



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
IG/IB/IQ/FACE-ECO/CDS  
CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ANA LUIZA DE MELO RIBEIRO

ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE CARBONO E A RELAÇÃO SOLO-PLANTA  
NO PANTANAL MATO-GROSSENSE

BRASÍLIA  
2022

ANA LUIZA DE MELO RIBEIRO

ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE CARBONO E A RELAÇÃO SOLO-PLANTA  
NO PANTANAL MATO-GROSSENSE

Trabalho Interdisciplinar Integrado de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Ciências Ambientais pela Universidade de Brasília sob a orientação da professora Gabriela Bielefeld Nardoto.

BRASÍLIA  
2022

Ficha catalográfica:



Dedico este trabalho ao senhor Pitote, de Barão de Melgaço.  
Pantaneiro descendente dos Guató, marido, pai, e meu querido avô.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais: Lucindo, meu melhor amigo, e Marisete, que me conhece melhor do que qualquer um. Todos os agradecimentos existentes no mundo não seriam capazes de expressar a significância do amor e apoio incondicional que foi me dado, mesmo assim, obrigada por tudo.

A minha avó Lourdes, pelo carinho e apoio sempre presentes, mesmo a mil quilômetros de distância.

Aos familiares e amigos que me acompanharam durante a graduação.

A professora Gabriela Nardoto, por apresentar o mundo dos isótopos estáveis e compartilhar o júbilo de estudar os solos.

Aos colegas do Environmental Isotope Studies, pelo acolhimento e ensinamentos compartilhados.

As amigas que conquistei na universidade nos últimos anos. Roberta, Janaína, Luiza, Giovanna e Luciana, a UnB não seria a mesma sem vocês.

## RESUMO

A assinatura isotópica de carbono é uma ferramenta de análise ambiental utilizada para identificação de mudanças da paisagem. O Pantanal é a maior planície alagável do mundo, onde os padrões de inundação são influência para a formação dos solos, cobertura da vegetação e processos relacionados ao ciclo do carbono como a dinâmica da matéria orgânica. A diminuição dessas áreas alagadas é um fator que contribui para o ressecamento do solo e estresse hídrico por parte da vegetação, portanto o objetivo deste trabalho é analisar a relação solo-vegetação do Pantanal Mato-grossense a partir de isótopos estáveis de carbono, comparar as regiões norte e sul, e avaliar a suscetibilidade ao estresse hídrico da vegetação. Para isso foram escolhidas quatro sub-regiões de análise de solo e material foliar no Pantanal: Transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN) e Pantanal Norte (PAN), no município de Poconé, Pantanal Sul (PS) e Transição do Pantanal Sul- Cerrado (T-PS) no município de Aquidauana. Os solos resultaram em textura média para T-PAN, argilosa para PAN, arenosa para PS e T-PS. A razão C/N dos solos resultou em valores com pouca variação, e no material foliar, a razão C/N indicou que a matéria orgânica de PAN como a mais suscetível para decomposição. Os atributos químicos indicam que no geral os solos estudados são pouco férteis, PAN apresentou melhores resultados em relação com as outras sub-regiões, devido a boa disponibilidade de potássio, cálcio, magnésio e capacidade de troca catiônica. A comparação entre a assinatura isotópica dos solos e vegetação demonstrou que o Pantanal Norte (T-PAN e PAN) possui no geral valores mais negativos que o Pantanal Sul (PS e T-PS), mesmo assim, a via fotossintética C<sub>3</sub> tem forte presença em todas as sub-regiões. Por conta disso, em um contexto de mudanças climáticas mais intensas, as sub-regiões PS e T-PS são as mais suscetíveis ao estresse hídrico prolongado, e comprometimento do desenvolvimento de espécies arbóreas, que ocasiona o favorecimento das plantas C<sub>4</sub>, e o processo de mudança na composição da vegetação.

**Palavras-chave:** assinatura isotópica, mudanças climáticas, áreas alagadas,  $\delta^{13}\text{C}$ , estresse hídrico

## ABSTRACT

The carbon isotopic signature is a tool for environmental analysis used to identify landscape changes. The Pantanal is the largest floodplain in the world, where flooding patterns are influential in soil formation, vegetation cover, and carbon cycle processes such as organic matter dynamics. The reduction of these flooded areas is a factor that contributes to soil drying and water stress on the part of the vegetation, therefore the objective of this work is to analyze the soil-vegetation relationship of the Pantanal Mato-grossense from stable carbon isotopes, compare the northern and southern regions, and evaluate the susceptibility of the vegetation to water stress. For this, four sub-regions were chosen for soil and leaf material analysis in the Pantanal: Transition Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN) and Pantanal Norte (PAN), in the municipality of Poconé, Pantanal Sul (PS) and Transição do Pantanal Sul- Cerrado (T-PS) in the municipality of Aquidauana. The soils resulted in medium texture for T-PAN, clayey for PAN, sandy for PS and T-PS. The C/N ratio of the soils resulted in values with little variation, and in the leaf material, the C/N ratio indicated that the organic matter of PAN as the most susceptible to decomposition. The chemical attributes indicate that, in general, the studied soils are not very fertile, PAN presented better results in relation to the other sub-regions, due to the good availability of potassium, calcium, magnesium and cation exchange capacity. The comparison between the isotopic signature of soils and vegetation showed that the northern Pantanal (T-PAN and PAN) has overall more negative values than the southern Pantanal (PS and T-PS), even so, the C3 photosynthetic pathway has a strong presence in all subregions. Because of this, in a context of more intense climate change, the PS and T-PS subregions are the most susceptible to prolonged water stress, and impairment of the development of tree species, which causes the favoring of C4 plants, and the process of change in vegetation composition.

**Keywords:** isotopic signature, climate change, wetlands,  $\delta^{13}\text{C}$ , water stress



## LISTA DE QUADROS

**Quadro 1.** Principais Solos do Pantanal por região.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Distribuição dos pontos de coleta do Pantanal Norte (T-PAN e PAN).

**Figura 2.** Distribuição dos Pontos de coleta do Pantanal Sul (T-PS e PS).

**Figura 3.** Granulometria média e desvio padrão das frações de areia, silte e argila (%) dos solos da Transição Pantanal Norte Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS).

**Figura 4.** Valores médios da razão C/N dos solos e material foliar da transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e transição do Pantanal Sul- Cerrado (T-PS).

**Figura 5.** Valores médios e desvio padrão  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) nos solos da Transição Pantanal Norte Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

**Figura 6.** Valores médios e desvio padrão de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) para vias fotossintéticas  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$  do material foliar da Transição Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul-Cerrado (T-PS).

**Figura 7.** Área antrópica e natural no bioma Pantanal (1985-2020) (Adaptado de Mapbiomas, 2021).

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Valores médios e desvio padrão de atributos químicos dos solos da Transição Pantanal Norte Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS).

**Tabela 2.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de solo da transição Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

**Tabela 3.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de solo do Pantanal Norte (PAN) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

**Tabela 4.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de solo do Pantanal Sul (PS) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

**Tabela 5.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de solo da Transição do Pantanal Sul-Cerrado (T-PS) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

**Tabela 6.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de material foliar da Transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN).

**Tabela 7.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de material foliar do Pantanal Norte (PAN).

**Tabela 8.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de material foliar do Pantanal Sul (PS).

**Tabela 9.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de material foliar do Pantanal Sul (T-PS).

## LISTA DE ABREVIATURAS

**C/N:** Relação Carbono/Nitrogênio

**C3:** Ciclo fotossintético de Calvin

**C4:** Ciclo fotossintético de Hatch-slack

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de Carbono.

**PAN:** Sub-região de estudo do Pantanal Norte

**PS:** Sub-região de estudo do Pantanal Sul

**T-PAN:** Sub-região de estudo da transição Pantanal Norte-Cerrado

**T-PS:** Sub-região de estudo da transição Pantanal Sul-Cerrado

**δ<sup>13</sup>C:** Assinatura isotópica do carbono.

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	15
2	Objetivo.....	16
2.1	Objetivo geral .....	16
2.2	Objetivos específicos .....	16
3	Revisão de Literatura.....	16
3.1	Solos do Pantanal .....	16
3.2	Dinâmica da matéria orgânica no Pantanal.....	18
3.3	Isótopos estáveis de carbono.....	19
4	Material e Métodos .....	20
4.1	Área de estudo.....	20
4.2	Coleta de solos e material foliar .....	21
4.3	Análises.....	24
5	Resultados e discussão .....	24
5.1	Atributos físico-químicos dos solos .....	24
5.1.1	Textura .....	24
5.1.2	Atributos químicos .....	26
5.1.3	Razão Carbono/Nitrogênio .....	27
5.2	Assinatura isotópica .....	28
5.2.1	Solos.....	28
5.2.2	Vegetação .....	30
5.3	Estresse hídrico no Pantanal .....	31
6	Conclusão.....	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34
	APÊNDICE A – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do solo da Transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN). .....	38
	APÊNDICE B – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do solo do Pantanal Norte (PAN). ..	40
	APÊNDICE C – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do solo do Pantanal Sul (PS). ..	41
	APÊNDICE D – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do solo da Transição do Pantanal Sul Cerrado (T-PS). .....	42
	APÊNDICE E – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do material foliar da Transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN). .....	44
	APÊNDICE F – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do material foliar do Pantanal Norte (PAN). .....	46

APÊNDICE G – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do material foliar do Pantanal Sul (PS).	
47	
APÊNDICE H – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do material foliar da Transição do Pantanal Sul-Cerrado (T-PS).	48

## 1 Introdução

A mudança climática global está intrinsicamente associada a mudança da composição da atmosfera por emissão de gases derivados das atividades humanas, principalmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agente do efeito estufa. A queima de combustíveis fósseis e o desmatamento são os principais processos que culminam no acúmulo do carbono na atmosfera em detrimento de outros estoques naturais (Villarino et al., 2018). Ecossistemas terrestres são considerados sumidouros para carbono atmosférico por conta da incorporação do CO<sub>2</sub> através da fotossíntese, e posterior decomposição da matéria orgânica que proporciona a contenção do carbono no solo e nos sedimentos dos corpos hídricos por um longo período de tempo (De Barros Ferraz et al., 2009). Devido a importância do carbono em ciclos biogeoquímicos na natureza, os isótopos estáveis de carbono se configuram como uma importante ferramenta de análises das dinâmicas ambientais.

Valores da razão isotópica do carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) contribuem para a compreensão das trocas de CO<sub>2</sub> entre a atmosfera e a biosfera, identificação de material originário de aerossóis no ar e ditam acerca da assinatura isotópica em plantas (Novello et al., 2021). Mendonça et al (2010) identificaram mudanças composicionais na vegetação ao longo do perfil dos solos na Floresta Nacional do Araripe no estado do Ceará, ao analisar a assinatura isotópica da vegetação com amostras de solo. A variação do carbono orgânico total com o aumento da profundidade resultou em valores mais positivos comparados aos perfis superficiais e a vegetação, indicando que a área havia passado por um histórico recente de mudança de composição na vegetação. A variação da razão isotópica na vegetação é influenciada pelo clima, principalmente pela precipitação e temperatura, devido a relação entre umidade e abertura estomática em plantas com fixação de carbono pela via fotossintética C<sub>3</sub>, pois, quanto maior a disponibilidade de água maior a atividade fotossintética e consequentemente evapotranspiração, que resulta em valores mais negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  (Santos, 2021).

