM no rio Caeté. Essas concentrações foram mais altas durante o período chuvoso, quando variou de 38,4 ± 11,6 µM no Riozinho do Rôla a 78,7 ± 57,9 µM no rio Purus (Figura 3.6). No entanto, Riozinho do Rôla e rio Caeté não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os períodos sazonais. No sistema principal do rio Amazonas, Richey et al. (1990) encontraram uma média de 100 µM durante a vazante e 180 µM durante o período de cheia. Os autores também observaram que nos principais afluentes as concentrações foram mais elevadas que no canal principal. No entanto, não houve diferenças estatisticamente significativas nas concentrações de CO₂ entre os rios amostrados (p = 0,51), e o rio Caeté e o Riozinho do Rôla não apresentaram diferenças estativas entre os períodos sazonais (p > 0,05).



Figura 3.6 – Concentrações de CO₂ livre em µmol nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco.

3.5.4 Concentrações de Clorofila a e nutrientes

A Figura 3.7 mostra as concentrações médias de clorofila *a* nos rios amostrados durantes os períodos chuvoso e seco. As concentrações foram mais altas durante o período seco (p < 0,05), e variaram entre 8,30 \pm 3,07 µg L⁻¹ no rio Purus e 35,04 \pm 18,64 µg L⁻¹ no rio Caeté. Não houve diferenças significativas nas concentrações de clorofila *a* entre os rios amostrados (p = 0,46). Santos e Muniz (2010) encontraram concentrações de clorofila *a* igual a 0,20 µg L⁻¹ na plataforma continental do rio Amazonas. Os autores observaram as maiores concentrações (chegando a 5,47 µg L⁻¹) durante o período de baixa descarga e atribuíram este aumento a maior concentraçõo de nutrientes e a maior penetração da luz.

A Tabela 3.1 mostra as concentrações dos principais nutrientes envolvidos no metabolismo de ambientes aquáticos. O nitrato (NO_3^-) apresentou maiores concentrações durante o período chuvoso, variando de 23,0 ± 10,70 µM no Riozinho do Rôla a 42,36 ± 12,10 µM no rio Purus, enquanto o nitrito (NO_2^-) apresentou as maiores concentrações durante o período seco $(1,73 \pm 0,58 \mu M$ no rio Caeté e 2,25 ± 0,88 µM no rio Iaco). O amônio (NH_4^+) apresentou maiores concentrações durante o período chuvoso, variando de 2,27 ± 1,61 µM no rio Caeté a 2,89 ± 1,71 µM no Riozinho do Rôla. Leite (2004) encontrou maiores concentrações de N durante o período de baixas vazões em rios da bacia do rio Ji-Paraná (RO) e atribuiu este fato ao aporte de água subterrânea rica em nutrientes. Bessa e Paredes (1990) também encontraram maiores concentrações de nitrogênio durante o período de seca. Isso mostra que o nitrogênio pode ter fontes distintas, levando a crer que o nitrogênio que chega aos nossos rios é transportado adsorvido ao sedimento durante o período de chuvas.

Quanto ao fosfato (PO_4^{3-}), as maiores concentrações foram observadas durante o período chuvoso, variando de 1,68 ± 1,17 µM no rio Acre a 2,12 ± 1,28 µM no rio Caeté. A exceção foi o rio Purus, que apresentou maior concentração durante o período seco, com uma concentração média de 4,07 ± 0,39 µM contra 2,13 ± 1,02 µM durante o período chuvoso. Leite (2004) também encontrou maiores concentrações de PO_4^{3-} durante o período de altas vazões. O autor salienta que este elemento possui um ciclo quase exclusivamente sedimentar e o fato de apresentar maiores concentrações durante o período de chuvas pode ser resultado do aumento da erosão neste período, que resulta no maior transporte de P nas formas particulada ou adsorvida aos minerais.

A sílica (Si) apresentou maiores concentrações durante o período seco, com médias variando entre $10,16\pm1,40$ mg L⁻¹ no rio Acre e $31,02\pm4,66$ mg L⁻¹ no rio Caeté. A sílica no

ambiente aquático é proveniente principalmente do intemperismo de minerais como silicatos de alumínio, frequentes em rochas sedimentares (WETZEL, 1983). Martinelli et al. (1993) mostraram que a sílica contribui com mais de 68% para a composição elementar do sedimento transportado pelo rio Amazonas.



