



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
CURSO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS

RENNYER HOLANDA SILVA

ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA E QUÍMICA EM RESERVATÓRIO DO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

FORTALEZA

2016

RENNYER HOLANDA SILVA

**ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA E QUÍMICA EM RESERVATÓRIO DO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Ciências Ambientais

Orientadora: Profa. Dra. Sandra Tédde Santaella.

Coorientador: Prof. MSc. Paulo de Freitas Lima.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Rui Simões de Menezes

S583e Silva, Rennyer Holanda.

Estratificação térmica e química em reservatório do Semiárido Brasileiro / Rennyer Holanda Silva – 2016.

61 p. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso Bacharelado em Ciências Ambientais, 2016.

Orientação: Prof^a. Dr^a. Sandra Tédde Santaella.

Co-Orientação: Prof^o. M.e Paulo de Freitas Lima.

1. Terras Semiáridas - Ceará. 2. Clima de regiões áridas. I. Título.

CDD 551.415

RENNYER HOLANDA SILVA

**ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA E QUÍMICA EM RESERVATÓRIO DO SEMIÁRIDO
BRASILEIRO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Ciências Ambientais.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Sandra Tédde Santaella (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Tito Augusto Gehring
Embrapa Agroindústria Tropical (EMBRAPA)

Prof. MSc. Raimundo Bemvindo Gomes
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

A Deus, pela vida, pela força concedida (sem ela eu não chegaria até aqui) e pela oportunidade de poder concluir mais essa etapa. Aos meus pais; à minha irmã Samira pela companhia e apoio; à minha esposa Daniele pelo amor, cumplicidade, incentivo e pelos sonhos compartilhados; ao meu filho Pedro Mariano, por me mostrar o verdadeiro sentido da vida e ser minha fonte de inspiração.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por não me deixar fraquejar e desistir quando essa parecia ser a melhor saída e pela conclusão de mais essa etapa em minha vida.

À minha esposa Daniele e meu filho Pedro Mariano pelo amor, paciência, apoio e convivência.

À minha orientadora Profa. Dra. Sandra Tédde Santaella pela excelente orientação, por dispor de seu tempo tão corrido para ministrar as aulas de metodologia científica, por compartilhar sempre seus melhores conhecimentos com nós alunos e por confiar “lá” em 27 de agosto de 2013 à minha entrada no EQUAL para iniciação científica.

Ao meu Coorientador Prof. MSc. Paulo de Freitas Lima, pelos ensinamentos repassados, pelas dicas e pela disponibilidade em esclarecer as dúvidas sempre que preciso.

Aos meus colegas do Grupo Esteves. André Porfírio, pela disponibilidade e paciência no ensinamento das análises físico-químicas e no esclarecimento das dúvidas. Bruno Diniz, Lucas Guerra e Paulo Ipiranga, pela parceria nas análises, pela convivência amistosa dentro do laboratório e pelos momentos de descontração.

À Rosa Lucena pelo esclarecimento das dúvidas no laboratório, pelo excelente trabalho desempenhado no EQUAL e pela convivência sadia. Aos meus demais colegas de laboratório: Tasso, Alexandre, Juliana, Andreza, Brenda, Patrícia, Daniele e Bruno.

À Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH-CE), pelo apoio técnico e logístico fornecido para as coletas de campo, disponibilização de dados, equipamentos, informações e esclarecimento das dúvidas. Ao Gerente de Desenvolvimento Operacional Walt Disney Paulino e a todos que fazem a gerência regional da COGERH do município de Pentecoste, em especial ao funcionário Henrique pela destreza e segurança desempenhada no seu trabalho e pela convivência bem-humorada.

Ao pesquisador Dr. Renato Carrhá Leitão e a Embrapa pelas parcerias estabelecidas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa.

Aos membros externos da banca, o pesquisador Dr. Tito Augusto Gehring e o Prof. MSc. Raimundo Bemvindo Gomes por aceitarem cordialmente o convite.

À professora Kamila Vieira pela oportunidade de trabalharmos juntos, aprendi muito com a monitoria Economia Ambiental. Aos professores Marcus Vinicius e Eduardo Sávio pela alta qualidade no nível dos conteúdos repassados em sala e pela experiência valorosa compartilhada com nós alunos.

Aos meus colegas da turma de Ciências Ambientais 2012 pela união e convivência bem-humorada.

Ao meu amigo Icaro Breno pela amizade, pela parceria diária nos trabalhos, nas discussões e nos desafios, pelo incentivo e pela ajuda na confecção dos mapas.

Ao meu amigo Willame Cavalcante (Will Nogueira) pela amizade, pela convivência extrovertida dentro e fora do laboratório e pela ajuda na confecção dos gráficos. Aos meus amigos Daniel e Edilson Bieh (cumpade) pela convivência bem-humorada.

À Wesley Leitão pela amizade, pelo esclarecimento das dúvidas com a estatística e pela ajuda na confecção dos gráficos.

Aos meus amigos Marcelo Sales e Marlon Lamartine pela amizade e apoio incondicional sempre.

À Paulo Roberto e Maria Cidrônea (Cida) do Laboratório de Oceanografia Geológica pelos “cafezinhos” e pela boa conversa durante o horário do almoço.

À Eunice Menezes pela paciência, agilidade e atenção dispensada aos estudantes na secretaria do curso de Ciências Ambientais.

Aos demais funcionários do Labomar. Em especial para Wagner, Francisco, “Dona” Célia, “Chico”, Murilo, Nadsa, Berg, Marcos, Márcio e Alcion (Piu-Piu), sem vocês o Labomar não seria o mesmo.

Enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“...Dê serviço ao nosso povo, encha os rios de barragem. Dê comida a preço bão, não esqueça a açudagem. Livre assim nós da ismola, que no fim dessa estiagem lhe pagamo inté os jurus sem gastar nossa coragem...”

(Luiz Gonzaga/Zé Dantas – Vozes da Seca)

RESUMO

A escassez hídrica é um problema observado em todo o mundo, porém em regiões semiáridas ela se torna mais forte por uma série de peculiaridades. No semiárido brasileiro, essa escassez é potencializada pela irregularidade pluviométrica, pelos eventos de estiagem prolongada e pela má gestão no armazenamento e distribuição dos recursos hídricos. No contexto da evolução hídrica do semiárido cearense, as ações e intenções sobre os aspectos quantitativos da disponibilidade da água ainda predominam sobre os requisitos de qualidade. Estudos sobre qualidade da água em reservatórios do semiárido contribuem para orientar o manejo e a elaboração de modelos adequados à condição climática peculiar dessa região. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de alguns fatores climáticos, hidrológicos e morfométricos sobre eventuais processos de mistura e de estratificação térmica e química das massas de água do açude Pereira de Miranda, localizado no município de Pentecoste, Ceará. As variáveis temperatura da água, oxigênio dissolvido, pH e condutividade elétrica foram usadas para avaliar o comportamento e a formação de gradientes térmicos e químicos do perfil vertical do reservatório. A transparência da água foi medida com disco de Secchi para caracterizar e limitar a extensão da zona eufótica. As medições foram realizadas entre 2010 e 2011 em três pontos de amostragem previamente selecionados. As análises das variáveis da água foram feitas em conjunto com dados climáticos (chuva, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento) e hidrológicas (tempo de retenção hidráulica teórico e variação no nível da água). Durante a pesquisa, o açude Pereira de Miranda apresentou gradientes térmicos e químicos pouco acentuados no período chuvoso e condições de mistura completa das massas de água durante a estiagem. A baixa amplitude diária de variação nos valores de temperatura e pH e nas concentrações de oxigênio dissolvido foram indicativos da vulnerabilidade do açude à microestratificações térmicas e químicas no período chuvoso dos dois anos de pesquisa. Os resultados apresentados reforçam a evidência de que as variações climáticas e hidrológicas de regiões semiáridas exercem influência sobre a variação espaço-temporal das variáveis físicas e químicas, como resultado da estruturação de períodos alternados de estratificação e misturas das massas de água.

Palavras-chave: Semiárido brasileiro. Gradientes térmicos e químicos. Perfil vertical.

ABSTRACT

Water scarcity is a problem observed throughout the world, though in semi-arid regions it becomes even stronger for a number of peculiarities. In the Brazilian semi-arid, this shortage is intensified by the rainfall irregularity, by prolonged drought events and by the mismanagement in the storage and distribution of the water resources. In the context of the evolution of water resources management in the semi-arid regions of Ceará, the actions and intentions on quantitative aspects of water availability still predominate over water quality requirements. Studies on water quality on reservoirs of semi-arid regions contribute to guide the management and development of models that are suitable for the peculiar climatic conditions of this region. Thus, the objective of this study was to evaluate the influence of some climatic, hydrological and morphometric factors on thermal and chemical stratification and other mixing processes of the weir Pereira de Miranda, located at the city of Pentecoste, Ceará state. For such, variables of water temperature, dissolved oxygen, pH and electrical conductivity were used in order to evaluate the behavior and the formation of thermal and chemical gradients on the vertical profile of the reservoir. The water transparency was measured with a Secchi Disk to characterize and limit the extent of the photic zone. These measurements were done between 2010 and 2011 in three previously selected sampling points. The analyses of the water variables were done together with climatic (rainfall rates, air temperature, relative humidity and wind speed) and hydrological data (theoretical time of hydraulic retention and variations on water levels). During the research, the Miranda Pereira weir presented thermal and chemical gradients slightly detached in the rainy season and in complete mixed conditions during the dry season. The variation range on a daily basis presented low values of temperature, pH and dissolved oxygen concentrations; being indicative of the weir's vulnerability for thermal and chemical micro- stratification during the rainy season of the two years of research. The results presented reinforce the evidence that climatic and hydrological variations in semi-arid regions have influence over the spatial-temporal variation of physical and chemical variables, as a result of the structuring of alternating periods of stratification and mixtures of water masses.

Keywords: Brazilian semi-arid region. Thermal and chemical gradients. Vertical profile.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 – Reservatório Pereira de Miranda.....	25
Figura 2 – Localização do açude Pereira de Miranda e definição das estações de coleta.....	27
Figura 3 – Variação do volume médio mensal, do regime de precipitação mensal e do tempo de residência teórico do açude Pereira de Miranda, durante 2010 e 2011. Média da precipitação mensal histórica (1974-2013).....	30
Figura 4 – Variação da temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento na área de influência do açude Pereira de Miranda, durante 2010 e 2011	32
Figura 5 – Variação da transparência (DS) e da zona eufótica (Zeu) da água no ponto 1 do açude Pereira de Miranda, durante os anos de 2010 e 2011	35
Figura 6 – Variação da transparência (DS) e da zona eufótica (Zeu) da água no ponto 2 do açude Pereira de Miranda, durante os anos de 2010 e 2011	36
Figura 7 – Variação da transparência (DS) e da zona eufótica (Zeu) da água no ponto 3 do açude Pereira de Miranda, durante os anos de 2010 e 2011	37
Figura 8 – Perfis verticais de temperatura da água, OD e pH do ponto 1/março (a), ponto 2/maio (b) e ponto 3/março (c), em 2010	39
Figura 9 – Perfis verticais de temperatura da água, OD e pH dos pontos 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do mês de maio, em 2011	42
Tabela 1 – Tratamento estatístico aplicado aos dados obtidos na pesquisa.....	28
Tabela 2 – Estatística descritiva das variáveis físicas e químicas amostradas em três estações de coleta no açude Pereira de Miranda, durante os anos de 2010 e 2011.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

NH ₄ ⁺	Amônia
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CV	Coefficiente de Variação
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CE	Condutividade Elétrica
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DP	Desvio Padrão
DS	Transparência da Água
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia
°C	Graus Celsius
IC	Índice de Confiança
IET	Índice de Estado Trófico
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
NO ₃ ⁻	Nitrato
NO ₂ ⁻	Nitrito
OD	Oxigênio Dissolvido
%	Porcentagem
pH	Potencial Hidrogeniônico
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
VCAS	Vórtice Ciclônico de Ar Superior
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Localização e caracterização da área de estudo.....	24
4.2 Variáveis e métodos de coleta.....	26
4.3 Análise estatística dos dados.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Variáveis climáticas e hidrológicas.....	29
5.2 Variáveis físicas e químicas	33
6. CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	46
ANEXOS	54

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural importante, responsável pela manutenção da vida na Terra. O equilíbrio dos ecossistemas, a regulação do clima, a preservação da biodiversidade, a sobrevivência do homem e de outras formas de vida e até valores culturais dependem integralmente deste recurso finito. Por ser um recurso esgotável, é necessário que seu uso seja feito de forma controlada e sustentável (PAZ; TEODORO; MENDONÇA, 2000).

Porém, o crescimento das cidades e o desenvolvimento de atividades econômicas de cunho industrial e agropecuário aumentou exponencialmente a demanda por recursos hídricos e contribuiu para a degradação da qualidade dos ecossistemas aquáticos mundiais pela exposição a poluentes que causam o desequilíbrio do sistema natural (MORAES; JORDÃO, 2002).

Em regiões semiáridas, como o nordeste brasileiro, a escassez de água é potencializada pela irregularidade pluviométrica, pelos eventos de estiagem prolongada e pela má gestão no armazenamento e distribuição dos recursos hídricos. O clima tropical semiárido é caracterizado por taxas de evaporação elevadas, baixa umidade relativa do ar e volume de chuvas pequeno e aleatório (AYOADE, 2010). Essa inconstância climática associada às pressões populacionais torna o semiárido um ambiente tipicamente frágil (LANDIM; SILVA; ALMEIDA, 2011).

Há mais de cem anos a construção de açudes no semiárido nordestino brasileiro tem sido a principal resposta à incidência constante de estiagens que castigam essa região (HOLANDA, 2013). As primeiras obras de açudagem tinham como finalidades principais o abastecimento humano, a dessedentação de animais, a regularização da vazão e controle das cheias de rios e a irrigação local. Atualmente, o objetivo principal dos açudes, bem como dos canais e adutoras que transportam a água neles armazenada, é o abastecimento das grandes cidades, dos parques industriais e dos complexos portuários.

Nesse sentido, os reservatórios são ecossistemas importantes que desempenham vários serviços ambientais para o homem (DÖRNBÖFER; OPPLET, 2016). No estado do Ceará, 93% da água ofertada aos usuários vêm dos açudes e, assim como no resto do semiárido brasileiro, o conflito pela água é realidade (ARAÚJO, 2003). No entanto, tão importante quanto ter água em quantidade, para usos múltiplos, é certificar-se de sua qualidade para garantir o melhor uso e orientar o manejo desses reservatórios.

A qualidade da água dos reservatórios do semiárido nordestino, além de sofrer o impacto natural da distribuição irregular de chuvas, típica da região, e das variações de

temperatura provocadas pelas mudanças climáticas globais, é influenciada pelas diversas atividades antrópicas desenvolvidas na sua bacia hidrográfica de influência. O processo de urbanização acelerada, a agricultura, a pecuária e a piscicultura intensiva são algumas das atividades que expõem os reservatórios a cargas poluentes elevadas (ARAÚJO *et al.*, 2008; BEZERRA *et al.*, 2014).

Além dessas atividades, Von Sperling (2005) considera as ligações clandestinas de esgotos domésticos e industriais como uma das principais causas da poluição dos recursos hídricos em geral por introduzirem matéria orgânica e organismos patogênicos no meio aquático.

Para entender o funcionamento dos reservatórios é importante compreender os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nesses sistemas (VIEIRA *et al.*, 2009). Os ciclos de mistura e estratificação são processos importantes para compreender a circulação de substâncias e as variações térmicas e químicas no perfil vertical da coluna d'água bem como suas influências na qualidade da água.

A despeito da complexidade de se avaliar a qualidade da água de um reservatório, devido à grande quantidade de variáveis que a influencia, a análise da mistura e da variabilidade térmica da coluna d'água é um aspecto essencial na quantificação dos processos físicos associados diretamente à qualidade de água, tais como a estratificação de densidades/temperatura (LEMOS, 2011).

Em reservatórios, a estratificação da densidade é causada, principalmente, pela temperatura (estratificação térmica). Porém, diferenças de densidade resultantes de variações nas concentrações de sólidos dissolvidos e suspensos também podem ser importantes. Assim, esta estratificação implica em uma mistura vertical incompleta, dividindo o reservatório em compartimentos distintos, alterando a qualidade da água (FORD; JOHNSON, 1986). Além do mais, as mudanças de temperatura na água afetam as funções ecossistêmicas dos lagos, que podem resultar em mudanças na composição de espécies e na concentração de oxigênio (WILLIAMSON *et al.*, 2009).

Nhiwatiwa e Marshall (2006) consideram a estratificação de um lago como sendo o fator mais importante na regulação de processos biológicos, uma vez que cria diferenças de densidade e influencia a mistura vertical e a distribuição de organismos, de substâncias químicas, de íons e de partículas. As estratificações térmica e química, além de outras consequências, podem alterar a distribuição de assembleias de fitoplâncton no perfil vertical da coluna d'água de reservatórios (BECKER *et al.*, 2008).

