

Dinâmica do Potencial Redox do Solo no Pantanal de Mato Grosso

Dynamic of the Soil Redox Potential in the Pantanal of Mato Grosso

Oswaldo Borges Pinto Junior^{*a}; Larissa Carla Oliveira Rieger^a; Anna Carolinna Albino Santos^a

^aUniversidade de Cuiabá, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. MT, Brasil.

*E-mail: osvaldo.borges@cogna.com.br.

Resumo

O Pantanal é um bioma que apresenta efeito sazonal de enchentes, compreendendo um período seco e outro chuvoso. O período de cheia ocorre entre os meses de outubro a abril, enquanto o período de seca envolve os meses de maio a setembro. O processo de inundação altera o equilíbrio do solo, provocando alterações físicas e químicas, inclusive no potencial redox (Eh). Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a dinâmica do potencial redox, juntamente com outras variáveis, como CO₂, O₂, temperatura e umidade do solo de uma serra localizada na RPPN (Reserva Particular do Patrimônio Natural/Nacional). Sistema de Unidades de Conservação – SNUC), Estância Ecológica SESC (Serviço Social do Comércio) Pantanal, município de Poconé. A pesquisa foi realizada entre os anos de 2012 a 2015. Para isso, foram realizadas medições nas profundidades do solo de 10 e 30 cm através de sensores que realizavam monitoramento contínuo, com registro de dados a cada 30 minutos. Entre os anos analisados, em 2012, o Eh atingiu o menor valor na profundidade de 10 cm, atingindo aproximadamente 48,58 mV e o máximo em 2015 com aproximadamente 610 mV. Em 30 cm, o valor mais baixo foi em 2014, sendo - 345 mV e máximo em 2015 com 662 mV. Entre os anos analisados, 2015 foi o que mais diferiu. Ao analisar os períodos hidrológicos do Pantanal se constatou que, na maioria dos anos, os períodos foram sazonalmente bem definidos, com diferenças estatísticas em cada período, mas em 2012 entre os períodos de cheia e seca não houve diferença estatística, assim como em 2014 entre seca e vazante (profundidade 10 cm). Em 30 cm apenas no ano de 2012, os períodos de cheia não apresentaram diferença estatística entre esses.

Palavras-chave: Cordilheira. Enchente. Período Hidrológico.

Abstract

Pantanal is a biome that has a seasonal effect of flooding, comprising a dry period and another rainy period. The flood period occurs between the months of October to April, while the dry period involves the months from May to September. The flooding process changes the balance of the soil, causing physical and chemical changes, including the redox potential (Eh). Thus, the objective of this work was to analyze the dynamics of the redox potential, together with other variables, such as CO₂, O₂, temperature and soil humidity of a mountain range located in the RPPN (Reserva Particular do Patrimônio Natural/National System of Conservation Units – SNUC), Ecological Resort SESC (Social Service of Commerce) Pantanal, municipality of Poconé. The research was carried out between the years 2012 to 2015. For this, measurements were taken at soil depths of 10 and 30 cm through sensors that performed continuous monitoring, with data recording every 30 minutes. Among the analyzed years, in 2012 the Eh reached the lowest value at a depth of 10 cm, reaching approximately 48.58 mV and the maximum in 2015 with approximately 610 mV. In 30 cm the lowest value was in 2014, being -345 mV and maximum in 2015 with 662 mV. Among the analyzed years, 2015 was the one that differed the most. When analyzing the hydrological periods of the Pantanal, it was found that in most years, the periods were seasonally well defined, with statistical differences in each period, but in 2012 between the flood and dry periods there was no statistical difference, as well as in 2014 between drought and ebb (depth 10 cm). In 30 cm only in the year 2012, the flood periods did not show statistical difference between them.

Keywords: Cordillera. Flood. Hydrological Period.

1 Introdução

O Pantanal é caracterizado por ser uma planície intermitente e sazonalmente inundada. É a maior área alagável contínua existente e ocupa cerca de 1,6 % do território brasileiro. É uma região de enorme importância ecológica e socioeconômica, que se destaca pela sua vasta biodiversidade e pelo regime hidrológico peculiar. A flutuação anual do nível da água - o pulso de inundação - regula os processos ecológicos que ali ocorrem (Merino *et al.*, 2013). As diferenças locais do regime hidrológico, somadas às variações da topografia e do solo, proporcionam zonas permanente e periodicamente

alagadas (Aquatic/Terrestrial Transition Zones - ATTZ) e outras raramente alagadas (Dorau, 2021; Nunes; Junk, 2004).

O processo de inundação altera o equilíbrio dos elementos e dos compostos no solo, resultando em importantes mudanças químicas, físicas, biológicas e mineralógicas, das quais a mais significativa é, possivelmente, o decréscimo no potencial eletroquímico de elétrons ou potencial redox (Lima *et al.*, 2005). Este fenômeno influencia as características morfológicas dos solos, levando à segregação do ferro e à formação de zonas enriquecidas em ferro, produzindo uma coloração característica nos perfis (Zeilhofer; Moura, 2009).