Figura 3.7 – Concentrações Clorofila $a \text{ em } \mu \text{g } \text{L}^{-1}$ nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco.

Período Chuvoso	$\mathrm{NH_4}^+$	NO ₃	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si
Rio Purus	2,4±1,9	42,4±12,1	1,1±1,2	2,1±1,0	8,1±2,5
Rio Acre	2,6±1,7	28,6±10,8	0,6±0,5	$1,7\pm1,2$	7,5±2,0
Rio Iaco	2,6±1,6	34,9±11,8	1,6±2,7	1,8±1,0	7,90±1,6
Rioz. do Rôla	2,9±1,7	23,0±10,7	0,6±0,4	1,9±1,5	8, 2±2,6
Rio Caeté	2,3±1,6	31,1±14,6	0,8±0,5	2,1±1,3	8,1±1,6
Período Seco	NH_4^+	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	PO_4^{3-}	Si
Rio Purus	1,0±0,4	5,0±1,0	2,0±0,7	4,1±0,4	13,2±1,8
Rio Acre	1,6±0,5	6,0±1,9	1,9±0,4	$0,7\pm0,2$	$10,2\pm1,5$
Rio Iaco	1,0±0,6	8,9±2,8	2,2±0,9	1,0±0,2	16,0±9,5
Rioz. do Rôla	2,0±0,6	14,4±11,0	2,0±0,40	0,5±0,6	11,0±6,8
Rio Caeté	1,2±0,4	5,0±0,4	1,70±0,6	0,4±0,1	31,08±4,7

Tabela 3.1 – Concentrações dos principais nutrientes (Si em mg L⁻¹; NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- e PO_4^{-3} em μM) nos rios amostrados durante o período chuvoso e período seco.

3.5.5 Fluxos de CO₂

Durante o período seco, os fluxos de CO₂ variaram de 1,9±1,0 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no Riozinho do Rôla a 4,9 ± 3,2 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Iaco. Já durante o período chuvoso os fluxos foram mais elevados, variando de 12,7 ± 5,9 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Caeté a 25,6 ± 13,3 µmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Iaco. Todos os rios e igarapés apresentaram diferenças estatisticamente significativas nos valores de fluxo entre os períodos sazonais (p < 0,05) e não houve diferenças nos fluxos de CO2 entre os rios amostrados (p > 0,05), como mostra a Figura 3.8.

Alin et al. (2011) realizaram medidas em diferentes rios de água branca da bacia Amazônica e encontraram um valor igual a 6,23 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Amazonas. Nos rios do sudoeste da Amazônia, estes autores encontraram valores variando de 5,59 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ a 14,23 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Purus, 2,09 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ a 7,15 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Madeira, 4,07 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Acre, 6,75 no rio Envira e 6,80 μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹ no rio Tarauacá. Vale ressaltar que essas medidas foram feitas durante o período de seca. Portanto, nossos valores estão dentro do padrão observado para outros rios durante este período.



Figura 3.8 – Fluxos de CO₂ (em μ mol CO₂ m⁻² s⁻¹) nos rios amostrados (RP = Rio Purus, RA = Rio Acre, RI = Rio Purus, RR = Riozinho do Rôla e RC = rio Caeté) durante o período chuvoso (A) e período seco (B).

3.6 DISCUSSÃO

3.6.1 Carga de Sedimentos

A carga de sedimentos em rios, bem como sua dinâmica, é controlada principalmente pela hidrologia, regime local de precipitação e pelas características geomorfológicas de cada bacia (GUYOT et al., 1999; BOURGOIN et al 2007; GAUTIER et al., 2007). O rio Madeira, importante tributário do rio Amazonas, tem suas cabeceiras nos Andes Bolivianos e exibe um carga de sedimentar igual a 1.094 mg L⁻¹ em Porto Velho, diminuindo até uma concentração igual a 672 mg L⁻¹ na sua foz (MARTINELLI et al, 1989). Essas diferenças nas concentrações

estão relacionadas principalmente com a contribuição dos tributários, que apresentam concentrações de sedimentos mais baixas, uma vez que tem suas cabeceiras em terrenos menos acidentados. A sazonalidade também tem significante controle nas concentrações de sedimentos neste rio. Leite et al. (2011) avaliaram a influencia da sazonalidade na carga sedimentar do rio Madeira e observou um pico de 1.645 mg L⁻¹ no período de alta descarga.

