

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS

**Avaliação comparativa das características gerais das lagoas do Violão,
Amendoim e Três Irmãs, Serra Sul de Carajás**
Relatório Final - Projeto Paleoclima

José Tasso F. Guimarães

Prafulla K. Sahoo

Ronnie Cley de O. Alves

Pedro Walfir M. Souza-Filho

Márcio S. da Silva

Gisele L. Nunes

Guilherme C. de Oliveira

Belém/PA

Julho/2019

Título: Avaliação comparativa das características gerais das lagoas do Violão, Amendoim e Três Irmãs, Serra Sul de Carajás.	
PROD. TEC. ITV DS – N008/2019	Revisão 00
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública	

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G963	Guimarães, José Tasso Félix Avaliação comparativa das características gerais das lagoas do Violão, Amendoim e Três Irmãs, Serra Sul de Carajás. / José Tasso Félix Guimarães ... [et. al.]. – Belém, 2019. 63 p.: il. 1. Geologia ambiental - Serra Sul (Carajás, PA). 2. Hidrologia - Sedimentação - Serra Sul (Carajás, PA). 3. Hidrogeologia - Sedimentação - Serra Sul (Carajás, PA). I. Título. CDD. 23. ed. 551.48098115
------	--

Bibliotecária responsável: Nisa Gonçalves – CRB 2 – 525

RESUMO

Com base na integração de dados geológicos, geomorfológicos, sísmicos, botânicos, sedimentológicos, geoquímicos, hidroquímicos e microbiológicos das lagoas de canga, e suas respectivas bacias de contribuições, da Serra Sul de Carajás foi possível um avanço no entendimento de suas funcionalidades físicas, químicas e biológicas. Os tipos de sedimentos de fundo das lagoas são produtos da litologia da bacia de drenagem, com rochas altamente resistentes ao intemperismo físico, e do baixo fluxo de energia das águas das lagoas favorecendo o intemperismo químico e deposição predominante por suspensão. O influxo de material orgânico para as lagoas é muito elevado e é produto da vegetação de cobertura da bacia, das macrófitas e da produtividade primária, cujos macrofragmentos são rapidamente decompostos no fundo das lagoas. Os sedimentos das lagoas do Violão, Amendoim, Três Irmãs 1 e 3 podem ser caracterizados como predominantemente de origens detríticas ou mistas (detrítica-orgânicos), enquanto os sedimentos da Lagoa Três Irmãs 2 são predominantemente orgânicos. Em comparação com outros lagos e lagoas do Brasil e do mundo, as lagoas de Carajás apresentam baixa concentração de nutrientes e produtividade muito baixa. As lagoas apresentam os mesmos grupos taxonômicos, porém com abundância variável. A análise funcional realizada para as funções biológicas mais representativas sugere uma alta afinidade funcional dessas nas lagoas estudadas. A avaliação comparativa das características gerais das lagoas indica que estas possuem similaridades em suas características abióticas (morfometria, sismoestratigrafia, geoquímica, sedimentos de fundo e qualidade de água) e bióticas (microrganismos e palinomorfos).

Palavras-chave: Lagoa de canga. Serra dos Carajás (PA). Geologia ambiental.

RESUMO EXECUTIVO

Estudos multi e transdisciplinares realizados ao longo de 2012-2018 nas lagoas sobre canga da Serra Sul de Carajás indica que estas possuem similaridades em suas características abióticas (morfometria, sismoestratigrafia, geoquímica, sedimentos de fundo e qualidade de água) e bióticas (microrganismos e palinomorfos).

TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos parâmetros morfométricos utilizados neste estudo	14
Tabela 2 - Descrição dos pontos de coleta de águas das lagoas estudadas. Ver Figura 1 para visualização dos pontos amostrais	18
Tabela 3 - Características morfométricas das bacias hidrográficas das lagoas da Serra Sul de Carajás	20
Tabela 4 - Parâmetros morfométricos das lagoas da Serra Sul de Carajás	24
Tabela 5 - Classificação das águas das lagoas baseada na Resolução CONAMA 357 (MMA, 2005). VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3. Cl.=Classe. As concentrações apresentadas são mínima (média) máxima	38
Tabela 6 - Classes de potencial de risco a eutrofização para águas superficiais relacionadas à concentração de nitrogênio. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3	39
Tabela 7 - Classificação das águas das lagoas com base nos coliformes fecais (E. coli). VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3	40
Tabela 8 - Probabilidade de efeitos a saúde devido a exposição a cianobactérias Chorus e Bartram (1999). VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3	41

FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico da Serra Sul de Carajás (S11) com a localização das lagoas do Violão (VL), Amendoim (AM) e Três Irmãs (LTi).....	11
Figura 2 - Mapa geomorfológico, litológico e de vegetação das Lagoas do Violão e Amendoim.	21
Figura 3 - Mapa geomorfológico, litológico e de vegetação das Lagoas Três Irmãs.....	22
Figura 4 - Perfis topográficos nas lagoas do Violão e Amendoim. Ver localização dos perfis na Figura 2.	23
Figura 5 - Perfis topográficos nas lagoas Três Irmãs. Ver localização dos perfis na Figura 3.	23
Figura 6 - Mapa batimétrico das lagoas da Serra Sul de Carajás. A) Lagoa do Violão. B) Lagoa do Amendoim. C) Lagoa Três Irmãs.	25
Figura 7 - Análise de agrupamento realizada a partir dos parâmetros de apresentados na Tabela 4. LV = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTI-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTI-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTI-3 = Lagoa Três Irmãs-3.....	26
Figura 8 - Mapa de fácies sedimentares das lagoas do Violão (A), Amendoim (B) e Três Irmãs (C).	27
Figura 9 - Perfis sísmicos mostrando múltiplos refletores, embasamento rochoso e preenchimento sedimentar da Lagoa do Violão. A localização dos perfis é ilustrada no mapa batimétrico.	28
Figura 10 - Perfis sísmicos mostrando múltiplos refletores, embasamento rochoso e preenchimento sedimentar da Lagoa do Amendoim. A localização dos perfis é ilustrada no mapa batimétrico.	29
Figura 11 - Perfis sísmicos mostrando múltiplos refletores, embasamento rochoso e preenchimento sedimentar da Lagoa Três Irmãs 1 (LTi-1). A localização dos perfis é ilustrada no mapa batimétrico.	30
Figura 12 - Depósitos e processos de sedimentação da Lagoa do Violão. I, II e III – Unidades sismoestratigráficas.....	31
Figura 13 - Box plots mostrando as concentrações elementares seletivas em sedimentos lacustres superficiais das lagoas estudadas. VI = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTI-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTI-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTI-3 = Lagoa Três Irmãs-3. REE = terras raras, COT = carbono orgânico total.	32
Figura 14 - Análise de agrupamento hierárquico (HCA) dos sedimentos lacustres com base nas concentrações dos elementos maiores, traços e terras das lagoas estudadas. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTI-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTI-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTI-3 = Lagoa Três Irmãs-3.	33
Figura 15 - Composições médias dos sedimentos lacustres normalizados em relação à Crosta Continental Superior (CCS), bem como das crostas lateríticas (CLs) que afloram nas bacias de contribuição das lagoas. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTI-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTI-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTI-3 = Lagoa Três Irmãs-3. Crosta CCS (Upper Continental Crust).....	34

Figura 16 - Análise fatorial dos elementos maiores, traços, terras raras e carbono orgânico total nos sedimentos lacustres das lagoas das lagoas estudadas. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3.....	35
Figura 17 - Perfis verticais de temperatura das lagoas em estudo. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3.	37
Figura 18 - Estado trófico das lagoas Violão (VL), Amendoim (AM), e Três Irmãs (LTi).....	40
Figura 19 - Distribuição especial de pólen e esporos nos sedimentos superficiais da Lagoa do Violão.....	42
Figura 20 - Distribuição espacial de pólen e esporos nos sedimentos superficiais da Lagoa do Amendoim.	44
Figura 21 - Curva de rarefação da riqueza de espécies gerada a partir das amostras de sedimento das lagoas Violão (V1 e V2), Amendoim (AM1 e AM2) e Três Irmãs (TI11, TI12, TI21, TI31, TI32 e TI33).....	46
Figura 22A - Classificação taxonômica das lagoas no âmbito de Filo. São mostradas as abundâncias relativas das 15 espécies mais frequentemente encontradas em cada uma das lagoas (V – Violão; AM – Amendoim; TI – Três Irmãs. O número indica o ponto de amostragem.....	47
Figura 22B - Classificação taxonômica das lagoas no âmbito de Espécies. São mostradas as abundâncias relativas das 15 espécies mais frequentemente encontradas em cada uma das lagoas (V – Violão; AM – Amendoim; TI – Três Irmãs. O número indica o ponto de amostragem.	48
Figura 23A - Análise de RDA das lagoas. 15 grupos taxonômicos (Filo) são diferenciados em 2 grupos (Figura 23-B) de acordo com a frequência com que cada grupo taxonômico é identificado. As linhas azuis indicam os fatores abióticos que são diferenciados com os grupos taxonômicos.	49
Figura 23B - A análise de agrupamentos, sugere a formação de 2 grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.44) indicados pelos retângulos em vermelho. A diferença entre os dois grupos também é significativa (H t2-test : T.2 = 144.92, df1 = 15, df2 = 14, p-value = 1.037e-12).....	50
Figura 24A - Análise de RDA das lagoas. 15 grupos taxonômicos (Espécie) são diferenciados em 3 grupos (Figura 23-B) de acordo com a frequência com que cada grupo taxonômico é identificado. As linhas azuis indicam os fatores abióticos que são diferenciados com os grupos taxonômicos.....	51
Figura 24B - A análise de agrupamentos, sugere uma formação de três grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.56) indicados pelos retângulos em vermelho. A diferença entre grupos é significativa: i) [C1, C2] H t2-test : T.2 = 7.6242, df1 = 15, df2 = 14, p-value = 0.000235; ii) [C1, C3] H t2-test : T.2 = 12.86, df1 = 15, df2 = 14, p-value = 1.071e-05). Observa-se uma maior diferenciação entre os grupos C1 e C3.....	52
Figura 25 - Análise comparativa das 50 principais espécies de bactérias que ocorrem nas lagoas amostradas.....	53