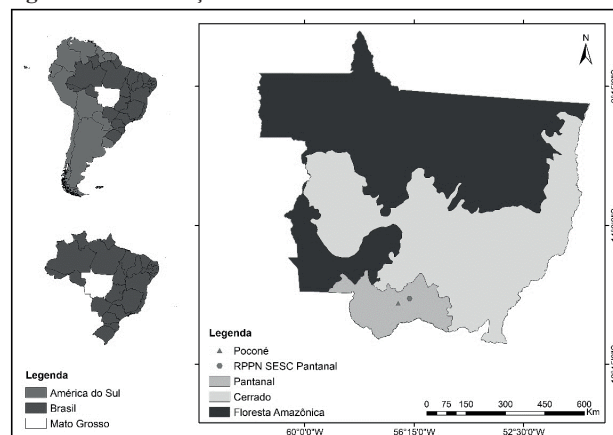
Reações de oxidação-redução ou redox são aquelas nas quais uma espécie química passa de um estado mais oxidado a um menos oxidado ou reduzido, ou vice-versa, pela transferência de elétrons. As medidas de potencial redox (Eh), em amostras ambientais como solo e água, começaram a ser utilizadas no início do século XX e com sua intensificação se tornou parâmetro rotineiro para monitoramento ambiental. O potencial redox pode ser medido através de titulações, em que um eletrodo inerte (platina, por exemplo) juntamente com um eletrodo de referência são usados para monitorar a variação do potencial durante uma titulação de redução-oxidação em um procedimento rápido, confiável, robusto e de baixo custo. O potencial Redox é uma medida de tensão que pode ser medida no solo e usada para prever os tipos de espécies reduzidas, que se esperariam na solução do solo. As medidas Eh são avaliadas juntamente com os dados de pH do solo e um diagrama de fase Eh / pH (Mattila, 2024).

A medida Eh deve ser considerada como um parâmetro integrado, que é desencadeado pela atividade de comunidades microbianas vivas. Assim, mudanças de condições externas, como precipitação e lençol freático, temperatura e disponibilidade de matéria orgânica, podem levar a mudanças nos valores de Eh. Consequentemente, o potencial redox pode variar em várias ordens de grandeza tanto temporalmente (por exemplo, minutos, horas ou dias) quanto espacialmente (por exemplo, horizontes, tipos de solo ou paisagens) (Gao *et al.*, 2002). Os diagramas de fase Eh / pH são úteis para mostrar como a redução e a oxidação de uma determinada espécie variam com o pH da solução e, também, analisar a relação entre os diferentes elementos que desenvolvem reações de redox para prever a fase em que um determinado elemento ocorre. Dessa forma, o objetivo deste trabalho consiste em analisar a dinâmica do potencial redox no solo de uma cordilheira em uma área sazonalmente alagada do Pantanal Norte Mato-Grossense.

2 Material e Métodos

A pesquisa foi conduzida em uma área localizada na Base Avançada de Pesquisas do Pantanal – Baía das Pedras, pertencente à Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN SESC – Barão de Melgaço, (16°30'15 S; 56°24'15" O), localizado a cerca de 160 km de Cuiabá – MT, Pantanal Mato-grossense de acordo com a Figura 1.

Figura 1 - Localização da área de estudo – RPPN Sesc – Poconé



Fonte: os autores.

O clima no Pantanal é do tipo Aw (Köppen), sendo quente e úmido, com um período seco no Inverno, pronunciada de maio a setembro e um período chuvoso no Verão de outubro a abril. Os índices pluviométricos oscilam de 800 a 1400 mm por ano, com 80% do total ocorrendo nos meses de novembro a março. O clima é fortemente sazonal, com temperatura média anual em torno de 25 °C, sendo nos meses de setembro a dezembro observadas as máximas temperaturas absolutas, ultrapassando os 40 °C. As temperaturas médias anuais variam entre máximas de 29 a 32 °C, e mínimas de 17 a 20 °C. O solo da região é classificado como GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico e a fitofisionomia é de campo (Hofmann *et al.*, 2010).

A área de estudo é conhecida como área de Acuri ou Acurizal, em função da fitofisionomia predominante de Floresta Estacional com Acuri (*Scheelea phalerata*). O solo da região é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico Típico (Couto; Oliveira, 2010). Os dados foram coletados em região de cordilheira, que são regiões com elevações que podem ou não serem alagadas. Essas áreas são conhecidas no Pantanal e que possuem pequenas elevações em forma de cordões, variando de 1 a 6 metros, sendo ocorrentes em solos eutróficos das classes formada dos Planossolos e Luvisolos. Constituem as posições mais elevadas da paisagem, na qual a inundação ocorre somente em eventos excepcionais (Ab'saber, 1988; Souza, 2003).

2.1 Método de amostragem

Amostragem e medidas *in situ*

O estudo foi realizado ao longo dos ciclos hidrológicos do Pantanal dividido em quatro períodos: o período “cheio” (correspondente aos meses de fevereiro, março e abril); o período “vazante”, (maio, junho e julho); o período “estiagem”, (agosto, setembro e outubro); e, por fim, o período “enchente”, (novembro, dezembro e janeiro), dos anos de 2012 a 2017.

Foram instalados sensores horizontalmente no perfil do solo na borda de uma “cordilheira” nas profundidades de 10 e 30 cm para o monitoramento contínuo da concentração de

CO₂ [ppm], de O₂ (%), umidade (m³ m⁻³), temperatura (°C) e potencial redox (Eh).

O Potencial Redox foi medido utilizando o sensor CSIM11-ORP, *Campbell Scientific*, USA, (eletrodo de referência – AgCl / KCl) na faixa de medida entre - 700 a +1100 mV. A sonda do pH *Campbell Scientific CSIM11-ORP*, *Campbell Scientific*, USA, (eletrodo de referência – AgCl / KCl) mede um sinal elétrico (em mV) da mudança da concentração de íon hidrônio [H₃O⁺]. Este sinal tem uma classificação do pH em uma escala logarítmica (pH = -log[H₃O⁺]). Para a calibração no laboratório foram utilizados os sensores de pH e ORP (CSM11), utilizou-se da solução tampão 7,0 (pH e ORP) e 4,0 (pH), solução de 5 % de HCl para a limpeza da sonda de pH, solução de 4% NaOH para a limpeza da sonda de pH (*Instruction Manual*, 2006).

Os dados de potencial redox foram corrigidos pela equação de regressão, sendo¹⁹: Fator de ajuste = - 0,6743 × (T) + 213,76 inseridos no *Datalogger CR1000* (*Instruction Manual*, 2000- 2006). Em que T é a temperatura (°C) na profundidade do sensor redox. Então, Potencial Redox (Eh, mV) = Fator de ajuste + medida do sensor redox.