As maiores concentrações de sedimentos foram observadas nos rios Purus, Iaco e Acre, que têm suas cabeceiras mais próximas à região Sub-Andina, comparados com os rios menores, Caeté e Riozinho do Rôla, os quais já têm suas cabeceiras dentro do território acreano, onde o relevo é menos acidentado. Com relação à sazonalidade, as maiores concentrações observadas durante o período de altas descargas.

As concentrações de SSF foram bem superiores às concentrações de SSG. A Figura 3.9 mostra a contribuição percentual do SSG e do SSF para as concentrações de sedimentos totais. Na maioria dos rios a porcentagem do SSF é maior que 97%. O sedimento grosso é composto principalmente por areia e tem tamanho superior a 63µm, enquanto o sedimento fino é composto por argila e silte e tem tamanho que varia entre 0,10 e 0,63 µm. Além de apresentar maior concentração, o SSF também tem maior associação com a matéria orgânica, uma vez que possui uma área superficial disponível para a adsorção maior quando comparado ao SSG (KEIL et al, 1994).



Figura 3.9 – Contribuição percentual das concentrações de SSG e SSF para as concentrações de sedimentos totais.

Cogo (2005) realizou experimentos em laboratório para determinar a influência do aumento das concentrações de sedimentos em suspensão nas taxas respiratórias em águas de rios e igarapés da bacia do rio Ji-Paraná (RO). A autora observou uma correlação positiva entre o aumento nas concentrações de sedimentos finos e as concentrações de COD edas taxas respiratórias. Para nossos rios, no entanto, não existiu uma correlação entre as concentrações de COD e as concentrações de SSF (r = 0,11 e p = 0,32; Figura 3.10). Isto pode ser explicado pelo fato de alguns rios não apresentarem diferenças nas concentrações de COD entre os períodos sazonais, como no caso do rio Caeté e rio Iaco.



Figura 3.10 – Correlação de Spearman (r) entre as concentrações de sedimentos em suspensão finos (SSF) em mg L⁻¹ e as concentrações de carbono orgânico dissolvido (COD) em mg L⁻¹ nos rios amostrados.

3.6.2 Respiração e Fotossíntese

Alguns estudos na Amazônia indicam que a respiração da matéria orgânica possa ser a principal fonte de CO₂ nos rios (RICHEY et al., 2002), uma vez que as maiores taxas respiratórias são observadas no período de maior vazão, quando também aumentam as concentrações de matéria orgânica dissolvida. No entanto, nos rios amostrados, não foram encontradas diferenças significativas nas taxas respiratórias entre os períodos sazonais (p > 0,05) e não foi observada correlação com as concentrações de COD (Figura 3.11A), embora as taxas mais altas tenham sido observadas durante o período seco, quando as concentrações de OD também foram mais altas. Dodds (2006) considera que em rios onde os processos autotróficos predominam, também pode existir alta atividade heterotrófica, com elevadas taxas de respiração. A Figura 3.11B mostra a correlação entre as concentrações de OD e as taxas respiratórias. Apesar de fraca a correlação foi significativa (p < 0,05). Este fato leva a crer que, durante o período seco, a fotossíntese esteja suprindo tanto as concentrações de OD como também fornecendo substrato para a respiração nos rios.

A produção primária nos rios amazônicos ainda é pouco estudada. Wissmar et al. (1981) estudaram a produção primária e a respiração no canal principal do rio Amazonas e em alguns tributários e considerou a baixa concentração de nutrientes e a baixa penetração de luz como principais fatores limitantes à fotossíntese. No entanto, o estudo não considerou a variabilidade sazonal deste processo, pois as amostragens foram realizadas apenas no período maiores vazões. Ellis et al. (2012), no entanto, realizaram as mesmas medidas em rios da região durante o período de seca e observou que para os rios do sudoeste da Amazônia (incluindo os rios Acre e Purus) a produção primária é relevante e também se constitui uma importante fonte de carbono para estes rios.