Figura 26A - Perfil funcional a partir de análise de Gene Ontology, 50 categorias funcionais mais representadas. Os perfis funcionais das lagoas foram analisados a partir de anotações de Biological Process (BP).	54
Figura 26B - Perfil funcional a partir de análise de Gene Ontology, 50 categorias funcionais mais representadas. Os perfis funcionais das lagoas foram analisados a partir de anotações de Molecular Function (MF).	54
Figura 26C - Perfil funcional a partir de análise de Gene Ontology, 50 categorias funcionais mais representadas. Os perfis funcionais das lagoas foram analisados a partir de anotações de Cellular Component (CC).	55
Figura 27A - A análise de agrupamentos (GO = BP), sugere uma formação de dois grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.74) indicados pelos retângulos em vermelho.....	56
Figura 27B - A análise de agrupamentos (GO = MF), sugere uma formação de dois grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.73) indicados pelos retângulos em vermelho.....	57
Figura 27C - A análise de agrupamentos (GO = CC), sugere uma formação de dois grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.72) indicados pelos retângulos em vermelho.....	58

SUMÁRIO

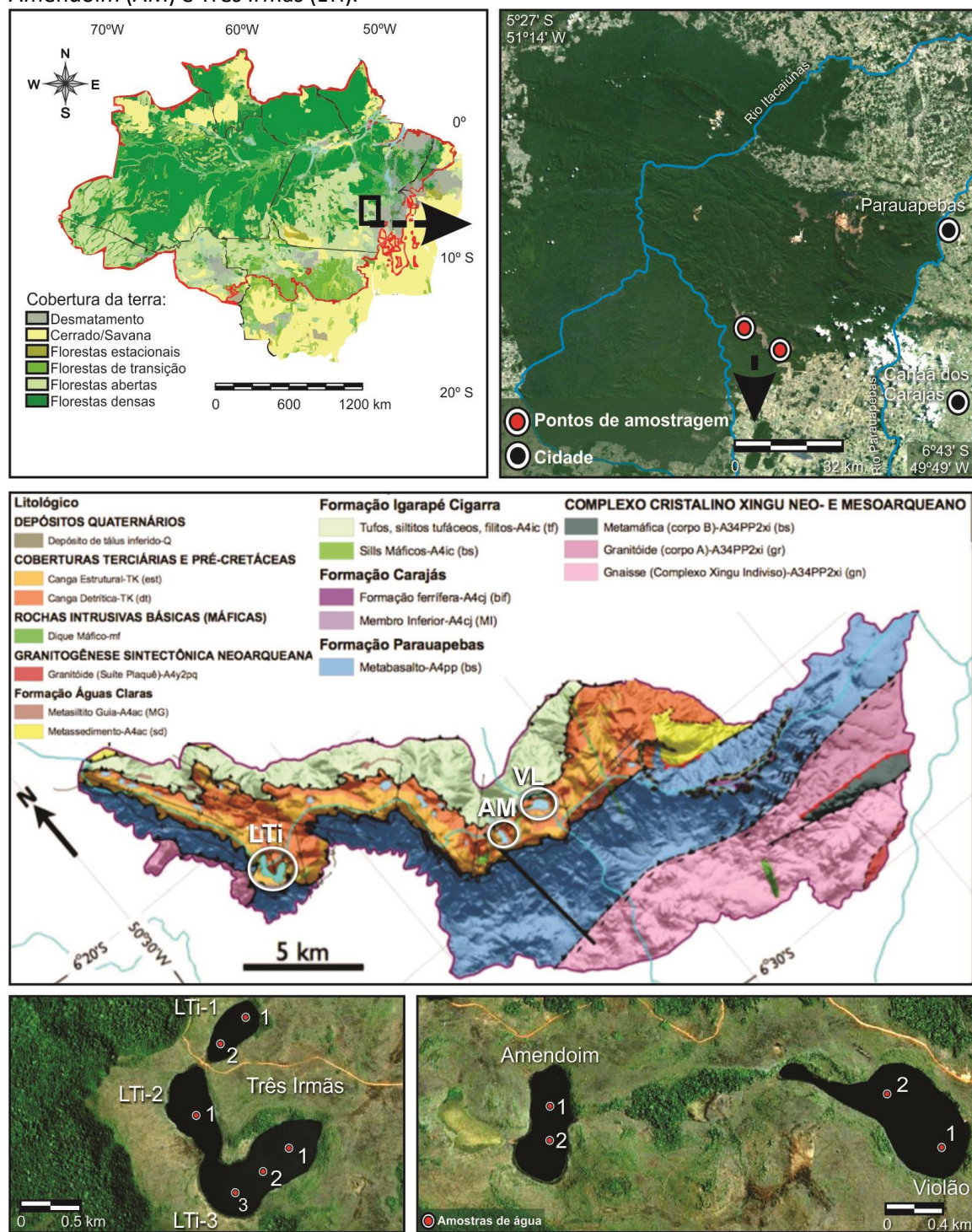
1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	12
3.1 ÁREA DE ESTUDO E LOCAIS DE AMOSTRAGEM	12
3.2 LEVANTAMENTO MORFOLÓGICO DAS BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO DAS LAGOAS	13
3.3 LEVANTAMENTO MORFOMÉTRICO DAS LAGOAS.....	13
3.4 LEVANTAMENTO SEDIMENTOLÓGICO DAS LAGOAS	15
3.5 LEVANTAMENTO SISMOESTRATIGRÁFICO DAS LAGOAS	16
3.6 LEVANTAMENTO GEOQUÍMICO DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DAS LAGOAS.....	16
3.7 LEVANTAMENTO DA QUALIDADE DE ÁGUA DAS LAGOAS.....	17
3.8 CHUVA POLÍNICA MODERNA.....	18
3.9 ANÁLISE GENÔMICA DOS SEDIMENTOS DAS LAGOAS	19
4 RESULTADOS.....	20
4.1 MORFOLOGIA DAS BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO DAS LAGOAS DA SERRA SUL DE CARAJÁS	20
4.2 MORFOMETRIA DAS LAGOAS DA SERRA SUL DE CARAJÁS.....	24
4.3 SEDIMENTOLOGIA DAS LAGOAS.....	26
4.4 ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DAS LAGOAS	28
4.5 ANÁLISE GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS DAS LAGOAS	31
4.6 ANÁLISE DA QUALIDADE DE ÁGUA DAS LAGOAS	36
4.7 CHUVA POLÍNICA MODERNA.....	41
4.8 ANÁLISE GENÔMICA DOS SEDIMENTOS DAS LAGOAS	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
6 CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

O estudo das lagoas do platô S11 da Serra Sul dos Carajás está sendo desenvolvido desde 2013 no âmbito do projeto “Paleoclima - Evidências Geológicas, Geomorfológicas e Palinológicas do Paleoclima e seus efeitos na Floresta Tropical do Sudeste da Amazônia Oriental durante o Cenozoico Superior” em execução no Instituto Tecnológico Vale Desenvolvimento Sustentável (ITVDS) com sede em Belém. O projeto é financiado essencialmente pela Vale, com contribuição subordinada do CNPq e FAPESPA, e conta com apoio direto das Diretorias de Planejamento de Ferrosos (DIPF) e de Ferrosos Norte (DIFN) da Vale, as quais interagem permanentemente com a equipe do projeto e fornecem suporte logístico.

O estabelecimento do clima quente e úmido na região Amazônica está relacionado à orogenia Andina durante o Cenozóico superior, quando as paleoaltitudes desta cordilheira tornaram-se barreira orográfica, aprisionando massas de ar úmidas provenientes do oceano. Este cenário climático favoreceu um intenso modelamento da paisagem que culminou com a evolução dos perfis lateríticos amazônicos, e desenvolvimento de extensos depósitos minerais e feições doliniformes. Estas últimas estão relacionadas com a formação de lagoas sobre as crostas ferruginosas (canga) da Serra dos Carajás, sudeste da Amazônia, como as lagoas do Violão, Amendoim e Três Irmãs. Os sedimentos depositados sobre estas lagoas contêm valiosos registros da evolução do clima, relevo e vegetação desta região durante o Quaternário superior. Assim, a equipe do ITV DS vem integrando dados geológicos, geomorfológicos, sísmicos, botânicos, sedimentológicos, geoquímicos, hidroquímicos e microbiológicos para análise ambiental atual e pretérita das lagoas de canga, e suas respectivas bacias de contribuições, da Serra Sul de Carajás (Figura 1). Desta maneira, este projeto também está permitindo um avanço significativo do conhecimento sobre essas lagoas, que é necessário para o entendimento de suas funcionalidades físicas, químicas e biológicas.

Figura 1 - Mapa geológico da Serra Sul de Carajás (S11) com a localização das lagoas do Violão (VL), Amendoim (AM) e Três Irmãs (LTi).



Fonte: próprio autor (2019).