Alguns lagos podem desenvolver padrões de mistura e estratificação que não são originados das variações sazonais na radiação solar, típica do semiárido nordestino, mas por fatores hidrológicos ou ventos sazonais que desestabilizam os reservatórios anualmente (FREITAS, 1999; HAMILTON; LEWIS, 1990; LEWIS, 1996).

Em reservatórios de regiões tropicais é mais comum a ocorrência de estratificação e desestratificação térmica diária (ESTEVES, 2011; TUNDISI; TUNDISI, 2008). Para Barbosa e Tundisi (1980) a principal hipótese que explica essa condição é o resfriamento do ar nos períodos noturnos e a forte incidência solar durante o dia.

Nesse sentido, nos reservatórios artificiais do semiárido brasileiro, os processos de mistura e estratificação são acrescidos de particularidades definidas pelo regime climático (FILHO; MARTINS; PORTO, 2006). As mudanças hidrológicas entre épocas de seca e chuva, a amplitude térmica diária e a ação do vento alteram constantemente a dinâmica dos reservatórios, com a definição de diferentes gradientes térmicos e químicos no perfil vertical, que conduzem a processos alternados de mistura e estratificação das massas d'água e mudanças na sua sazonalidade (BARBOSA *et al.*, 2012).

Tendo em vista que açudes localizados em regiões sob o regime de sucessivas secas são imprescindíveis para a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico local, estudos limnológicos nessas regiões são importantes para identificar atividades que alteram a qualidade da água e a vida aquática de reservatórios.

Além disso, estudos dessa natureza contribuem para orientar o manejo e a elaboração de modelos adequados à condição climática peculiar da região semiárida. Ambientes aquáticos dessa região do Brasil incorporam aspectos mais amplos dentro da escala de bacia hidrográfica como clima, geomorfologia, vegetação e uso e ocupação da terra (BARBOSA *et al.*, 2012), que devem ser levados em consideração na gestão e controle desses reservatórios (CHELLAPPA *et al.*, 2009).

Esta pesquisa faz parte de um projeto mais amplo, iniciado em 2009, estruturado em dois eixos principais: (1) amostragem mensal de água na superfície e fundo, em cinco estações de coleta, para determinação de variáveis físicas e químicas, assim como para identificação e contagem de fitoplâncton e de zooplâncton; e (2) amostragem trimestral, em escala nictemeral, para determinação de variáveis físicas, químicas e biológicas, além da determinação da produtividade primária. Este trabalho é referente ao primeiro eixo da pesquisa.

A partir destas considerações, a avaliação espaço-temporal dos dados será realizada sob a hipótese de que uma pequena variação, térmica ou química, no perfil vertical, será suficiente para promover estratificações e desestratificações diárias na coluna d'água.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência de alguns fatores climáticos, hidrológicos e morfométricos sobre os processos de mistura das massas de água do açude Pereira de Miranda.

2.2 Objetivos específicos

- Correlacionar as variações nos dados de oxigênio dissolvido (OD), temperatura da água, potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE) no perfil vertical dos pontos amostrados no açude Pereira de Miranda.
- Identificar termoclinas e delimitar os possíveis compartimentos verticais da coluna de água.
- Analisar a capacidade de estratificação térmica e química com a profundidade dos pontos de amostragem (três estações de amostragem) e a variação espaço-temporal com variações na profundidade.
- Verificar a ação do vento e da redução do nível da água na mistura das massas de água.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Reservatórios e lagos estratificados normalmente possuem três tipos de camadas: epilímnio, metalímnio e hipolímnio. A primeira refere-se à camada superficial que sofre ação direta da radiação solar e do vento, possuindo certa turbulência. O metalímnio é a camada intermediária entre a superfície e o fundo do reservatório. E, o hipolímnio é a camada de água inferior, fria e densa (WETZEL, 1983).

Na medida em que se aumenta a profundidade ocorre diminuição da temperatura e aumento da densidade das camadas de água. Birge (1987) denominou de termoclina a região na qual a temperatura cai pelo menos 1°C a cada metro no metalímnio (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Wetzel (1983) denominou de termoclina a camada intermediária marcada por grande descontinuidade na temperatura. A temperatura da água é um indicador que, em geral, está ligado ao calor e aos fluxos de energia que regulam a estratificação térmica (POLITI; CUTLER; ROWAN, 2012).

A estratificação térmica é uma condição limnológica importante que influencia a qualidade da água de lagos e reservatórios e ocorre quando compartimentos diferentes desses sistemas aquáticos atuam como corpos de densidades diferentes, flutuando um sobre o outro. Esta situação é causada, normalmente, pelo efeito de gradientes térmicos sobre as diferenças nas densidades entre os compartimentos, que podem resultar em diferenças na concentração de substâncias em solução, distribuídas no perfil vertical da coluna de água (BARTRAM; BALLANCE, 1996).

Os principais fatores que atuam na formação da estratificação térmica em reservatórios são: radiação solar, transferência de calor na interface ar/água, direção e energia cinética das entradas e saídas de água e direção e força do vento (FORD; JOHNSON, 1986; TUNDISI; TUNDISI, 2008). Ao atingir a superfície de lagos e reservatórios a radiação solar é transmitida em forma de calor, gerando camadas ou estratos de diferentes temperaturas e, conseqüentemente, de diferentes densidades (ALCÂNTRA *et al.*, 2010).

A estratificação térmica afeta de forma direta os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem nos lagos, incluindo a produção primária e secundária, o balanço de nutrientes, a depleção de oxigênio e a distribuição e migração de organismos na coluna de água (MAZUMDER; TAYLOR, 1994). Este comportamento foi confirmado por Santos *et al.* (2015) em estudo realizado em um reservatório urbano na cidade de São Paulo. Investigando a influência dos padrões de estratificação térmica e os processos hidrodinâmicos, os autores chegaram à conclusão que os dois eventos de estratificação térmica e o abaixamento da

termoclina ocorridos durante o período da pesquisa acarretaram alterações na distribuição vertical de substâncias e de várias espécies de fitoplâncton.

Dantas, Bittencourt-Oliveira e Moura (2010), estudando o comportamento espacial e temporal dos morfotipos reto e espirilado de *C. raciborskii* no reservatório Mundaú, semiárido de Pernambuco, notaram que não houve diferença na densidade dos morfotipos entre os dois períodos sazonais amostrais (seco-janeiro 2005; chuvoso-junho 2005). No entanto, o sucesso ecológico do morfotipo espirilado foi atribuído à estratificação térmica, enquanto as condições de mistura foram determinantes no sucesso do morfotipo reto.

A quebra da estratificação térmica ocorre, principalmente, pelas correntes aquáticas formadas pelas afluências, juntamente com as vazões de saída, transferência de energia pelo vento, alterações da pressão atmosférica, gradientes horizontais de densidade e pela força de Coriolis (MARTIN; McCUTCHEON, 1998; WETZEL, 1983). O vento é o principal mecanismo externo capaz de misturar camadas ou estratos de diferentes temperaturas e densidades (FERREIRA; CUNHA, 2013).

A estratificação química, resultante de variações nas concentrações de oxigênio e de sólidos dissolvidos e suspensos, é um processo semelhante e geralmente desencadeado pela estratificação térmica (ESTEVES, 2011). Quando bem estabelecida, pode ser vista mais comumente em lagos meromíticos, ou seja, onde a circulação não alcança toda a coluna d'água (SIBERT; KORETSKY; WYMAN, 2015). Nesses lagos, o mixolímnio é influenciado diretamente por mudanças sazonais e, após o hipolímnio, é possível observar uma quimioclina bem definida e, mais abaixo, o monimolímnio (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Segundo Tundisi e Tundisi (2008) o monimolímnio é uma camada permanentemente sem circulação.

Estudando as características limnológicas de dois lagos meromíticos na Rússia, Degermendzhy *et al.* (2010) observaram que o lago Shunet, com profundidade média de cinco metros, quando estratificado termicamente no verão, criava um habitat diferente para as espécies. Assim, a distribuição de fitoplâncton e zooplâncton não era uniforme, com rotíferos e copépodes habitando o epilímnio, além de possuir quimioclina habitada por comunidade bacteriana heterotrófica.

Para Bartram e Ballance (1996), eventos sucessivos de estratificação térmica favorecem a ocorrência da estratificação química, principalmente na distribuição das concentrações de oxigênio no perfil vertical da coluna de água. Esteves (2011) e Ramirez (1996) corroboram essa hipótese ao defenderem que em lagos, perfis clinogradados de oxigênio são formados frequentemente quando ocorrem estratificações térmicas.

Este comportamento foi observado por Barbosa, Barbosa e Bicudo (2012) ao

avaliarem a estratificação química e os padrões de limitação por luz e nutrientes, de dois lagos naturais (lago Dom Helvécio e lago Carioca) no sudeste do Brasil entre janeiro de 2002 e dezembro de 2006. Os resultados indicaram que o longo período de estratificação térmica favoreceu a ocorrência de estratificação química nos dois lagos. Porém, o lago Dom Helvécio, mais profundo (39,2 m), oligotrófico e de característica dendrítica, não apresentou mistura completa durante o período de circulação anual, sugerindo leve meromixia e estabilidade química no hipolímnio. Por outro lado, no lago Carioca, mais raso (11,8 m) e com a superfície rica em nutrientes, observou-se elevada atenuação de luz e alta disponibilidade das formas nitrogenadas e fosfatadas em toda a coluna d'água, mesmo durante a estratificação.

Condições meteorológicas e mudanças climáticas, têm influência direta na dinâmica de reservatórios, pois as alterações na temperatura da água podem, a longo prazo, modificar a duração da mistura vertical, dos eventos de estratificação e a profundidade da termoclina (ADRIAN *et al.*, 2009). O epilímnio é a região dos lagos mais afetada pelas mudanças climáticas, pois recebe ação direta da atmosfera que está acima da lâmina d'água, por variações de velocidade do vento e da incidência da radiação solar (ADRIAN *et al.*, 2009).

Ecossistemas aquáticos continentais de regiões mais quentes do planeta possuem particularidades na dinâmica dos processos físicos de estratificação e mistura vertical, se comparados com os reservatórios das regiões temperadas (ESTEVES, 2011). Barbosa (1981 *apud* FILHO, MARTINS e PORTO, 2006) afirma que a importância do padrão de variação sazonal, típico de lagos temperados, é menor em regiões tropicais quando comparada às variações diárias.

Segundo Esteves (2011), em lagos de regiões tropicais é mais comum a ocorrência de estratificação e desestratificação diária ou estratificação durante a primavera, verão e outono com desestratificação no inverno. Nos eventos diários de estratificação, o lago se mantém termicamente estável durante boa parte do dia e, à noite ocorre a desestratificação, devido à perda de calor para a atmosfera. Esta conduta é típica das características polimíticas dos reservatórios do semiárido brasileiro (FILHO; MARTINS; PORTO, 2006). Estas características associadas à profundidade reduzida dos lagos tropicais têm como resultado uma diferença pequena de temperatura entre o epilímnio e o hipolímnio, que são importantes para compreender a dinâmica do meio (ESTEVES, 2011; TUNDISI; TUNDISI, 2008).

Em reservatórios do nordeste brasileiro é comum a presença de microestratificações mesmo quando a variação térmica é pequena. Lucca, Albuquerque e Rocha (2008), entre abril e novembro de 1999, ao caracterizarem limnologicamente o lago Caçó (tropical raso), estado do Maranhão, constataram microestratificações térmicas e químicas (pH e oxigênio dissolvido)

em pontos da região limnética do lago, mesmo quando a amplitude térmica registrada era pequena. O Índice de Estado Trófico (IET) de Carlson (1977) modificado por Toledo-Jr. *et al.* (1993) para reservatórios e lagos tropicais foi aplicado na pesquisa, classificando o lago como oligotrófico.

Vieira, Cardoso e Costa (2015) observaram comportamento semelhante no açude Armando Ribeiro, Rio Grande do Norte. Amostragens realizadas entre 2009 e 2011 em dois pontos da barragem, que têm profundidade média de 12,3 m, mostraram que, oxigênio dissolvido, pH e temperatura da água do açude apresentaram diferenças significativas entre a zona eufótica e a afótica. Além disso, a variação vertical do oxigênio dissolvido e da temperatura da água indicou perfil microestratificado.

Os estudos sobre variações nictemerais de Medeiros *et al.* (2006) no açude Bodocongó (Paraíba) durante o período seco (novembro de 2003), mostraram tendência de variação, entre período diurno e período noturno, de temperatura da água, condutividade elétrica, pH e oxigênio dissolvido. A análise dos dados da única estação de coleta com cinco metros de profundidade mostrou que, mesmo com a baixa amplitude térmica de 1,4°C entre a superfície (um metro) e a última profundidade (cinco metros), foram observados vestígios de estratificação no metalímnio da coluna de água durante o turno da manhã e no início da tarde. Além disso, observaram tendência para níveis mais baixos de oxigênio no fundo, sugerindo estratificação química no açude.

É importante ressaltar que além dos processos de estratificação, a antropização da bacia de drenagem, a piscicultura intensiva, o despejo de esgoto não tratado e a lixiviação de produtos químicos nos reservatórios do semiárido do Nordeste brasileiro alteram a qualidade das águas. Essas ações acarretam problemas como a eutrofização e o assoreamento.

Somado a isso, a irregularidade pluviométrica desta região contribui para agravar este quadro. Além da redução do volume dos reservatórios, a estiagem prolongada contribui para a degradação da qualidade da água, pois há aumento da biomassa algal e da turbidez (BRAGA *et al.*, 2015).

Em 2002, o açude Pereira de Miranda foi eleito o “reservatório piloto” durante a implantação do programa de monitoramento de qualidade de água realizado através do convênio COGERH/SEMACE no qual foi submetido a um estudo mais detalhado. Entre outras questões, foi avaliada a contribuição dos nutrientes advindos das águas afluentes e a influência da carga dos nutrientes oriundos dos principais tributários, principalmente durante o período chuvoso quando afluem com maior vazão, na deterioração da qualidade da água (COGERH, 2002).

Entre março e dezembro de 2002, Amancio, Farias e Neto (2005) realizaram monitoramento das concentrações de nutrientes do açude Pereira de Miranda que, na época, apresentava profundidade média de 7,2 m. Os autores concluíram que as estações de coleta localizadas na desembocadura dos rios Canindé e Capitão Mor foram afetadas pela precipitação e que o carreamento constante de matéria orgânica pelos tributários, seguido de decomposição, provocou aumento de amônia total (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) e nitratos (NO_3^-). Além disso, o processo de decomposição ocasionou a liberação de quantidades de nitrito diretamente proporcionais às de nitrogênio e fósforo.

Em pesquisa realizada entre dezembro de 2009 e abril de 2010 no açude Pereira de Miranda, Lemos (2011) detectou que o reservatório estava estratificado em períodos mais ou menos constantes. A perfilagem de um único ponto, próximo à barragem do reservatório, zona de maior profundidade, mostrou padrão de mistura e estratificação ao longo do dia, que pode ser explicado pelo aquecimento do epilímnio durante as horas de influência da luz solar e por poucos ventos nas primeiras horas do dia, e desestratificação à noite, ocasionada pela perda de calor para atmosfera.

A estratificação térmica influenciou variáveis como pH e salinidade. Os resultados mostraram também a relação evidente entre oxigênio dissolvido e temperatura da água, ressaltando que a estratificação química pode ter sido favorecida pela estratificação térmica. Finalmente, o autor observou que as camadas estratificadas permaneceram estáveis, com um processo forte e resistente à mistura.

França *et al.* (2013), entre abril e setembro de 2012 (período seco), avaliaram a qualidade da água do açude Pereira de Miranda a partir de dados limnológicos amostrados no mesmo ponto representativo, com 14 m de profundidade na época, encontrando resultados semelhantes. Os autores verificaram que os processos de estratificação e desestratificação predominaram ao longo de 2012 para todas as variáveis analisadas (temperatura, pH, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido). Constataram também que ocorreu estratificação química nos mesmos períodos que ocorreu estratificação térmica. Além disso, a aplicação do IET de Carlson modificado por Toledo *et al.* (1984) indicou que a eutrofia do reservatório permaneceu durante todo o ano de 2012, e que a aceleração desse processo intensificou a estratificação e a desestratificação nos perfis verticais da coluna de água.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada no açude Pereira de Miranda, inserido na bacia hidrográfica do rio Curu, na mesorregião Norte do Estado do Ceará, semiárido nordestino.

A bacia do rio Curu possui uma área de drenagem de 8.534 km² que corresponde a aproximadamente 6% do território cearense, abrangendo os municípios de Apuiarés, Canindé, Caridade, General Sampaio, Irauçuba, Itapajé, Itatira, Paracuru, Paraipaba, Paramoti, Pentecoste, São Gonçalo do Amarante, São Luís do Curu, Tejuçuoca e Umirim. Essa bacia é composta por 13 açudes públicos gerenciados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), sendo o açude Pereira de Miranda, também conhecido como açude Pentecoste, o que possui a maior capacidade de armazenamento hídrico (COGERH, 2016; DNOCS, 2016).