Os efeitos das mudanças climáticas para ecossistemas alagáveis têm associação com as alterações nos pulsos de inundação, regime de chuvas, e mudanças de temperatura e umidade que afetam os níveis de evapotranspiração (Mitsch et al., 2010). O Pantanal é a maior planície alagável contínua do mundo, com enchentes periódicas devido ao conjunto de fatores geológicos e climáticos da região, que refletem na formação dos solos, disponibilidade de nutrientes, e composição da

vegetação na paisagem (Pott & Pott, 2009; Weber & Couto, 2008; da Cunha, 1985). Nas últimas décadas, a estação seca se tornou mais longa, e as áreas alagadas do Pantanal tiveram sua abrangência reduzida em 29% (Mapbiomas, 2019; Lázaro et al., 2020). Entre os anos de 2008 a 2020, de Oliveira et al. (2021) demonstraram tendências de aumento da temperatura e diminuição do volume médio da precipitação anual em até 25% em seu estudo no sudoeste do Mato Grosso, enquanto Vourlitis et al. (2021) indicam que variáveis climáticas afetam o desenvolvimento espécies arbóreas de forma distinta, possibilitando mudanças na composição da vegetação e na diversidade de espécies.

Portanto, estudos a partir da associação da vegetação com o ciclo do carbono, solos e as variáveis climáticas, contribuem para o entendimento da dinâmica da paisagem, assim como os efeitos da degradação ambiental e suscetibilidade de ecossistemas a determinados impactos. Dessa forma, proporcionando uma ferramenta para ações de preservação ou conservação do meio ambiente em contextos específicos.

## **2 Objetivo**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar a relação solo-vegetação do Pantanal Mato-grossense a partir de isótopos estáveis de carbono.

### **2.2 Objetivos específicos**

Comparar a assinatura isotópica do solo e material foliar do Pantanal nas regiões norte, sul e áreas de transição do Pantanal-Cerrado.

Avaliar a suscetibilidade ao estresse hídrico da vegetação nas regiões norte, sul e áreas de transição do Pantanal-Cerrado.

## **3 Revisão de Literatura**

### **3.1 Solos do Pantanal**



Os solos como conhecemos atualmente são resultantes dos processos intempéricos através do tempo, associados a características geológicas, clima, vegetação e ação biológica de cada região do globo. O principal processo de formação geológica do Pantanal são deposições de sedimentos quaternários, provenientes do arco de planaltos ao redor da grande planície central (Weber & Couto, 2008).

A suscetibilidade a inundações do Pantanal em termos gerais é resultante principalmente da estruturação geomorfológica da região e ação da Massa Equatorial Continental (mEc), massa de ar quente com origem na Amazônia que confere umidade para a região central da América do Sul na primavera (Tarda, 1986). Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o Pantanal correspondente ao Clima tropical Aw, com inverno seco e período de chuvas entre outubro a março com médias pluviométricas de 1200 mm (Kottek et al., 2006; Calheiros & Fonseca Júnior, 1996). A concentração pluviométrica associada a uma planície de baixa altimetria e declividade com um planalto circundante, ocasiona o direcionamento do escoamento superficial, tendo como consequência o acúmulo de água na região de planície (Souza & Sousa, 2006; da Silva, 1986).

Os solos do Pantanal são geralmente deficientes em nutrientes, arenosos e abundantes em ferro (Weber & Couto, 2008; da Cunha, 1985). Entre os processos de formação presentes no bioma, a plintitização do ferro ocorre com maior presença na porção norte, podzolização na parte central, e salinização no sul do bioma, a gleização é comum nos solos do Pantanal como um todo (Weber & Couto, 2008).

No Quadro 1, constam as classificações de solos mais comumente descritas no Pantanal nas regiões Norte (porção do estado de Mato Grosso), Central (composta pelo leque aluvial do Taquari na região centro-oeste da planície) e Sul (região de Aquidauana no Mato Grosso do Sul).

Quadro 1. Principais Solos do Pantanal por região.

<b>REGIÃO DO PANTANAL</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS</b>
Norte	Plintossolos, Planossolos, Vertissolos Hidromórficos, Gleissolos e Neossolos Flúvicos.
Central	Espodossolos Férrilúvicos, Neossolos Quartzarênicos hidromórficos, Planossolos Nátricos, Planossolos Háplicos, Plintossolos Argilúvicos e Plintossolos Háplicos.

Sul	Planossolos Háplicos solódicos, Planossolos Nátricos, Vertissolos Hidromórficos sódicos/carbonáticos, Gleissolos Háplicos, Neossolos Flúvicos carbonáticos vérticos/solódicos.
-----	--

Fonte: Weber & Couto (2008).

### 3.2 Dinâmica da matéria orgânica no Pantanal

Os fatores que influenciam na dinâmica da matéria orgânica no Pantanal são o uso do fogo, pastagens em cerrado não-inundável e a flutuação do nível da água nos períodos de cheia e seca (Weber & Couto, 2008). Em menor escala, a planície de alagamento possui uma variação de altimetria, criando áreas mais altas ou rebaixadas que pode ser alagáveis ou não. Esse fator corrobora na distribuição da vegetação, seu adensamento, composição e desenvolvimento, assim como nas características químicas dos solos (Cunha, 1980).

Cunha (1980) elenca os componentes geomorfológicos do Pantanal sendo as cordilheiras, vazantes, baías e campos limpos. As cordilheiras são formações mais altas não inundáveis, de transição abrupta com áreas alagáveis, o que torna sua disposição semelhante a borda de um corpo hídrico. A vegetação nas cordilheiras possui médio porte, composta por espécies encontradas no Cerrado, e tem os padrões de inundação como direcionador do desenvolvimento das plantas. As vazantes, campos limpos e baías são as porções rebaixadas, sendo o campo limpo caracterizado pelo substrato plano, vazantes que possuem a depressão mais escavada ou baías em que ocorrem a formação de pequenos lagos. Segundo Cunha (1980), a vegetação das depressões consiste em gramíneas adaptadas aos regimes de alagamento e estiagem, com pouca diversificação de espécies.

Os padrões de inundação do Pantanal se mostram essenciais para a manutenção do ciclo do carbono e fluxo de matéria orgânica na paisagem. Nogueira et al. (2002) demonstraram a influência dos pulsos de inundação na distribuição da matéria orgânica, onde cerca de 90% da matéria acumulada na estação seca foi removida e realocada pela chuva. Outra consequência é a flutuação da distribuição da vegetação. Pott (1995) descreve que em áreas arenosas e alagáveis, a vegetação é restrita a

gramíneas tanto pelo fator de saturação de água no solo quanto déficit de nutrientes, mas que há eventual mudança na composição devido ao avanço de espécies arbóreas pioneiras até o leito de rios e áreas alagáveis durante a época de seca, que se perdem com a volta da estação cheia.

Solos arenosos apresentam baixos teores de fósforo e matéria orgânica (Centeno et al., 2017). Entretanto, Brum et al. (1987) verificaram um aumento significativo de fósforo e magnésio nos meses de novembro na região do Paiaguás, no Pantanal Sul, em duas unidades geomórficas: cordilheiras (não alagáveis) e vazantes (continuamente alagadas). Segundo da Cunha (1985), a maior disponibilização dos nutrientes pode ser resultado do aumento da umidade e temperatura característicos da estação do ano, ocasionado intensificação da atividade de microrganismos do solo. Portanto, variações de clima e umidade são fatores indiretos para a disponibilidade de nutrientes no solo, devido as condições ambientais que ditam acerca do desenvolvimento da biota que realiza a decomposição da matéria orgânica.

### 3.3 Isótopos estáveis de carbono

Isótopos estáveis se tratam de variantes do mesmo elemento químico diferenciados pela quantidade de nêutrons no núcleo atômico, existentes em forma estável, ou seja, sem decaimento radioativo. O carbono possui dois isótopos estáveis, o  $^{12}\text{C}$  (6 nêutrons) com abundancia total na natureza entre 98,98% e o  $^{13}\text{C}$  (7 nêutrons) cerca de 1,10% (Novello et al., 2021). A diferença na quantidade de nêutrons confere características e comportamentos distintos para os dois isótopos em reações físico-químicas configurando variações nas proporções entre carbonos  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$  na composição da matéria e compartimentos ambientais como o solo, água e a vegetação (Werner et al., 2012; Alves et al., 2005).

Essa diferença é representada pela a razão entre o  $^{13}\text{C}$  e o  $^{12}\text{C}$ , que origina a assinatura isotópica do carbono simbolizada pelo  $\delta^{13}\text{C}$ . O cálculo de  $\delta^{13}\text{C}$  tem base nos valores da razão entre os isótopos da amostra e da razão estabelecida como padrão internacional para análise do Carbono, expressado na fórmula:

$$\delta (\text{‰}) = [(R_{\text{Amostra}} - R_{\text{Padrão}}) / R_{\text{Padrão}}] \times 1000$$

O resultado é multiplicado e expressado em partes por mil (‰), devido aos valores diminutos.

Em plantas, o  $\delta^{13}\text{C}$  está associado com os mecanismos de fixação de carbono, e conseqüente fracionamento dos isótopos no processo de fotossíntese, sendo estes o Ciclo de Calvin ( $\text{C}_3$ ) geralmente árvores, e Hatch-Slack ( $\text{C}_4$ ) por gramíneas (Gouveia et al, 1999). A estrutura foliar das espécies  $\text{C}_4$  possui uma camada a mais de células nas folhas denominada anatomia Kranz, que contém uma enzima de maior afinidade com o  $\text{CO}_2$  em relação com o mecanismo das plantas  $\text{C}_3$  (Kluge et al., 2015). A maior absorção e conseqüente armazenamento de carbono pela via  $\text{C}_4$ , proporciona maior eficiência para a fotossíntese, tornando as plantas  $\text{C}_4$  menos dependentes do controle estomático para prevenir a perda de água em detrimento da captura de dióxido de carbono na atmosfera (Buckeridge et al., 2015). As discrepâncias metabólicas entre as duas vias refletem em valores de  $\delta^{13}\text{C}$  distintos o suficiente para serem identificados, plantas com ciclos  $\text{C}_3$  apresentam valores de na faixa entre -32 a -22 ‰, e as que variam entre -16 e -9 ‰ são plantas  $\text{C}_4$  (Boutton,1996).

Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  no solo em áreas naturais são similares com a cobertura vegetal presente, devido a matéria orgânica do solo ser oriunda principalmente da vegetação local (De Barros Ferraz et al., 2009). O balanço entre os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  da matéria orgânica do solo e da vegetação indicam flutuação da composição da vegetação na paisagem. Victoria et al. (1995) observaram essas mudanças nos solos da região de Nhecolândia, no Pantanal Sul, onde as assinaturas isotópicas da matéria orgânica transacionaram de gramíneas  $\text{C}_4$  (-17‰) para formação arbórea  $\text{C}_3$  (-27‰) em um transecto de 600 metros. Nesse mesmo estudo, o solo da vegetação arbórea resultou em valores com tendências positivas com o aumento da profundidade, alcançando o maior valor por volta de 70 cm, indicando que durante a formação do solo quando os perfis até 70 cm não haviam sido formados, o substrato possuía cobertura de vegetação  $\text{C}_4$  ao invés da atual  $\text{C}_3$ .