2 OBJETIVOS

Este projeto objetiva identificar e discutir com base em evidências geológicas, geomorfológicas, sedimentológicas e palinológicas as mudanças paleoclimáticas cenozóicas e seus reflexos na floresta tropical úmida na região sudeste da Amazônia através de um estudo interdisciplinar, que são fundamentais para o entendimento das funcionalidades físicas, químicas e biológicas das lagoas em canga da Serra Sul dos Carajás.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 ÁREA DE ESTUDO E LOCAIS DE AMOSTRAGEM

A área de estudo está localizada na Serra Sul da Floresta Nacional de Carajás, sudeste da Amazônia, que corresponde a um platô laterítico estreito com direção NW-SE (Figura 1). Este platô apresenta altitudes de aproximadamente 730 m, elevando-se sobre uma paisagem dominada por florestas ombrófilas. Conforme a geologia regional, esta região representa a maior província tectônica Arqueana do Craton Amazônico (MACAMBIRA & LAFON, 1995; RÄMÖ *et al.*, 2002), que inclui rochas metavulcânicas de baixo grau máficas, intermediárias e félsicas da Formação Parauapebas e formações ferríferas bandadas (BIFs) da Formação Carajás (OLSZEWSKI *et al.*, 1989). Os maiores depósitos de ferro estão associados com esta última formação. Sob condições de clima tropical úmido, crostas lateríticas (canga) foram extensamente desenvolvidas sobre os BIFs, produzindo canga de minério e detrítica (Golder, 2010; Figura 1). A superfície do platô apresenta várias lagoas isoladas da influência fluvial e situadas em um sistema de bacias de contribuição restritas ou fechadas formadas por processos estruturais e intempéricos dos perfis da canga (MAURITY & KOTSCHOUBEY, 1995). Estas lagoas constituem ambientes deposicionais com espaço de acomodação variável e podem ser classificadas como ativas e inativas ou preenchidas. As lagoas do Violão, Amendoim e Três Irmãs, Serra Sul de Carajás representam ambientes sedimentares ativos (Figura 1). A lagoa Três Irmãs corresponde a três lagoas parcialmente conectadas durante o período chuvoso.

A tipologia vegetal da Serra dos Carajás é representada principalmente por florestas ombrófilas densa e aberta, com ocorrência dispersa de florestas decíduais, nas encostas do platô. Nas áreas de dominância da formação ferrífera, a vegetação dominante cede lugar a uma vegetação de campos rupestres que é desenvolvida sobre a canga (vegetação de canga) (SKIRYCZ *et al.*, 2014; GUIMARÃES *et al.*, 2014; PORTO & SILVA, 1989; NUNES *et al.*, 2015). Capões florestais podem ser observados próximo às margens das lagoas e em algumas depressões topográficas. Brejos também ocorrem nas margens das lagoas preenchidas, e são recobertos principalmente por palmeiras, enquanto que macrófitas ocupam suas porções centrais.

O clima regional é de monções tropicais, com uma média anual da temperatura de aproximadamente 26°C (ALVARES *et al.*, 2013). A precipitação total anual varia de 1.800 a 2.300 mm, com um total de ~ 1.550mm durante a estação chuvosa (novembro a maio) e ~ 350 mm durante a estação seca (junho a outubro) (MORAES *et al.*, 2005). Particularmente para Serra Sul de Carajás, a média anual da temperatura é ~ 25.5°C, e os valores médios mínimos e máximos são de 20°C e 31°C, respectivamente (SAHOO *et al.*, 2016). A

precipitação total anual é ~ 2.050 mm, com ~1.860 mm durante a estação chuvosa (outubro a maio) e ~190 mm durante a estação seca (junho a setembro).

3.2 LEVANTAMENTO MORFOLÓGICO DAS BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO DAS LAGOAS

A fim de satisfazer os requisitos para o mapeamento morfológico detalhado das bacias de contribuição das lagoas em estudo, uma imagem multiespectral de alta resolução espacial do satélite Worldview-2 foi adquirida em 19 de maio de 2013. Um modelo digital do terreno (MDT) foi elaborado a partir de dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*) adquiridos em 23 de novembro de 2009. A imagem WorldView-2 apresenta 8 bandas multiespectrais com resolução espacial de 50 cm na banda pancromática e 2 m de resolução nas bandas multiespectrais (UPDIKE & COMP, 2010). O tratamento de dados de sensoriamento remoto foi realizado utilizando o *software* PCI Geomatica 13. As imagens foram ortorretificadas e os valores digitais foram posteriormente convertidos para refletância do terreno através do algoritmo ATCOR. A imagem foi usada para interpretação das feições morfológicas do relevo e também para a navegação em tempo real durante os levantamentos batimétricos e levantamento sísmicos.

O equipamento utilizado foi o LiDAR ALTM 2025 Optech Inc. com emissão de 25.000 pulsos de laser por segundo, e ângulo de varredura de até 20°, a uma altitude de até 1.000 m. Estes parâmetros resultaram na aquisição de seis pontos de elevação no terreno por m², e esta malha de pontos foi utilizada para a geração do MDT. Todos os mapeamentos planimétricos e altimétricos apresentados neste trabalho foram referenciados para o datum SIRGAS, na projeção UTM, zona 22.

3.3 LEVANTAMENTO MORFOMÉTRICO DAS LAGOAS

Os dados batimétricos das lagoas foram adquiridos pelos ecobatímetros Raytheon modelo DE719E e PC 2010 da SyQuest, operando na frequência de 200 kHz. Os dados adquiridos tanto pelo ecobatímetro, quanto pelo DGPS da TRIMBLE modelo AG-132, com correção diferencial por satélite, foram armazenados, monitorados e sincronizados em notebook através do software HYPACK SURVEY MAX 6.2B. Os arquivos digitais foram gravados na extensão (*.raw) e (*.xyz), no seguinte formato: GGA (dados de coordenadas a cada 1 segundo), VTG (dados de velocidade e rumo a cada 1 segundo) e DBS (dados de profundidade a cada 1 décimo segundo). Estes dados foram coletados a uma frequência de 10 Hz, ou seja, 10 medidas de profundidade por segundo, permitindo o registro contínuo dos dados batimétricos. Os dados de coordenadas (GGA) foram coletados com as projeções UTM e geográfica, ambas com o Datum WGS-84.

Durante a aquisição e processamento dos dados foi utilizado o software HYPACK MAX 6.2B. No processamento os dados foram editados para que os problemas ocorridos durante a aquisição fossem corrigidos, ou seja, retirada dos *spikes*. A correção do nível também foi realizada durante este processo. Os dados exportados no formato XYZ foram posteriormente processados no Golden Software Surfer 11 para geração dos mapas batimétricos, compilados a partir de um grid de aproximadamente 1 m para todas lagoas e incluiu uma busca no raio de 2,5 vezes o tamanho do *grid* e um fator de índice 5. Além disso,

o método de *Kriging* foi aplicado durante o processo de interpolação para geração dos mapas. Os mapas de contorno e coloração de todos os elementos foram realizados em função do teor em várias frequências cumulativas dos elementos a 0,5%, 1,5%, 4,0%, 8,0%, 15,0%, 25,0%, 40,0%, 60,0%, 75,0%, 85,0%, 92,0 %, 96,0%, 98,5% e 99,5%.

Para a análise de similaridade das lagoas foram calculados os atributos morfométricos proposta por Häkanson (2004), os quais estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos parâmetros morfométricos utilizados neste estudo.

Parâmetro	Sigla	Unidade	Descrição
Comprimento máximo	L _{max}	km	L _{max} é definido como a linha que conecta os dois pontos mais distantes da lagoa. Esta linha pode ser reta, em lagoas regulares, ou curva, em lagoas irregulares.
Largura máxima	B _{max}	km	B _{max} é definida como a linha que une os dois pontos mais distantes das margens sem ultrapassar seus limites.
Área	A	km	A área total da lagoa pode ser calculada através do mapeamento por imagem de satélite, em que cada ponto em torno da margem torna-se uma coordenada geográfica integrada a um arquivo vetorial.
Volume	V	m ³	Para o cálculo do volume em m ³ podem ser utilizadas duas fórmulas: a fórmula V _I utilizada para uma aproximação linear do volume e a fórmula V _p para uma aproximação parabólica.
Profundidade máxima	D _{max}	m	D _{max} é definida como a máxima profundidade conhecida para a lagoa. Ela pode ser estimada através dos arquivos <i>raster</i> da interface GIS.
Profundidade média	D _{mv}	m	D _{mv} em metros é definida como a razão entre o volume da lagoa (V _{em} m ³) e a área da lagoa (A _{em} m ²).
Profundidade relativa	D _{rel}	m	D _{rel} é definida como a razão entre a profundidade máxima (D _{max}) e o diâmetro médio da lagoa.
Perímetro	L _o	km	O perímetro pode ser estimado por programas de geoprocessamento (GIS), como os utilizados neste estudo também para calcular a área.
Índice de desenvolvimento de margem	L _d	adimensional	L _d é a razão entre a margem de uma lagoa qualquer e a margem de um círculo perfeito de área igual à da lagoa. De forma

			que, o seu valor reflete o quanto o contorno da lagoa se afasta do contorno de um círculo perfeito de mesma área.
Índice de desenvolvimento de volume	Vd	adimensional	Vd é definido pela razão entre o volume de água da lagoa e o volume de um cone com a base igual a da superfície da lagoa (A em km ²) e com altura igual a máxima profundidade (Dmax em m).
Índice morfométrico	MI	adimensional	MI é uma relação entre o perímetro e a profundidade média.

Fonte: próprio autor (2019).