O açude Pereira de Miranda (Figura 1) está localizado no município de Pentecoste que pertence à microrregião do médio Curu. A bacia hidrográfica desse açude, que representa 2% do território cearense, abrange também os municípios de Apuiarés, Canindé, Caridade e Paramoti (IBGE, 2016) e drena uma área de 2.840 km². Sua recarga ocorre, principalmente, pelos rios Canindé e Capitão Mor e supre grande parte da demanda hídrica dessa região. O volume hídrico potencial do açude Pereira de Miranda é 360.000.000 m³, profundidade média de 7,2 m e sua bacia hidráulica ocupa uma área inundável de 5.700 ha (ARAÚJO, 1990).

O reservatório foi projetado e construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), entre os anos de 1950 e 1957, com a finalidade de controlar as cheias do rio Canindé e regularizar a vazão do rio Curu. A partir de sua construção foi possível desenvolver a irrigação das terras a montante e a jusante da barragem, a geração de energia elétrica e a piscicultura (MACEDO, 1977).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (1928), o clima da região é do tipo BSw'h, ou seja, semiárido, seco e quente com chuvas no verão e outono. O IPECE (2014) classifica o clima do município de Pentecoste como sendo, predominantemente, tropical quente semi-árido e tropical quente sub-úmido. A precipitação média anual é de 817,7 mm, distribuída nos meses de janeiro a abril, com temperaturas variando entre 26 °C e 28 °C (FUNCEME, 2016).

Figura 1 – Reservatório Pereira de Miranda.



Fonte: Próprio autor.

Nessa região predominam solos rasos e pedregosos, associados aos afloramentos de rochas e com alta erodibilidade natural, classificados como neossolos, argissolos e luvisolos (CPRM, 2014). São solos pouco evoluídos, constituídos por frações minerais, com pouca matéria orgânica, não hidromórficos e com argilas de alta ou baixa atividade (EMBRAPA, 2013).

A geologia do local é marcada por rochas do embasamento cristalino, com destaque para as depressões sertanejas. Existem também formações de rochas sedimentares como os tabuleiros pré-litorâneos e as planícies fluviais. A vegetação que circunda a área de influência do Pereira de Miranda é dominada pela caatinga arbustiva densa (IPECE, 2015).

A economia do município de Pentecoste baseia-se na agropecuária, nos projetos de irrigação, no comércio e na indústria de calçados. Todas essas atividades dependem direta ou indiretamente do abastecimento de água oriundo do açude Pereira de Miranda. Vale ressaltar que o município possui um dos maiores centros de pesquisa em aquicultura da América do Sul, coordenado pelo DNOCS (IBGE, 2016).

4.2 Variáveis e métodos de coleta

As variáveis selecionadas para o desenvolvimento da pesquisa foram: oxigênio dissolvido, temperatura da água, potencial hidrogeniônico e condutividade elétrica. Além dessas, dados de transparência da água foram utilizados tendo em vista sua relação com a profundidade da radiação subaquática e, portanto, com a temperatura.

A amostragem das variáveis foi realizada entre os anos de 2010 e 2011 em três pontos do reservatório: P 1- região mais profunda (próximo à barragem); P 2- região intermediária entre o rio afluyente Canindé e a barragem; e P 3- região intermediária entre o rio afluyente Capitão Mor e a barragem (Figura 2).

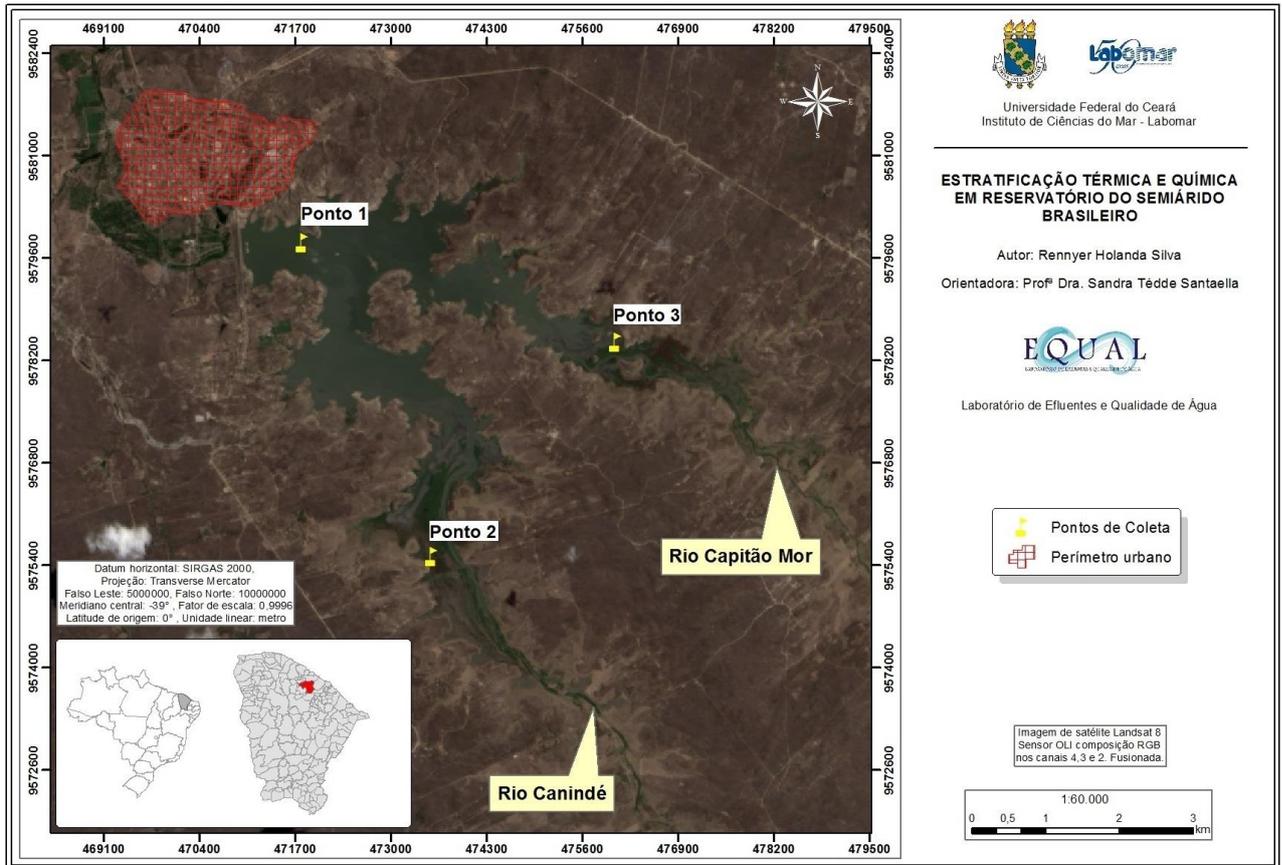
Os dados de temperatura da água, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e pH foram obtidos no perfil vertical da coluna d'água com sonda multiparamétrica modelo YSI 6600 V2. Em cada estação, a sonda percorreu toda a coluna d'água a partir dos primeiros 0,30 m com as profundidades: 0,30 m; 0,50 m; 0,70 m; 1,0 m; 1,3 m; 1,5 m; 1,7 m; 2,0 m; 2,3 m; 2,5 m e, assim, sucessivamente, até o fundo do açude, obtendo o valor de cada variável simultaneamente. As coletas foram realizadas entre 09:00 e 15:00 h.

Dados de transparência da água foram coletados *in situ* com disco de Secchi. A zona eufótica foi estimada através da multiplicação do valor da transparência da água encontrada em cada ponto por 2,7. A profundidade de cada ponto foi determinada com um profundímetro portátil *Speedtech Instruments*.

Os dados de temperatura do ar (°C), velocidade do vento (m/s) e umidade relativa (%) da área de influência do açude Pereira de Miranda nos anos de 2010 e 2011 foram obtidos através da estação meteorológica da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), que fica localizada próximo a parede do reservatório.

Os equipamentos utilizados neste trabalho (barco, sonda multiparamétrica e profundímetro), bem como o apoio técnico e logístico, foi fornecido pela gerência regional da COGERH com sede no município de Pentecoste.

Figura 2 – Localização do açude Pereira de Miranda e definição das estações de coleta.



Fonte: Próprio autor.

4.3 Análise estatística dos dados

Para compreender a influência das variáveis físicas e químicas, nos processos potenciais de estratificação térmica e química e mistura das massas de água do açude Pereira de Miranda, foi dado tratamento estatístico aos dados (Tabela 1).

Tabela 1 – Tratamento estatístico aplicado aos dados obtidos na pesquisa.

Tipo	Programas estatísticos e <i>software</i>
Tabulação dos dados e construção de tabelas e gráficos	<i>Microsoft Excel 2013</i>
Estatística descritiva (medidas de tendência central e dispersão)	<i>SigmaPlot 11.0</i>
Gráficos da evolução temporal de variáveis climáticas e hidrológicas dos anos de 2010 e 2011, profundidade do disco de Secchi e estimativa da extensão da zona eufótica	<i>Microsoft Excel 2013</i>
Gráficos do gradiente vertical de OD, temperatura e pH para cada ponto de coleta	<i>Origin 9.1</i>
Comparação entre médias de temperatura entre profundidades para os três pontos de amostragem (Análise de Variância - ANOVA)	SPSS 17.0
Identificação de possíveis eventos de estratificação térmica no reservatório	SPSS 17.0

Fonte: Próprio autor.

O teste estatístico ANOVA foi aplicado para verificação de diferenças significativas entre as médias diárias de temperatura obtidas em duas faixas da zona eufótica (para os valores de temperatura medidos entre a superfície e a profundidade do disco de Secchi e entre esta e o limite inferior da zona eufótica) e na faixa correspondente à zona afótica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variáveis climáticas e hidrológicas

As características climáticas da região semiárida do Nordeste brasileiro são marcadas por período chuvoso curto, concentrado nos meses de março, abril e maio, quando a temperatura atinge os menores valores, a pressão atmosférica diminui e a confluência de ventos alcança posição mais ao sul (POLZIN; HASTENRATH, 2014). No estado do Ceará, o período de chuvas abrange os meses de fevereiro, março, abril e maio, sendo os meses de março e abril geralmente os mais chuvosos, representando a quadra chuvosa do Estado (FUNCEME, 2016).

Os três principais sistemas atmosféricos responsáveis pela ocorrência de chuvas no Ceará são: frentes frias, vórtice ciclônico de ar superior (VCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), considerada principal indutora de chuvas no Estado, atuando, principalmente, durante a quadra chuvosa (FUNCEME, 2016; SILVA; ESTEVÃO; BRITO, 2012). Porém, fenômenos como o *El Niño*, causado pelo aquecimento anormal das águas do oceano pacífico equatorial, contribuem para a diminuição de chuvas no estado do Ceará e, consequentemente, para a redução do volume dos reservatórios (FUNCEME, 2016).

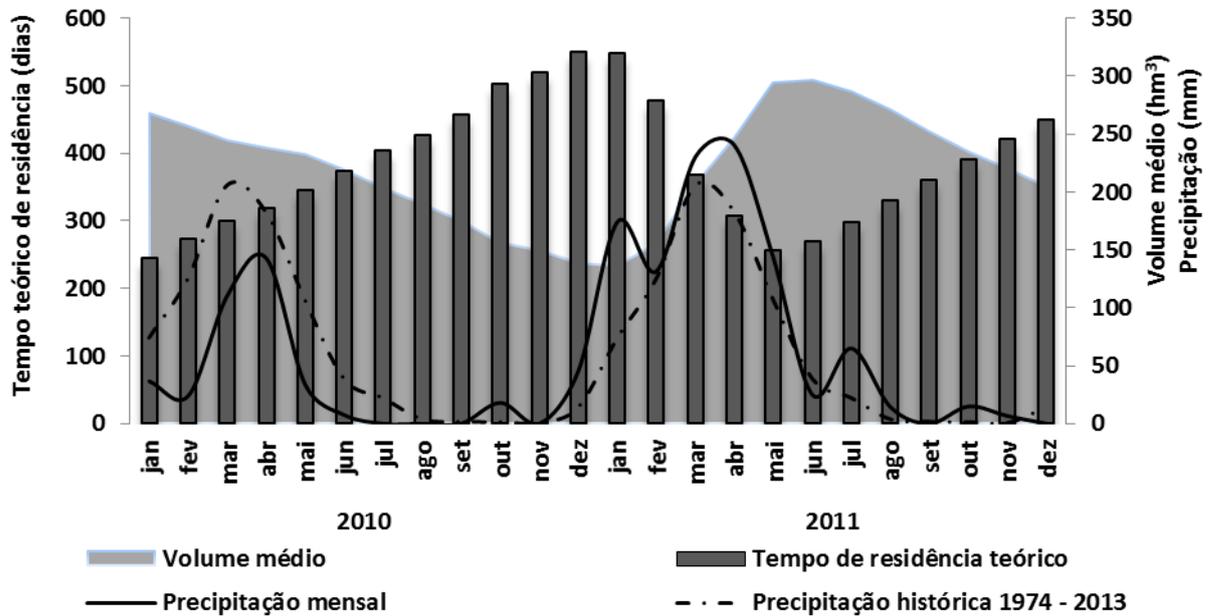
A peculiaridade da distribuição irregular de chuvas, típica do semiárido brasileiro, foi observada na bacia hidrográfica do açude Pereira de Miranda durante o estudo. Em 2010, a precipitação foi muito inferior à média histórica considerada (1974 a 2013), seguido por um ano considerado chuvoso, quando a precipitação na bacia superou a média histórica anual (Figura 3).

Em 2010, as maiores precipitações foram observadas em março e abril, enquanto em 2011 as chuvas se concentraram entre janeiro e maio. Devido a essa variação interanual, as baixas precipitações em 2010 fizeram o volume médio do açude diminuir de 272 hm³ (janeiro) para 133 hm³ (dezembro). Em contrapartida, o regime de chuvas acima da média registrado em 2011 elevou o volume do açude de 157 hm³ (janeiro) para 226 hm³ (dezembro).

A estabilidade dos reservatórios está diretamente ligada à variação do seu volume. Em períodos de estiagem, a diminuição do volume torna o reservatório mais susceptível ao processo de mistura e instabilidade, pois fatores como o vento atuam mais facilmente em uma coluna d'água rasa (FREIRE; CALIJURI; SANTAELLA, 2009). Por outro lado, o aumento do volume torna o sistema mais estável e mais resistente à mistura. Reservatórios com maior coluna d'água tendem à estabilidade, pois são mais resistentes à ação do vento e da chuva,

favorecendo, inclusive, os processos de estratificação térmica e química (ESTEVES, 2011).

Figura 3 – Variação do volume médio mensal, do regime de precipitação mensal e do tempo de residência teórico do açude Pereira de Miranda, durante 2010 e 2011. Média da precipitação mensal histórica (1974-2013).



Fonte: Próprio autor.

O tempo de residência teórico ou tempo de retenção hidráulica é o tempo necessário para a substituição de toda a água do reservatório (TUNDISI; TUNDISI, 2008). No caso do açude Pereira de Miranda, esse tempo aumentou linearmente durante o ano de 2010 (de 262 a 573 dias entre janeiro e dezembro), inversamente proporcional ao volume do reservatório. Em 2011 esse tempo decaiu de 570 a 260 dias entre janeiro e maio (período de maior precipitação), voltando a aumentar linearmente de junho até dezembro (de 265 a 460 dias), mantendo relação inversamente proporcional com o volume do reservatório.

O tempo de retenção hidráulica elevado pode contribuir para o aumento da transparência da água, pois favorece a sedimentação de partículas suspensas (LIMA, 2011). Dessa forma, maior transparência da água favorece a penetração de luz na coluna de água influenciando a profundidade da radiação subaquática e, portanto, a temperatura (ESTEVES, 2011; TUNDISI; TUNDISI, 2008).

Por outro lado, além da influência direta das variáveis climáticas, o tempo de retenção hidráulica é fortemente influenciado pelos cursos de água que desembocam no reservatório. A afluência hídrica ao reservatório modifica padrões de circulação internos e altera padrões de mistura (LEMONS, 2011). Segundo Lewis (2000), a sazonalidade de um reservatório é

influenciada diretamente pelo ciclo hidrológico do rio ao qual ele está ligado.