## **4 Material e Métodos**

### **4.1 Área de estudo**

O Pantanal se encontra na região transfronteiriça entre Brasil, Argentina, Bolívia e Paraguai, sendo a porção brasileira, denominada Pantanal Mato-grossense,

com área aproximada de 138.183 km<sup>2</sup> (Silva & Abdon, 1998). O Pantanal Matogrossense está localizado nos estados de Mato Grosso (MT) e Mato Grosso do Sul (MS) no centro-oeste do Brasil.

A área de estudo se concentra nos extremos norte, sul e respectivas áreas de transição do Pantanal com o Cerrado. Foram divididas quatro sub-regiões: a transição do Pantanal Norte com o Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e transição do Pantanal Sul com o Cerrado (T-PS). As sub-regiões do Pantanal Norte encontram-se no município de Poconé, no estado de Mato Grosso, T-PAN e PAN, se localizam na região próxima à Pousada Piuval/Rio Bento Gomes, e na extensão da rodovia MT-060 (Transpantaneira), respectivamente. As sub-regiões do Pantanal Sul se localizam no município de Aquidauana, no estado de Mato Grosso do Sul. PS corresponde a área nas proximidades da Fazenda Barranco Alto, e T-PS abrange o transecto da rodovia MS-170.

#### 4.2 Coleta de solos e material foliar

A amostragem de solo e material foliar foi realizada com trado holandês em áreas de vegetação nativa, nos anos de 2016 e 2017, tendo como critérios de coleta: composição da vegetação, aspectos geomorfológicos e grupos geológicos, a fim de conferir maior representatividade com as características do bioma. Foram coletadas amostras de 0 a 20 cm de profundidade, e de 20 a 40 cm quando possível, devido a limitação da profundidade nos pontos selecionados.

A amostragem do material foliar foi realizada nos mesmos pontos de amostragem de solo, sempre que possível. Foram coletadas amostras de material foliar de diferentes plantas, a fim de conter maior representatividade da vegetação.

Os pontos de coleta da Figura 1 correspondem a distribuição da amostragem na parte Norte. A T-PAN abrange amostras de solo em 16 pontos e de vegetação em 14. PAN possui mostras de solo em 10 pontos e amostras de vegetação em 2 pontos.

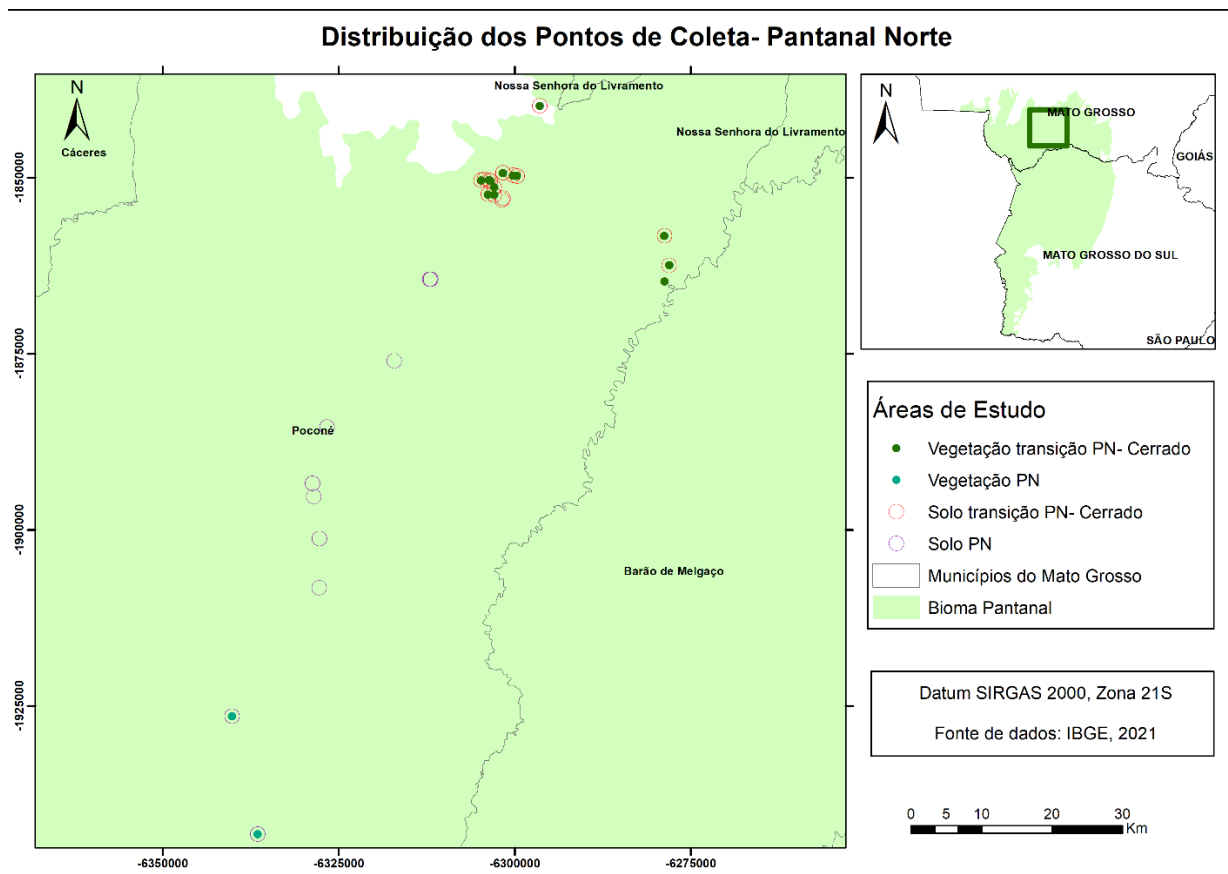


Figura 1. Distribuição dos pontos de coleta do Pantanal Norte (T-PAN e PAN).

No Pantanal Sul (Figura 2) a amostragem correspondente ao PS resultou em amostras de solo em 15 pontos de coleta e amostras de vegetação em 14 pontos. A sub-região T-PS abrange amostras de solo distribuídas em 32 pontos e amostras de material foliar em 19 pontos.

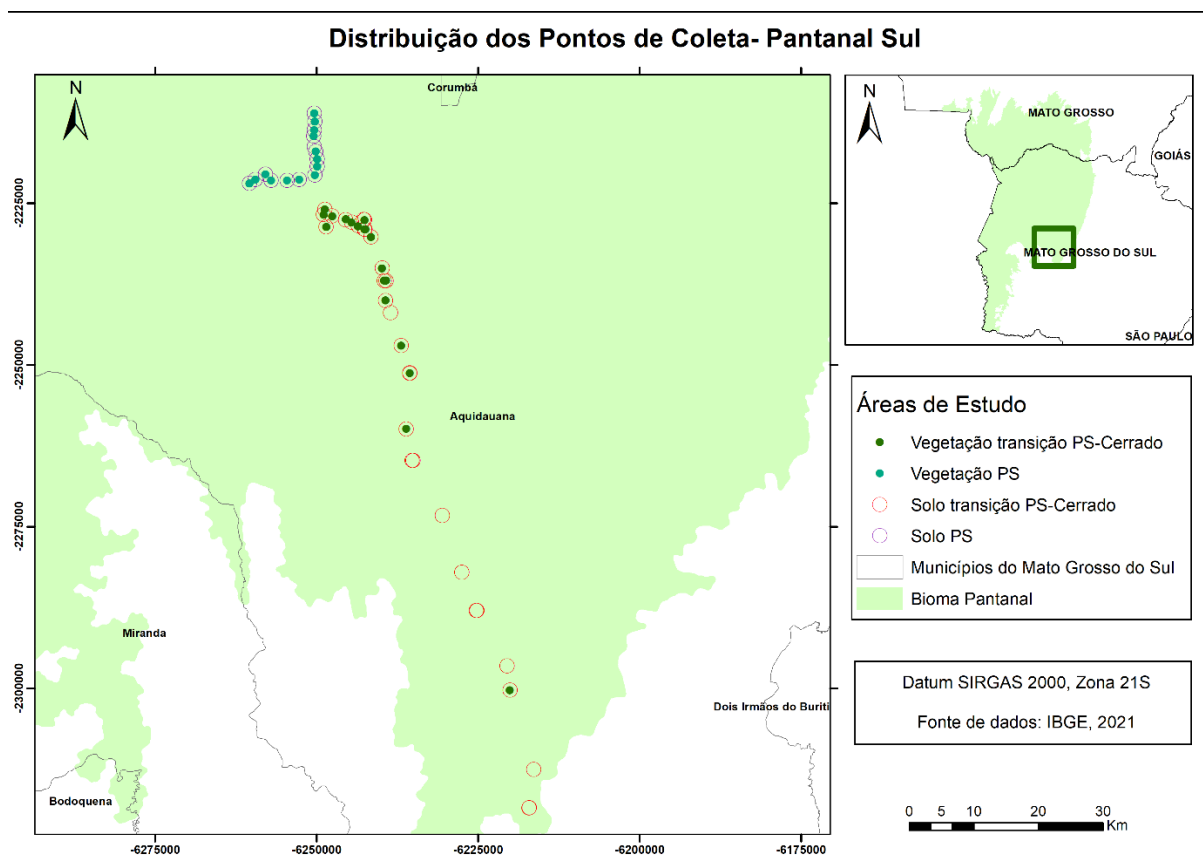


Figura 2. Distribuição dos Pontos de coleta do Pantanal Sul (T-PS e PS).

As amostras de solo foram secas em local arejado pelo método de terra fina seca ao ar (TFSA), torrões foram quebrados de forma manual e por fim o solo foi peneirado com malha de 2 mm. A medição da textura foi realizada pelo método do densímetro segundo o Manual de métodos de análise de solo da Embrapa (Teixeira et al., 2017) e analisada no Laboratório de Relações Solo-Vegetação, do departamento de Ecologia da Universidade de Brasília. Para a análise isotópica, o solo foi triado para retirada de raízes e moído, a obtenção das assinaturas isotópicas do carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) é feita por um espectrômetro de massas para razões isotópicas (Thermo Quest-Finnigan Delta Plus), acoplado ao analisador elementar.

No Laboratório de Relações Solo-Vegetação no departamento de Ecologia da Universidade de Brasília as amostras de material foliar foram secas em estufa de circulação forçada a 60°C por 72 horas, e depois de secas foram moídas em um moinho de facas. Foi feita a pesagem em balança de precisão (1,5 a 2 mg) e posterior acondicionamento em cápsulas de estanho e armazenamento em placas de ELISA. As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Ecologia Isotópica – CENA/USP para a realização da análise isotópica do Carbono e determinação da

Razão Carbono-Nitrogênio pelo analisador elementar acoplado a um espectrômetro de massa (Carlo Elba, CHN-1100).

### 4.3 Análises

Os valores resultantes de textura, atributos químicos e  $\delta^{13}\text{C}$  do solo foram separados em quatro grupos de acordo com as sub-regiões de estudo selecionadas como Transição Pantanal Norte Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS). As análises compreendem os valores médios e desvio padrão dos resultados apresentados por cada sub-região.