3.4 LEVANTAMENTO SEDIMENTOLÓGICO DAS LAGOAS

Para a coleta de amostras de sedimentos de fundo das lagoas foi utilizado uma draga de sedimentos superficiais tipo *van veen*. O planejamento da coleta das amostras foi realizado sobre o mapa batimétrico das lagoas. Áreas batimetricamente uniformes tiveram uma densidade de pontos de amostragem menor que aquelas que apresentavam maior variação batimétrica. Desta forma, foram coletadas 40 amostras em cada uma nas lagoas do Violão e Amendoim, enquanto que nas lagoas Três Irmãs foram coletadas um total de 80 amostras: 24 amostras na Lagoa LTi-1, 32 amostras na Lagoa LTi-2 e 24 amostras na Lagoa LTi-3. Posteriormente, as amostras foram fotografadas, armazenadas em sacos plásticos e etiquetadas em campo.

Para uma avaliação granulométrica, cerca de 20 g de amostras de massa foram tratados com peróxido de hidrogénio para remover a matéria orgânica, seguido por um processo de dispersão com a solução de pirofosfato de sódio. Posteriormente, as amostras foram analisadas em um granulômetro a laser Mastersizer 2000. Os sedimentos foram caracterizados com base na proposta de classificação de Wentworth (1922) e Folk e Ward (1957). Considerando-se os componentes orgânicos, cerca de 10 g de amostra foram utilizados para a análise do carbono orgânico total (COT) por um analisador de combustão LECO CS-300. Assim, seguindo a classificação de sedimentos lacustres proposta por Schnurrenberger *et al.* (2003), as fácies sedimentares dessas amostras incluíram os dados inorgânicos e orgânicos para definição dos produtos e processos de sedimentação atuantes durante a deposição dos sedimentos de fundo das lagoas.

3.5 LEVANTAMENTO SISMOESTRATIGRÁFICO DAS LAGOAS

Perfilagens sísmicas rasas foram realizadas nas três lagoas usando o instrumento StrataBox™ Marine Geophysical da SyQuest, operando em uma frequência de 10 KHz, com resolução de estratos sedimentares de 6 cm à penetração até 40 m e resolução de profundidade de 0,1 m. Ao perfilador StrataBox foi acoplado um sistema de posicionamento global Trimble DGPS com correção diferencial pelo satélite ASAT da OmniStar Banda L1, com precisão submétrica. A profundidade do fundo foi configurada para até 20m, com um ganho “DC Gain” de 20 dB, e um *Bottom Triggered* de 1,5 dB. Os dados foram visualizados

com paletas de tom de cinza e de cores do oceano. A aquisição dos dados era visualizada em tempo real no monitor do computador, conforme o deslocamento da embarcação sobre a linha pré-definida, possibilitando assim o gerenciamento do percurso e garantindo melhor qualidade ao levantamento. O levantamento sísmico ainda não foi realizado na Lagoa Três Irmãs 2 e 3, pois o equipamento apresentou problemas técnicos durante o trabalho, e terá que ser reparado nos EUA. Contudo, isto não comprometeu a análise morfométrica das lagoas, uma vez que foi possível efetuar o levantamento batimétrico nas três lagoas.

O mapeamento dos refletores sísmicos e da geometria das unidades sismoestratigráficas foi realizado a partir dos métodos de interpretação sísmica propostos por Vail *et al.* (1977) e Catuneanu *et al.* (2009).

3.6 LEVANTAMENTO GEOQUÍMICO DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DAS LAGOAS

Os conteúdos de elementos maiores e menores foram medidos por espectrometria de emissão óptica com plasma (ICP-OES) e os de elementos traços por espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (ICP-MS) no Laboratório Acme Analytical, após a fusão por tetraborato de lítio seguido por digestão de ácido nítrico diluído em 0,2 g da amostra em pó. A precisão e a exatidão foram verificadas por análises paralelas de padrões de referência internacionais. O erro analítico para elementos maiores e menores é de ~2%, enquanto para elementos traços é de ~10%. Enxofre total (ET) e carbono orgânico total (COT) foram medidos a partir de um analisador de combustão LECO CS-300. Os teores médios dos elementos maiores, menores e traços foram normalizados para os valores da Crosta Continental Superior (CCS) (WEDEPOHL, 1995), folhelhos australianos Pós-Arqueano (PAAS) (TUREKIAN & WEDEPOHL, 1961), assim como em relação a rochas e solos das bacias de contribuição das lagoas para definição precisa da proveniência dos sedimentos.

Mapas de elementos geoquímicos foram compilados a partir das amostras coletadas nas lagoas do Violão e Amendoim (40 amostras cada), e nas lagoas Três Irmãs (80 amostras divididas em 24 amostras na Lagoa LTI-1, 32 amostras na Lagoa LTI-2 e 24 amostras na Lagoa LTI-3). Um *grid* de aproximadamente 100 m (Lagoa do Violão) e 30 m (lagoas do Amendoim e Três Irmãs) foi utilizado para geração dos mapas, incluindo uma busca no raio de 2,5 x o tamanho do *grid* e um fator de índice 5. Além disso, o método de *Kriging* foi aplicado durante o processo de interpolação para geração dos mapas. Os mapas de contorno e coloração de todos os elementos foram realizados em função do teor em várias frequências cumulativas dos elementos a cada 0.5%. As cores de contorno foram consistentes com as correspondentes cores de preenchimento obtidas a partir da utilização da tabela de cores *chroma depth*.

3.7 LEVANTAMENTO DA QUALIDADE DE ÁGUA DAS LAGOAS

Amostras de água foram coletadas sazonalmente (períodos seco e chuvoso) ao longo dos anos de 2013 a 2015 nas lagoas estudadas. De dois a três pontos de amostragem foram escolhidos para cada lagoa seguindo perfis longitudinais (Figura 1; Tabela 2), com base nos mapas batimétricos das lagoas. Nos pontos selecionados, foram determinados *in-situ* com uma sonda multiparâmetro Horiba W-20XD, parâmetros físico-químicos, tais como

temperatura, pH, oxigênio dissolvido (DO), turbidez e condutividade. A transparência da água foi obtida com um disco de Secchi. Amostras de água da superfície, meio e fundo, com base na lâmina d'água (Tabela 2), foram coletadas com uma garrafa Van Dorn e armazenadas segundo critérios definidos em ABNT (1987) e SMEWW (2005). Os parâmetros inorgânicos, orgânicos e bacteriológicos foram analisados pela SGS Geosol e Bioagri seguindo os procedimentos da EPA (2004), SMEWW (2005) e CETESB (2006).

A partir da análise dos dados analíticos, as lagoas foram classificadas de acordo com o Índice de Estado Trófico (IET), proposto por Carlson (1977), Lambou *et al.* (1983) e modificado por Lamparelli (2004). No presente estudo, os IET das lagoas foram obtidos usando o índice de Carlson modificado, amplamente utilizado na América do Sul (MOLISANI *et al.*, 2010), e calculado a partir das seguintes equações:

- (1) $IET (Cl-a) = 10 (6 - (0,92 - 0,34(\ln Cl-a/\ln 2)))$
- (2) $IET (FT) = 10 (6 - (0,92 - 0,34(\ln FT) - \ln 2))$
- (3) $IET (PS) = 10 (6 - ((\ln PS)/\ln 2))$

Onde: Cl-a = Clorofila-a ($\mu\text{g/l}$); FT = Fósforo Total ($\mu\text{g/l}$), PS = Profundidade Secchi e $\ln$ = logaritmo natural.

Os limites estabelecidos para as diferentes classes de trofia são: ultraoligotrófico ($IET \leq 47$), oligotrófico ($47 < IET \leq 52$), mesotrófico ($52 < IET \leq 59$), eutrófico ($59 < IET \leq 63$), supereutrófico ($63 < IET \leq 67$) e hipereutrófico ($IET > 67$). O IET final foi à média aritmética simples dos índices anuais relativos Cl-a, FT e PS.

A qualidade das águas das lagoas foi avaliada com base na legislação CONAMA 357/2005 (MMA, 2005) e guias internacionais como a Canadian Drinking Water Quality (2008), WHO (2008), e Drinking Water Directives EU (1998). Estas normas descrevem separadamente a concentração e mudanças de cada parâmetro. O Índice de Qualidade da Água (IQA) foi aplicado para sintetizar os múltiplos parâmetros dentro uma unidade única. O IQA foi calculado pelo produto ponderado da qualidade da água correspondente as variáveis: temperatura da amostra, pH, OD, demanda bioquímica de oxigênio (DBO5, 20-5 dias, 20°C), coliformes fecais, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais e turbidez (CETESB, 2003). Os indicadores de qualidade da água, a partir do IQA são: ótima ($80 \leq IQA \leq 100$), boa ($52 \leq IQA \leq 80$), regular ($37 \leq IQA \leq 52$), ruim ($20 \leq IQA \leq 37$) e péssima ($0 \leq IQA \leq 20$) (CETESB, 2003).

Tabela 2 - Descrição dos pontos de coleta de águas das lagoas estudadas. Ver Figura 1 para visualização dos pontos amostrais.

Lagoas	Pontos amostrais	Coordenadas (UTM) 22M		Profundidade da lâmina d'água (m)	
		Latitude (m S)	Longitude (m W)	Chuvoso	Seco
Violão	VL1	9292460	571649	9	7
	VL2	9292734	571391	9	7
Amendoim	Am1	9292726	569494	5	3

	Am2	9292444	569474	8	6
Três Irmãs	LTi1-1	9298400	561184	3,5	2
	LTi1-2	9298260	561074	3	2
	LTi2-1	9297791	560824	1	0,5
	LTi3-1	9297641	561542	12	10
	LTi3-2	9297473	561348	13	11
	LTi3-3	9297320	561163	9	7

Fonte: próprio autor (2019).