O Conteúdo Volumétrico de Água (CVA) do solo foi estimado a partir de sensores modelo EC-5 *Decagon Instruments*, USA. A concentração de CO₂ no solo foi determinada *in situ* por meio de uma sonda de medidas contínuas, (Mod GMM221, *Vaisala Inc.*, Helsinki, Finland), com registros a cada trinta minutos. A temperatura do solo e a concentração de O₂ foram medidas usando sensor Mod.SO-100, *Apogee Instruments*.

2.2 Análises estatísticas

Os dados do potencial redox foram submetidos a análise de variância - ANOVA ($\alpha = 0,05$) e quando constatadas diferenças, realizou-se o teste *post hoc* de Tukey, através do programa *R Statistical* (R Core Team, 2015), utilizando o package *Vegan* (Oksanen *et al.*, 2013).

3 Resultados e Discussão

De acordo com o Quadro 1 se encontram os resultados da precipitação da área de estudo que caracterizam dois períodos bem definidos na região, o seco (maio a setembro) e chuvoso (outubro a abril) nos anos de 2012 a 2017.

Quadro 1 - Precipitação da área de estudo

Período	Meses 2012 a 2017	Precipitação
Seco	Junho	23,27 mm
Seco	Julho	15,73 mm
Seco	Agosto	10,87 mm
Chuvoso	Dezembro	215,53 mm
Chuvoso	Janeiro	235,89 mm
Chuvoso	Fevereiro	237,06 mm

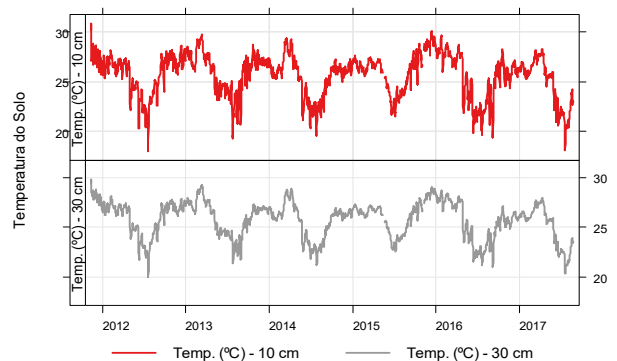
Fonte: dados da pesquisa.

Foram encontrados valores similares no Pantanal, com precipitações máximas em novembro e dezembro (período

úmido, porém não houve precipitação em junho, setembro e outubro (Sanches *et al.*, 2010). A precipitação anual foi aproximadamente 1400 mm, comparando com a precipitação total média anual no Pantanal apresenta um gradiente Oeste-Nordeste e Leste-Sudeste, em que no Oeste, a precipitação é inferior a 1000 mm e a máxima é de aproximadamente 1300 mm (Hofmann *et al.*, 2010). Os meses mais chuvosos são fevereiro, março e novembro, no entanto os meses de seca são julho, junho e setembro. Entre todas as regiões, possui a menor precipitação do mês de maio e a maior de fevereiro. Possui dois picos de precipitação, um mais elevado, entre janeiro e março e outro, com valores menores, em novembro e dezembro. No restante dos meses, possui precipitação baixa, com exceção de julho, quando não há chuva (Darzi, 2018).

A temperatura do solo variou de 16 °C a 30 °C em 10 cm e de 20 °C a 30 °C em 30 cm. No período analisado as maiores temperaturas foram registradas no mês de março e as menores no mês de julho para ambas as profundidades de acordo com a Figura 2. No estudo da mesma área do estudo realizado foi encontrada a temperatura do solo para ambas as profundidades, os maiores valores médios na enchente e cheia (27,3 e 27,5 °C, na profundidade de 10 cm, e 27,1 e 27,3 °C, na profundidade de 30 cm) (Messias *et al.*, 2013).

Figura 2 - (a) Médias da temperatura do solo (°C), nas profundidades de 10 e 30 cm, no período de 2012 a 2017



Fonte: dados da pesquisa.

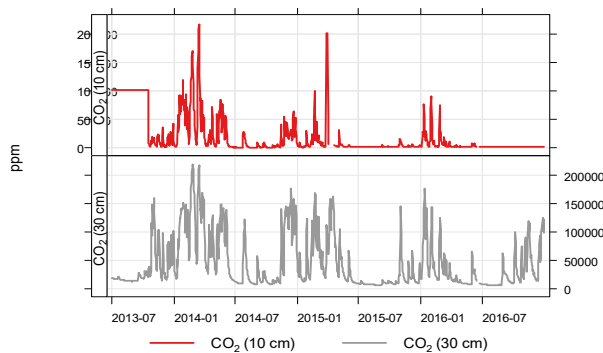
A temperatura tem um impacto múltiplo na medição de Eh, porque é uma propriedade que é inerente à equação de Nernst, alterando o potencial do eletrodo de referência e altera as propriedades elétricas do cabeamento (Dorau *et al.*, 2021).

A umidade do solo está diretamente relacionada com a precipitação e com a enchente e tende a ser maior quando a temperatura do solo é baixa e vice-versa, podendo tanto favorecer como inibir a produção de CO₂, havendo teoricamente uma umidade ótima que maximize a respiração. Assim, um solo com deficiência de água pode reduzir ou eliminar o crescimento bacteriano. Por outro lado, uma umidade excessiva restringe a transferência de oxigênio, diminuindo a atividade dos micro-organismos aeróbicos (Padrão, 2004). O solo teve diferentes valores de umidade

conforme o período hidrológico do Pantanal, diminuindo na estiagem e aumentando à medida que se aproximam os períodos de chuva. Em 10 cm os houve variação de 0,1 a 0,4 m³ m⁻³, na profundidade de 30 cm foram superiores a 0,5 m³ m⁻³. Em 2014, a umidade foi mais elevada e prolongada, em função de período de chuva que foi mais longo e mais intenso.