Durante o período seco, foi possível observar que as concentrações de clorofila *a* foram mais altas, evidenciando a importância da produtividade primária nos rios amostrados. Apesar das concentrações de nutrientes necessários terem sido um pouco mais baixas, a maior penetração de luz ocasionada pela baixa concentração de sedimentos em suspensão favoreceu a intensificação deste processo. A Figura 3.12 mostra a transparência da água em relação à profundidade de cada rio. Nota-se que apenas o Riozinho do Rôla apresenta menor transparência durante o período seco. Isso se deve a maior concentração de sedimentos finos encontrada neste rio. No entanto, as concentrações de NO_3^- (fonte de nitrogênio para produtores primários) é bem mais alta do que nos demais rios, e isto pode ter favorecido a
fotossíntese, mesmo com baixa penetração de luz, uma vez que as concentrações de clorofila *a* neste rio também foram altas.

Durante o período chuvoso, as concentrações foram mais baixas. Além disso, tivemos dificuldades nas análises, devido às altas concentrações de sedimentos. Por este motivo, em alguns rios tivemos apenas o resultado de duas análises pra este período.



Figura 3.11 – Correlação de Spearman (r) entre as taxas respiratórias (TR) em μ M h⁻¹ e as concentrações de OD (A) em μ M e as concentrações de COD (B) em mg L⁻¹ nos rios amostrados.

A sílica também se constitui em um nutriente importante para a fotossíntese, principalmente em rios amazônicos onde a comunidade de diatomáceas é bem representativa (SALAS et al., 2002; FERRARI et al. 2007). No estado do Acre, o primeiro trabalho publicado sobre algas foi feito por Archibald e King em 1985 e a divisão (ou filo) Bacillariophyta, à qual pertencem as diatomáceas, foi a segunda mais representativa (KEPPELER et al., 1999). Essas algas têm como principal pigmento a clorofila *a* e a sílica é o principal componente de sua parede celular. Como os rios estudados são bastante sedimentares e, portanto, as concentrações de sílicas são altas, este é mais um fator importante para afirmar que os rios estudados oferecem condições apropriadas para que haja produção primária durante o período seco. No rio Caeté, por exemplo, onde foi encontrada a maior concentração de clorofila *a*, também foi observada a maior concentração de Si. Foram realizadas amostragens da comunidade fitoplanctônica nos rios, mas por falta de pessoal pra

realizar a identificação das algas em tempo hábil, não foi possível apresentar os resultados. No entanto, o material continua preservado, podendo ser analisado posteriormente.



Figura 3.12 – Transparência e profundidade média (em cm) para os rios amostrados durante o período chuvoso e período seco.

3.6.3 Oxigênio Dissolvido e CO₂ livre

De acordo com Esteves (1998) as principais fontes de oxigênio para os corpos d'água são a fotossíntese e a atmosfera e as perdas são por consumo pela decomposição da matéria orgânica (oxidação), evasão para a atmosfera, respiração de organismos aquáticos, nitrificação e oxidação de íons metálicos.

Os resultados mostraram maiores concentrações durante o período seco, e isto pode ser resultado da maior atividade fotossintética, favorecida neste período. Análises isotópicas do oxigênio dissolvido (δ^{18} O) constituem uma ferramenta útil para identificar quais os processos que afetam as mudanças nas concentrações de oxigênio dissolvido em sistemas aquáticos. Quay et al., (1995) consideram que valores maiores que 24,2‰ acompanhados de baixas concentrações de OD indicam que a respiração excede a fotossíntese e que valores menores que 24,2‰ acompanhados de altas concentrações de OD indicam que a fotossíntese predomina. Ellis et al. (2012) realizaram análises da composição isotópica do oxigênio (δ^{18} O) em rios amazônicos, e encontrou valores acima de 24,2‰ em pequenos igarapés e em grandes rios, indicando que a respiração predomina nesses sistemas. Infelizmente não foi possível realizar análises isotópicas do oxigênio dissolvido nos nossos rios. No entanto, os rios Acre e Purus foram amostrados por Ellis et al. (2012) durante o período de seca, e o δ^{18} O nesses rios é menor que 24,2‰ com altas concentrações de OD, indicando assim o predomínio da fotossíntese.