Para a classificação da textura foi consultado o triângulo textural utilizado pela Embrapa solos, e para as análises dos atributos químicos foi utilizada a cartilha de análise do solo da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG, 2018) e o Guia Prático Para Interpretação de Resultados de Análises de Solos da Embrapa Tabuleiros Costeiros (Sobral et al.,2015).

## 5 Resultados e discussão

### 5.1 Atributos físico-químicos dos solos

#### 5.1.1 Textura

A granulometria média dos solos resultou em textura Média para T-PAN, textura Argilosa para PAN e textura Arenosa para as sub-regiões PS e T-PS. Na figura 3 é possível observar que PS é a área em que fração areia possui o valor mais alto, enquanto PAN possui o menor.



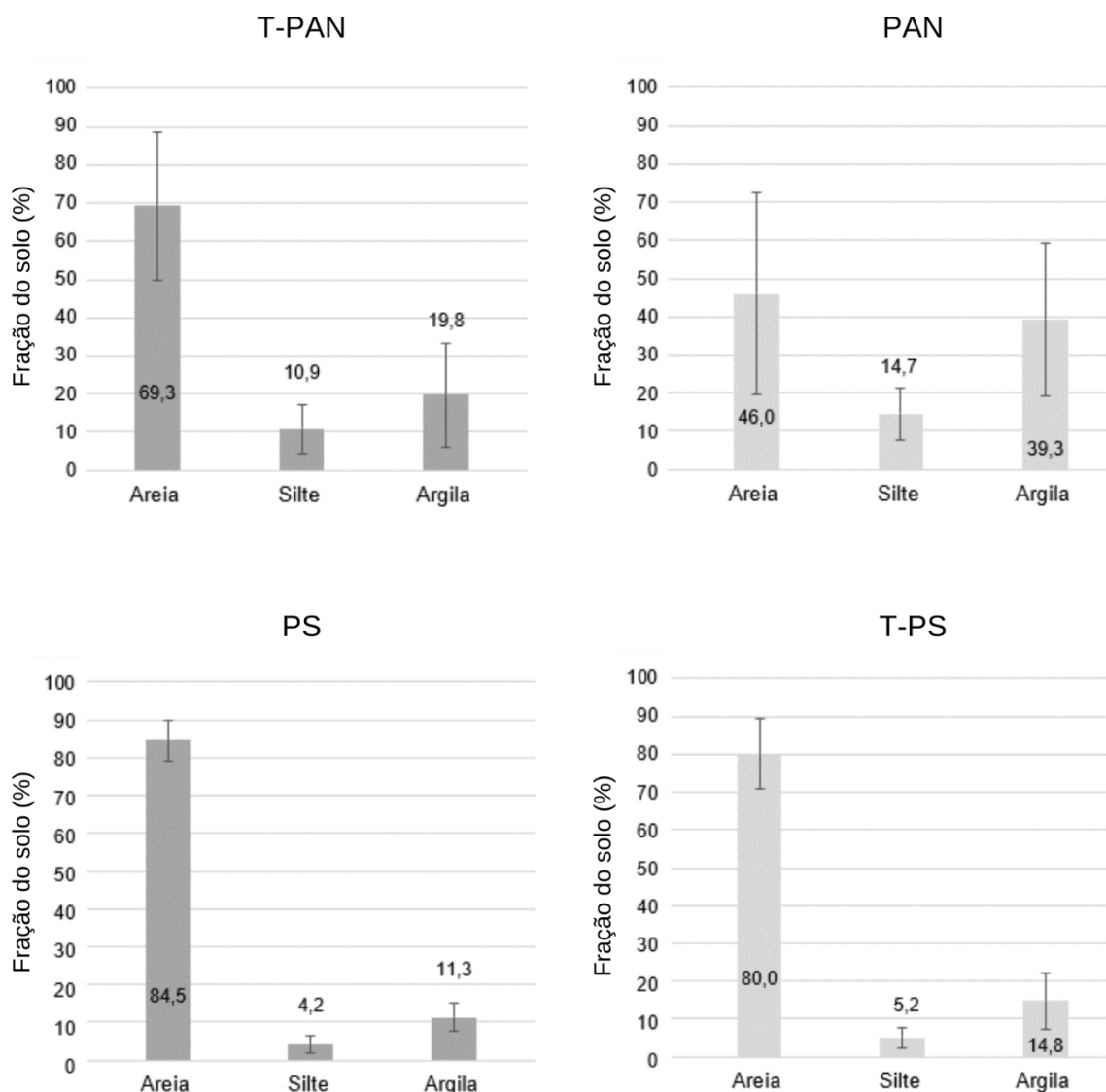


Figura 3. Granulometria média e desvio padrão das frações de areia, silte e argila (%) dos solos da Transição Pantanal Norte Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS).

A textura é o resultado do balanço entre as frações granulométricas do solo: argila, areia e silte, que tem influência em comportamentos como a suscetibilidade a erosão, capacidade de retenção de água e capacidade de drenagem (Brady & Weil, 2013). A textura arenosa das sub-regiões do Pantanal Sul configura menor força de coesão e adesão entre as partículas do substrato, como consequência esses solos possuem alta capacidade de drenagem e baixa capacidade de retenção de água (Centeno et al., 2017). Em uma área com nível de inundação uniforme, o tipo de solo presente é o determinante para a vegetação. Gramíneas são dominantes em solos

arenosos, enquanto fitofisionomias arbustivas são presentes em solos com teores maiores de argila (Pott, 1995).

### 5.1.2 Atributos químicos

O pH em água resultou em classificação de acidez média para todos os solos das sub-regiões do Pantanal com variação entre 5,1 e 5,6 conforme a tabela 1. O Fósforo obteve valores baixos em todas as sub-regiões, e o potássio apresentou valores mais baixos nas sub-regiões de transição (T-PAN e T-PS) em comparação com PAN e PS. Sobral et al. (2015) aponta que alto teor de potássio pode ser explicado pelo baixo intemperismo do solo, ou adição de nutrientes. A sub-região PAN resultou nos maiores valores de cálcio, magnésio e alumínio trocáveis em comparação com as outras sub-regiões de estudo, assim como a acidez potencial ( $H^+ Al$ ), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T) e capacidade de troca catiônica efetiva (t).

Tabela 1. Valores médios e desvio padrão de atributos químicos dos solos da Transição Pantanal Norte Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS).

ATRIBUTOS QUÍMICOS	T-PAN		PAN		PS		T-PS	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
<b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>	5,1	0,5	5,3	0,7	5,6	0,6	5,4	0,62
<b>P (mg/ dm<sup>3</sup>)</b>	7	5,3	6,5	3,7	15,1	18,6	5,8	5,2
<b>K (mg/dm<sup>3</sup>)</b>	51,7	39,5	82,1	37	76,4	62,2	67,2	53,2
<b>Ca<sup>2+</sup>(cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	2,4	1,7	5,8	4,5	2,6	2,7	2,1	2
<b>Mg<sup>2+</sup>(cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	0,8	0,5	2,1	0,9	0,7	0,4	0,5	0,49
<b>Al<sup>3+</sup>(cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	0,6	0,88	0,6	0,6	0,1	0,1	0,3	0,4
<b>H+Al (cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	3,7	1,7	4,5	1,6	1,6	0,6	2,6	2
<b>SB (cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	3,4	2,2	8,2	5,6	3,4	3,2	2,9	2,6
<b>t (cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	3,9	2,2	8,9	5,4	3,5	3,1	3,2	2,4
<b>T (cmol/dm<sup>3</sup>)</b>	7,1	3	12,7	4,8	5	2,9	5,4	3,3
<b>V (%)</b>	43,2	18	60,1	16	58,5	23,2	47,6	23,7
<b>m (%)</b>	20,3	22,4	9,1	8,7	9,3	13,8	19	22,3
<b>P-Rem (mg/L)</b>	41	7,9	33,8	8,6	49,5	4,3	45,4	7,8

Os atributos químicos de forma geral apresentam valores considerados médios em questão de fertilidade, com exceção do fósforo e a saturação por alumínio (m) que

apresentaram valores considerados muito baixos para todas as sub-regiões. A sub-região PAN se destaca com os melhores valores na maioria dos atributos, que inclui o potássio, cálcio, magnésio e capacidade de troca catiônica.

### 5.1.3 Razão Carbono/Nitrogênio

A razão Carbono/Nitrogênio (C/N) para os solos representada na figura 4, resultou em valores médios próximos para todas as sub-regiões. A semelhança da relação C/N em solos de diferentes áreas para Cardoso et al. (2017) se explicam possivelmente pela semelhança da matéria orgânica depositada no solo.

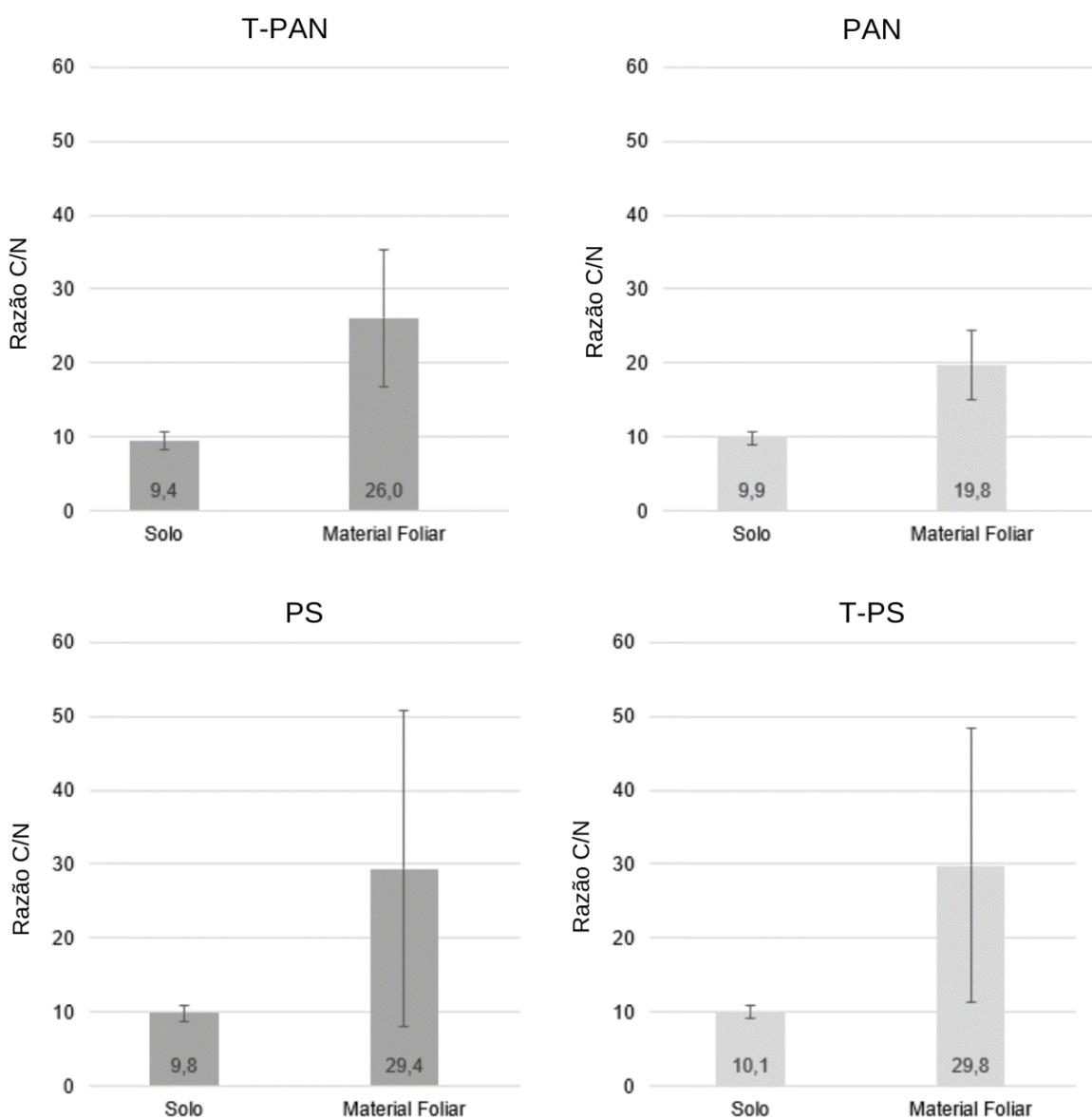


Figura 4. Valores médios e desvio padrão da razão C/N dos solos e material foliar da transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS).