3.8 CHUVA POLÍNICA MODERNA

A análise da chuva polínica moderna tem sido utilizada com sucesso para definir indiretamente a cobertura vegetal das bacias de contribuição (sinal local) das lagoas dos platôs da Serra dos Carajás, bem como a vegetação de suas encostas (sinal regional) (GUIMARÃES *et al.*, 2014; GUIMARÃES *et al.*, 2016). Além disso, estes estudos podem fornecer subsídios para determinar com precisão a extensão geográfica das espécies de canga desta região. Assim, cerca de 1-2 cm³ das amostras de sedimentos superficiais das lagoas do Violão, Amendoim e Três Irmãs foram tratadas com técnicas clássicas da palinologia que incluem a acetólise. Um tablete de esporos de *Lycopodium* com 20,848 ± 3457 esporos/tablete foi adicionado em cada amostra antes do tratamento químico para o cálculo da concentração de pólen. Os grãos foram identificados com o auxílio de um microscópio ótico com luz transmitida Zeiss Imager M2. A identificação foi realizada pela comparação com literatura especializada (ROUBIK & MORENO, 1991; CARREIRA *et al.*, 1996; COLINVAUX *et al.*, 1999), atlas de pólen de Carajás (CARREIRA & BARTH, 2003) e coleção de referência ITV/GABAN-Vale. Os grãos de pólen foram agrupados em campos rupestres, formações florestais e macrófitas de acordo com estudos anteriores (NUNES, 2009; NUNES *et al.*, 2015; GUIMARÃES *et al.*, 2014; REIS *et al.*, 2017), enquanto os esporos foram agrupados em samambaias, algas e fungos. Estes dados foram distribuídos espacialmente no software Surfer 11 (GOLDEN SOFTWARE, 2012).

3.9 ANÁLISE GENÔMICA DOS SEDIMENTOS DAS LAGOAS

3.9.1 Pontos de amostragem

Para os estudos de genômica, foram coletadas em setembro de 2015 amostras de sedimento da superfície dos Lagoas Amendoim, Violão e Três Irmãs (Figura 1). Foram utilizados coletores do tipo Van Veen para amostragem dos sedimentos superficiais situados a profundidades variáveis entre 1 a 10 m. Um total de 10 amostras foram coletadas (Tabela 2), sendo armazenadas em tubos estéreis de polietileno, levadas ao laboratório e mantidas à -80° C até o processamento de extração de DNA. A amostragem foi feita em duplicata para as lagoas Amendoim (2 pontos) e Violão (2 pontos). No caso da lagoa Três Irmãs, em função de sua subdivisão em três lagoas menores, foram definidos 6 pontos de amostragem (Figura 1).

3.9.2 Preparação da amostra e sequenciamento

A extração do DNA genômico de 250 mg de sedimento foi feita por meio do kit PowerSoil DNA Isolation (MoBio) de acordo com as instruções dos fabricantes. A qualidade e a concentração foram medidas em eletroforese em gel de agarose (1%) e pelo fluorômetro Qubit 2.0 (ThermoFisher). A extração de DNA foi feita em duplicata para cada uma das 10 amostras e posteriormente misturadas. Um total de 10 bibliotecas de sequenciamento foi preparado usando o kit Sequencing Nextera XT DNA sample (Illumina, USA) seguindo as instruções do fabricante e sequenciadas pela plataforma Illumina MiSeq pela Plataforma de Sequenciamento de DNA (FIOCRUZ-Minas).

3.9.3 Análise de sequências e estatística

A análise multivariada de ordenação via RDA (Análise de Redundância) permite avaliar o efeito das características abióticas sobre a distribuição de microrganismos nas lagoas de canga. É também chamada de análise restrita, porque restringe a ordenação dos objetos de uma matriz por uma regressão linear múltipla de uma segunda matriz. Para o estudo das lagoas, a primeira matriz corresponde a distribuição dos microrganismos, também chamada de matriz de observação, e a segunda matriz busca avaliar os efeitos abióticos, neste caso, distribuição de elementos químicos, nas lagoas. A estratégia de RDA permite avaliar o quanto da estrutura da comunidade pode estar relacionada aos fatores abióticos. Porém assume que existe uma resposta linear das espécies aos gradientes abióticos. A RDA é conceitualmente equivalente a uma regressão linear múltipla multivariada, seguida de uma PCA (Análise de Componentes) baseada nos valores ajustados. Os resultados são apresentados a partir de uma visualização chamada de *bi-plot*.

A análise de agrupamento hierárquica (HCA) permite visualizar estrutura de grupos em uma matriz de observação. A partir da derivação de uma matriz de distância entre os componentes da matriz, é realizado um cálculo de proximidade buscando ligar os objetos que estejam mais próximos entre si. A característica de análise é exploratória, visando uma análise de associação entre componentes da matriz de observação. Para o estudo em questão, busca-se avaliar o grau de proximidade entre as lagoas a partir da matriz de observação. Não é definido, *a priori*, quantos agrupamentos serão calculados. O resultado da análise é visual, sendo apresentado na forma de um dendrograma, onde se observa um grupo maior, subdividido em grupos menores. A definição de potenciais grupos é obtida a partir de corte na altura (*tree cut*), no eixo y do dendrograma. Para se ter uma confiança estatística do corte, é necessário utilizar métodos de reamostragem (*Bootstrap*). O procedimento *Bootstrap* é uma técnica de reamostragem bastante utilizada em diferentes situações estatísticas. A base da técnica é a obtenção de um “novo” conjunto de dados, neste caso dendrograma, por reamostragem do conjunto de dados original. A técnica *Bootstrap* permite avaliar as estimativas dos parâmetros, por exemplo ponto de corte, mas também obter boas estimativas dos erros padrão da distribuição gerada pelas estimativas dos parâmetros nas iterações de reamostragem. Com a técnica de reamostragem, torna-se possível estimar valores “p” (ex. 95% de confiança) para uma conformação de grupos em dendrogramas. O agrupamento hierárquico calculado para as lagoas tomou como matriz de

observação os valores obtidos para as lagoas a partir dos dois principais componentes durante a análise de RDA. Agrupamentos com $p \geq 95\%$ são delineados a partir de retângulos (em vermelho) sobre o dendrograma.

4 RESULTADOS

4.1 MORFOLOGIA DAS BACIAS DE CONTRIBUIÇÃO DAS LAGOAS DA SERRA SUL DE CARAJÁS

A bacia de contribuição da Lagoa do Violão apresenta a maior área (1,8 km²) e maior variabilidade de altitude (164 m); enquanto a Lagoa Três Irmãs, formada por três corpos de água por vezes conectados, apresenta o maior perímetro (8,1 km) e menor variação de elevação (77,5 m). A bacia da Lagoa do Amendoim possui o menor perímetro e área dentre as três lagoas estudadas. A Tabela 3 apresenta as características morfométricas das lagoas da Serra Sul.

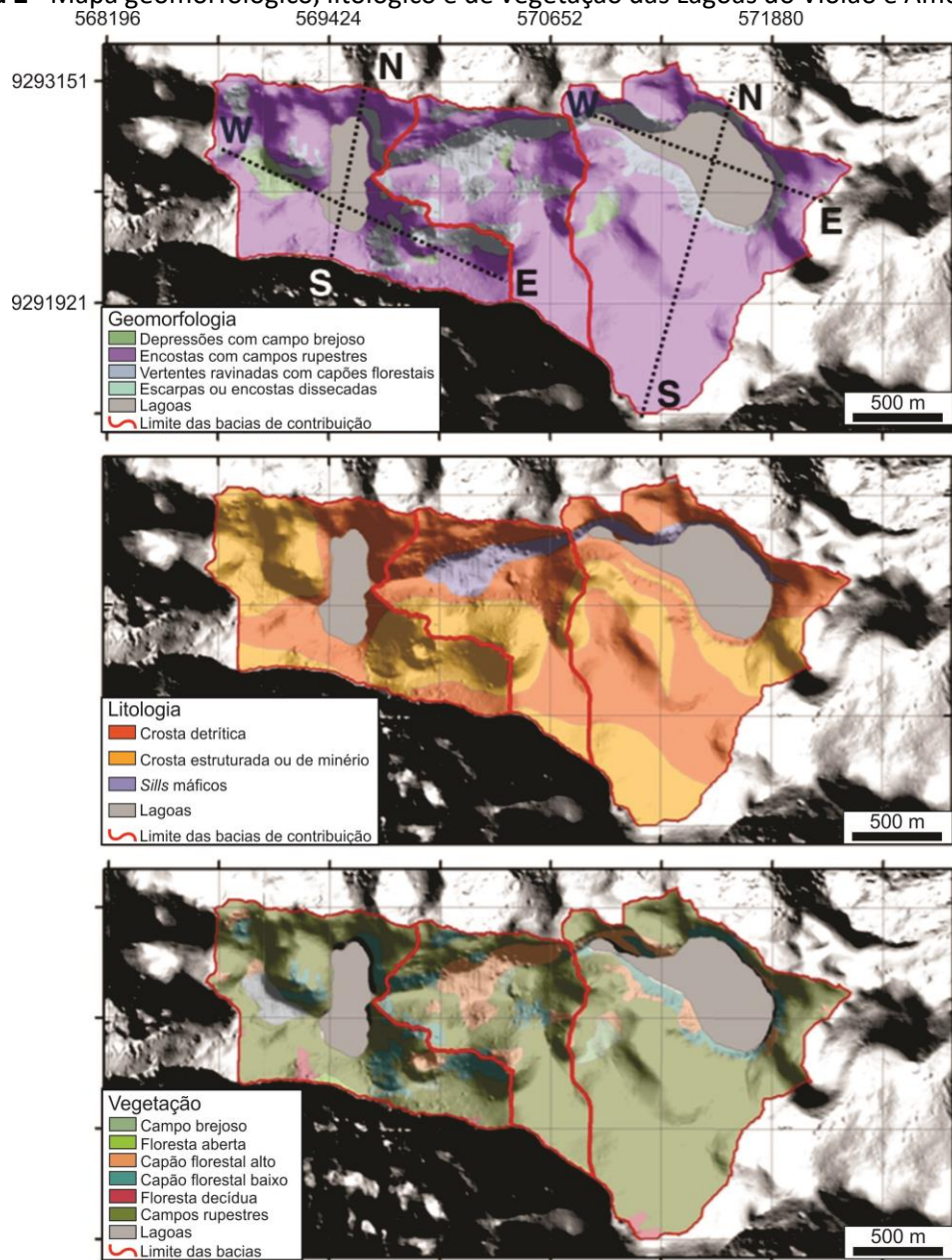
Tabela 3 - Características morfométricas das bacias hidrográficas das lagoas da Serra Sul de Carajás.