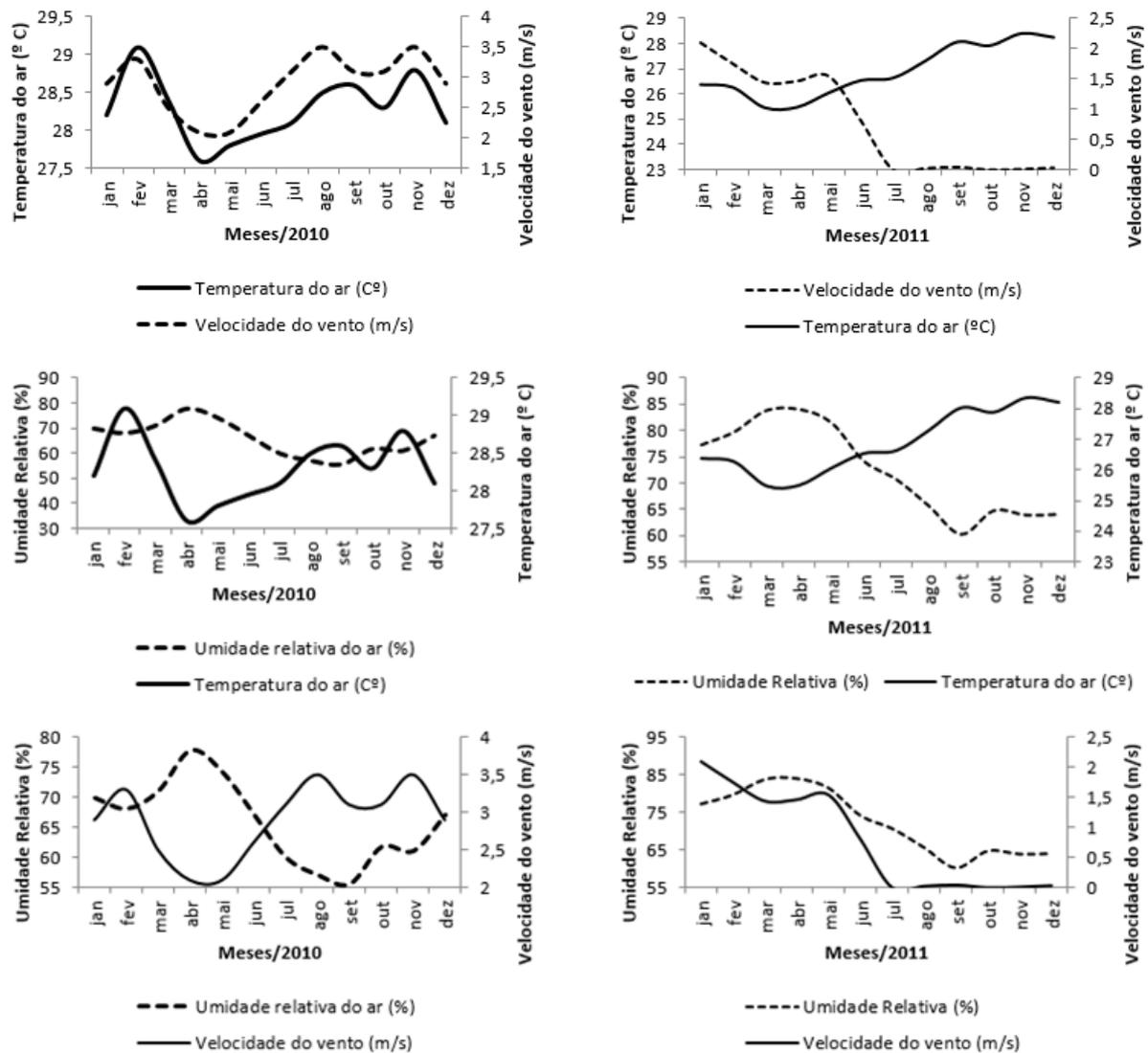
Assim, as cargas afluentes introduzidas pelos principais tributários do reservatório Pereira de Miranda também são responsáveis por alterar o tempo de retenção hidráulica da água no açude.

Segundo Rangel-Peraza *et al.* (2009) e Branco *et al.* (2009), a morfologia da bacia de drenagem, em conjunto com os fatores externos (vento, temperatura do ar, umidade relativa), são capazes de influenciar as variáveis dos sistemas aquáticos continentais. Para González *et al.* (2003), o relevo da bacia de drenagem pode interferir nos episódios de mistura das massas de água e estratificação térmica, pois a geomorfologia define o potencial da ação do vento sobre a dinâmica de mistura vertical ou manutenção de compartimentos distintos no perfil vertical dos reservatórios.

Durante o período de pesquisa, a maior variação na temperatura média mensal do ar na área de influência do açude Pereira de Miranda foi registrada em 2011 (Figura 4). Nesse ano, a amplitude de variação foi de 2,9 °C, tendo variado entre 25,4 °C (abril) a 28,3 °C (novembro). Esses valores expressam claramente as características do clima semiárido, no qual o primeiro semestre concentra os menores valores de temperatura do ar em relação ao segundo semestre. Pôde-se observar que a amplitude de variação da temperatura no ciclo sazonal dos anos de 2010 e 2011 foi muito inferior às oscilações diárias. Nos trópicos, as variações sazonais de temperatura são relativamente constantes e pequenas e as variações diárias são maiores e significativas (ESTEVEVES, 2011; RAMIREZ, 1996; VEIGA; RAO; FRANCHITO, 2011).

A umidade relativa do ar na região variou de 55,5 a 77,7% em 2010 e de 60,2 a 83,8% em 2011. Para os dois anos, os maiores valores foram observados no primeiro semestre, em consequência da estação chuvosa que eleva a quantidade de vapor de água presente na atmosfera, aumentando, conseqüentemente, a umidade relativa do ar (SILVA; ESTEVÃO; BRITO, 2012). Em contrapartida, os menores valores observados no segundo semestre foram relacionados à interrupção das chuvas e ao aumento das médias mensais de temperatura e da velocidade do vento. Além disso, o déficit de pressão de vapor, os altos valores de radiação solar e a diminuição considerável de nebulosidade nesse período, são fatores preponderantes na redução da umidade relativa do ar (GIANOTTI *et al.*, 2013).

Figura 4 – Variação da temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento na área de influência do açude Pereira de Miranda, durante 2010 e 2011.



Fonte: Próprio autor.

No ano de 2010 os ventos na região foram mais intensos entre julho e dezembro, período seco, com média mensal máxima de 3,5 m/s registrada nos meses de agosto e novembro. Lemos (2011) comentou que, durante a estação seca, as velocidades do vento são geralmente mais elevadas do que em outras épocas do ano. Segundo Reynolds (1984), ventos de magnitude acima de 3,0 m/s são capazes de movimentar massas de água. Em julho de 2011 a estação meteorológica da FUNCEME estava com problemas técnicos e não foi possível coletar dados a partir desse período. Apesar disso, nos dados coletados até junho observou-se que os ventos tiveram intensidade baixa, com média mensal máxima de 2,0 m/s em janeiro. O padrão de ventos intensos, como observados em 2010, pode ter influência direta na distribuição das variáveis físicas e químicas da água, favorecendo períodos de estabilidade e

circulação, que irá depender da sua intensidade.

O cenário climático de 2010 e 2011, caracterizado por mudanças nas variáveis hidroclimáticas pode ter influenciado as variáveis limnológicas do açude Pereira de Miranda. A variação no nível do açude e a ação do vento, por ser o principal mecanismo externo capaz de misturar as massas de água de diferentes temperaturas e densidades, (FERREIRA; CUNHA, 2013), podem estar diretamente ligados a possíveis eventos de estratificação ou à manutenção da estabilidade da massa d'água no reservatório Pereira de Miranda nesses anos.

5.2 Variáveis físicas e químicas

A Tabela 2 representa a análise estatística descritiva das variáveis físicas (transparência da água e temperatura da água) e químicas (pH, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica) para cada estação de amostragem no açude Pereira de Miranda, nos anos de 2010 (março, maio, agosto, setembro e dezembro) e 2011 (janeiro, maio, outubro e novembro).

Os valores de transparência da água variaram consideravelmente nos anos analisados. O valor mínimo de 0,70 m (pontos 2 e 3, 2º semestre) e máximo de 1,30 m (ponto 1, 2º semestre) em 2010 e o valor mínimo de 0,70 m (pontos 1, 2 e 3, 2º semestre) e máximo de 2,20 m (ponto 2, 1º semestre) em 2011, sugerem condições variáveis de radiação subaquática, com maiores valores de transparência da água em 2011, associados ao aumento do nível da água do reservatório. Nessas condições, o aumento da zona eufótica pode favorecer maior distribuição de calor na coluna de água e a formação de gradientes térmicos mais acentuados no perfil vertical (LEMOS, 2011).

Em 2010, os maiores valores foram observados em setembro com 1,30 m (ponto 1) e 1,10 m (ponto 3), enquanto o menor valor foi observado em dezembro, com 0,70 m (ponto 3). A redução do volume médio do reservatório na segunda metade do ano, com aumento na densidade de sólidos em suspensão, pode ter influenciado a diminuição da transparência constatada na última coleta realizada em dezembro de 2010.

Nesse sentido, Braga *et al.* (2015) observaram redução nos valores de transparência no açude Dourado, Rio Grande do Norte, durante o período seco. As medições realizadas entre maio/2011 e dezembro/2012 registraram os dados mínimos de transparência quando o volume do reservatório diminuiu consideravelmente em virtude da estiagem prolongada observada nos anos da pesquisa.

Em 2011, os maiores valores para transparência da água, registrados nos três pontos de

amostragem, foram observados em maio, após os primeiros meses de chuva. De acordo com esse resultado, é provável que fatores como a distância desses pontos em relação à região fluvial, o processo de sedimentação de partículas em suspensão ao longo do gradiente longitudinal e o aumento do nível da água tenham contribuído para o estabelecimento de maior zona eufótica na região intermediária e lacustre do reservatório Pereira de Miranda.

Avaliação semelhante foi realizada por Freire, Calijuri e Santaella (2009), no açude Pacajús, e Molisani *et al.* (2013), no açude Orós, localizados no semiárido do Ceará. Nesse ano, os meses de novembro e dezembro tiveram os menores valores de transparência registrados (0,70 m), associados ao período com menor nível de água e maior velocidade do vento. Essas condições, conforme observadas por Freire, Calijuri e Santaella (2009), pode facilitar a ressuspensão de material particulado a partir do sedimento, elevando a turbidez da água e reduzindo, portanto, sua transparência.

Tabela 2 – Estatística descritiva das variáveis físicas e químicas amostradas em três estações de coleta no açude Pereira de Miranda, durante os anos de 2010 e 2011.

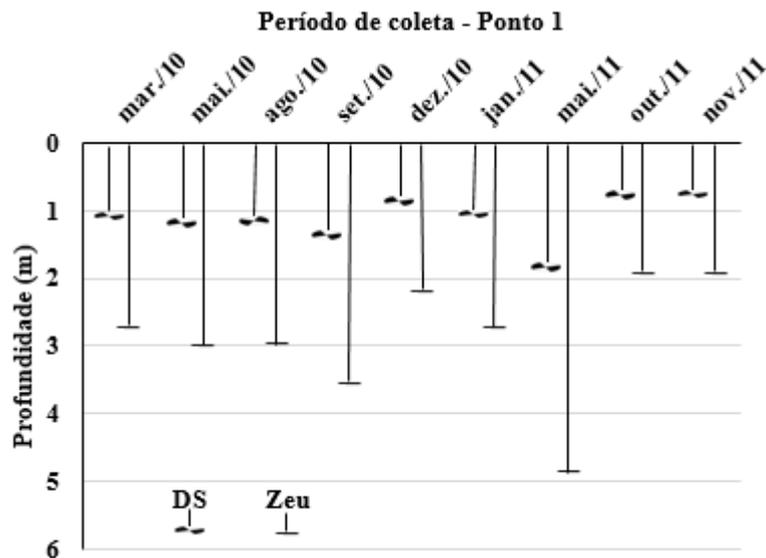
	2010					2011						
	DS	Temp.	OD	pH	CE	DS	Temp	OD	pH	CE		
	(m)	(°C)	(mg/L)		(µS/cm)	(m)	(°C)	(mg/L)		(µS/cm)		
PONTO 1	Mínimo	0,80	28,1	3,67	7,76	453,0	Mínimo	0,70	28,1	0,44	7,72	434,0
	Máximo	1,30	30,8	9,03	8,77	637,0	Máximo	1,80	29,8	8,52	8,65	574,0
	Média	1,06	29,3	7,09	8,48	499,8	Média	1,05	28,8	5,77	8,34	514,7
	Mediana	1,10	29,4	7,30	8,62	470,0	Mediana	0,85	28,9	5,78	8,39	514,0
	DP	0,18	1,0	1,73	0,30	60,9	DP	0,51	0,52	2,11	0,26	39,5
	CV (%)	16,0	3,0	24,0	3,0	12,0	CV (%)	48,0	1,0	36,0	3,0	7,0
	IC - 95%	0,22	0,57	0,96	0,17	7,9	IC - 95%	0,82	0,33	1,42	0,16	6,2
	IC - 95%	0,37	0,80	1,33	0,23	10,5	IC - 95%	1,51	0,46	2,02	0,23	8,2
PONTO 2	Mínimo	0,70	27,7	4,94	7,81	453,0	Mínimo	0,70	28,0	2,75	7,86	457,0
	Máximo	1,20	30,5	7,89	8,33	636,0	Máximo	2,20	29,3	7,95	8,76	1038,0
	Média	0,94	28,9	6,97	8,16	502,3	Média	1,15	28,5	6,50	8,41	634,2
	Mediana	0,90	28,8	7,26	8,18	473	Mediana	0,85	28,5	6,82	8,48	520,0
	DP	0,18	1,0	0,87	0,14	60,7	DP	0,70	0,38	1,52	0,27	223,9
	CV (%)	19,0	3,0	12,0	1,0	12,0	CV (%)	60,0	1,0	23,0	3,0	35,0
	IC - 95%	0,22	0,58	0,48	0,08	9,4	IC - 95%	1,12	0,24	0,96	0,17	38,2
	IC - 95%	0,37	0,81	0,67	0,11	12,4	IC - 95%	2,05	0,34	1,36	0,24	50,5
PONTO 3	Mínimo	0,70	27,5	5,88	8,03	448,0	Mínimo	0,70	27,8	2,18	7,89	322,0
	Máximo	1,10	30,1	8,65	8,67	627,0	Máximo	1,80	29,3	8,67	8,84	1049,0
	Média	0,96	28,6	7,25	8,30	497,9	Média	1,10	28,3	6,48	8,46	629,8
	Mediana	1,00	28,3	7,05	8,27	467,0	Mediana	0,95	28,2	6,57	8,49	511,0
	DP	0,16	1,0	0,76	0,18	61,9	DP	0,52	0,44	1,77	0,27	246,5
	CV (%)	16,0	3,0	1,0	2,1	12,0	CV (%)	47,0	1,0	27,0	3,0	39,0
	IC - 95%	0,20	0,58	0,42	0,10	9,86	IC - 95%	0,83	0,28	1,27	0,17	40,1
	IC - 95%	0,34	0,81	0,58	0,14	13,02	IC - 95%	1,52	0,4	1,82	0,24	53,0

Fonte: Próprio autor.

Onde: DS = transparência da água (m); Temp. = temperatura da água (°C); OD = oxigênio dissolvido (mg/L); pH = potencial hidrogeniônico (adimensional); CE = condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$); DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação (%) e IC = índice de confiança (%).

A variação temporal da transparência da água e da zona eufótica no ponto 1 para o período pesquisado está representada na Figura 5. Nas três primeiras coletas de 2010 observou-se que os resultados de transparência da água foram praticamente os mesmos, o que pode ter sido resultado da escassez de chuvas no primeiro semestre, insuficientes para elevar a quantidade de material particulado nesta região. Por outro lado, o aumento da transparência no segundo semestre pode ter sido favorecido pelo tempo de retenção hidráulica elevado, que permitiu a sedimentação de partículas suspensas. A redução da transparência observada na última coleta (dezembro/2010) foi influenciada pelo período chuvoso que iniciou em dezembro, ressuspensando os sólidos na coluna d'água.

Figura 5 – Variação da transparência (DS) e da zona eufótica (Zeu) da água no ponto 1 do açude Pereira de Miranda, durante os anos de 2010 e 2011.



Fonte: Próprio autor.

Onde: DS = transparência da água e Zeu = zona eufótica.

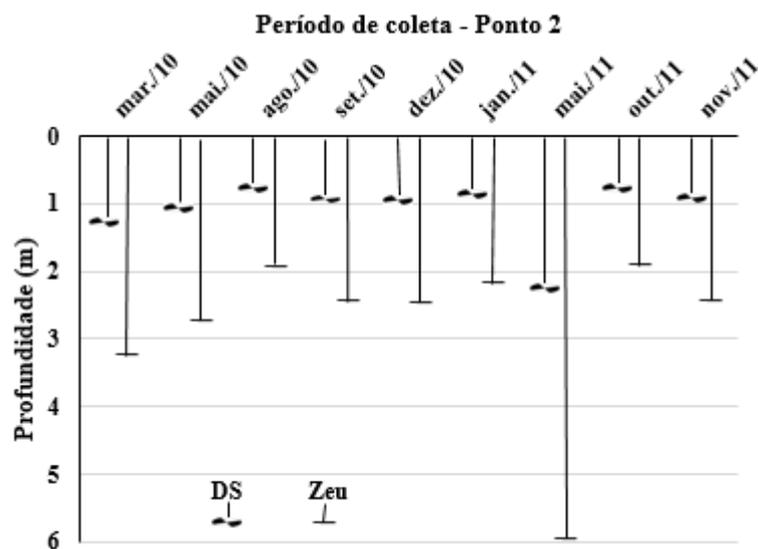
Em 2011, destaca-se o mês de maio pela grande elevação da transparência da água. Nesse caso, sugere-se que o processo de sedimentação de partículas orgânicas e inorgânicas

em suspensão na coluna de água foi mais atuante sobre as condições limnológicas do açude do que as chuvas registradas acima da média naquele mês.