Com relação às concentrações de CO_2 livre, as mesmas apresentaram padrão inverso as do OD, com maiores concentrações durante o período chuvoso. Essas maiores concentrações estão relacionadas ao aumento nas taxas respiratórias, a maior entrada de água do solo rica em CO_2 e a dissolução do carbonato (RASERA, 2010). Durante o período seco, as concentrações de CO_2 foram mais baixas apenas nos rios Purus, Acre e Iaco. No rio Caeté e no Riozinho do Rôla não houve diferenças entre os períodos sazonais. Essas diferenças podem estar relacionadas com a distribuição das frações do carbono inorgânico dissolvido (CID). Em tributários, a contribuição do CO_2 para o CID total é maior quando comparada aos rios maiores (RICHEY et al. 1990; DEVOL & HEDGES, 2001). Como observado no Capítulo II, durante o período seco, as concentrações de CID são elevadas. No entanto, a maior parte está na forma de bicarbonato, pois os rios são supridos principalmente por água subterrânea rica em sais. No entanto, pequenos tributários recebem águas vindas de pequenos igarapés, os quais apresentam elevadas concentrações de CO₂ mesmo durante o período seco. Nesse período, o rio Caeté e o Riozinho do Rôla apresentaram maiores concentrações CO_2 livre quando comparados aos demais rios, embora essas diferenças não tenham sido significativas (p = 0,19).

A respiração da matéria orgânica é consideração como a principal fonte de CO₂ em rios (RICHEY et al, 2002; MAYORGA et al., 2005; ELLIS et al., 2012). A Figura 3.13 mostra a correlação entre as concentrações de CO₂ livre e as concentrações de COD (A), pH (B), concentrações de OD (C) e taxa respiratória (D). As concentrações de CO₂ se mostraram negativamente correlacionadas com os valores de pH (r = -0,70 e p < 0,05) e com as concentrações de OD (r = -0,58 e p < 0,05). No entanto, a correlação com as concentrações de COD foi fraca, porém significativa (r = 0,31 e p < 0,05) e não houve correlação com as taxas respiratórias (r = -0,19 e p = 0,20). Isto pode indicar que, além da respiração, outros fatores devem estar contribuindo para o aumento das concentrações de CO₂ livre durante o período chuvoso.



Figura 3.13 – Correlação de Spearman (r) entre as concentrações de CO₂ livre (em μ M) e as concentrações de COD (em mg L⁻¹), pH, concentrações de OD (em mg L⁻¹) e taxas respiratórias (em μ M h⁻¹) nos rios amostrados.

3.6.4 A relação com os fluxos de CO₂

A Figura 3.14 mostra a correlação entre os fluxos de CO_2 e as concentrações de OD, CO_2 livre, clorofila *a* e taxas respiratórias. Nota-se que existe uma correlação negativa e significativa com as concentrações de OD e positiva e significativa com as concentrações de CO_2 livre e clorofila *a*. Já para com as taxas respiratórias, a correlação foi fraca e negativa. Durante o período chuvoso, quando todas as condições físicas, químicas e biológicas tornam o meio mais propício à respiração, os fluxos de CO_2 foram superiores aos fluxos observados durante o período seco. Richey et al. (2002), investigou quais seriam as fontes de carbono que estariam suportando as emissões de CO_2 para atmosfera, e concluiu que a respiração *in situ* seria responsável por 35% dessa evasão. Este fato levou os autores a concluírem que a respiração *in situ*, associada às mudanças hidrológicas sazonais, são os principais fatores que controlam a evasão de carbono em rios da Amazônia. Ellis et al. (2012) também observaram maiores fluxos de CO_2 em rios com elevadas taxas de respiração.

No entanto, nos nossos rios não foi observada correlação entre as taxas respiratórias e os fluxos de CO₂ (Figura 3.13D). Porém, este fato não suporta a afirmação de que a respiração nestes rios não seja responsável por esses altos fluxos, mas que a ação de outros fatores, como velocidade da corrente e concentração de CO₂, também sejam responsáveis por essas emissões (Rasera, 2010; Alin et al., 2011). Como já foi mostrado, a respiração *in situ* não é a única fonte de CO₂ nos rios, uma vez que suas concentrações também são influenciadas pela entrada de água do solo e pela dissolução do carbonato.