Bacia	Perímetro (km)	Área (km ²)	Elevação mínima (m)	Elevação máxima (m)	Variação de elevação (m)
Lagoa do Violão	7,77	1,83	723,3	877,4	164,1
Lagoa do Amendoim	6,89	1,20	700,5	834,5	134,0
Lagoa Três Irmãs	8,13	1,61	695,3	772,8	77,5

Fonte: próprio autor (2019).

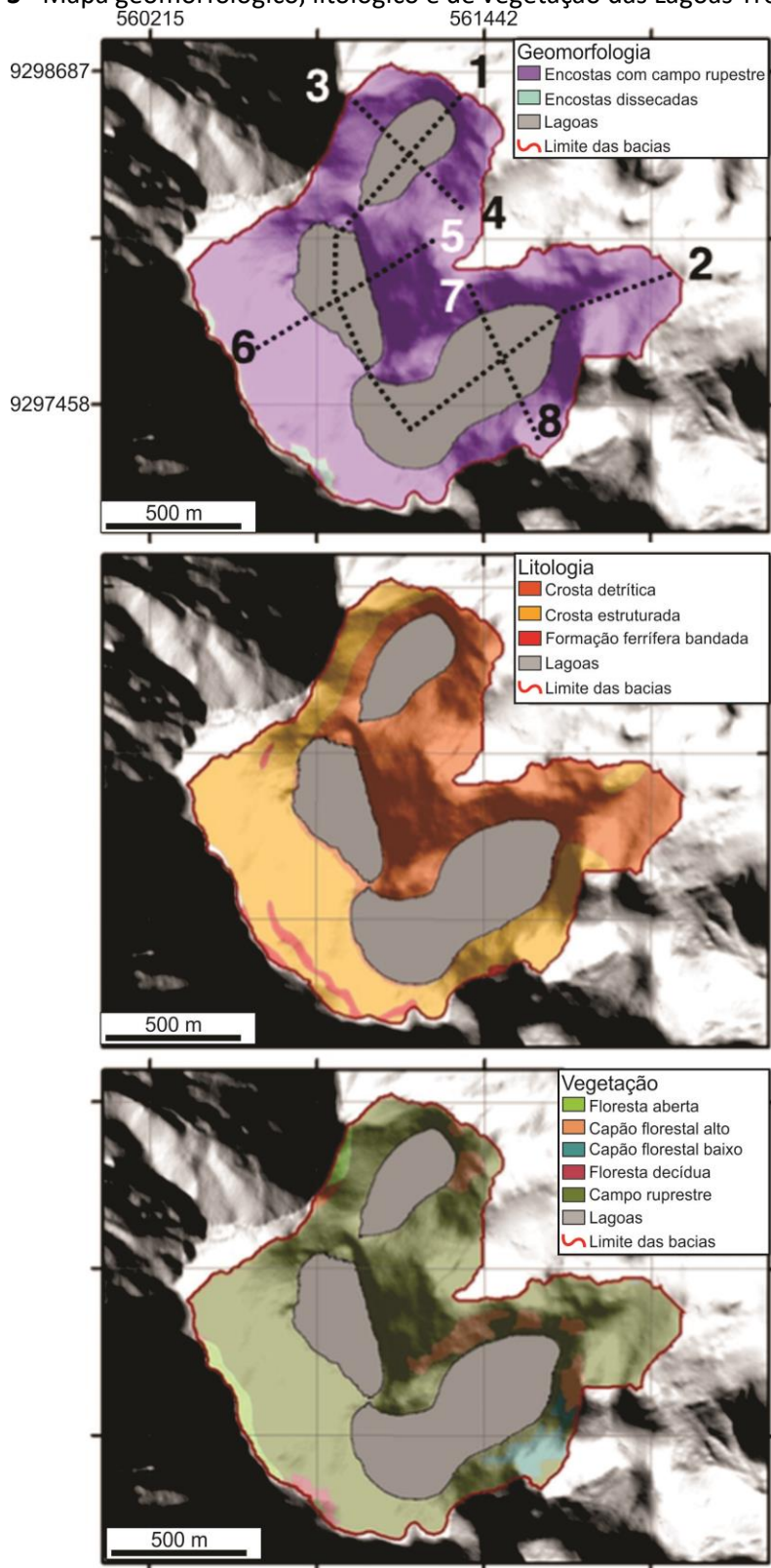
Do ponto de vista geomorfológico, as bacias de drenagem das três lagoas apresentam declividades elevadas (>20°, podendo chegar a 60°) e são marcadas por vertentes íngremes recobertas por campos rupestres. Nas bacias das lagoas do Violão e Amendoim são observadas, ainda, vertentes ravinadas com capões florestais (Figuras 2 e 3).

Figura 2 - Mapa geomorfológico, litológico e de vegetação das Lagoas do Violão e Amendoim.



Fonte: Modificado de: Rezende e Barbosa (1972) e Golder (2010).

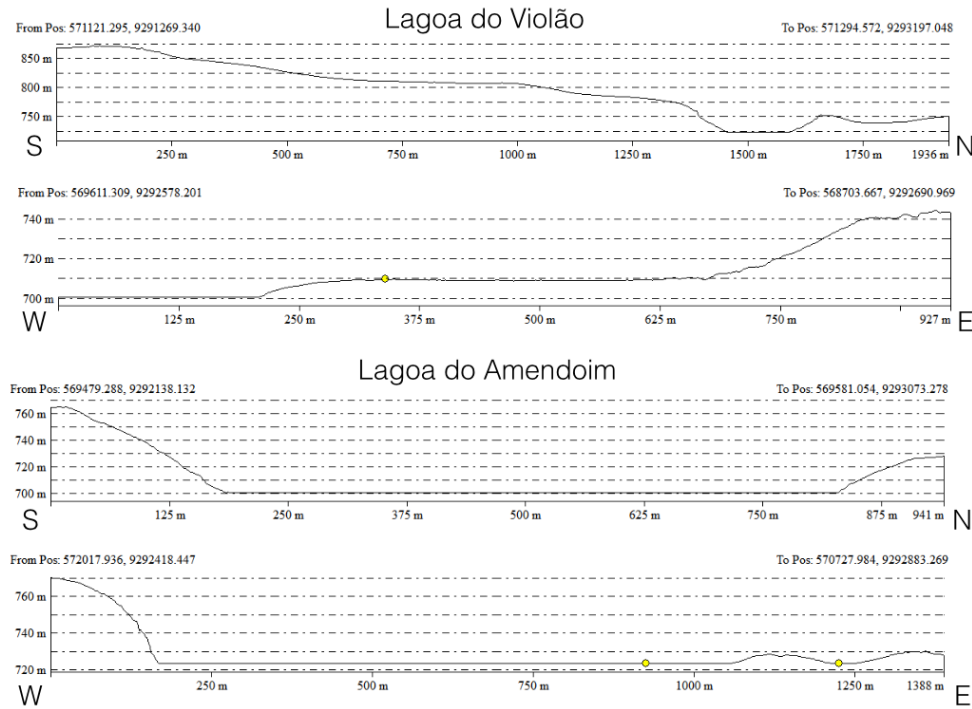
Figura 3 - Mapa geomorfológico, litológico e de vegetação das Lagoas Três Irmãs.



Fonte: Modificado de: Rezende e Barbosa (1972) e Golder (2010).

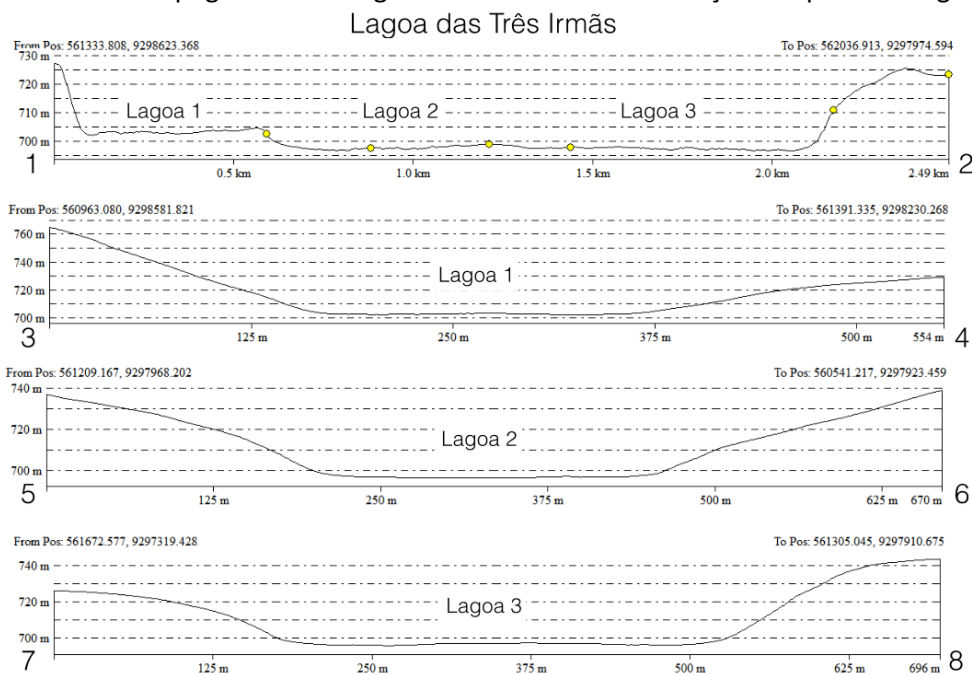
Os perfis topográficos apresentados nas figuras 4 e 5 ilustram as características morfológicas das bacias de drenagem das lagoas do Violão, Amendoim e Três Irmãs.