A variação temporal da transparência da água e da zona eufótica no ponto 2 (Figura 6), mostra que no segundo semestre de 2010 a transparência foi menor comparada ao ponto 1. A redução do volume médio do reservatório e a conseqüente redução da profundidade do ponto de coleta de 12,0 para 5,7 m (entre janeiro e dezembro) pode ter sido determinante para o aumento da densidade de sólidos em suspensão e conseqüente redução da penetração da luz na coluna d'água.

O maior valor de transparência observado no ponto 2 em 2011 foi, também, no mês de maio (2,2 m). Além do aumento do volume do reservatório de 157 hm³ (janeiro) para 336 hm³ (maio), o aporte de água do tributário que fica na confluência daquele ponto pode ter diluído substâncias que reduzem a penetração da luz na água, aumentando a transparência. A redução da transparência observada nas duas últimas coletas de 2011 pode estar relacionada ao aumento da turbidez em virtude do decréscimo do volume do reservatório.

Figura 6 – Variação da transparência (DS) e da zona eufótica (Zeu) da água no ponto 2 do açude Pereira de Miranda, durante os anos de 2010 e 2011.



Fonte: Próprio autor.

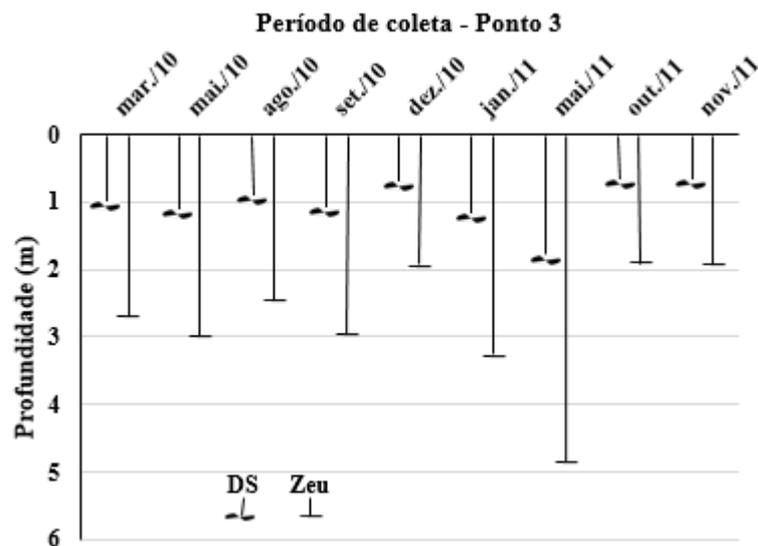
Onde: DS = transparência da água e Zeu = zona eufótica.

No ponto 3 (Figura 7), a variação temporal da transparência da água e da zona eufótica observada em 2010 foi a menor entre os três pontos naquele ano. O regime de chuvas abaixo da média e a pequena variabilidade no aporte de sedimentos e matéria orgânica advindos do

tributário que desemboca próximo ao ponto de coleta, podem ter favorecido a manutenção da transparência constante para o ano analisado. O menor valor de transparência observado na última coleta, coincidiu com o menor volume médio do reservatório (133 hm^3) para o ano de 2010.

Por outro lado, observaram-se variações consideráveis nos dados de transparência para o ponto 3 em 2011. No primeiro semestre, os valores de transparência foram maiores que 1,0 m, provavelmente como consequência do aumento do volume do reservatório. No segundo semestre, os valores caíram para 0,7 m. O decréscimo do volume do reservatório e a ação dos ventos, mais intensa nessa época do ano, podem ter contribuído para a redução da transparência.

Figura 7 – Variação da transparência (DS) e da zona eufótica (Zeu) da água no ponto 3 do açude Pereira de Miranda, durante os anos de 2010 e 2011.



Fonte: Próprio autor.

Onde: DS = transparência da água e Zeu = zona eufótica.

A distribuição vertical dos resultados de temperatura da água, OD e pH foram avaliados para todas as coletas e para cada ponto. No entanto, as amplitudes dos gradientes verticais foram muito baixas, especialmente para a temperatura da água. Assim, a análise de evidência de formação de estratificação térmica e química foi limitada aos gráficos de cada ponto de coleta e para cada um dos dois anos de pesquisa, que tiveram maior amplitude de variação vertical. No entanto, os demais gráficos estão em anexo.

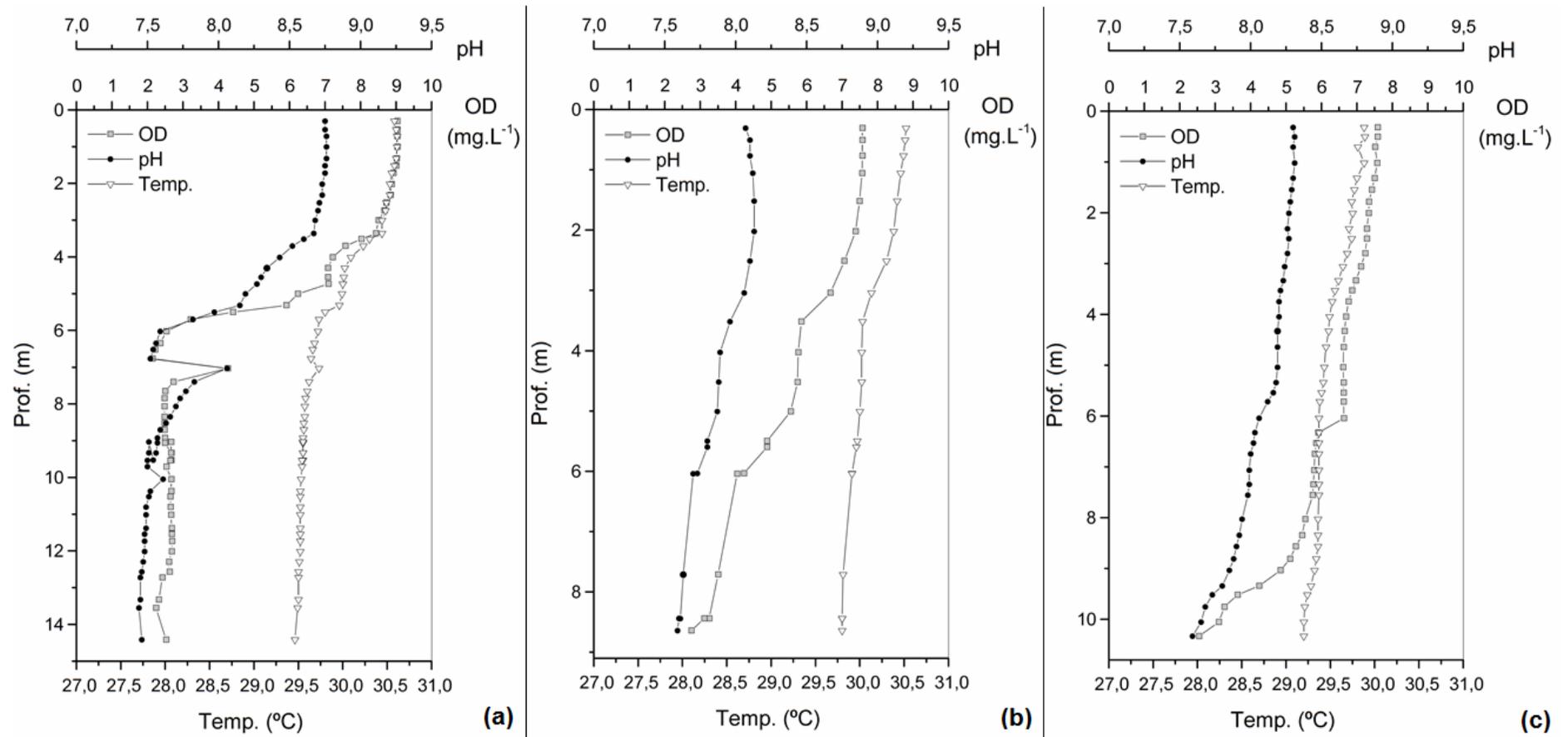
A condutividade elétrica praticamente não variou nos pontos analisados e, portanto, não foram incluídos na análise gráfica. As medidas de condutividade elétrica observadas por Filho, Martins e Porto (2006) na água do reservatório Frios também teve comportamento semelhante. Naquele estudo, a CE não variou significativamente no perfil vertical, indicando que o reservatório estava bem misturado verticalmente quanto a sais, permitindo que os autores concluíssem que não houve estratificação salina na época, com total ausência de quimioclina.

Em 2010, os pontos e os meses nos quais as variáveis mais oscilaram foram o 1 e 3 em março e o 2 em maio (Figura 8). As menores amplitudes de variação foram verificadas no período de estiagem, no qual a sinergia entre o menor volume armazenado e maior ação do vento pode ter favorecido condições de mistura na coluna de água, evitando a formação de estratificação térmica e química nos horários de coleta (diurno).

No ponto 1, a variação de temperatura entre a superfície e o fundo, correspondente a uma profundidade de 14,4 m, foi de apenas 1,15 °C. No entanto, a redução da temperatura, mais evidente entre as profundidades de 2 a 6 m, foi acompanhada da redução nas concentrações de oxigênio dissolvido e nos valores de pH. Embora a variação de temperatura nessa faixa de profundidade tenha sido inferior a 1° C, pode ter sido suficiente para possibilitar diferenças na densidade da água e possível microestratificação térmica e química. Para reservatórios de regiões tropicais, Payne (1986) afirmou que gradientes térmicos em torno de 1° C são suficientes para originar microestratificações térmicas. No entanto, Dantas, Moura e Bittencourt-Oliveira (2011) adotaram como critério para reconhecer estratificação térmica nos açudes Arcoverde e Pedras, semiárido de Pernambuco, o estabelecimento de termoclina com gradiente térmico maior ou igual a 0,5 °C/m. Com base nesse critério, no açude Pereira de Miranda podem ter ocorrido apenas tendências a pequenas microestratificações.

O OD atingiu valores de saturação no epilímnio (9 mg/L) e valores muito baixos (2,5 mg/L) na região mais profunda do reservatório. Essa variação de OD foi indicativo de estratificação química no perfil vertical do ponto 1. Esteves (2011) comentou que em reservatórios de regiões tropicais, é comum observar a estratificação química, especialmente de oxigênio, independente da estratificação térmica.

Figura 8 – Perfis verticais de temperatura da água, OD e pH do ponto 1/março (a), ponto 2/março (b) e ponto 3/março (c), em 2010.



Fonte: Próprio autor.

Onde: OD = oxigênio dissolvido (mg.L⁻¹); pH = potencial hidrogeniônico (adimensional) e Temp. = temperatura da água (°C).

Porém, Filho, Martins e Porto (2006), em acordo com o relato de Esteves (2011), discutiram a importância secundária de se utilizar as concentrações de oxigênio dissolvido para se caracterizar estratificação química em reservatórios da região tropical. Para os autores, o aumento da velocidade das reações bioquímicas, em virtude das altas temperaturas dessa região, favorece elevadas taxas de decomposição de matéria orgânica, de modo que a formação de gradientes químicos, definidos pelo OD, pode não refletir a magnitude da produção primária.

Os valores pH no ponto 1 permaneceram dentro da faixa alcalina, variando de 8,7 a 7,4 entre a superfície e o fundo. A variação do pH e de OD no perfil vertical da coluna de água foi correspondente e pode ser explicada em razão da atividade fotossintética dos produtores primários na região fótica, que implica em maior consumo de gás carbônico, produção de oxigênio e aumento do pH. A possibilidade de maiores gradientes no ponto 1 está relacionada à maior profundidade, na qual o calor incidente nas primeiras camadas é mais lentamente distribuído para profundidades maiores (LEMOS, 2011; SOUSA, 2013).

Para os pontos 2 e 3, a variação entre as três variáveis foi menos sensível, embora todas elas tenham apresentado decréscimo com a profundidade, especialmente as concentrações de oxigênio dissolvido. A redução acentuada desse gás nas camadas mais profundas pode estar relacionada ao metabolismo dos consumidores e à ausência de atividade fotossintética na região afótica. Para Esteves (2011), a decomposição da matéria orgânica no fundo dos reservatórios tropicais, devido à atividade microbiana, é a principal responsável pela redução de oxigênio. No ponto 2, a variação de temperatura entre a superfície e o fundo foi de apenas 0,72 °C para uma profundidade de 8,6 m, enquanto que no ponto 3 a amplitude térmica de 0,69 °C para 10,3 m de profundidade foi ainda menos representativa de condições de estratificação térmica.

A análise variância (ANOVA) para as temperaturas medidas entre as profundidades das duas regiões eufóticas (superfície e zona eufótica) e uma região afótica (fundo), aplicada para os três pontos, não resultou em diferenças significativas para o valor de significância de 5%, reforçando a evidência de que apenas pequenas microestratificações tivessem ocorrido nas condições avaliadas no açude Pereira de Miranda durante o primeiro ano de pesquisa.

A variação no ponto 1 sugere a formação de uma pequena termoclina. No entanto, a não formação de termoclinas nos pontos 2 e 3 reforça a evidência de que, no período amostrado, eventos de estratificação térmica não foram observados no açude Pereira de Miranda e que o processo de mistura foi mais atuante sobre as condições limnológicas do açude. Esse fato é mais relevante quando se considera que as coletas foram realizadas entre 09:00 e 15:00 h, quando a radiação solar é mais intensa e mais favorável a provocar estratificação diurna. Filho, Martins e Porto (2006) observaram picos máximos de radiação e maiores gradientes verticais de temperatura e de oxigênio dissolvido no reservatório Frios, localizado na mesma bacia hidrográfica do açude Pereira de Miranda, no período de 11:00 às 14:00 h, reforçando a vulnerabilidade dos reservatórios dessa região à estratificação durante o intervalo de maior incidência de radiação solar.

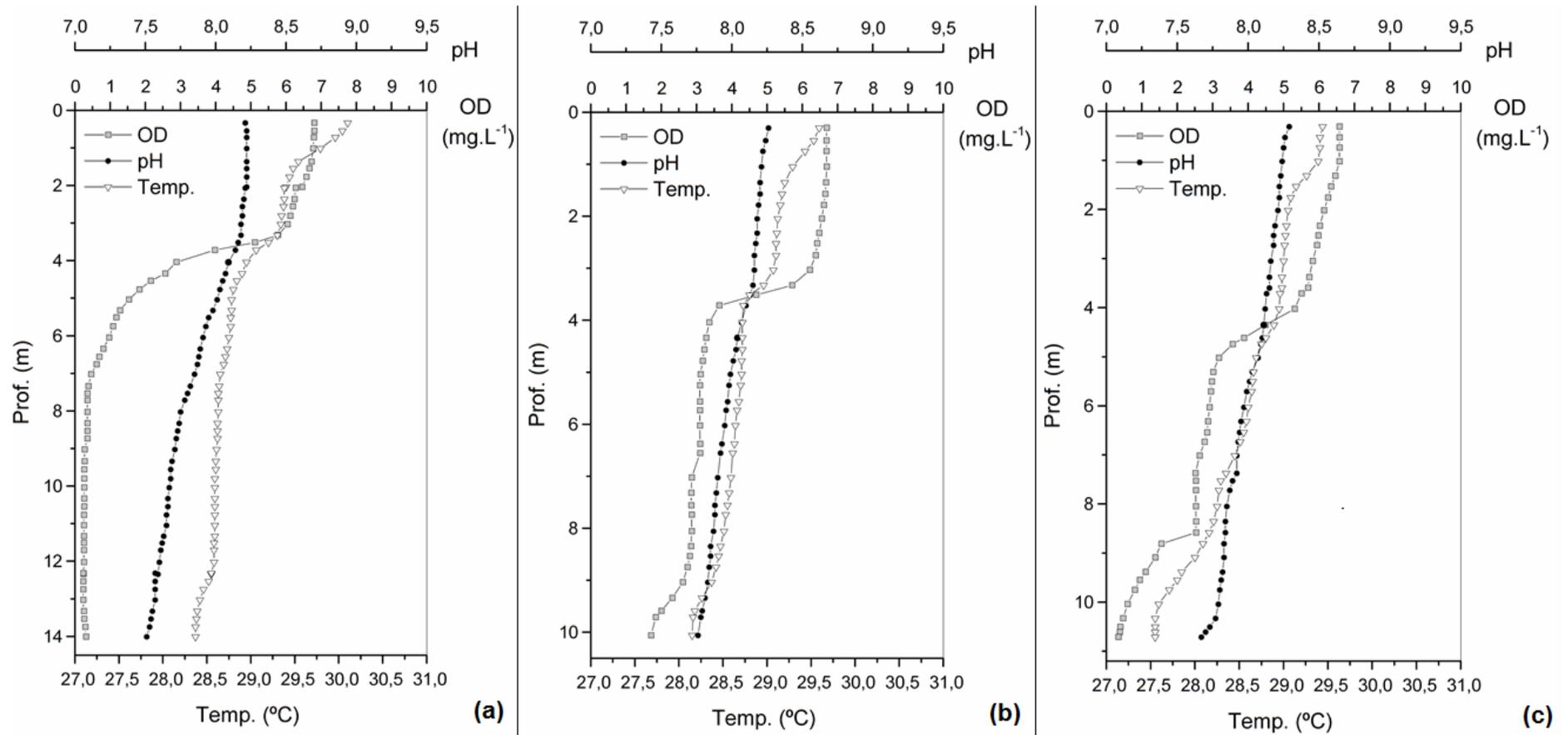
Nesse sentido, os resultados obtidos no açude Pereira de Miranda fornecem evidências de que a formação de gradientes, embora de pequena amplitude, tenha favorecido a formação de microestratificações, especialmente na região mais profunda.