As concentrações de CO₂ no solo, de acordo com a Figura 3, variaram de acordo com o período de inundação, com base no acúmulo da precipitação, chegando a valores próximos a 200.000 [ppm]. As concentrações de CO₂ foram tipicamente maiores no período úmido e em 30 cm, nos períodos de seca, as concentrações foram menores, tanto em 10 cm quando em 30 cm. Em 2013, as concentrações de CO₂ permaneceram constantes em 10 cm com decréscimo na enchente. Os solos secos estão associados com as baixas concentrações de CO₂, o que permite rápido efluxo de CO₂ do solo para a atmosfera. Em 2014 foram obtidos maiores picos de concentrações em relação aos outros anos, tanto em 10 cm como em 30 cm, o que pode estar associado à precipitação mais intensa neste ano.

Figura 3 - Média diária de CO₂ nas profundidades de 10 cm e 30 cm no período de 2012 a 2016



Fonte: dados da pesquisa.

A produção de CO₂ no solo aumentou nas chuvas no período da enchente, o que explica a diferença entre a estiagem e enchente. Os valores médios diferem entre si ao longo do ciclo hidrológico como também entre as profundidades. Dentro de cada período, os valores foram menores na profundidade de 10 cm do que em 30 cm. Os solos secos podem ser associados com as baixas concentrações de CO₂, visto que possuem alta difusividade, o que permite rápido efluxo de CO₂ do solo para a atmosfera (Lobo, 2000; Mattila, 2024).

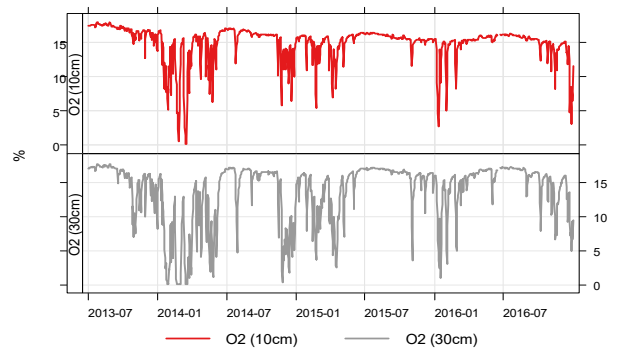
De acordo com Padrão (2004), sugere-se que o efluxo de CO₂ pode ser limitado pela umidade em níveis muito altos. Assim, a concentração de CO₂ na profundidade de 10 cm pode resultar da produção de CO₂ nesse local, como também do transporte lento de CO₂, proveniente das camadas inferiores, ou uma combinação desses fatores.

Os dados obtidos até 2013 tiveram um máximo de 100.000 [ppm], em função da resolução do sensor. A partir de 2014, outro sensor foi utilizado, com faixa de leitura superior, por isso, ultrapassaram 100.000 [ppm]. No Pantanal Norte,

comprovou-se que o fluxo de CO₂ no solo na profundidade de 10 e 30 cm foram mais altos na cheia e enchente do que na vazante e estiagem, indicando condições de difusão limitada no solo, quanto aos solos secos, foram observadas baixas concentrações de CO₂, por esse possuir alta difusividade, que permite acelerado efluxo de CO₂ do solo para a atmosfera.

Os valores de O₂ de acordo com a Figura 4, apresentaram-se menores nos períodos de enchente e cheia, tanto em 10 cm quanto em 30 cm, chegando próximos a zero, principalmente na profundidade de 30 cm. O O₂ tende a diminuir nestes períodos, pois os solos estão úmidos, ou completamente alagados, o que prejudica sua difusividade.

Figura 4 - Média diária de O₂ (%) nas profundidades de 10 cm e 30 cm no período de 2012 a 2016



Fonte: dados da pesquisa.

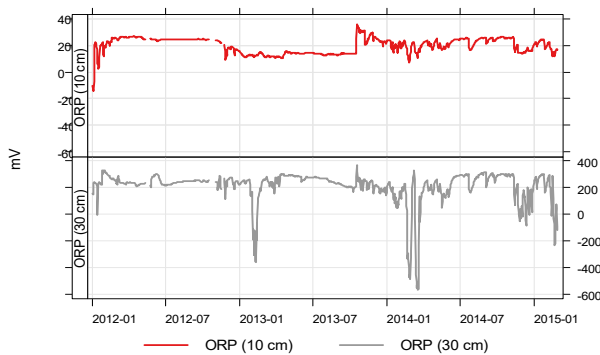
Com a inundação da área de estudo se tem a diminuição das trocas gasosas entre o solo e o ar, pois a difusão de gases na lâmina de água é cerca de 10.000 vezes mais lenta do que ar. Com isso, o suprimento de oxigênio para o solo se torna extremamente lento, muito abaixo das necessidades dos micro-organismos. Dessa forma, os micro-organismos aeróbicos agem de maneira muito rápida, consumindo o oxigênio do solo, tornando-os inativos ou mortos. Em contrapartida, os micro-organismos anaeróbicos, facultativos e obrigatórios, representados por bactérias, proliferam e passam a dominar a atividade biológica do alagado.

Os valores médios de O₂ do solo foram diferentes entre as estações e só houve diferença significativa entre os períodos do dia na estiagem. Na profundidade de 10 cm, os valores médios de O₂ foram maiores no período da enchente e menores no período da vazante, em razão de os solos estarem úmidos e a sua difusividade ficar prejudicada. O O₂ do solo tende a diminuir seus valores no período da cheia, quando o solo já está completamente alagado. Durante as inundações, reduz-se a quantidade de oxigênio disponível no solo para as raízes das plantas, criando-se um ambiente hipóxico ou anóxico, resultando em maior acidificação dos solos e aumento das concentrações de íons solúveis, como o Fe²⁺ e Mn²⁺ (Padrão, 2004).