O material foliar de PAN é o que apresenta menor razão C/N indicando que a matéria orgânica é mais suscetível à decomposição em comparação com as outras sub-regiões. Na porção sul, o alto desvio padrão das sub-regiões PS e T-PS demonstra que as razões C/N do material foliar são mais variados que as sub-regiões T-PAN e PAN.

## 5.2 Assinatura isotópica

### 5.2.1 Solos

A figura 5 dispõe acerca dos valores médios de  $\delta^{13}\text{C}$  e respectivo desvio padrão encontrados nos solos das sub-regiões de estudo do Pantanal nas profundidades: 0 a 20 cm e 20 a 40 cm. De forma geral, as regiões norte e sul do Pantanal apresentam valores negativos abaixo de -20‰. As sub-regiões da porção norte (T-PAN e PAN) apresentam valores mais negativos que os da porção sul (PS e T-PS).

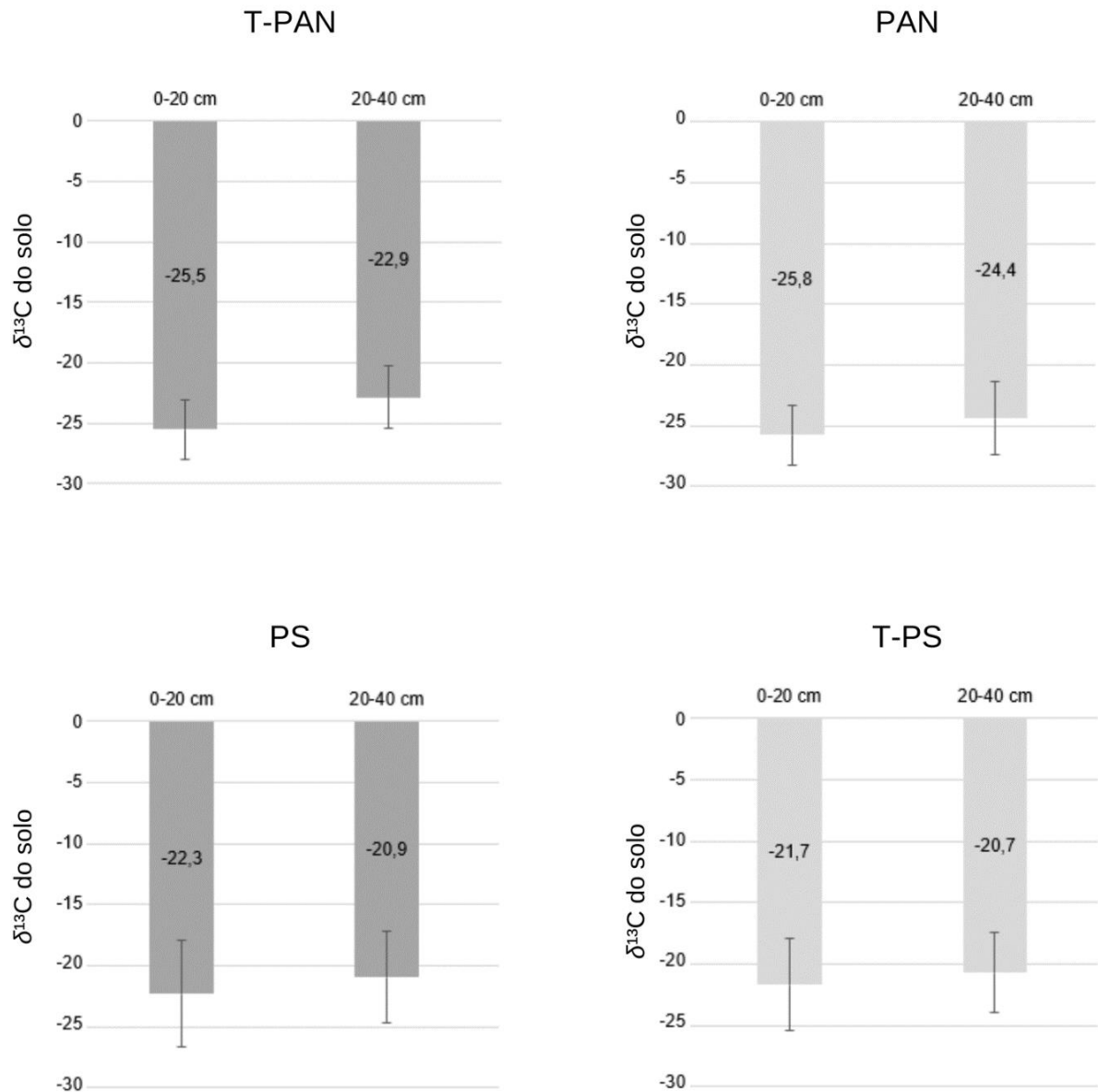


Figura 5. Valores médios e desvio padrão  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) nos solos da Transição Pantanal Norte Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

O  $\delta^{13}\text{C}$  das amostras em maior profundidade (20 a 40 cm) são maiores que o de solos superficiais (0-20 cm). Segundo De Barros Ferraz et al (2009), o aumento da assinatura isotópica em até 4‰ é comum em situações onde a contribuição  $\text{C}_3$  é maior. Acredita-se que, com a decomposição da matéria orgânica, os perfis mais profundos tenham maior concentração de  $^{13}\text{C}$ , ou que a alta concentração ocorra por eventos de podzolização. Em casos onde a diferença ultrapassa 4‰, há maior probabilidade de ocorrência de mudança na vegetação. Dois pontos de amostragem

na sub-região T-PAN apresentam diferenças pouco maiores que 4 ‰, indicando a possível mudança na composição da vegetação (Apêndice A).

Essas mudanças podem ocorrer por fatores naturais ou antrópicos, como a expansão e retração da arbóreas pioneiras em áreas alagáveis diante dos eventos de cheia e seca citados por Pott (1995), ou antrópicas para o estabelecimento de áreas de pastagem (Cardoso et al., 2011). A mudança na cobertura do solo de vegetação arbórea nativa para pastagens na região de Nhecolândia estudada por Cardoso et al. (2011) demonstrou queda na qualidade do solo devido à perda substancial de matéria orgânica e bases trocáveis, além de indícios que a degradação ocorreu de forma mais severa pela retirada de fitofisionomias adaptadas aos limitantes de baixo teor de nutrientes, agravante que da Cunha (1985) aponta como provável consequência da redução de populações de microrganismos do solo.

### 5.2.2 Vegetação

Os valores médios de  $\delta^{13}\text{C}$  no material foliar  $\text{C}_3$  obteve os valores mais negativos na sub-região PAN e os menores em T-PS, enquanto PS resultou no valor mais positivo da assinatura isotópica  $\text{C}_4$  (figura 6). PAN não compreendeu nenhuma planta  $\text{C}_4$ , portanto não resultou uma assinatura. A proporção total entre as amostras coletadas resultou em 119 amostras  $\text{C}_3$  e 19  $\text{C}_4$  que indica a hegemonia da contribuição  $\text{C}_3$  para a matéria orgânica do solo no Pantanal, condizente com as assinaturas encontradas nos solos.

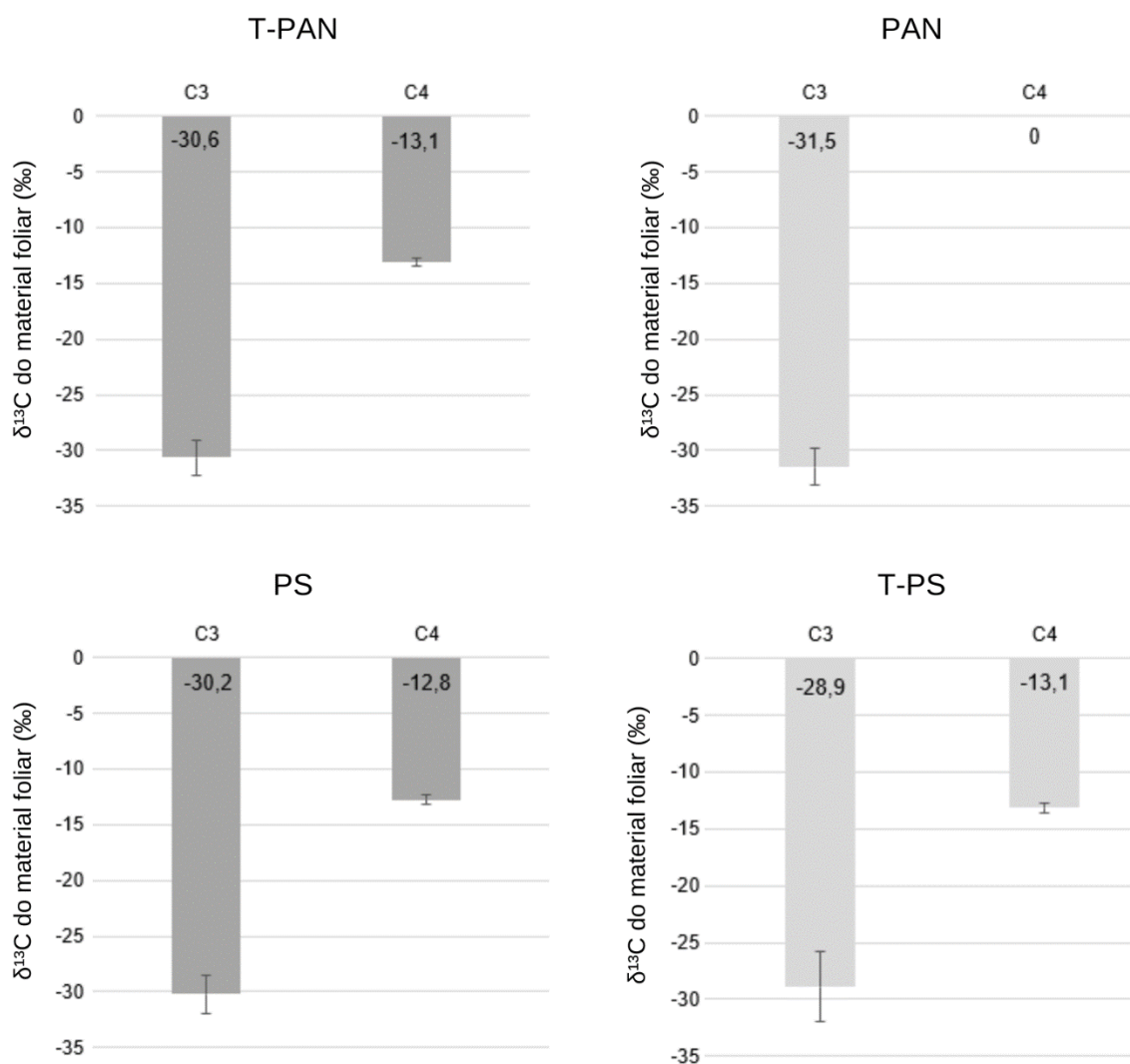


Figura 6. Valores médios e desvio padrão de  $\delta^{13}\text{C}$  para vias fotossintéticas C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> do material foliar da Transição Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN), Pantanal Norte (PAN), Pantanal Sul (PS) e Transição Pantanal Sul -Cerrado (T-PS)