Durante o período de seca, as condições foram mais favoráveis à fotossíntese, com maior penetração da luz e disponibilidade de nutrientes. Este processo, associado à geologia das bacias, levou a uma redução das concentrações de CO_2 livre, ocasionando também uma diminuição nos fluxos de CO_2 . Neste período as taxas respiratórias foram um pouco mais altas do que no período chuvoso. É possível que a biomassa de algas possa estar agindo como substrato para a atividade microbiana. Através da análise isotópica do CO_2 respirando em rios amazônicos, Ellis et al., (2012) encontraram valores que apontam a importância do fitoplâncton com fonte de carbono nestes rios durante o período de seca. Além disso, parte do CO_2 produzido pela respiração pode também estar sendo assimilada pelo fitoplâncton e, portanto, não sendo evadido para a atmosfera.



Figura 3.14 – Correlação de Spearman (r) entre os fluxos de CO_2 (em μ mol CO_2 m⁻² s⁻¹) e as concentrações de OD (A) em mg L⁻¹, concentrações de CO_2 livre (B) em μ M as taxas respiratórias (C) em μ M h⁻¹ e as concentrações de clorofila *a* (D) em μ g L⁻¹ nos rios amostrados.

3.7 CONCLUSÕES

- Os fluxos de CO₂ não apresentaram correlação com as taxas respiração.
- As concentrações de OD e clorofila *a* durante o período seco evidenciam atividade fotossintética nos rios amostrados.

REFERÊNCIAS

ALIN, S. R.; RASERA, M. F. F. L.; SALIMON, C. I.; RICHEY, J. E.; HOLTGRIEVE, G. W.; KRUSCHE, A. V.; SNIDOVONGS, A. Physical controls on carbon dioxide transfer velocity and flux in low-gradient river systems and implications for regional carbon budgets. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 116, p. 1-17, 2011. Doi: 10.1029/2010JG001398.

BESSA, M. F.; PAREDES, J. F. Transporte do carbono e do nitrogênio orgânico e inorgânico dissolvidos pelo rio São Francisco, Brasil, durante um ano hidrológico (1984-1985). **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 9-15, 1990.

BOURGOIN, L. M.; BONNET, M. P.; MARTINEZ, J. M.; KOSUTH, P.; COCHONNEAU, G.; MOREIRA-TURCQ, P.; GUYOT, J. L.; VAUCHEL, P.; FILIZOLA, N.; SEYLER, P. Temporal dynamics of water and sediments exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 335, p. 140-156, 2007.

COGO, M. C. **O papel dos sedimentos em suspensão no metabolismo de rios de micro e meso-escala no estado de Rondônia**. 2005. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

DEVOL, A. H.; HEDGES, J. I. Organic matter and nutrients in the mainstem Amazon river. In: MCCLAIN, M. E.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E. (Ed.). **The biogeochemistry of the Amazon basin**. New York: Oxford University Press, 2001. p. 275-306.

DODDIS, W. K. Eutrophication and trophic state in rivers and streams. Limnology and Oceanography, Grafton, v. 51, p. 671–680, 2006.

ELLIS, E. E.; RICHEY, J. E.; AUFDENKAMPE, A. K.; KRUSCHE, A. V.; QUAY, P. D.;SALIMON, C. I.; CUNHA, H. B. Factors controlling water-column respiration in rivers of the central and southwestern Amazon Basin. **Limnology and Oceanography**, Grafton, v. 57, p. 527–540, 2012. DOI: 10.4319/lo.2012.57.2.0527.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 1998. 602 p.

FEDERAL INTERAGENCY SEDIMENTATION PROJECT. **Report NN**. A study of methods used in measurement and analysis of sediment load in reservoirs. Vicksburg, MS, 2000. 29 p.

FERRARI, F.; PROCOPIAK, L. K.; ALENCAR, Y. B.; LUDWIG, T. A. V. Eunotiaceae (Bacillariophyceae) em igarapés da Amazônia Central, Manaus e Presidente Figueiredo, Brasil. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 37, p. 1-16, 2007.

GAUTIER, E.; BRUNSTEIN, D.; VAUCHEL, P.; ROULET, M.; FUERTES, O.; GUYOT, J. L.; DAROZZES, J.; BOURREL, L. Temporal relations between meander deformation, water discharge and sediment fluxes in the floodplain of the Beni River (Bolivian Amazonia). **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 32, p. 230-248, 2007.