A variação do potencial redox (ORP) para o solo estudado está apresentada na Figura 5 e foi realizado de acordo com a sonda do pH Campbell Scientific CSIM11-ORP, *Campbell*

Scientific, USA, (eletrodo de referência – AgCl / KCl), em que mede um sinal elétrico (em mV) da mudança da concentração de íon hidrônio [H₃O⁺]. A variabilidade espacial e temporal em Eh é ampliada durante os períodos iniciais de inundação/saturação e drenagem à medida que o sistema muda de aeróbica para anaeróbica.

Figura 5 - Média diária do potencial redox (ORP/Eh) nas profundidades de 10 cm e 30 cm no período de 2012 a 2015



Fonte: dados da pesquisa.

Em 2014 ocorreu número maior de dias com Eh negativo (em 30 cm), ou seja, o solo estava saturado, o que pode ser explicado com o regime de chuvas para este ano. Em estudos nos solos do Pantanal de Barão de Melgaço foram encontrados valores de Eh menores em maiores profundidades (Risk *et al.*, 2008). O potencial redox diminuiu na cheia (meados de fevereiro), ou seja, em que o teor de umidade elevado diminuiu a taxa e quantidade de difusão de O₂ no solo e aumentou nos outros períodos do ciclo hidrológico.

O potencial redox foi geralmente maior na profundidade de 30 cm do que perto da superfície do solo (10 cm), o que deve estar relacionado ao maior teor de matéria orgânica na superfície dos solos, pois essa influencia na dinâmica do Fe e do Mn e esses elevados teores de matéria orgânica favorecem a formação de complexos de Fe³⁺solúveis (Messias *et al.*, 2013).

De acordo com o Quadro 2 se apresenta o valor de pH de 0 a 50 cm de profundidade para o solo do Acurizal, Planossolo Háplico eutrófico típico (Dias, 2017).

Quadro 2 - Média do pH do solo de 0 a 50 cm de profundidade na área de estudo

Profundidade (cm)	pH
Acurizal, Planossolo Háplico eutrófico típico	
0 – 10 ¹	5,6
10 - 20	5,6
20 – 30	5,9
30 - 40	5,8
40 - 50	6,1
Média	5,7

Fonte: dados da pesquisa.

Encontraram-se valores de pH para esta área de estudo variando de aproximadamente 5,0 a 5,5 entre os anos de 2014

e 2015. Em março de 2014 teve o menor pH e em maio do mesmo ano o maior valor. Levando em consideração o pH da solução do solo da área de estudo e conforme o diagrama de fase de Eh/pH, é possível observar que a pH 5 o Fe(OH)₃ reduz-se a Fe²⁺ quando o Eh está abaixo de 467 mV (Messias *et al.*, 2013). Com redução do ferro em Eh a 467 mV, constata-se que em todos os anos este elemento esteve presente no solo. Quando o Fe²⁺ estiver presente, pode-se assumir que a maioria das moléculas de O₂ dissolvidos foram reduzidas a H₂O, que a maioria dos NO₃⁻ presentes foi desnitrificada e que a maioria dos óxidos de Mn foi reduzido para Mn²⁺ (Messias *et al.*, 2013; Mattila, 2024; Osterholm *et al.*, 2023).

Em 2013, 2014 e 2015, no período de cheia, a profundidade de 30 cm o Eh chegou -100 mV, o que permite dizer que a redução do solo potencialmente produziu metano. Após a inundação, os decompostos aeróbicos utilizam rapidamente o O₂ disponível. Uma vez que a maior parte do O₂ é consumida, as bactérias desnitrificantes usam nitrato como fonte de energia, seguidas por redutores de Mn e Fe, redutores de SO₄²⁻ e, finalmente, metanógenos. Na profundidade de 10 cm, o solo permaneceu seco na maioria do tempo com valores ultrapassando a 300 mV, assim o O₂ controlava o sistema.

Em solos ácidos (pH < 4,5) ocorre a desnitrificação, com Eh de 850 mV a redução de Fe³⁺ para Fe²⁺, com Eh = 550 mV e a redução de CO₂ em CH₄ com Eh -100 mV (Vourlitis *et al.*, 2017). Ao mesmo tempo, as condições anaeróbicas no solo favorecem as emissões de CH₄ através da metanogênese da atividade microbiana (Messias *et al.*, 2013).

A desnitrificação é a principal via de redução do NO₃⁻ na maioria dos solos e cerca de 60 a 80% do NO₃⁻ encontrado em solos é convertido em formas gasosas. A disponibilidade de O₂ nos solos é, geralmente, considerada como o principal fator controlador da desnitrificação, dado que a produção de NO₃⁻ durante a nitrificação depende de condições óxicas do ambiente (Vourlitis *et al.*, 2017). A água presente nos poros dos solos pode regular a disponibilidade de O₂, reduzindo a difusão desse gás e a disponibilidade de espaço poroso. Maiores taxas de desnitrificação têm sido associadas a solos com 60% ou mais dos seus poros saturados por água, o que mostra que a desnitrificação pode ser significativamente superior em solos úmidos em relação aos secos, em uma mesma área (Vourlitis *et al.*, 2017).