Em 2011, observou-se a formação de gradientes mais acentuados, com maior amplitude de variação em maio, para os três pontos de coleta (Figura 9), após o reservatório receber aporte hídrico elevado. Nesse período, as diferenças das médias de temperatura para as três profundidades preestabelecidas foram significativamente diferentes para os três pontos, o que reforça a magnitude superior dos gradientes térmicos e químicos em comparação aos dados de 2010.

Portanto, as maiores amplitudes de variações foram observadas em período de elevado volume hídrico armazenado e baixa intensidade na velocidade dos ventos, que podem ter favorecido condições de estabilidade na coluna de água e, portanto, eventos de estratificação térmica e química. Por outro lado, observam-se as menores amplitudes de variação no período seco.

O reconhecimento de que a maior ação do vento, associada à redução do volume armazenado, podem causar instabilidades físicas na coluna de água e mistura das massas de água durante o período de estiagem (FREIRE; CALIJURI; SANTAELLA, 2009) pode ser estendido para o açude Pereira de Miranda, que apresentou menor transparência da água, maior velocidade do vento e gradientes térmicos e químicos menos acentuados no perfil vertical no segundo período do ano, marcado pela estiagem e redução no nível da água.

Figura 9 – Perfis verticais de temperatura da água, OD e pH dos pontos 1 (a), 2 (b) e 3 (c) do mês de maio, em 2011.



Fonte: Próprio autor.

Onde: OD = oxigênio dissolvido (mg.L⁻¹); pH = potencial hidrogeniônico (adimensional) e Temp. = temperatura da água (°C).

No ponto 1, a redução da temperatura mais evidente foi observada entre as profundidades de 0 e 4 m. Nessa região é possível observar a formação de uma pequena termoclina, com base na aproximação do gradiente térmico de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, sugerido por Dantas, Moura e Bittencourt-Oliveira (2011). A partir do limite inferior da pequena zona de termoclina, observou-se redução mais acentuada nos valores de pH e OD, sendo evidência complementar da formação de microestratificação térmica no açude Pereira de Miranda. O decaimento dos valores de OD chegando, praticamente, a zero no hipolímnio pode estar relacionado à rápida decomposição da matéria orgânica. Segundo Esteves (2011) e Filho, Martins e Porto (2006), o consumo de oxigênio para a decomposição da matéria orgânica no hipolímnio de reservatórios tropicais é de quatro a nove vezes maior do que o de reservatórios temperados. Essa rápida decomposição pode favorecer a produção do gás carbônico, que por sua vez pode influenciar na redução dos valores de pH.

Para o ponto 2, a variação de temperatura entre a superfície e o fundo, correspondente a uma profundidade de 10 m, foi de $1,44\text{ }^{\circ}\text{C}$. Assim como no ponto 1, a redução da temperatura mais evidente foi observada entre 0 e 4 m. No entanto, nesse ponto é possível observar uma termoclina mais bem estabelecida, sugerindo que maior evidência de estratificação térmica, embora o estabelecimento de faixa de termoclina não tenha implicado em reduções graduais nos valores de pH e OD, como observado para o ponto 1.

No ponto 3, a variação gradual da temperatura entre a superfície e o fundo não resultou no estabelecimento de termoclina acentuada, que pudesse indicar a formação clara de um gradiente térmico capaz de formar estratificação. No entanto, a redução gradual dos valores de pH e OD com a profundidade, levando a valores de OD próximos da anoxia, pode estar sendo conduzida pelo metabolismo biológico diferenciado entre as regiões eufótica, determinada pelos produtores primários, e a região afótica, influenciada pelo metabolismo de consumidores e decompositores (Esteves, 2011).

A análise variância (ANOVA) para as temperaturas medidas entre as profundidades das duas regiões eufóticas e uma região afótica, aplicada para os três pontos, resultou em diferenças significativas para o valor de significância de 5%, reforçando a evidência de que eventos de estratificação térmica tivessem ocorrido nas condições avaliadas no açude Pereira de Miranda durante o segundo ano de pesquisa.

A formação de termoclinas nos pontos 2 e 3 reforça a evidência de que, no período amostrado, foram observados eventos de estratificação térmica no açude Pereira de Miranda e que o processo de mistura não foi atuante sobre as condições limnológicas do açude.

Portanto, as poucas chuvas registradas em 2010 e a ação intensa do vento, foram determinantes para acentuar o processo de mistura e instabilidade das massas de água do açude Pereira de Miranda, dificultando a formação de termoclinas, ou favorecendo termoclina pouco estabelecida, e a ocorrência de microestratificações pouco acentuadas no perfil vertical. Por outro lado, o período chuvoso acima da média observado em 2011, o consequente aumento do volume hídrico do reservatório e a baixa intensidade na velocidade do vento, foram preponderantes para que o sistema aquático tendesse à estabilidade naquele ano, favorecendo a formação de termoclinas e de gradientes térmicos e químicos que levaram à estratificação térmica e química do açude.

Assim, a compreensão dos fatores que agem sobre a dinâmica limnológica é importante para compreender a variação espacial (vertical e longitudinal) e temporal das variáveis químicas, físicas e biológicas.

6. CONCLUSÕES

No açude Pereira de Miranda houve evidências de vulnerabilidade a fatores climáticos (chuva e vento) e hidrológicos (nível da água e tempo de retenção hidráulica), a partir da observação da formação de gradientes térmicos e químicos distintos entre pontos e entre períodos amostrados anuais e interanuais amostrados.

As variações nos dados de OD, temperatura da água e pH no perfil vertical dos pontos amostrados foram mais acentuadas no período chuvoso, enquanto que no estio os dados analisados oscilaram pouco. A CE praticamente não variou nos pontos analisados para os anos amostrados.

As termoclinas mais evidentes foram identificadas nos pontos 2 e 3 do mês de maio em 2011, destacando-se, assim, a divisão da coluna d'água em compartimentos verticais.

A capacidade de estratificação térmica e química foi mais acentuada no período chuvoso, caracterizado por maior profundidade dos pontos de amostragem e maior volume armazenado do reservatório, enquanto que no período seco a redução da profundidade favoreceu os processos de mistura que dificultaram a formação de gradientes indicadores de estratificação.

No entanto, considerando que os processos diários de estratificação e mistura das massas de água (atelmixia) são comuns aos reservatórios do semiárido brasileiro, é importante expandir o estudo no açude Pereira de Miranda para escalas diárias (nictemerais).

Essa abordagem pode ser essencial para avaliar a importância de variações diárias nas variáveis químicas, físicas e biológicas e suas implicações sobre a qualidade da água, relacionadas à influência de fatores hidroclimáticos, em complementação à avaliação dessas variações em escalas mensais ou sazonais.

Ficou evidente que no açude Pereira de Miranda a estratificação e a mistura ocorreram em um ciclo diurno governado por variáveis climáticas, tais como radiação solar e vento.

REFERÊNCIAS

ADRIAN, R. *et al.* Lakes as sentinels of climate change. **Limnology and Oceanography**, Baltimore, v. 54, n. 6 (parte 2), p. 2283-2297, nov. 2009.

ALCÂNTRA, E. H. *et al.* Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 144, n.11, p. 2651-2665, nov. 2010.

AMANCIO, A. L. L.; FARIAS, W. R. L.; NETO, A. R. S. Balanço de nutrientes da água do açude Pentecoste (Pentecoste, Ceará, Brasil) no período de março a dezembro de 2002. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 36, n. 1, p. 44-52, jan./abr. 2005.

ARAÚJO, J.A.A., (coord.) **Barragem no Nordeste do Brasil**: experiência do DNOCS em barragens na região semi-árida. 2ª Ed. Fortaleza: DNOCS, 1990. 328p.

ARAÚJO, J. C. Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido: Modelagem e Validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 39-56, abr./jun. 2003.

AYOADE, John Olaniyi. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 13. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 332p.

ARAÚJO, L. E. Análise estatística de chuvas intensas na bacia hidrográfica do rio Paraíba. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n.2, p. 162-169, mar. 2008.

BARBOSA, F.A.R.; TUNDISI, J.G. Primary production of phytoplankton and environmental characteristics of a shallow quaternary lake at eastern Brazil. **Arch. Hydrobiol.**, Stuttgart, v. 90, n. 2, p. 139-161. 1980.

BARBOSA, J. E. L. *et al.* Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Carlos, v. 24, n. 1, p. 103-118. 2012.

BARBOSA, L. G.; BARBOSA, F. A. R.; BICUDO, C. E. M. Inter-annual chemical stratification in Brazilian natural lakes: meromixis and hypolimnetic memory. **Acta**

Limnologica Brasiliensia, São Carlos, v. 24, n. 2, p. 127-139. 2012.

BARTRAM, Jamie; BALLANCE, Richard. **Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes**. UNEP/WHO, 1996. 348p.

BECKER, V. *et al.* Phytoplankton equilibrium phases during thermal stratification in a deep subtropical reservoir. **Freshwater Biology**, Oxford, v. 53, n. 5, p. 952-963. 2008.

BEZERRA, L. A. V. *et al.* Limnological characteristics of a reservoir in semiarid Northeastern Brazil subject to intensive tilapia farming (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758). **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Carlos, v. 26, n. 1, p. 47-59. 2014.

BRAGA, G. G. *et al.* Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region. **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Carlos, v. 27, n. 1, p. 15-23. 2015.

BRANCO, C. W. C. *et al.* Impact of climate on the vertical water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. **Lakes & Reservoirs: Research na Management**, v. 14, n. 3, p. 175-191. 2009.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Curu**. 2015. Disponível em: <<http://www.cbhcuru.com.br/conheca/>>. Acesso em: 04 jan. 2016.

COGERH. COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Rede de Monitoramento da Qualidade de Água operada pela COGERH**. 1. ed. Fortaleza, 2002.

CHELLAPPA, S. *et al.* Reproductive seasonality of the fish fauna and limnoecology of semi-arid Brazilian reservoirs. **Limnologica**, Berlin, v. 39, n. 4, p. 325-329, dez. 2009.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Geodiversidade do Estado do Ceará: Programa Geologia do Brasil Levantamento da Geodiversidade**. 1. ed. Fortaleza: Cprm, 2014. 214 p.

DANTAS, Ê. W.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C.; MOURA, A. N. Cyanobacterial

blooms in stratified and destratified eutrophic reservoirs in semi-arid region of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 83, n. 4, p. 1327-1338, dez. 2011.

DANTAS, Ê. W.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C.; MOURA, A. N. Spatial-temporal variation in coiled and straight morphotypes of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Wolsz) Seenayya et Subba Raju (Cyanobacteria). **Acta Botanica Brasilica**, Porto Alegre, v. 24, n. 2, p. 585-591. 2010.

DEGERMENDZHY, A. G. *et al.* Vertical stratification of physical, chemical and biological components in two saline lakes Shira and Shunet (South Siberia, Russia). **Aquatic Ecology**, v. 44, n. 3, p. 619-632, 15 ago. 2010.

DNOCS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS. **Todos açudes do DNOCS na bacia do rio Curu estão em volume morto**. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/php/comunicacao/noticias.php?f_registro=3293&f_opcao=imprimir&p_view=short&f_header=1>. Acesso em: 05 jan. 2016.

DÖRNHÖFER, K.; OPPLET, N. Remote sensing for lake research and monitoring - Recent advances. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 64, p. 105-122, mai. 2016.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos da Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 790 p.

FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n.1, p. 83-93, jan./mar. 2013.

FILHO, F. A. S.; MARTINS, E. S. P. R.; PORTO, M. O Processo de Mistura em Reservatórios do Semi-Árido e sua Implicação na Qualidade da Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 109-119, out./dez. 2006.

FORD, Dennis E.; JOHNSON, Linda S. **An Assessment of reservoir Mixing Processes**. 1. ed. Little Rock: US Army of Engineer, 1986. 162p.

FRANÇA, J. M. B. *et al.* Comportamento das variáveis qualitativas do açude Pereira de Miranda – Pentecoste/CE, no período de estiagem. **Geociências**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 586-599. 2013.

FREIRE, R. H. F.; CALIJURI, M. C.; SANTAELLA, S. T. Longitudinal patterns and variations in water quality in a reservoir in the semiarid region of NE Brazil: responses to hydrological and climatic changes. **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Carlos, v. 21, n. 2, p. 251-262. 2009.

FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de. **O estado das águas no Brasil: perspectivas de gestão e informações de recursos hídricos**. 1. ed. Brasília: ANEEL, 1999. 334 p.

FUNCEME. FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Governo do Estado do Ceará**. Disponível em: < <http://www.funceme.br/>>. Acesso em: 9 jan. 2016.

GIANOTTI, A. R. C. *et al.* Análise microclimática em duas fitofisionomias do cerrado no alto vale do Jequitinhonha, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 28, n.3, p. 246-256, set. 2013.

GONZÁLEZ, E. J. *et al.* Fitoplankton de cinco embalses de Venezuela con diferentes estados tróficos. **Limnetica**, v. 22, n. 1-2, p. 15-35. 2003.

HAMILTON, S. K.; LEWIS JR., W. M. Basin morphology in relation to chemical and ecological characteristics of lakes on the Orinoco River floodplain, Venezuela. **Arch. Hydrobiol.**, Stuttgart, v. 119, n. 4, p. 393-425, out. 1990.

HOLANDA, Francisco Ariosto (Relator). **Seca: análises, pressupostos, diretrizes, projetos e metas para o planejamento de um novo Nordeste**. 1 ed. Brasília: Câmara dos Deputados, 2013. 228p.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Informações sobre os municípios brasileiros: Pentecoste**. Disponível em:

<<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=231070&search=||infogr%Elficos:-informa%E7%F5es-completas>>. Acesso em: 07 jan. 2016.

IPECE. INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. **Perfil Básico Municipal 2014 Pentecoste**. Fortaleza, 2015.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928. 1 mapa, color. Escalas variam.

LANDIM, R. B. T. V.; SILVA, D. F.; ALMEIDA, H. R. R. C. Desertificação em Irauçuba (CE): Investigação de Possíveis Causas Climáticas e Antrópicas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, n. 1, p. 1-21. 2011.

LEMOS, Victor Edney Dajtenko. **Monitoramento e gestão da qualidade da água em reservatórios incorporando processos hidrodinâmicos e climáticos de regiões tropicais semiáridas**. 2011. 167p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

LEWIS Jr., W. M. Basis for the protection and management of tropical lakes. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v. 5, n. 1, p. 35-48, mar. 2000.

LEWIS Jr., W. M. Tropical Lakes: how latitude makes a difference. In: *SCHIEMER, F.; BOLAND, K. (Eds.)*, 1996, Amsterdam. **Perspectives in Tropical Limnology**. Amsterdam: SPB Academic Publishing bv. p. 43-64. 1996.

LIMA, Paulo de Freitas. **Influência da estacionalidade hidrológica na classificação trófica, nas variáveis limnológicas e na dinâmica de fitoplâncton do reservatório Pentecoste, semiárido cearense**. 2011. 134p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

LUCCA, J. V.; ALBUQUERQUE, A. L. S.; ROCHA, O. Spatial heterogeneity and temporal changes of abiotic factors, in Lake Caçó, Maranhão state, Brazil. **Acta Limnologica**

Brasiliensia, São Carlos, v. 20, n. 2, p. 89-97. 2008.

MACEDO, M. V. A. **Características físicas e técnicas dos açudes públicos do Estado do Ceará**. Fortaleza, DNOCS, 132 p. 1977.

MARTIN, James Lenial; McCUTCHEON, Steve C. **Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. 794p.

MAZUMDER, A.; TAYLOR, W. D. Thermal Structure of Lakes Varying in Size and Water Clarity. **Limnology and Oceanography**, Baltimore, v. 39, n. 4, p. 968-976, jun. 1994.

MEDEIROS, P. R. *et al.* Vertical and nictemeral dynamics of limnological variables in a tropical Brazilian Dam. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 6, n.1 (Suplemento Especial), p. 73-80. 2006.

MOLISANI, M. M. *et al.* The influence of Castanhão reservoir on nutrient and suspended matter transport during rainy season in the ephemeral Jaguaribe river (CE, Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 73, n.1, p. 115-123. 2013.

MORAES, D. S. L.; JORDÃO, B. Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v. 36, n.3, p. 370-374, jun. 2002.

NHIWATIWA, T; MARSHALL, B. E. Seasonal and diurnal stratification in two small Zimbabwean reservoirs. **African Journal of Aquatic Science**, Grahamstown, v. 31, n. 2, p. 185-196. 2006.

PAYNE, A.I. **The ecology of tropical lakes and rivers**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 301p.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 465-473. 2000.