Figura 4 - Perfis topográficos nas lagoas do Violão e Amendoim. Ver localização dos perfis na Figura 2.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 5 - Perfis topográficos nas lagoas Três Irmãs. Ver localização dos perfis na Figura 3.



Fonte: próprio autor (2019).

As litologias que afloram nas bacias de drenagem são marcadas essencialmente por crosta detrítica e crosta de minério de ferro. Rochas máficas são observadas somente na Lagoa do Violão. Enquanto, formações ferríferas bandadas ocorrem localmente nas lagoas do Violão e Três Irmãs (Figuras 2 e 3).

4.2 MORFOMETRIA DAS LAGOAS DA SERRA SUL DE CARAJÁS

As lagoas da Serra Sul de Carajás apresentam morfologias similares. A batimetria da Lagoa do Violão revela margens curtas e encostas abruptas, enquanto seu fundo é relativamente plano (Souza Filho et al., 2016), morfologia semelhante à da Lagoa Três Irmãs 3 (LTi-3). Por outro lado, a Lagoa do Amendoim apresenta fundo relativamente plano, mas com depocentro localizado na porção sul da lagoa. Esta posição descentralizada do depocentro da lagoa também pode ser observada nas lagoas Três Irmãs 1 e 2 (LTi-1 e 2). Além disso, as lagoas LTi-1 e 2 apresentam uma forma suavemente côncava, enquanto a LTi-3 apresenta dois patamares distintos: um mais raso a sudoeste e outro mais profundo a nordeste (Figura 6).

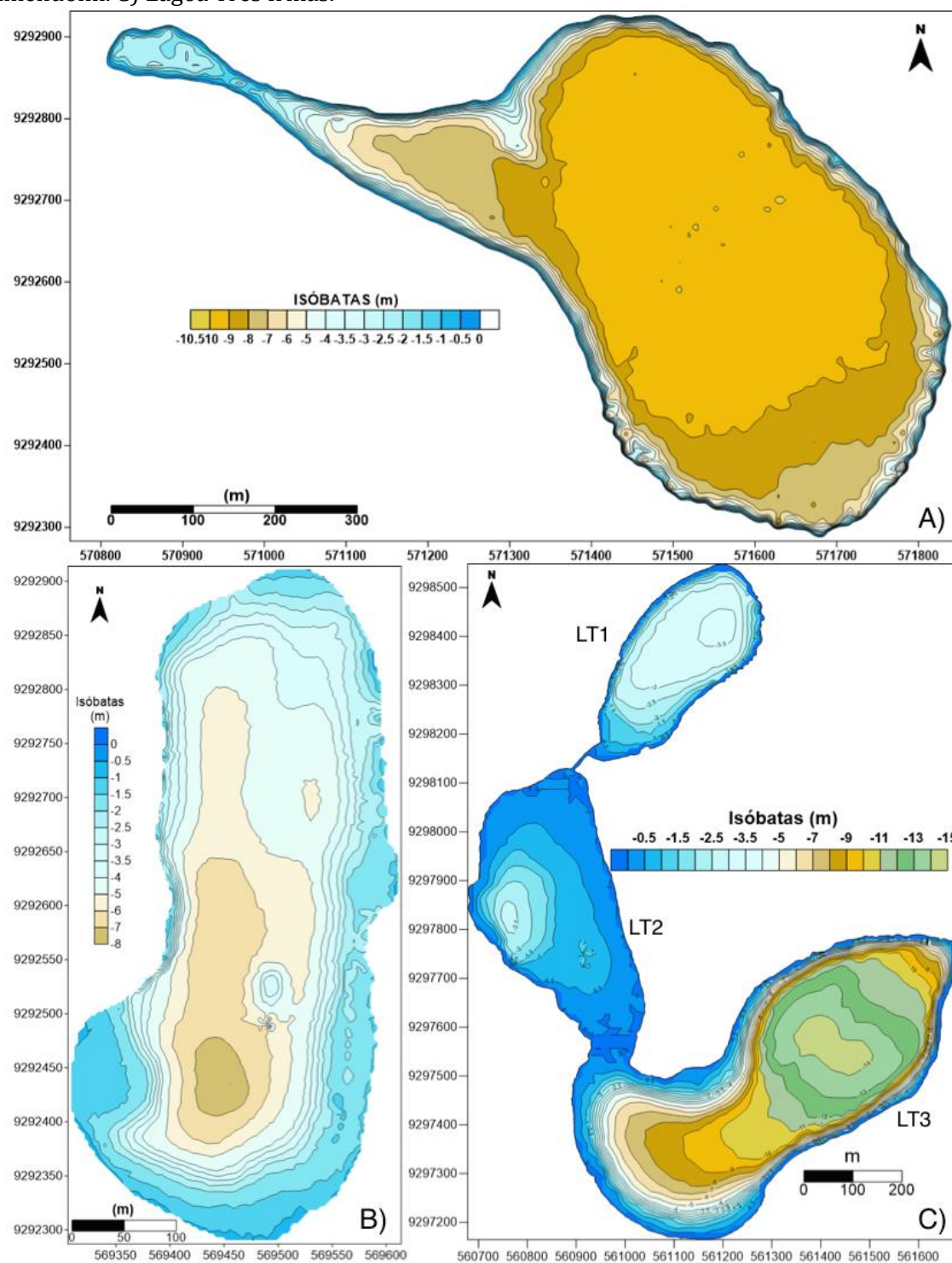
Os parâmetros morfométricos foram calculados a partir dos dados batimétricos para as lagoas estudadas (Tabela 4). A partir destes parâmetros foi realizada uma análise de agrupamento considerando as distâncias euclidianas para avaliar o grau de similaridade entre as lagoas (Figura 7). O primeiro agrupamento reforça as similaridades entre as lagoas do Violão e LTi-3, devido aos seus maiores comprimentos, largura, área, perímetro, volume e profundidade. Do mesmo modo que o segundo agrupamento indica semelhanças entre as lagoas do Amendoim, LTi-1 e LTi-2.

Tabela 4 - Parâmetros morfométricos das lagoas da Serra Sul de Carajás.

Parâmetros/Lagoas	Violão	Amendoim m	LTi-1	LTi-2	LTi-3
Comprimento Máximo	1120	628	480	602	885
Largura máxima (m)	460	280	225	295	460
Área (m ²)	273934	126843	74501	116466	252630
Volume (m ³)	181435	489244	188247	84258	2052638
Profundidade máxima	10.5	8.03	3.93	2.79	14.65
Profundidade média (m)	6.62	3.86	2.53	0.72	8.13
Profundidade relativa	1.8	2	1.3	0.7	2.6
Perímetro (m)	2784	1730	1270	1581	2456
Índice de desenvolvimento de	1.42	2.23	3.26	11.35	1.07
Índice de desenvolvimento de	1.89	1.44	1.93	0.78	1.66
Índice morfométrico	420.33	448.46	502.62	218.35	302.27

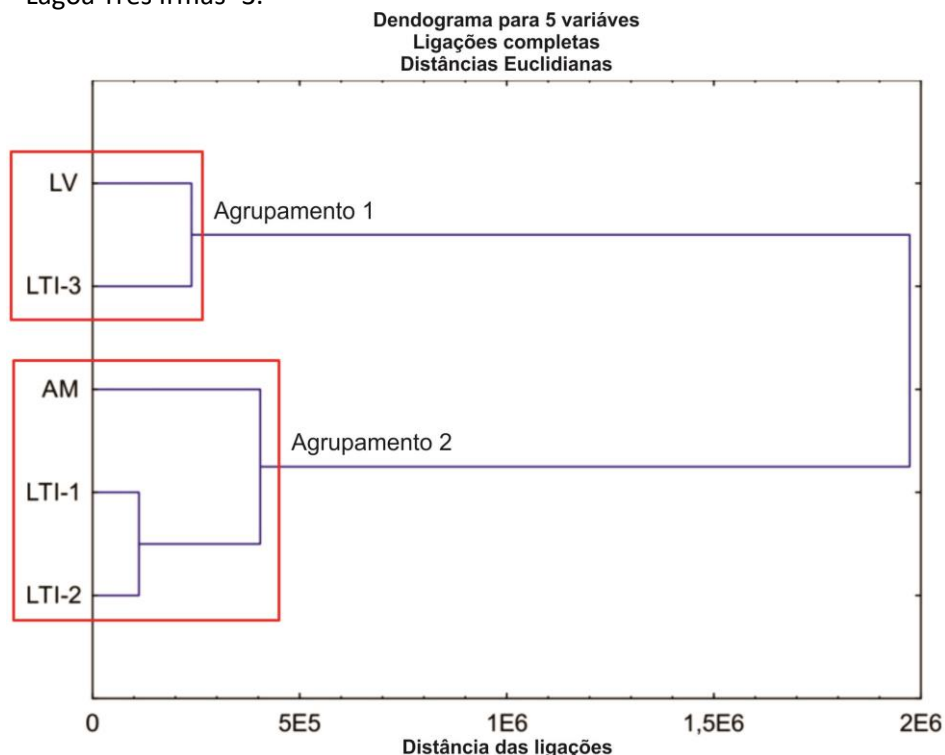
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 6 - Mapa batimétrico das lagoas da Serra Sul de Carajás. A) Lagoa do Violão. B) Lagoa do Amendoim. C) Lagoa Três Irmãs.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 7 - Análise de agrupamento realizada a partir dos parâmetros apresentados na Tabela 4. LV = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTI-1 = Lagoa Três Irmãs - 1, LTI-2 = Lagoa Três Irmãs -2 e LTI-3 = Lagoa Três Irmãs -3.