### 5.3 Estresse hídrico no Pantanal

Os destaques da série temporal do monitoramento feito pela iniciativa Mapbiomas (2021) sobre cobertura do solo na Bacia do Alto Paraguai (BAP) onde está localizado o Pantanal, demonstrou que entre os anos de 1985 e 2020 a área correspondente a superfície de água reduziu de 5,9 milhões de hectares para 1,5 milhões de ha (Figura 8). Entre as principais mudanças estão a conversão de fisionomias naturais na área de planaltos para atividades agropecuárias e o recuo das áreas alagadas onde se estabeleceram formações campestres.

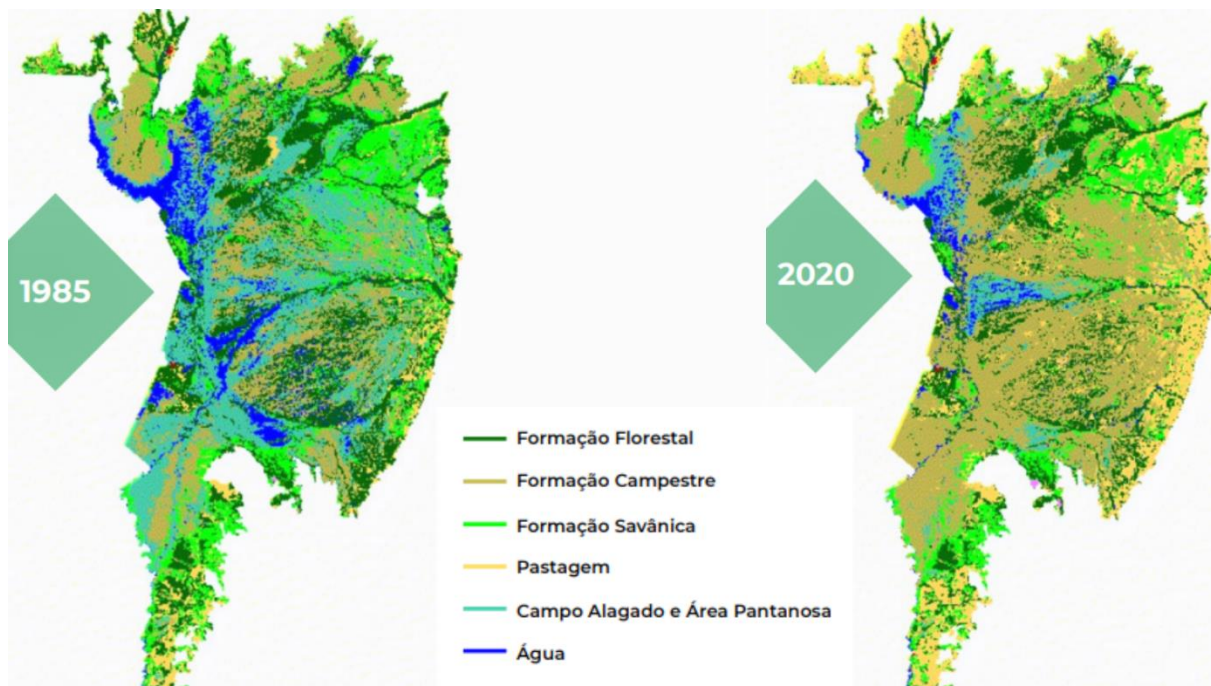


Figura 7. Área antrópica e natural no bioma Pantanal (1985-2020) (Adaptado de Mapbiomas, 2021).

No início da década de 1980 foram contabilizados 146 dias sem precipitação, enquanto que em 2011 o total de dias sem chuva chegou a 287 (de Oliveira et al., 2021). Além disso, a quantidade de chuva tem diminuído ao longo das décadas (Cardoso & Marcuzzo, 2010). Em um contexto de precipitação reduzida, as cheias serão mais fracas e os solos extremamente arenosos da região não conferem boa retenção de água, o que culmina em maior espaço temporal em que a vegetação passará pelo estresse hídrico antes da próxima chuva.

De modo geral, as inundações em áreas mais ao leste do Pantanal possuem menor volume e curta duração, ao contrário da região oeste que possui cheias mais abundantes e duradouras (Adamoli, 1986). A sub-região PAN possui maior proximidade com esse reduto oeste de umidade duradoura no Pantanal, que pode ser uma influência para a hegemonia  $C_3$  na porção norte do Pantanal.

Em todas as sub-regiões analisadas a assinatura isotópica do solo indica contribuição majoritária de espécies com fixação  $C_3$ , que realizam a fotossíntese a partir de estômatos abertos em consequência da perda água pela evapotranspiração. Quando se encontram em situação de falta de água, os estômatos se fecham para conter a evapotranspiração, diminuindo a captura de  $CO_2$  e a produtividade primária (Pereira et al., 2004).



Vourlitis et al. (2021) verificaram a relação entre a taxa de crescimento relativo e variáveis climáticas no Mato Grosso, com espécies arbóreas em uma região de cerrado, e outra correspondente ao Pantanal Norte. As espécies arbóreas do Pantanal demonstraram correlação positiva com a precipitação, e em relação a duração da estação seca, a maioria das espécies do Pantanal demonstraram forte correlação negativa, incluindo espécies que não demonstraram correlação significativa com a precipitação, indicando que o aumento da duração do período sem chuvas é uma variável de grande influência na vegetação. A resposta diferenciada das espécies estudadas indica que o ressecamento afeta a comunidade de forma variável, afetando sua composição e possivelmente a diversidade. (Vourlitis et al., 2021).

Para Cunha (1985), a variabilidade de nutrientes nos solos do Pantanal influencia na ocupação de espécies arbóreas ou gramíneas pouco exigentes em uma área, onde a disponibilização de nutrientes está ligada fortemente com a umidade no solo logo após eventos de cheia. Nesse aspecto, outra possível consequência indireta acerca de mudanças climáticas intensas que culminam na alteração no regime de chuvas e decréscimo da pluviosidade são os efeitos no desenvolvimento da vegetação, pelo limitante de nutrientes em função da umidade.

## **6 Conclusão**

Os dados referentes as últimas décadas demonstram o enfraquecimento das inundações sazonais do Pantanal. A redução das chuvas anuais em conjunto com a textura arenosa dos solos, propicia a intensificação do ressecamento, principalmente na região sul. A vegetação C<sub>3</sub> das sub-regiões PS e T-PS, são as mais suscetíveis ao estresse hídrico, pois se localizam na parcela do Pantanal com o maior recuo de áreas alagadas, com solos mais arenosos e menor volume natural de pluviosidade. Em um contexto de aumento das temperaturas, diminuição do volume das chuvas e ampliação da estação seca, a pressão por estresse hídrico em plantas C<sub>3</sub> na região sul pode evoluir para o comprometimento do desenvolvimento da vegetação arbórea em escala regional e favorecimento das plantas C<sub>4</sub>, o que propicia o processo de mudança na composição da vegetação no futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamoli, J. (1986). Fitogeografia do Pantanal. Anais do I Simposio sobre Recursos Naturais e Socio-Economicos do Pantanal. Centro de Pesquisa Agropecuária do Pantanal, Corumbá, MS, p. 90-106.
- Alves, B. J. R., Zotarelli, L., Jantalia, C. P., Boddey, R. M., & Urquiaga, S. (2005). Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. Processos biológicos no sistema solo-planta: Ferramentas para uma agricultura sustentável. Brasília, Embrapa-SCT, 343-350.
- Boutton, T. W. (1996). Stable carbon isotope ratios of soil organic matter and their use as indicators of vegetation and climate change. In: Boutton, T. W. & Yamasaki, S. Mass Spectrometry of Soils. Nova York: Marcel Dekker. Cap. 2. p. 47-82.
- Brady, N. C. & Weil, R. R. (2013). Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos. 3ª edição. Bookman, Porto Alegre, RS.
- Buckeridge, M. S., Yepes, A., de Souza, A. P., Marabesi, M., & Tonini, P. P. (2015). Comparação entre os sistemas fotossintéticos C3 e C4.
- Calheiros, D. F., & Fonseca Júnior, W. C. D. (1996). Perspectivas de estudos ecológicos sobre o Pantanal. Corumbá: EMBRAPA-CPAP.
- Cardoso, E. L., Silva, M. L. N., Curi, N., Ferreira, M. M., & Freitas, D. A. F. D. (2011). Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 35, 613-622.
- Cardoso, E., Santos, S., Fernandes, A., Fernandes, F., & Pelissaro, H. (2017). Disponibilidade de nutrientes no solo sob diferentes estados de conservação de pastagens nativas de áreas úmidas no Pantanal. In Embrapa Pantanal- Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Simpósio Internacional De Microbacias Hidrográficas, 5.; 2017, Botucatu, SP. Biomas Brasileiros: conservação da biodiversidade, solo, floresta e água. Botucatu, SP: UNESP, 2017.
- Cardoso, M. R. D., & Marcuzzo, F. F. N. (2010). Mapeamento de três decênios da precipitação pluviométrica total e sazonal do bioma Pantanal.
- Centeno, L. N., Guevara, M. D. F., Cecconello, S. T., de Sousa, R. O., & Timm, L. C. (2017). Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade, 4(1), 31-37.
- Coringa, E. D. A. O., Couto, E. G., Otero Perez, X. L., & Torrado, P. V. (2012). Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. Acta Amazonica, 42, 19-28.