POLITI, E., CUTLER, M. E. J.; ROWAN, J. S. Using the NOAA Advanced Very High

Resolution Radiometer to characterise temporal and spatial trends in water temperature of large European lakes. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 126, p. 1-11. 2012.

POLZIN, D.; HASTENRATH, S. Climate of Brazil's nordeste and tropical atlantic sector: preferred time scales of variability. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 29, n. 2, p. 153-160. 2014.

RAMIREZ RESTREPO, John Jairo. 1996. 283p. **Variações espacial, vertical e nictemeral da estrutura da comunidade fitoplanctônica e variáveis ambientais em quatro dias de amostragem de diferentes épocas do ano no lago das Garças, São Paulo**. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

RANGEL-PERAZA, J. G. *et al.* Statistical assessment of water quality seasonality in large tropical reservoirs. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v. 14, n. 4, p. 315-323, dez. 2009.

REYNALDS, C. S. **The ecology of freshwater phytoplankton**. Cammbridge: Cammbridge Univ. Pres., 1984. 384p.

SANTOS, R. M. *et al.* Short-term thermal stratification and partial overturning events in a warm polymictic reservoir: effects on distribution of phytoplankton community. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 75, n.1, p. 19-29, mar. 2015.

SOUSA, Mart Som dos Reis. **Nutrientes e fitoplâncton em reservatório do semiárido brasileiro**. 2013. 80p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 201.

SIBERT, R. J.; KORETSKY, C. M.; WYMAN, D. A. Cultural meromixis: Effects of road salt on the chemical stratification of an urban kettle lake. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 395, n. 1, p. 126-137. 2015.

SILVA, J. M. O.; ESTEVÃO, G. S. BRITO, D. S. Análise do índice pluviométrico da região metropolitana do cariri/Ce nos anos de 2001 e 2004. **Revista Geonorte**, Manaus, Edição Especial 2, v. 2, n.5, p. 1267-1277. 2012.

SPERLING, Marcos Von. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias:** introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 452p.

TUNDISI, José Galizia; TUNDISI, Takako Matsumura. **Limnologia**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 632 p.

VEIGA, J. A. P.; RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H. Annual mean analysis of the tropical heat balance and associations with the walker circulation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n.1, p. 1-8, mar. 2011.

VIEIRA, A. C. B. *et al.* Correlation between the zooplanktonic community and environmental variables in a reservoir from the Northeastern semi-arid. **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Carlos, v. 21, n. 3, p. 349-358. 2009.

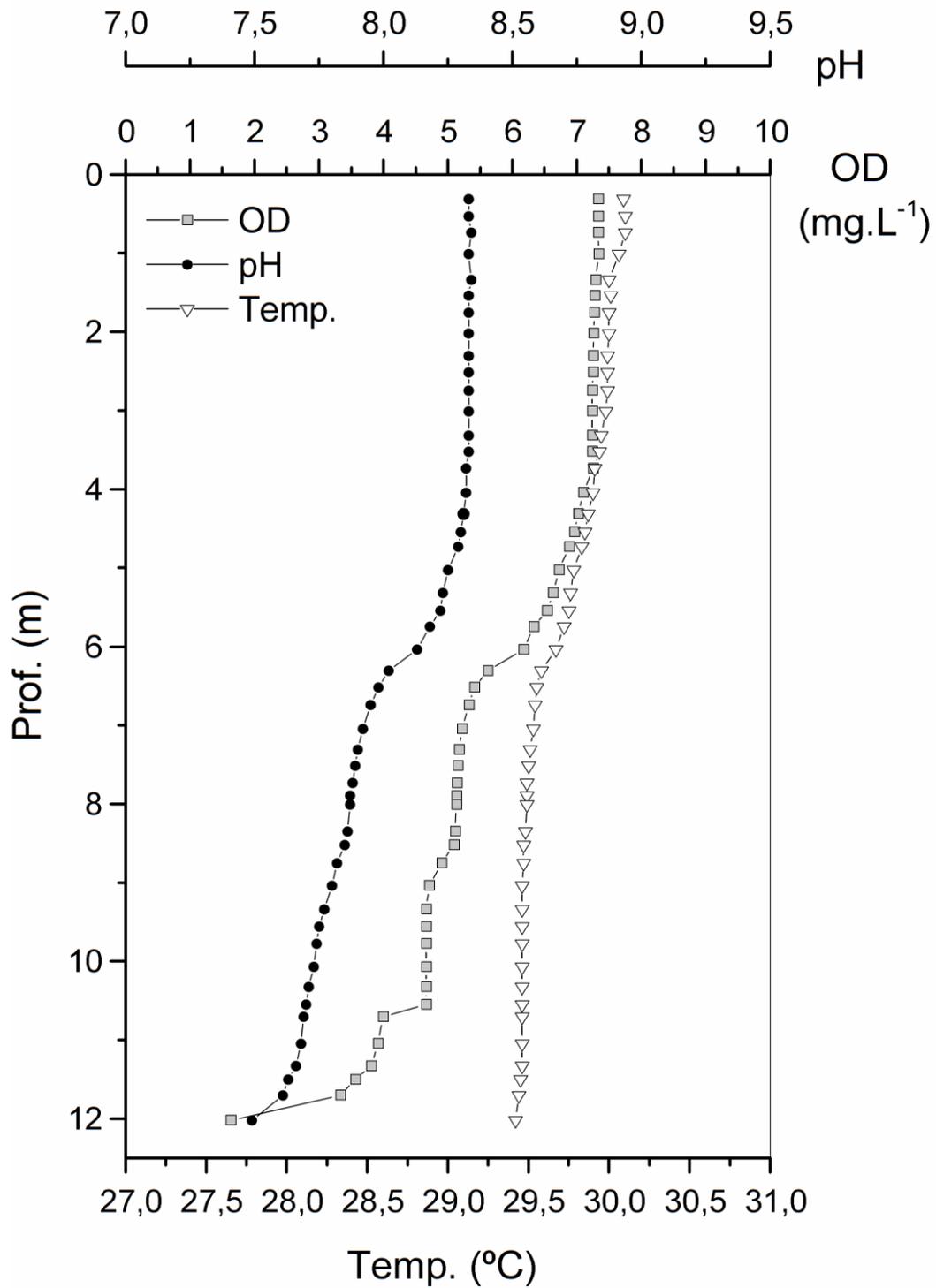
VIEIRA, P. C. S.; CARDOSO, M. M. L.; COSTA, I. A. S. Vertical and temporal dynamics of phytoplanktonic associations and the application of index assembly in tropical semi-arid eutrophic reservoir, northeastern Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Carlos, v. 27, n. 1, p. 130-144. 2015.

WETZEL, Robert G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. 1. ed. Philadelphia: Elsevier, 1983. 860 p.

WILLIAMSON, C. E. *et al.* Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. **Limnology and Oceanography**, Baltimore, v. 54, n. 6 (parte 2), p. 2273-2282, nov. 2009.

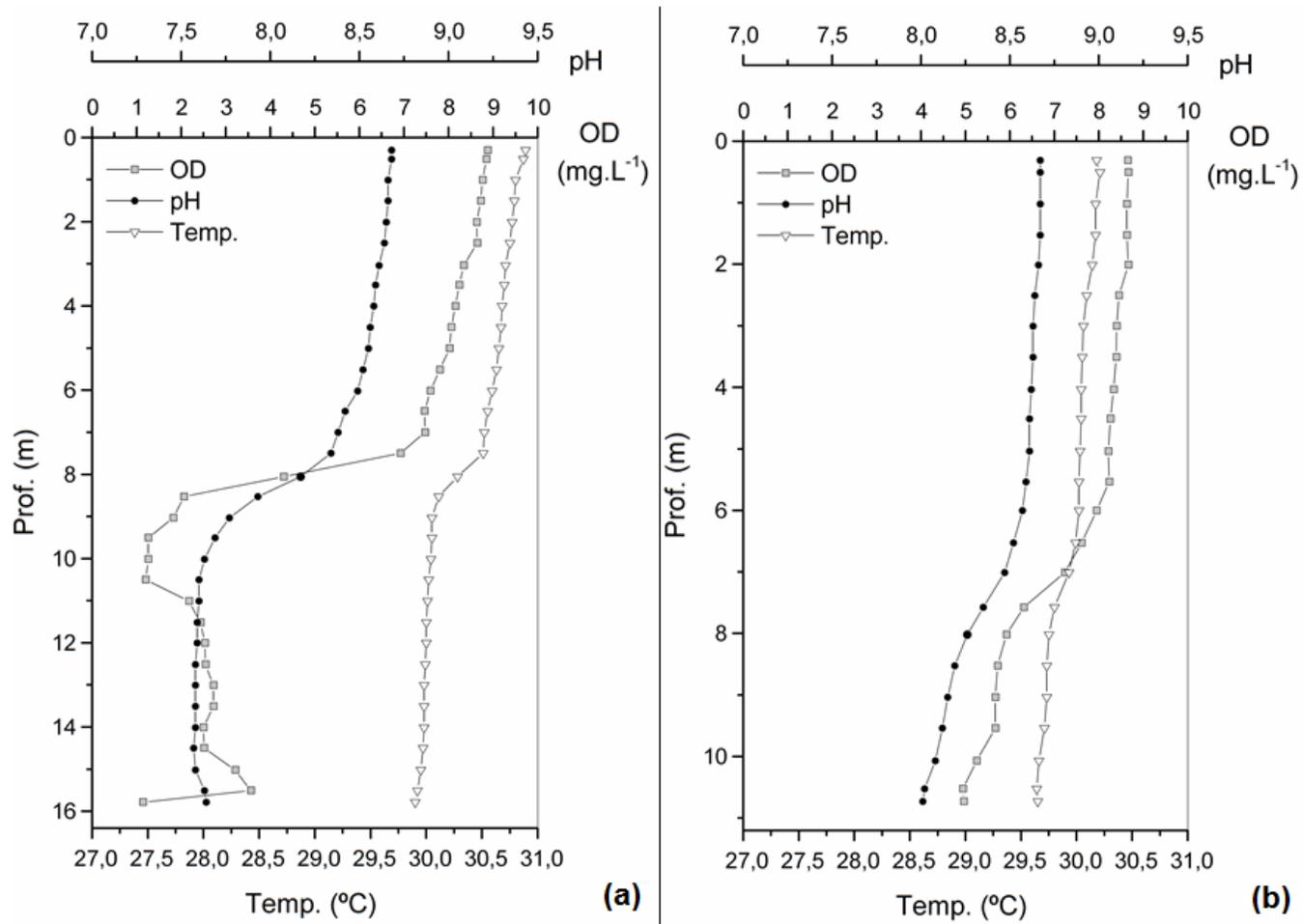
ANEXOS

ANEXO A – PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA, OD E pH DO PONTO 2 (MARÇO), EM 2010.



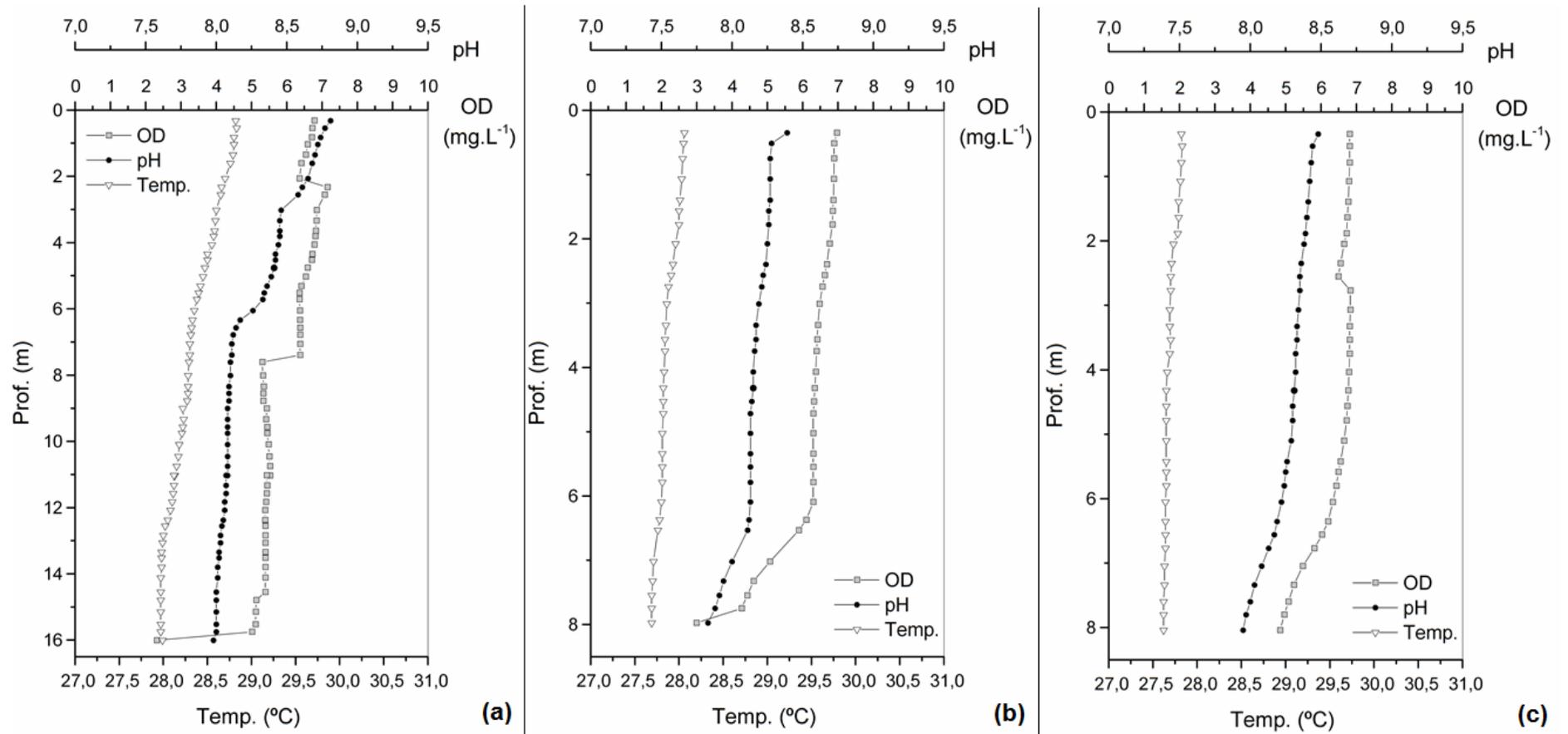
Fonte: Próprio autor.

ANEXO B – PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA, OD E pH DOS PONTOS 1 (A) E 3 (B) DO MÊS DE MAIO, EM 2010.



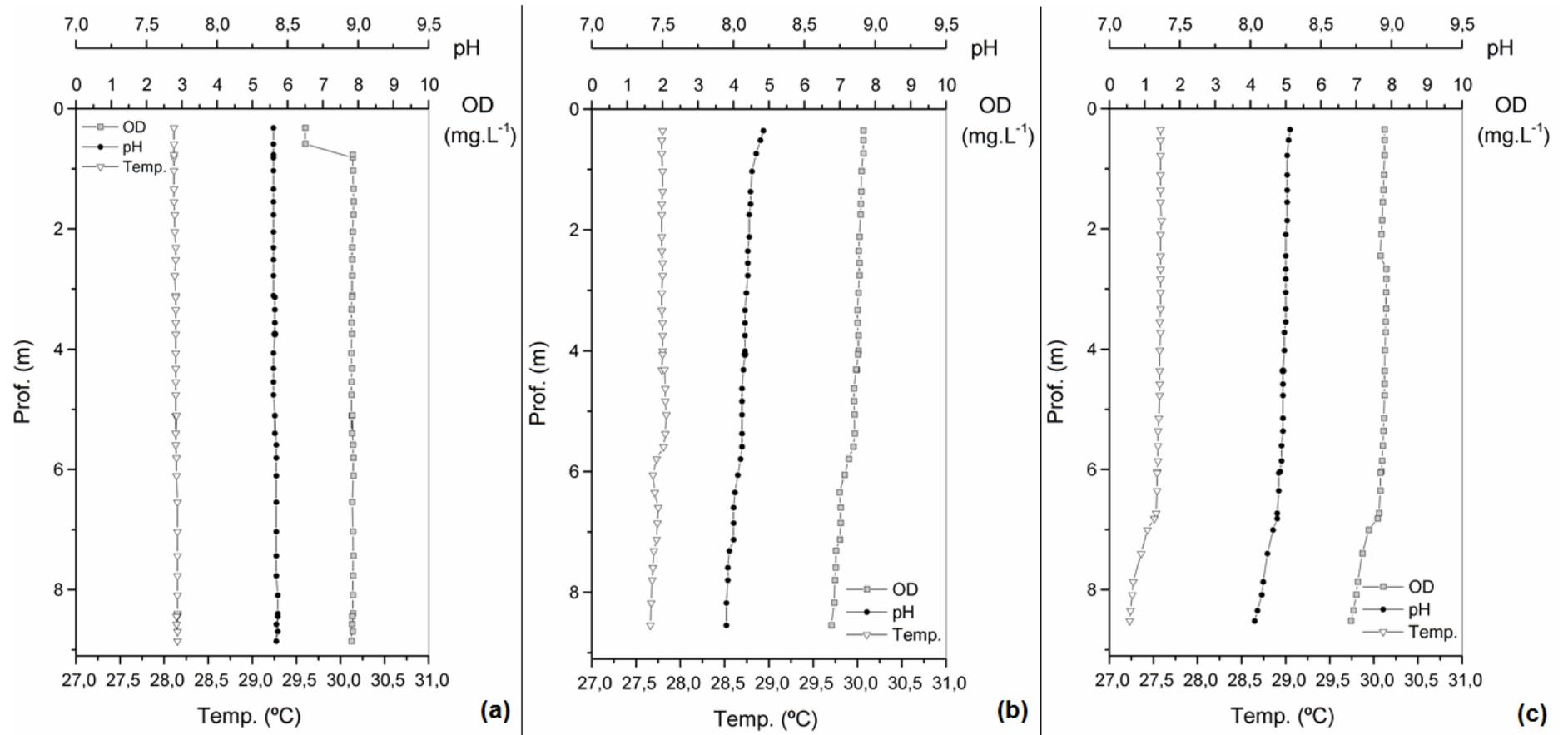
Fonte: Próprio autor.