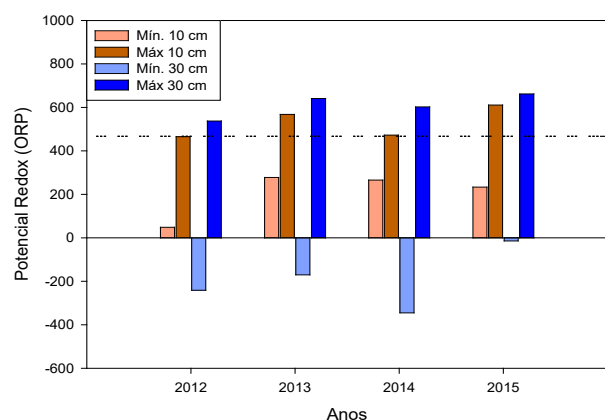
Os “hot points” de carbono são zonas nas quais o CH₄ é produzido em decorrência de gradientes redox muito fortes, que são causados pela estrutura porosa do solo, possíveis colônias de micróbios, concentrações de carbono prontamente utilizáveis e a liberação de oxigênio através das raízes (Vepraskas *et al.*, 2000).

Muitas espécies de plantas, especialmente aquelas adaptadas aos ambientes terrestres, tornam-se estressadas quando O₂ se torna limitante. Quando o fornecimento de O₂ às raízes é restrito, o metabolismo aeróbio cai e os processos críticos para o crescimento e manutenção diminuem

drasticamente, ou mesmo param (Risk *et al.*, 2008).

Entre os anos analisados, em 2012, o Eh atingiu o menor valor na profundidade de 10 cm de acordo com a Figura 6, atingindo aproximadamente 48,58 mV e o máximo em 2015 com aproximadamente 610 mV. Em 30 cm, o menor valor foi em 2014, sendo -345 mV e máximo em 2015 com 662 mV. Vale ressaltar que em 2014 houve maior acumulado de precipitação, o que favoreceu o processo de redução do solo. O excesso de umidade no solo limita a disponibilidade do oxigênio nos solos, então, vários grupos de micro-organismos obrigatórios e facultativos utilizam compostos oxidados como receptores de elétron na cadeia respiratória, transformando-os em formas reduzidas, contribuindo para a redução do potencial redox do solo.

Figura 6 - Variação dos valores mínimos e máximos de potencial redox no período de 2012 a 2015 da RPPN Sesc – Poconé



Fonte: dados da pesquisa.

A linha pontilhada na Figura 6 representa o potencial redox em 467 mV. Nesta fase ocorre a redução do ferro, evidenciando que em todos os anos o ferro esteve presente no solo. Se o Fe²⁺ estava presente, assume-se que a maior parte do O₂ dissolvido foi reduzido para H₂O, a maioria do NO₃⁻ foi desnitrificada e os óxidos de Mn reduzidos para Mn²⁺. A redução do ferro e manganês favorecem o processo de plintização. Nos locais em que há grande alternância sazonal do nível freático, o processo de plintização predomina (Wachinger *et al.*, 2000). A presença

de formas de Fe redutíveis e carbono orgânico dissolvido, associado às variações nas condições de oxirredução, permitem a continuidade do processo de plintização (Li *et al.*, 2024).

Para os colaboradores, durante o mês de março, o Fe²⁺ estava na solução do solo, ou seja, se o Fe²⁺ estava presente, pode-se assumir que a maior parte do O₂ dissolvido foi reduzido para H₂O; a maior parte do NO₃⁻ presente foi desnitrificada, bem como a dos óxidos de Mn, reduzida para Mn²⁺. A redução do Mn (IV) ocorre a valores de Eh maiores que do Fe³⁺, geralmente entre 200 e 300 mV, podendo ser mobilizado até mesmo em ambiente ligeiramente reduzido e, conseqüentemente, ocorre acúmulo de Mn²⁺ em Eh mais elevado do que o Fe²⁺, sugerindo que a redução do Mn⁴⁺ preceda o Fe³⁺ (Li *et al.*, 2024; Messias *et al.*, 2013).

O processo de plintização é o mais marcante na maioria dos solos do Pantanal de Barão de Melgaço, ocorrendo desde solos com desenvolvimento pedogenético incipiente a classes de solos bem desenvolvidos (Babaloa *et al.*, 2020; Parent *et al.*, 2008).

A formação do horizonte plíntico está sempre relacionada com processos que levam à segregação, mobilização e transporte de Fe²⁺, seja pelo fluxo lateral das águas de infiltração, das zonas mais altas até as mais baixas, ou pelas oscilações do lençol freático carregado desse elemento, precipitação e concentração final de compostos de ferro (laterização ou plintização) (Couto; Oliveira, 2010).

Ao analisar os períodos hidrológicos do Pantanal, verificou-se que na maioria dos anos, os períodos são bem definidos, com diferenças estatísticas ($p < 0,05$) em cada período. De acordo com o Quadro 3, comparando-se o período de cheia para cheia, a média na profundidade de 10 cm do ano de 2012 com a profundidade de 30 cm do mesmo período não teve alteração significativa, observando-se que no período de enchente para enchente no ano de 2012 nas duas profundidades, 10 cm e 30 cm, respectivamente teve uma alteração, em função de ser um ano de chuvas intensas, como relacionado na Figura 2. No período de estiagem e vazante para o ano de 2012, para as duas profundidades, não teve alterações significativas.