- da Cunha, N. G. da. (1980) Considerações sobre os solos da sub-região da Nhecolândia, Pantanal Mato-grossense. Circular técnica nº 1, Embrapa - UEPAE, Corumbá, 45 p.
- da Cunha, N. G. (1985). Dinâmica de nutrientes em solos arenosos no Pantanal Mato-Grossense. Embrapa-Cpap.
- da Silva, T. C. (1986). Contribuição da geomorfologia para o conhecimento e valorização do Pantanal. Anais do 1º Simpósio Sobre Recursos Naturais e Sócio-Econômicos do Pantanal. Corumbá, MS. p.77-90.
- de Barros Ferraz, E. S., Ometto, J. P. H. B., Martinelli, L. A., Moreira, M. Z., de Camargo, P. B., & Victoria, R. L. (2009). Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis. Oficina de Textos.
- de Oliveira, A. C. B., Junior, E. S. O., & Muniz, C. C. (2021). Análise climática da região de Salto do Céu, cabeceira do pantanal: uma caracterização necessária. Revista equador, 10(2), 401-418.
- Epamig. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. (2018). Análise de Solo: Determinações, cálculos e interpretação. 1ª ed. Belo Horizonte, MG.
- Gouveia, S. E., Pessenda, L. C., Boulet, R., Aravena, R., & Scheel-Ybert, R. (1999). Isótopos do carbono dos carvões e da matéria orgânica do solo em estudos de mudança de vegetação e clima no Quaternário e da taxa de formação de solos do estado de São Paulo. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 71(4), 969-980.
- Kluge, R. A., Tezotto-Uliana, J. V., & da Silva, P. P. (2015). Aspectos fisiológicos e ambientais da fotossíntese. Revista virtual de química, 7(1), 56-73.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259-263.
- Lal, R. (2013). Soil carbon management and climate change. Carbon Management, 4(4), 439-462.
- Lázaro, W. L., Oliveira-Júnior, E. S., Silva, C. J. D., Castrillon, S. K. I., & Muniz, C. C. (2020). Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. Acta Limnologica Brasiliensia, 32, e104.
- MapBiomás. (2019). Pantanal perdeu 29% de superfície de água, entre a cheia de 1988/1989 e a última, em 2018. Disponível em: <https://mapbiomas.org/pantanal-perdeu-29-de-superficie-de-agua-entre-a-cheia-de-19881989-e-a-ultima-em-2018>. Acesso em: 25 jul. 2022.

- MapBiomass. (2021). Mapeamento anual da cobertura e uso da terra no Brasil (1985 - 2020): destaques do mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Pantanal entre 1985 a 2020. 14 p.
- Mendonça, L. A., Frischkorn, H., Santiago, M. F., Camargo, P. B. D., de Lima, J. O., & Mendes Filho, J. (2010). Identificação de mudanças florestais por 13C e 15N dos solos da Chapada do Araripe, Ceará. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 314-319.
- Mitsch, W. J., Nahlik, A., Wolski, P., Bernal, B., Zhang, L., & Ramberg, L. (2010). Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. *Wetlands ecology and management*, 18(5), 573-586.
- Nogueira, F., Couto, E. G., & Bernardi, C. J. (2002). Geostatistics as a tool to improve sampling and statistical analysis in wetlands: a case study on dynamics of organic matter distribution in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 62, 861-870.
- Novello, V. F., de Carvalho Campos, M., Chiessi, C. M., de Paula-Santos, G. M., Pessenda, L. C. R., Gomes, T., ... & da Cruz, F. W. (2021). Aplicação de isótopos estáveis de carbono no estudo das mudanças climáticas e ambientais. *Derbyana*, 42.
- Pereira, B. A., Figueiredo, I. C., Aragona, M., Tôrres, N., & Felisberto, S. A. (2004). Condutância estomática em plantas com diferentes síndromes fotossintéticas no PESCAN-GO. *Pós-Graduação Em Ecologia Métodos De Campo Em Ecologia*, 62.
- Pott, A. (1995). Relações da vegetação com ambientes do Pantanal. *Encontro sobre Sensoriamento Remoto aplicado a estudos no Pantanal*, 5-7.
- Pott, A., & Pott, V. J. (2009). Vegetação do Pantanal: fitogeografia e dinâmica. *Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, 2, 1065-1076.
- Santos, F. L. D. S. (2021). Relação entre os fatores edafo-climáticos e os isótopos estáveis de carbono e nitrogênio ao longo do gradiente Pantanal-Cerrado-Caatinga. 138 p. Tese (Doutorado em Ecologia). Universidade de Brasília, Brasília.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, J. C., Oliveira, J.B., & Cunha, T. J. F. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa.
- Silva, J. D. S. V., & Abdon, M. D. M. (1998). Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas sub-regiões. *Área de Informação da Sede-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.
- Soares, A. F., SILVA, J., & Ferrari, D. L. (2006). Solos da paisagem do Pantanal brasileiro-adequação para o atual sistema de classificação. In: *Simpósio de Geotecnologias no Pantanal*, 1., 2006, Campo Grande, MS. Anais... Campinas:

Embrapa Informática Agropecuária; São José dos Campos: Inpe, 2006.p. 275-284.

- Sobral, L. F., Barreto, M. D. V., Da Silva, A. J., & Dos Anjos, J. L. (2015). Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 15p.
- Souza, C. A. D., LANI, J. L., & Sousa, J. B. D. (2006). Origem e evolução do Pantanal Mato-grossense. Simpósio Nacional De Geomorfologia, 1-11.
- Tarda, J. R. (1986). O Sistema climático do Pantanal. Da compreensão do sistema a definição de prioridades de pesquisa climatológica. Anais do 1º Simpósio sobre recursos naturais e sócio-econômicos do Pantanal. Corumbá, MS. p.9-27.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G.(2017). Manual de Métodos de Análise de Solo. 3ª edição. Embrapa solos, Rio de Janeiro.
- Victoria, R. L., Fernandes, F., Martinelli, L. A., Piccolo, M. C., de Camargo, P. B., & Trumbore, S. (1995). Past vegetation changes in the Brazilian Pantanal arboreal-grassy savanna ecotone by using carbon isotopes in the soil organic matter. *Global Change Biology*, 1(3), 165-171.
- Villarino, S. H., Studdert, G. A., & Littera, P. (2018). Greenhouse gas inventories: deriving soil organic carbon change factors and assessing soil depth relevance in Argentinean Semiarid Chaco. *Catena*, 169, 164-174.
- Vourlitis, G. L., Pinto Jr, O. B., Dalmagro, H. J., de Arruda, P. E. Z., de Almeida Lobo, F., & de Souza Nogueira, J. (2022). Tree growth responses to climate variation in upland and seasonally flooded forests and woodlands of the Cerrado-Pantanal transition of Brazil. *Forest Ecology and Management*, 505, p.119917.
- Weber, O. L., & Couto, E. G. (2008). Dinâmica da matéria orgânica no complexo do Pantanal. In: Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais. 2ª edição. Metrópole. Porto Alegre, RS, p.463-482.
- Werner, C., Schnyder, H., Cuntz, M., Keitel, C., Zeeman, M. J., Dawson, T. E., ... & Gessler, A. (2012). Progress and challenges in using stable isotopes to trace plant carbon and water relations across scales. *Biogeosciences*, 9(8), 3083-3111.

**APÊNDICE A – Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e razão C/N do solo da Transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN).**

Tabela 2. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de solo da transição Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

<b>T-PAN</b>		
<b>SOLO 0-20</b>		
<b>Amostra</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math></b>	<b>Razão C/N</b>
T-PAN 01 0_20	-23,9	9,6
T-PAN 02 0_20	-25,1	10,6
T-PAN 03 0_20	-27,1	10,7
T-PAN 04 0_20	-27,4	10,9
T-PAN 05 0_20	-27,3	10,2
T-PAN 06 0_20	-24,1	9,0
T-PAN 07 0_20	-21,2	8,5
T-PAN 08 0_20	-29,0	11,3
T-PAN 09 0_20	-21,1	8,5
T-PAN 10 0_20*	-26,5	10,3
T-PAN 11 0_20	-26,8	9,3
T-PAN 12 0_20	-26,1	10,0
T-PAN 13 0_20	-27,2	11,8
T-PAN 14 0_20	-21,3	8,8
T-PAN 15 0_20	-26,2	10,6
T-PAN 16 0_20*	-28,2	9,9
<b>SOLO 20-40</b>		
<b>Amostra</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math></b>	<b>Razão C/N</b>
T-PAN 01 20_40	Sem dados**	Sem dados**
T-PAN 02 20_40	-22,9	8,8
T-PAN 03 20_40	-25,7	11,0
T-PAN 04 20_40	-25,7	9,6
T-PAN 05 20_40	-24,6	7,7
T-PAN 06 20_40	-23,3	8,3
T-PAN 07 20_40	-18,0	7,0
T-PAN 08 20_40	-26,0	9,6
T-PAN 09 20_40	-19,4	8,3
T-PAN 10 20_40*	-21,9	8,7
T-PAN 11 20_40	-22,3	8,7
T-PAN 12 20_40	-21,6	8,2
T-PAN 13 20_40	-24,6	10,0
T-PAN 14 20_40	-18,5	8,6
T-PAN 15 20_40	-24,9	10,8
T-PAN16 20_40*	-23,2	7,5

\* Pontos de coleta com variação de  $\delta^{13}\text{C}$  maior que 4‰.

\*\* Pontos de coleta onde a amostragem da profundidade de 20-40 cm não foi possível ser realizada.

## APÊNDICE B – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do solo do Pantanal Norte (PAN).

Tabela 3. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de solo do Pantanal Norte (PAN) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

PAN		
SOLO 0-20		
Amostra	$\delta^{13}\text{C}$	Razão C/N
PAN 01 0_20	-26,7	10,7
PAN 02 0_20	-28,5	10,0
PAN 03 0_20	-28,1	10,8
PAN 04 0_20	-22,1	9,1
PAN 05 0_20	-26,4	11,1
PAN 06 0_20	-26,8	10,3
PAN 07 0_20	-22,1	9,2
PAN 08 0_20	-25,6	10,7
PAN 09 0_20	-23,2	9,1
PAN 10 0_20	-28,2	10,8
SOLO 20-40		
Amostra	$\delta^{13}\text{C}$	Razão C/N
PAN 01 20_40	-26,5	9,7
PAN 02 20_40	-27,5	11,5
PAN 03 20_40	Sem dados**	Sem dados**
PAN 04 20_40	-20,5	9,1
PAN 05 20_40	Sem dados**	Sem dados**
PAN 06 20_40	-24,2	9,2
PAN 07 20_40	-21,2	8,7
PAN 08 20_40	Sem dados**	Sem dados**
PAN 09 20_40	-23,0	9,2
PAN 10 20_40	-27,7	8,6

\*\* Pontos de coleta onde a amostragem da profundidade de 20-40 cm não foi possível ser realizada.