ANEXO C – PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA, OD E pH DOS PONTOS 1 (A), 2 (B) E 3 (C) DO MÊS DE AGOSTO, EM 2010.



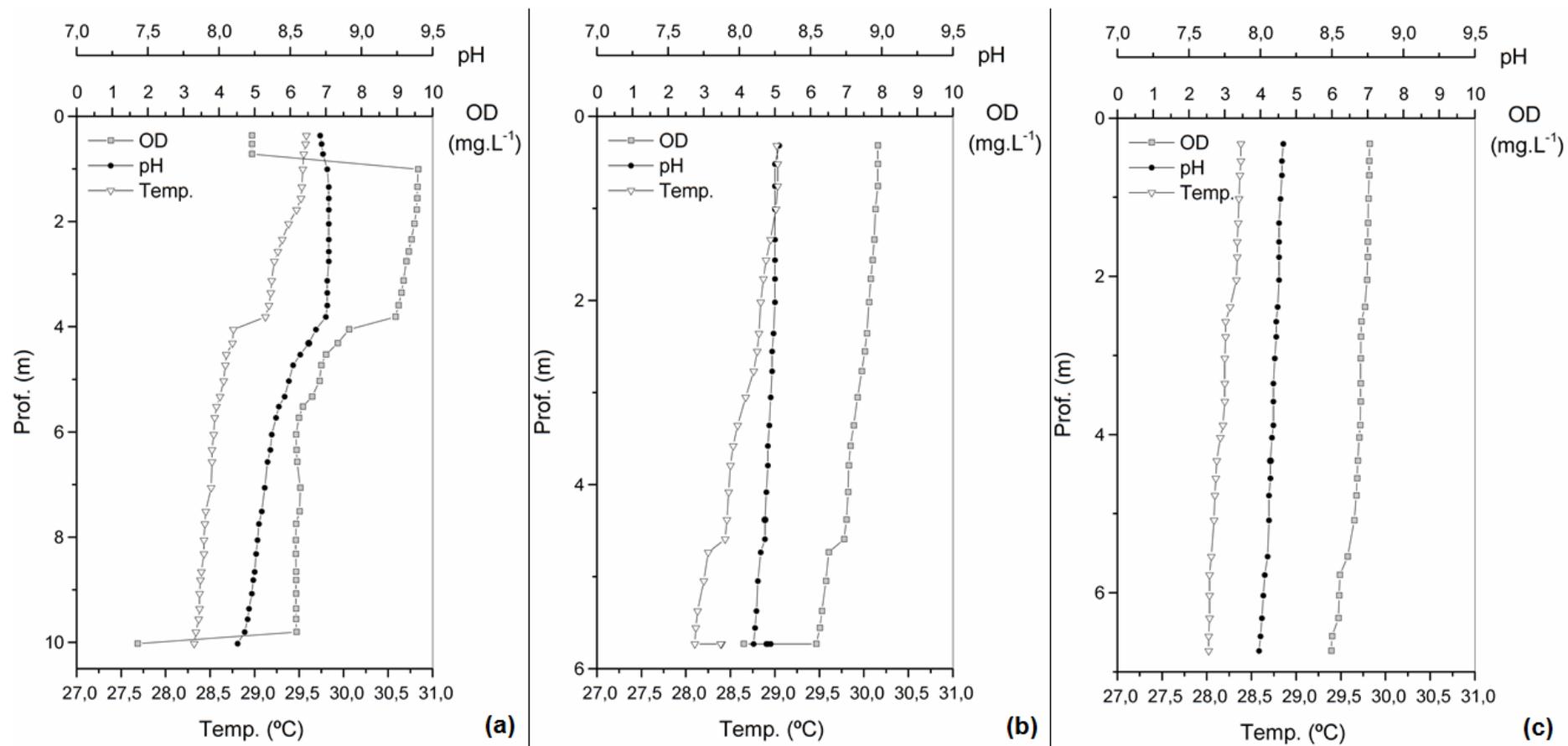
Fonte: Próprio autor.

ANEXO D – PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA, OD E pH DOS PONTOS 1 (A), 2 (B) E 3 (C) DO MÊS DE SETEMBRO, EM 2010.



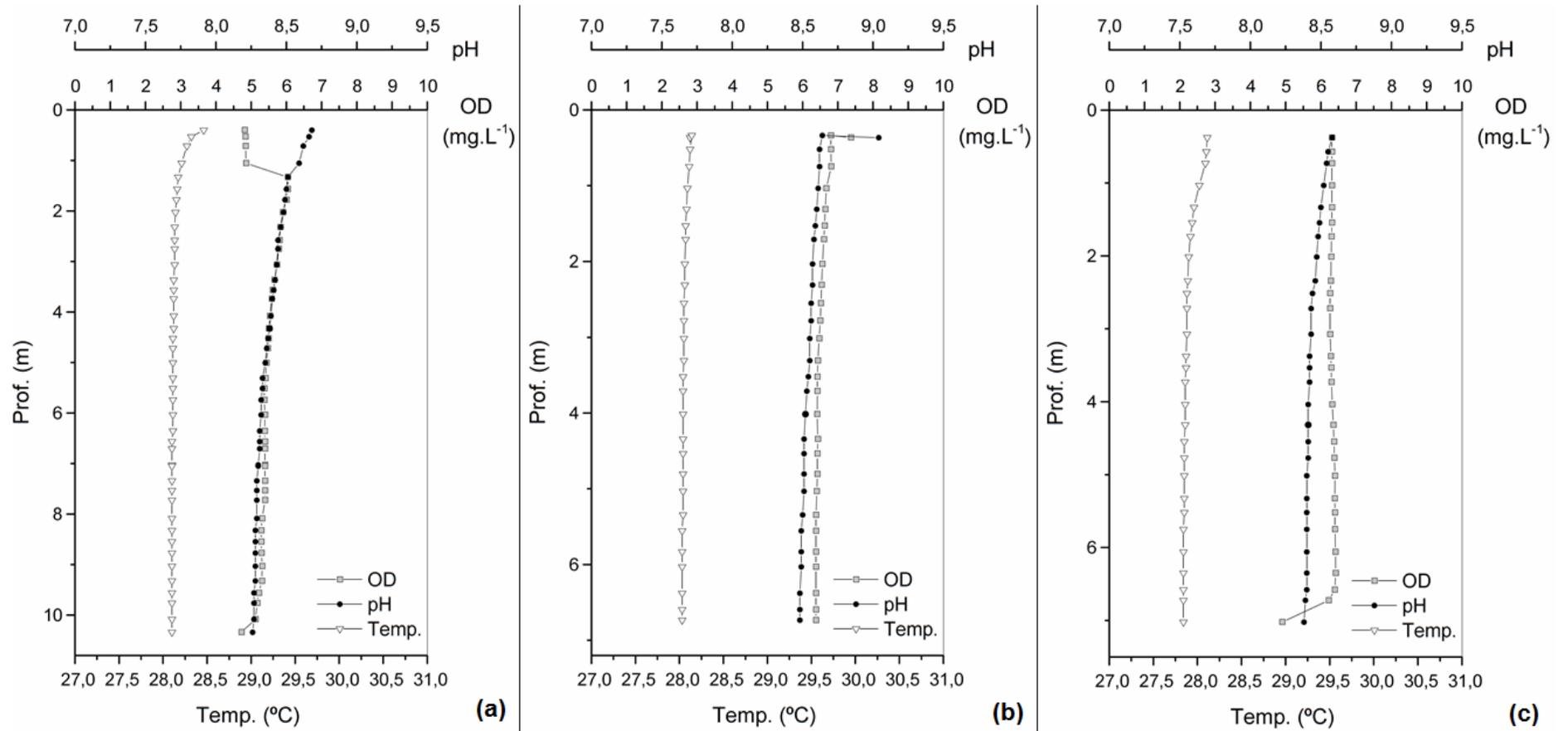
Fonte: Próprio autor.

ANEXO E – PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA, OD E pH DOS PONTOS 1 (A), 2 (B) E 3 (C) DO MÊS DE DEZEMBRO, EM 2010.



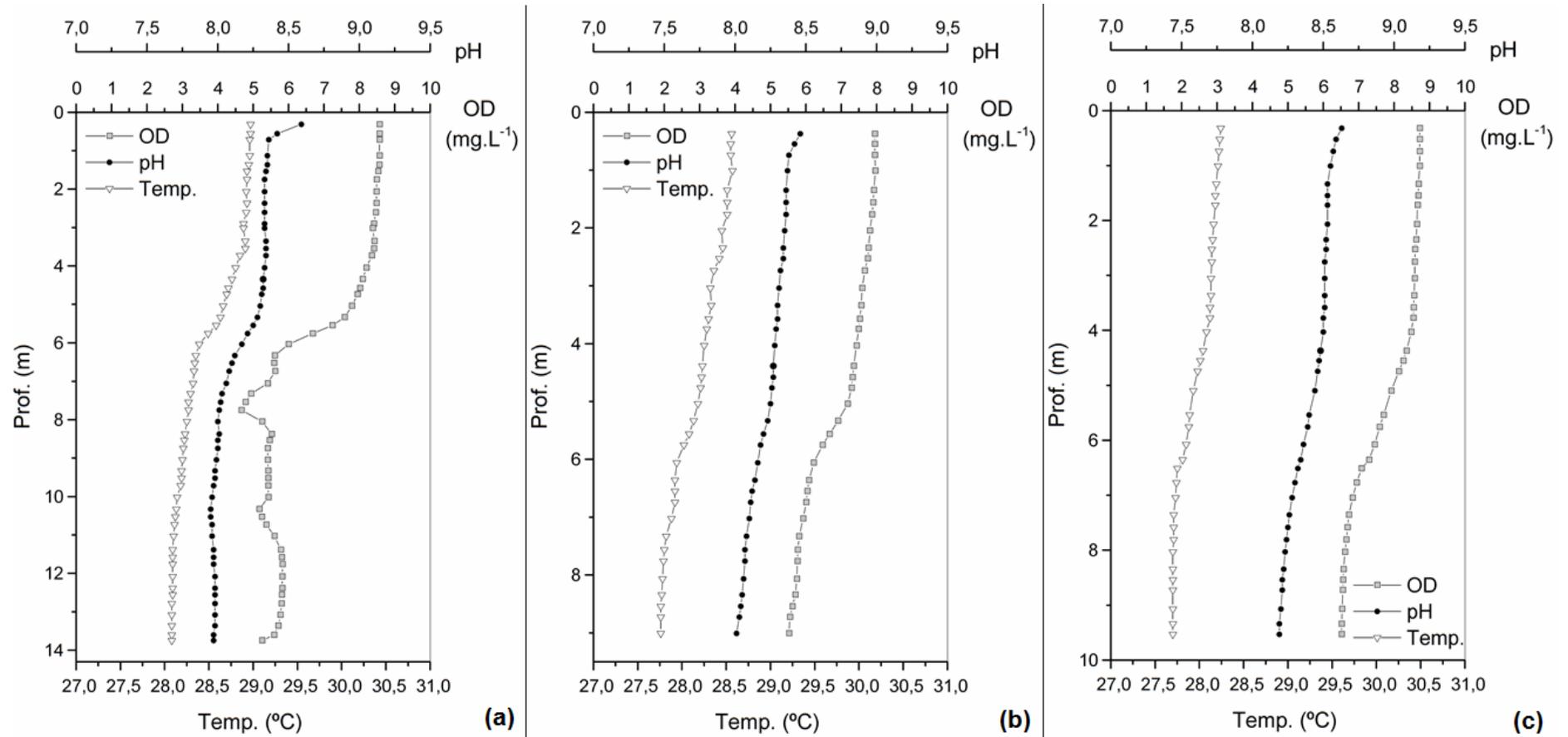
Fonte: Próprio autor.

ANEXO F – PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA, OD E pH DOS PONTOS 1 (A), 2 (B) E 3 (C) DO MÊS DE JANEIRO, EM 2011.



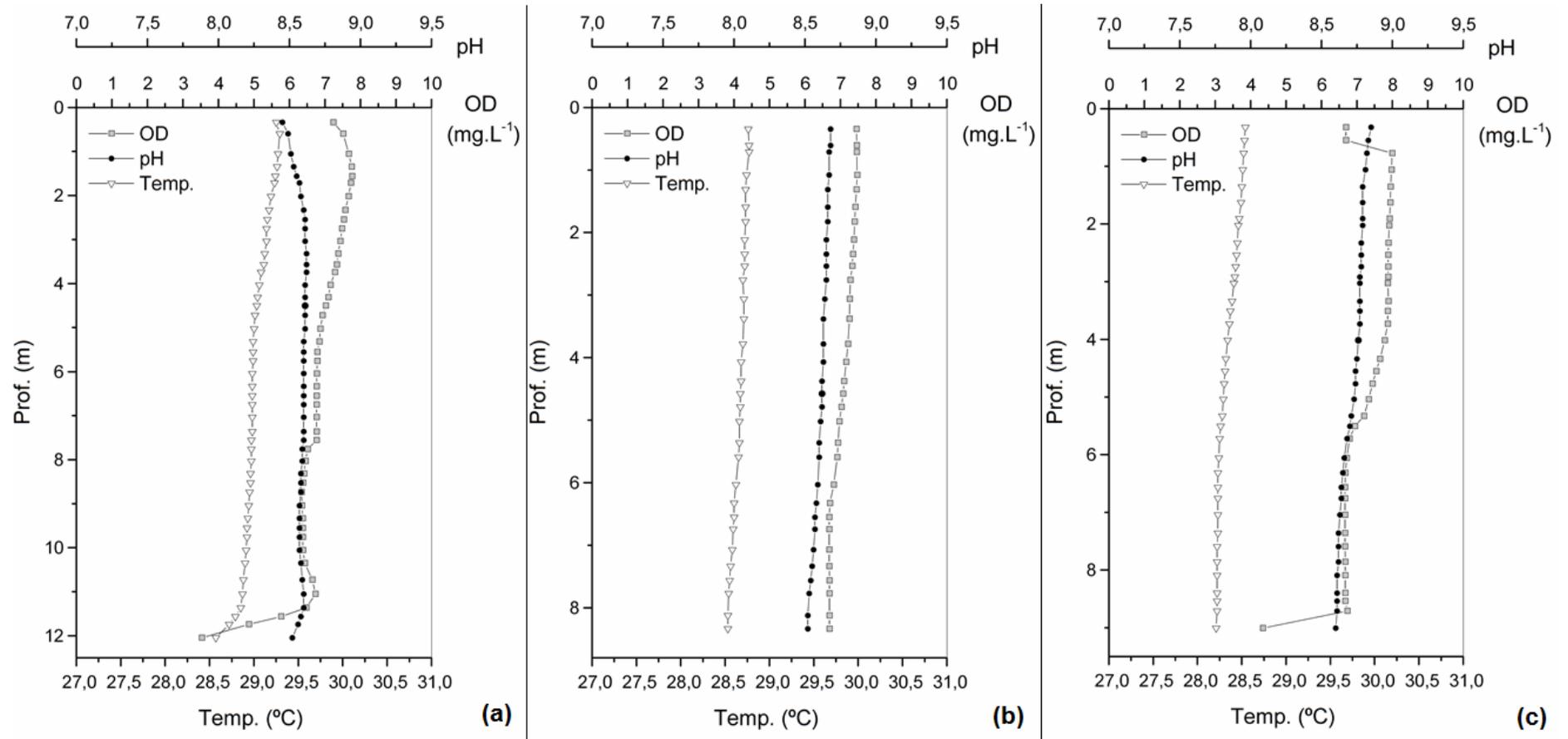
Fonte: Próprio autor.

ANEXO G – PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA, OD E pH DOS PONTOS 1 (A), 2 (B) E 3 (C) DO MÊS DE OUTUBRO, EM 2011.



Fonte: Próprio autor.

ANEXO H – PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA DA ÁGUA, OD E pH DOS PONTOS 1 (A), 2 (B) E 3 (C) DO MÊS DE NOVEMBRO, EM 2011.



Fonte: Próprio autor.