GUYOT, J. L.; JOUANNEAU, J. M.; WASSON, J. G. Characterization of river bed and suspended in the Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia). Journal of South America Earth Science, Amsterdam, v. 12, p. 401-410, 1999.

KEIL, R. G.; MAYER, L. M.; QUAY, P. D.; RICHEY, J. E.; HEDGES, J. I. Loss of organic matter from riverine particles in deltas. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, New York, v. 61, p. 1507-1511, 1997.

KEPPELER, E. C.; LOPES, M. R. M.; LIMA, C. S. Ficoflóra do Lago Amapá em Rio Branco, Acre: I: Euglenophyceae. **Revista Brasileira de Biologia**, Rio de Janeiro, v. 59, p. 679-686, 1999.

LEITE, N. K. A biogeoquímica do rio Ji-Paraná, Rondônica. 2004. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

LEITE, N. K.; KRUSCHE, A. V.; BALLESTER, M. V. R.; VICTORIA, R. L.; RICHEY, J. E.; GOMES, B. M. Intra and interannual variability in the Madeira River water chemistry and sediment load. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 105, p. 37-51, 2011. DOI: 10.1007/s10533-010-9568-5.

McCLAIN, M. E.; NAIMAN, R. J. Andean influences on the biogeochemistry and ecology of the Amazon River. **BioScience**, Washington, DC, v. 58, p. 325-338, 2008.

MARKER, A. F. H.; NUSCH, H.; RIEMANN, B. The measurement of photosynthetic pigments in freshwater and standardization of methods: conclusion and recommendations. Archives of Hydrobiology, Heidelberg, v. 14, p. 91-106, 1980.

MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; DEVOL, A. H.; RICHEY, J. E.; FORSBERG, B. R. Suspended sediments load in the Amazon Basin: an overview. **GeoJournal**, Dordrecht, v. 19, p. 381-389, 1989.

MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; DEMATE, J. L. I.; RICHEY, J. E.; DEVAOL, A. H. Chemical and mineralogical composition of Amazon River floodplain sediments, Brazil. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 8, p. 391-402, 1993.

MAYORGA, E.; AUFDENKAMPE, A. K.; MACIELLO, C. A.; KRUSCHE, A. V.; HEDGES, J. I.; QUAY, P. D.; RICHEY, J. E.; BROWN, T. A. Young organic matter as a source of carbon dioxide outgassing from Amazonian rivers. **Nature**, London, v. 436, p. 538-541, 2005. DOI: 10.1038/nature03880.

QUAY, P. D.; WILBUR, D. O.; RICHEY, J. E.; DEVOL, A. H.; BENEER, R. FORSBERG, B. R. The ¹⁸O:¹⁶O of dissolved oxygen in rivers and lakes in the Amazon Basin: Determining the ratio of respiration to photosynthesis rates in freshwaters **Limnology and Oceanography**, Grafton, v. 40, p. 718-729, 1995.

RASERA, M. F. F. L. Determinação dos fluxos de CO₂ e parâmetros físicos envolvidos nestes processos em diferentes ambientes fluviais da Amazônia. 2010. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

RICHEY, J. E.; HEDGES, J. I.; DEVOL, A. H.; QUAY, P. D.; VICTORIA, R. L.; MARTINELLI, L. A.; FORSBERG, B. R. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. **Limnology and Oceanography**, Grafton, v. 35, p. 352-371, 1990.

RICHEY, J. E.; MELACK, J. M.; AUFDENKAMPE, A. K.; BALLESTER, M. V. R.; HESS, L. L. From water to the atmosphere: carbon dioxide evasion from the Amazon River system. **Nature**, London, v. 416, p. 617-620, 2002.

SALAS, S. E.; DUQUE, S. R.; NUÑEZ-AVELLANEDA, M.; LAMARO, A. A. Diatoms from Colombian Amazon. **Cryptogamie Algologie**, Paris, v. 23, p. 75-99, 2002.