**APÊNDICE C – Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e razão C/N do solo do Pantanal Sul (PS).**

Tabela 4. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de solo do Pantanal Sul (PS) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

<b>PS</b>		
<b>SOLO 0-20</b>		
<b>Amostra</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math></b>	<b>Razão C/N</b>
PS 01 0-20	-17,0	10,1
PS 02 0-20	-17,9	11,0
PS 03 0-20	-24,6	10,3
PS 04 0-20	-26,4	10,9
PS 05 0-20	-25,7	11,9
PS 06 0-20	-16,3	10,2
PS 07 0-20	-25,6	9,4
PS 08 0-20	-26,4	11,2
PS 09 0-20	-25,5	8,8
PS 10 0-20	-24,2	10,0
PS 11 0-20	-25,7	9,2
PS 12 0-20	-18,2	9,9
PS 13 0-20	-22,2	9,1
PS 14 0-20	-13,8	9,4
PS 15 0-20	-24,7	9,0
<b>SOLO 20-40</b>		
<b>Amostra</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math></b>	<b>Razão C/N</b>
PS 01 20-40	-16,9	9,9
PS 02 20-40	-16,6	9,4
PS 03 20-40	-22,6	10,4
PS 04 20-40	-23,4	10,8
PS 05 20-40	-24,7	12,1
PS 06 20-40	-15,6	9,9
PS 07 20-40	-24,3	8,4
PS 08 20-40	-22,9	11,0
PS 09 20-40	-22,6	8,4
PS 10 20-40	-24,4	9,6
PS 11 20-40	-25,6	8,2
PS 12 20-40	-17,9	10,3
PS 13 20-40	-20,6	9,0
PS 14 20-40	-14,1	8,3
PS 15 20-40	-21,8	9,2

**APÊNDICE D – Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e razão C/N do solo da Transição do Pantanal Sul Cerrado (T-PS).**

Tabela 5. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de solo da Transição do Pantanal Sul-Cerrado (T-PS) em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

<b>T-PS</b>		
<b>SOLO 0-20</b>		
<b>Amostra</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math></b>	<b>Razão C/N</b>
T-PS 01 0-20	-15,6	10,2
T-PS 02 0-20	-22,1	9,7
T-PS 03 0-20	-25,7	8,6
T-PS 04 0-20	-26,1	8,9
T-PS 05 0-20	-24,8	10,0
T-PS 06 0-20	-18,9	9,6
T-PS 07 0-20	-24,7	9,8
T-PS 08 0-20	-22,9	10,0
T-PS 09 0-20	-24,8	10,2
T-PS 10 0-20	-18,6	8,8
T-PS 11 0-20	-25,3	10,1
T-PS 12 0-20	-27,4	9,5
T-PS 13 0-20	-23,5	8,5
T-PS 14 0-20	-17,8	9,4
T-PS 15 0-20	-25,5	9,4
T-PS 16 0-20	-21,4	9,7
T-PS 17 0-20	-19,9	9,5
T-PS 18 0-20	-21,7	9,7
T-PS 19 0-20	-23,8	11,1
T-PS 20 0-20	-18,4	11,1
T-PS 21 0-20	-16,0	10,8
T-PS 22 0-20	-25,0	11,4
T-PS 23 0-20	-18,9	10,0
T-PS 24 0-20	-16,9	10,7
T-PS 25 0-20	-25,0	10,5
T-PS 26 0-20	-17,2	11,9
T-PS 27 0-20	-16,1	11,1
T-OS 28 0-20	-15,8	11,1
T-PS 29 0-20	-25,7	10,5
T-PS 30 0-20	-18,7	10,3
T-PS 31 0-20	-24,7	13,3
<b>SOLO 20-40</b>		
<b>Amostra</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math></b>	<b>Razão C/N</b>
T-PS 01 20-40	-16,7	10,4
T-PS 02 20-40	-23,4	9,2
T-PS 03 20-40	-24,3	8,9
T-PS 04 20-40	-25,7	8,8
T-PS 05 20-40	-23,0	10,3
T-PS 06 20-40	-18,3	11,5
T-PS 07 20-40	-24,5	10,0
T-PS 08 20-40	-21,1	8,4

T-PS 09 20-40	-23,2	9,4
T-PS 10 20-40	-18,3	8,9
T-PS 11 20-40	-22,2	9,2
T-PS 12 20-40	-26,6	9,8
T-PS 13 20-40	-22,3	9,4
T-PS 14 20-40	-17,3	8,8
T-PS 15 20-40	-24,6	9,9
T-PS 16 20-40	-19,0	9,7
T-PS 17 20-40	-19,0	9,1
T-PS 18 20-40	-19,7	8,9
T-PS 19 20-40	-21,8	9,9
T-PS 20 20-40	-18,6	10,4
T-PS 21 20-40	-15,6	11,4
T-PS 22 20-40	-23,9	10,5
T-PS 23 20-40	-19,1	9,5
T-PS 24 20-40	-16,8	10,6
T-PS 25 20-40	-23,6	10,7
T-PS 26 20-40	-15,6	11,7
T-PS 27 20-40	Sem dados**	Sem dados**
T-PS 28 20-40	-15,9	10,9
T-PS 29 20-40	-23,8	10,2
T-PS 30 20-40	-18,0	11,0
T-PS 31 20-40	Sem dados**	Sem dados**

---

\*\* Pontos de coleta onde a amostragem da profundidade de 20-40 cm não foi possível ser realizada.

**APÊNDICE E – Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e razão C/N do material foliar da Transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN).**

Tabela 6. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de material foliar da Transição do Pantanal Norte-Cerrado (T-PAN).

T-PAN		
Amostra	$\delta^{13}\text{C}$	Razão C/N
P T-PAN 01	-30,87	19,51
P T-PAN 02	-29,98	20,48
P T-PAN 03	-31,57	13,41
P T-PAN 04	-28,69	39,18
P T-PAN 05	-30,34	24,20
P T-PAN 06	-31,49	18,94
P T-PAN 07	-30,98	24,93
P T-PAN 08	-32,44	23,58
P T-PAN 09	-29,06	29,21
P T-PAN 10	-29,37	54,18
P T-PAN 11	-30,60	37,51
P T-PAN 12	-29,82	25,99
P T-PAN 13	-32,92	16,17
P T-PAN 14	-32,96	27,69
P T-PAN 15	-31,73	22,42
P T-PAN 16	-31,23	20,39
P T-PAN 17	-27,26	25,54
P T-PAN 18	-29,79	24,33
P T-PAN 19	-28,68	20,28
P T-PAN 20	-28,90	30,77
P T-PAN 21	-32,91	24,77
P T-PAN 22	-34,33	33,02
P T-PAN 23	-31,35	22,69
P T-PAN 24	-32,89	23,66
P T-PAN 25	-30,71	19,20
P T-PAN 26	-33,53	24,05
P T-PAN 27	-13,35	26,18
P T-PAN 28	-30,97	33,67
P T-PAN 29	-12,70	42,95
P T-PAN 30	-31,09	22,17
P T-PAN 31	-13,03	21,08
P T-PAN 32	-29,61	25,14
P T-PAN 33	-28,19	11,64
P T-PAN 34	-30,11	15,91
P T-PAN 35	-29,43	21,45
P T-PAN 36	-28,97	24,10

P T-PAN 37	-30,60	17,64
P T-PAN 38	-28,88	10,35
P T-PAN 39	-30,04	35,00
P T-PAN 40	-31,47	34,79
P T-PAN 41	-30,45	32,29
P T-PAN 42	-30,70	29,53
P T-PAN 43	-13,45	51,37

---

## APÊNDICE F – Valores de $\delta^{13}\text{C}$ e razão C/N do material foliar do Pantanal Norte (PAN).

Tabela 7. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de material foliar do Pantanal Norte (PAN).

PAN		
Amostra	$\delta^{13}\text{C}$	Razão C/N
P PAN 01	-28,26	14,76
P PAN 02	-31,15	18,52
P PAN 03	-30,81	27,80
P PAN 04	-29,89	19,08
P PAN 05	-32,19	19,73
P PAN 06	-32,24	17,57
P PAN 07	-32,60	27,02
P PAN 08	-33,32	14,79
P PAN 09	-33,02	18,64

**APÊNDICE G – Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e razão C/N do material foliar do Pantanal Sul (PS).**

Tabela 8. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de material foliar Pantanal Sul (PS).

PS		
Amostra	$\delta^{13}\text{C}$	Razão C/N
P PS 01	-12,27	65,04
P PS 02	-32,08	13,76
P PS 03	-27,45	16,38
P PS 04	-28,98	17,30
P PS 05	-29,50	22,43
P PS 06	-30,36	19,02
P PS 07	-32,05	20,78
P PS 08	-33,85	31,56
P PS 09	-30,10	19,71
P PS 10	-30,57	11,05
P PS 11	-31,20	19,22
P PS 12	-28,28	25,92
P PS 13	-13,17	52,68
P PS 14	-12,16	112,83
P PS 15	-30,96	34,07
P PS 16	-29,34	30,73
P PS 17	-29,55	28,92
P PS 18	-32,56	18,49
P PS 19	-30,89	28,03
P PS 20	-29,48	21,31
P PS 21	-33,70	36,73
P PS 22	-29,38	32,50
P PS 23	-29,76	20,08
P PS 24	-30,38	27,90
P PS 25	-27,51	20,02
P PS 26	-30,57	22,52
P PS 27	-28,12	9,79
P PS 28	-29,06	14,72
P PS 29	-27,09	25,38
P PS 30	-29,80	16,63
P PS 31	-12,99	58,82
P PS 32	-12,96	40,38
P PS 33	-12,78	12,06
P PS 34	-12,75	86,26
P PS 35	-30,85	23,29
P PS 36	-29,19	15,13
P PS 37	-32,26	16,24

**APÊNDICE H – Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  e razão C/N do material foliar da Transição do Pantanal Sul-Cerrado (T-PS).**

Tabela 9. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) e razão C/N das amostras de material foliar do Pantanal Sul (PS).

<b>T-PS</b>		
<b>Amostra</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math></b>	<b>Razão C/N</b>
P T-PS 01	-30,34	15,75
P T-PS 02	-33,61	31,38
P T-PS 03	-32,85	27,78
P T-PS 04	-31,74	28,16
P T-PS 05	-32,49	23,55
P T-PS 06	-27,55	39,51
P T-PS 07	-28,14	25,05
P T-PS 08	-28,90	25,59
P T-PS 09	-29,78	19,09
P T-PS 10	-28,41	25,29
P T-PS 11	-13,26	42,24
P T-PS 12	-27,77	27,13
P T-PS 13	-30,73	19,01
P T-PS 14	-30,97	11,54
P T-PS 15	-13,46	61,11
P T-PS 16	-13,63	20,50
P T-PS 17	-30,05	22,61
P T-PS 18	-29,15	24,81
P T-PS 19	-29,08	50,76
P T-PS 20	-28,58	31,70
P T-PS 21	-13,70	84,28
P T-PS 22	-27,01	26,19
P T-PS 23	-28,61	24,37
P T-PS 24	-31,38	22,84
P T-PS 25	-31,07	14,13
P T-PS 26	-28,56	28,65
P T-PS 27	-12,69	38,31
P T-PS 28	-26,69	10,82
P T-PS 29	-28,69	17,50
P T-PS 30	-28,37	18,24
P T-PS 31	-28,71	24,17
P T-PS 32	-12,57	51,97
P T-PS 33	-30,26	11,96
P T-PS 34	-27,53	28,45
P T-PS 35	-13,00	30,72
P T-PS 36	-29,33	20,94
P T-PS 37	-30,50	23,39
P T-PS 38	-23,31	26,88



P T-PS 39	-28,72	22,44
P T-PS 40	-30,31	27,08
P T-PS 41	-30,84	24,78
P T-PS 42	-28,62	9,35
P T-PS 43	-12,68	32,28
P T-PS 44	-13,17	118,45
P T-PS 45	-26,67	30,98
P T-PS 46	-28,75	43,22
P T-PS 47	-27,90	28,22
P T-PS 48	-29,95	28,98
P T-PS 49	-28,87	17,78

---