Quadro 3 - Potencial Redox entre os períodos hidrológicos nas profundidades de 10 cm e 30 cm do Pantanal – Período de 2012 a 2015

Profundidade	Períodos	2012	2013	2014	2015
		Eh			
		Média(dp)	Média(dp)	Média(dp)	Média(dp)
10 cm	Cheia	447,80+/-19,65 ^a	319,24+/-13,81 ^a	384,49+/-41,51 ^a	378,37+/-32,36 ^a
	Enchente	357,84+/-78,85 ^b	412,77+/-62,87 ^b	383,66+/-39,86 ^b	431,17+/-35,31 ^b
	Estiagem	440,98+/-2,06 ^b	361,27+/-69,07 ^c	441,79+/-16,92 ^c	479,02+/-21,98 ^c
	Vazante	443,17+/-4,55 ^c	337,47+/-4,23 ^d	417,47+/-31,42 ^c	453,22+/-24,92 ^d
30 cm	Cheia	441,99+/-26,07 ^a	378,04+/-167,66 ^a	291,18+/-270,12 ^a	391,41+/-141,75 ^a
	Enchente	429,83+/-58,48 ^{ab}	443,63+/-42,81 ^b	392,22+/-108,92 ^b	480,32+/-67,89 ^b
	Estiagem	443,53+/-3,48 ^b	433,53+/-43,47 ^c	560,58+/-32,74 ^c	586,92+/-25,73 ^c
	Vazante	440,99+/-27,76 ^c	473,95+/-9,86 ^d	488,07+/-80,64 ^d	551,66+/-59,59 ^d

Médias seguidas de diferentes letras minúsculas, na coluna, para cada profundidade, representam a diferença estatística entre as estações. Teste T ($\alpha < 0,05$).

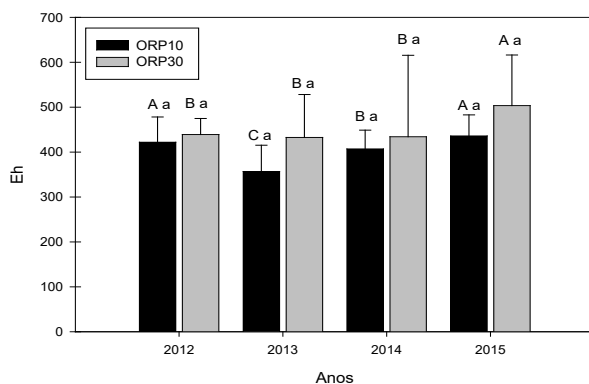
Fonte: dados da pesquisa.

Comparando os anos de 2013, 2014 e 2015 de cheia para cheia, de enchente para enchente, de estiagem para estiagem, de vazante para vazante nas duas profundidades de 10 cm para 30 cm não houve alteração significativa.

Observa-se que para os anos de 2012 a 2015, o potencial redox foi maior geralmente na profundidade de 30 cm do que perto da superfície do solo (10 cm) em que se pode relacionar ao maior teor de matéria orgânica na superfície do solo e que tem influência na dinâmica do Fe e Mn. O potencial redox diminui no período da cheia para os anos de 2012 a 2015, pois o teor de umidade elevado faz com que a diminuição na taxa e quantidade de difusão de O₂ no solo e aumenta nos outros períodos.

Na Figura 7, ao comparar o potencial redox entre os anos, observa-se que não houve diferença significativa na profundidade de 10 cm, em 2012 e 2015, com valores superiores a 400 mV, no ano 2013 e 2014 foram diferentes estatisticamente. Na profundidade de 30 cm, somente 2015 distinguiu-se entre os anos analisados.

Figura 7 - Média anual do potencial redox entre 2012 a 2015



Letras maiúsculas diferentes representam diferença estatística entre os anos de estudo. Teste T ($\alpha < 0,05$).

Fonte: dados da pesquisa.

Em 2015, na profundidade de 30 cm, o potencial redox se apresentou distinto quando comparado com os demais anos, o que pode estar associado ao volume da precipitação, que atingiu os menores valores se comparado aos outros. É comum que o potencial redox seja maior em maiores profundidades, do que perto da superfície dos solos, pois o teor de matéria orgânica é maior na superfície dos solos, a qual influencia a dinâmica do Fe e do Mn, tanto por seu efeito inibidor do processo de cristalinidade dos óxidos quanto por sua atuação como fonte de energia, para os micro-organismos responsáveis pela redução microbiana dos compostos oxidados. Elevados teores de matéria orgânica favorecem a formação de complexos de Fe³⁺ solúveis e suportam a formação da ferrihidrita (Beirigo, 2008).

A mesma área de estudo mostrou valores médios anuais similares de Eh com uma média de 442 mV e 444 mV nas profundidades de 0,10 m e 0,30 m, respectivamente, nos anos de 2014 e 2015 corroborando com os resultados obtidos neste trabalho. As maiores diferenças sazonais foram aparentes

no período de fevereiro a março, considerando as diferenças do ano mais úmido (2014) versus seco (2015) com base na precipitação, período de inundação e a fase do rio Cuiabá nas proximidades (Oliveira *et al.*, 1992).

O potencial redox pode ser um fator que limita a ocorrência de plantas que são capazes de crescer em Eh na faixa de 300 mV a 700 mV (Rancourt *et al.*, 2005). Como o crescimento e função normais das raízes requerem um conteúdo de oxigênio adequado (10% do volume), a respiração da raiz na deficiência de oxigênio se assemelha à fermentação alcoólica (Couto; Oliveira, 2010). O etanol é acumulado nos tecidos das raízes no etileno, os ácidos orgânicos e outros compostos perturbadores do metabolismo são acumulados em toda a planta. Em consequência, mudanças que afetam as raízes (crescimento retardado e desenvolvimento) e os órgãos da planta (amarelamento e murchamento de folhas, flores caídas) ocorrem (Lathuillière *et al.*, 2017).

4 Conclusão

As variações sazonais do processo de inundação do Pantanal propiciam alternância nas condições de redução e oxidação do solo. Durante o período de inundação no Pantanal, ocorrem mudanças nas reações físico-químicas, em função de processos redox mórficos. A umidade do solo foi a variável que mais explicou a variação do potencial redox ao longo dos períodos hidrológicos, como evidenciado no ano de 2015 em 30 cm. Todos os anos analisados houve variação do Eh, com dias negativos, o que potencialmente levou à formação de gás metano.

Compreender a dinâmica do processo de redução e oxidação possibilita prever os tipos de espécies reduzidas que ocorrem na solução do solo. Nesta pesquisa pode-se perceber que é característico dos solos do Pantanal reações redoximórficas, em que, a saturação do solo provoca a redução.