SANTOS, M. L. S.; MUNIZ, K. Variação nictemeral de parâmetros abióticos e clorofila *a* em uma estação oceanográfica na plataforma continental do Amazonas. **Atlântica**, Rio Grande, v. 32, p. 237-246, 2010. DOI: 10.5088/ATL.2010.32.2.237.

SARTORY, D. P.; GROBBELAAR, J. U. Extraction of chlorophyll-*a* from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. **Hydrobiologia**, Dordrecht, v. 114, p. 177-187, 1984.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry**: chemical equilibrium and rates in natural waters. New York: John Wiley & Sons, 1996. 1022 p.

WETZEL, R. G. Limnologia. Lisboa: Ed. da Fundação Calouste Gulbenkian, 1993. 645 p.

WETZEL, R. G.; LIKENS, G. E. Limnological analyses. New York: Springer-Verlag, 1991. 391 p.

WISSMAR, R. C.; RICHEY, J. E.; STALLARD, R. F.; EDMOND, J. M. Plankton metabolism and carbon processes in the Amazon River, its tributaries, and floodplain waters, Peru-Brazil, May-June 1977. **Ecology**, Brooklyn, v. 62, p. 1622-1633, 1981.

CONCLUSÕES FINAIS

O presente trabalho foi realizado com o objetivo principal de quantificar os fluxos evasivos de CO_2 em rios da bacia do Purus, no sudoeste da Amazônia e poder contribuir para preencher a lacuna de conhecimento acerca do papel dos sistemas aquáticos no ciclo regional do carbono. Procurou-se relacionar a composição química da água destes rios com os fluxos, bem como a influência das mudanças hidrológicas sazonais, e a relação entre as taxas respiratórias e a biomassa de algas e tais fluxos.

A partir dos resultados obtidos conclui-se que:

- Os rios estudados apresentam águas relativamente ricas em nutrientes, com diferenças significativas somatório de cátions (ZT⁺), indicando que esses rios drenam terrenos quimicamente diferenciados. Nos igarapés, também foi possível observar diferenças nas concentrações de íons relacionadas com a tipologia de solo de cada microbacia, com as maiores concentrações encontradas no igarapé que drena um terreno mais fértil.
- O carbono inorgânico dissolvido (CID) apresentou concentrações elevadas nos rios, com uma porcentagem elevada na forma de bicarbonato (HCO₃⁻). Essa maior contribuição fez com que as concentrações de CO2 fossem mais baixas durante o período seco. Ainda com relação ao CID, sua composição isotópica mostrou que nos rios esse carbono é mais enriquecido do que nos igarapés, indicando maior contribuição do intemperismo de rochas em relação à respiração do solo.
- Nos rios houve uma correlação significativa e positiva entre TZ⁺ e os fluxos de CO₂. Nos igarapés esta correlação foi negativa e significativa, porém positiva com a velocidade da corrente. Isto demonstra que apesar das características químicas das águas claramente influenciarem os fluxos de CO₂, não há um padrão único entre estes diferentes sistemas, mas sim distintas interações entre fatores de controle.
- A sazonalidade exerce forte influência nas concentrações e nos fluxos de carbono. Durante o período seco, com a predominância do bicarbonato, as concentrações de CID são elevadas. Já durante o período chuvoso, observa-se um aumento nas concentrações de carbono orgânico dissolvido. A pCO₂ e os fluxos evasivos também foram mais altos durante o período de chuva, reflexo

do aumento das concentrações de substrato para a respiração e maior entrada de água do solo, rica em CO₂.

Apesar das concentrações de COD e sedimentos em suspensão serem mais altas durante o período de chuvas, não houve diferenças significativas nas taxas respiratórias entre os períodos sazonais. Isto pode ser um reflexo da atividade do fitoplâncton durante o período seco, que além de elevar as concentrações de oxigênio dissolvido, ainda fornecem substrato para a respiração nos rios. Isto demonstra que a produção primária é significante em rios do sudoeste da Amazônia durante o período seco.

A Amazônia é um mosaico de ecossistemas. Embora os resultados aqui apresentados sejam relevantes, deve-se considerar que ainda há muito a ser estudado e avaliado. É necessário que as técnicas de amostragem sejam ainda mais precisas e que um número maior de ambientes seja amostrado, o que ajudará a aumentar a acurácia nas estimativas das emissões de carbono em toda a bacia.