A medida Eh deve ser considerada como um parâmetro integrado, que é desencadeado pela atividade de comunidades microbianas vivas. Assim, mudanças de condições externas, como precipitação e lençol freático, temperatura e disponibilidade de matéria orgânica, podem proporcionar mudanças nos valores de Eh.

Referências

- AB'SABER, A.N. O Pantanal Mato-Grossense e a teoria dos refúgios. *Rev. Bras. Geog.*, v.1, p.9-57, 1988.
- BABALOLA, T.S. *et al.* An investigation of soil development with morphological properties *In* Kabba, Southern Guinea Savannah Zone of Nigeria. 2020.
- BEIRIGO, R.M. Sistema pedológico Planosolo-Plintossolo no Pantanal de Barão de Melgaço-MT. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.
- COUTO, E.G.; OLIVEIRA, V.A. The soil diversity of the Pantanal. *In*: JUNK, W. *et al.* The Pantanal: ecology, biodiversity and sustainable management of a large neotropical seasonal wetland. Pensoft Publishers, 2010. doi: <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200012>.

- DARZI, L.B.G. Análise da precipitação do Pantanal utilizando dados de sensoriamento remoto. Campo Grande: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2018.
- DORAU, K. et al. Temperature-induced diurnal redox potential in soil. *Environ. Sci. Proc. Impacts*, v.23, p.1782-1790, 2021.
- GAO, S. et al. Comparison of redox indicators in a paddy soil during rice-growing season. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.66, p.805-817, 2002.
- HOFMANN, G.S. et al. O clima na Reserva Particular de Patrimônio Natural SESC Pantanal. Rio de Janeiro: SESC, 2010.
- INSTRUCTION MANUAL. Using CSIM11 pH and ORP Probes with Campbell Scientific Dataloggers. Campbell Scientific Inc. Rev 10/06. Appendix A, 2000-2006.
- LATHUILLIÈRE, M.J. et al. Soil CO₂ concentrations and efflux dynamics of a tree island in the Pantanal wetland. *J. Geophys. Res. Biogeosc.*, v.122, p.2154-2169, 2017.
- LI, J. et al. Elevated CO₂ increases soil redox potential by promoting root radial oxygen loss in paddy field. *J. Environ. Sci.*, p.11-20, 2024.
- LOBO, P.C.; JOLY, C.A. Aspectos ecofisiológicos da vegetação de mata ciliar do sudeste do Brasil. *MATAS CILIARES: conservação e recuperação*. São Paulo: EDUSP, 2000. p.143-157.
- MATTILA, T.J. Redox potential as a soil health indicator: how does it compare to microbial activity and soil structure? *Plant Soil.*, p.617-625, 2024.
- MERINO, E.R.; ASSINE, M.L.; PUPIM, F.D.N. Estilos fluviais e evidências de mudanças ambientais na planície do Rio Miranda, Pantanal. *Rev. Bras. Geomorfol.*, v.14, p.127-134, 2013.
- MESSIAS, I.A.M. et al. Monitoramento contínuo do potencial redox e de variáveis complementares em ambiente hipersazonal no Pantanal Norte. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v.37, p.632-639, 2013.
- NUNES DA CUNHA, C.; JUNK, W.J. Year-to-year changes in water level drive the of *Vochysia divergens* in Pantanal glassland. *Appl. Veg. Sci.*, v.7, p.103-110, 2004.
- OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. Classes gerais de solos do Brasil: guia auxiliar para o seu reconhecimento. Jaboticabal: FUNEP, 1992.
- OKSANEN, J. et al. *Vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.0 – 10. Software <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>, 2013.
- OSTERHOLM, P. et al. Can identification and risk assesment of acid sulfate soils be simplified. In: *INTERNATIONAL ACID SULFATE SOIL CONFERENCE ABSTRACT BOOK*, 2023.
- PARENT, C. et al. An overview of plant responses to soil waterlogging. *Plant Stress*. v.2, p.20-27, 2008.
- PADRÃO, M.J.L.M. Reabilitação de solos contaminados com produtos utilizando técnicas agrárias. Porto: Universidade do Porto, 2004.
- RANCOURT, D.G. et al. Hydrous ferric oxide precipitation in the presence of nonmetabolizing bacteria: Constraints on the mechanism of a biotic effect. *Geochimica et Cosmochimica*, v.3, n.69, p.553-577, 2005.
- RISK, D.; KELLMAN, L.; BELTRAMI, H. A new method for in situ soil gas diffusivity measurement and applications in the monitoring of subsurface CO₂ production. *J. Geophys. Res. Biogeosc.*, p.113, 2008.
- SANCHES, L. et al. Estimativa do coeficiente Priestley-Taylor em floresta monodominante cambarazal no pantanal. *Rev. Bras. Meteorol.*, p.25, 2010.
- SOUZA, J.B. Caracterização e gênese de solos em ambientes de cordilheira e campo de inundação periódica da sub-região do Pantanal de Poconé, Mato Grosso. Viçosa: UFV, 2003.
- VEPRASKAS, M.J. et al. Wetland soils: genesis, hydrology, landscapes, and classification. CRC Press, 2000.
- VOURLITIS, G.L. et al. Soil N, P, and C dynamics of upland and seasonally flooded forests of the Brazilian Pantanal. *Global Ecol. Conserv.*, v.12, p.227-240, 2017.
- WACHINGER, G. et al. Variability of soil methane production on the micro-scale: spatial association with hot spots of organic material and Archaeal populations. *Soil Biology Biochem.*, v.8/9, n.32, p.1121-113, 2000.
- ZEILHOFER, P.; MOURA, R.M. Hydrological changes in the Northern Pantanal caused by the Manso dam: impact analysis and suggestions for mitigation. *Ecol. Eng.*, v.35, p.105-117, 2009