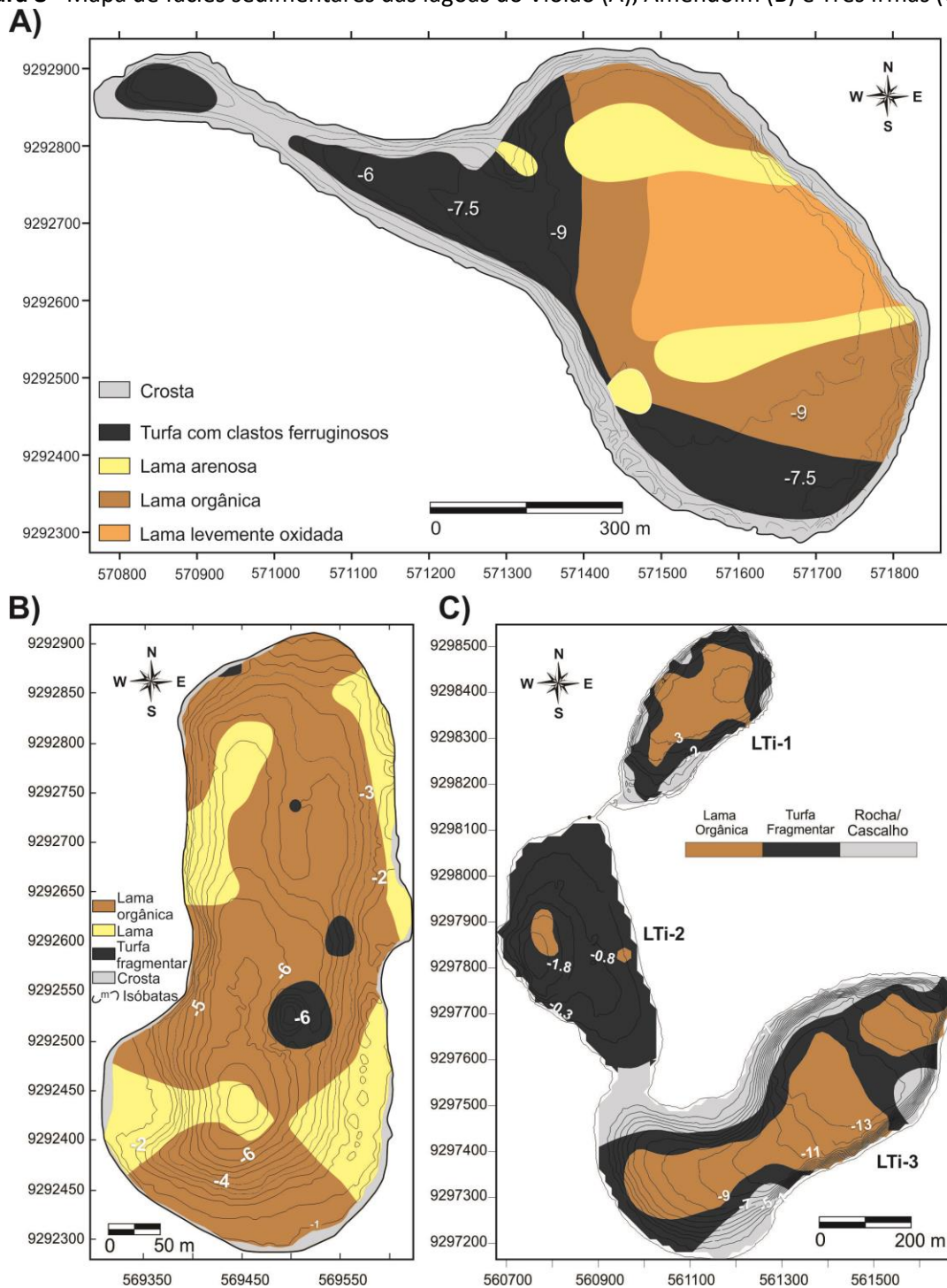
Fonte: próprio autor (2019).

4.3 SEDIMENTOLOGIA DAS LAGOAS

Baseado na classificação de sedimentos clásticos e orgânicos, cinco fácies sedimentares foram identificadas no fundo da lagoa do Violão que inclui afloramentos rochosos, turfa com clastos ferruginosos, lama arenosa, lama orgânica e lama levemente oxidada (Figura 8A). Considerando a Lagoa do Amendoim, os sedimentos de fundo são principalmente representados por lama orgânica, enquanto que lama ocorre preferencialmente próxima as áreas de saída de drenagem, e turfa fragmentar está restrita às porções centrais e mais profundas desta lagoa (Figura 8B). Os sedimentos de fundo das lagoas Três Irmãs são constituídos por cascalhos ferruginosos nas margens das lagoas LTI-1 e LTI-3, enquanto que na lagoa LTI-2 as margens bem como a maior parte do seu fundo são constituídas por turfa fragmentar. Esta última tipologia é também observada nas porções marginais das lagoas LTI-1 e LTI-3, adjacente à crosta ferruginosa. As porções centrais das lagoas apresentam lama orgânica (Figura 8C). Esta distribuição é produto da litologia da bacia de drenagem, com rochas altamente resistentes ao intemperismo físico, e fluxo baixo de energia das águas das lagoas favorecendo o intemperismo químico e deposição predominante por suspensão, respectivamente. O influxo de material orgânico para as lagoas é muito elevado e produto da vegetação de cobertura da bacia, macrófitas e produtividade primária, cujos macrofragmentos são rapidamente decompostos no fundo

das lagoas. A lagoa LTi-2 apresenta características faciológicas muito similares a outras lagoas preenchidas, e colonizadas por macrófitas, da Serra dos Carajás.

Figura 8 - Mapa de fácies sedimentares das lagoas do Violão (A), Amendoim (B) e Três Irmãs (C).

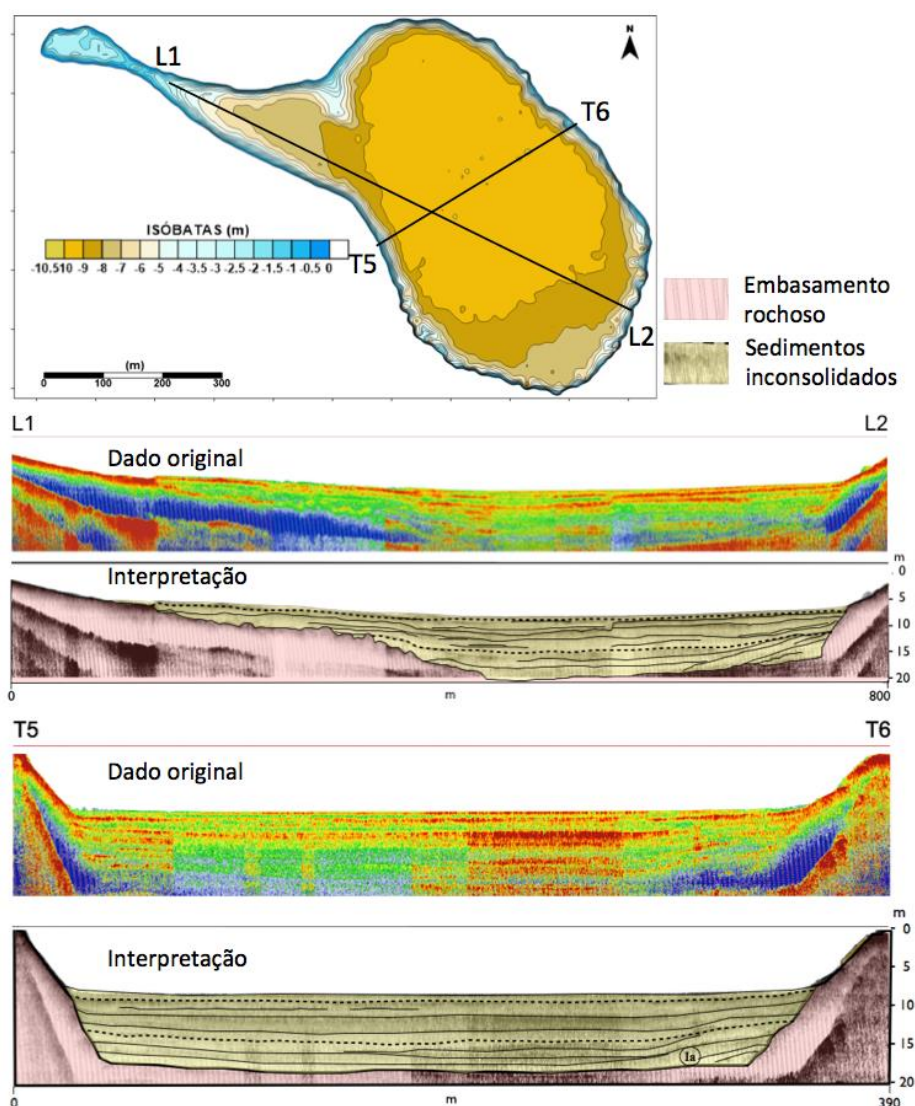


Fonte: próprio autor (2019).

4.4 ANÁLISE SISMOESTRATIGRÁFICA DAS LAGOAS

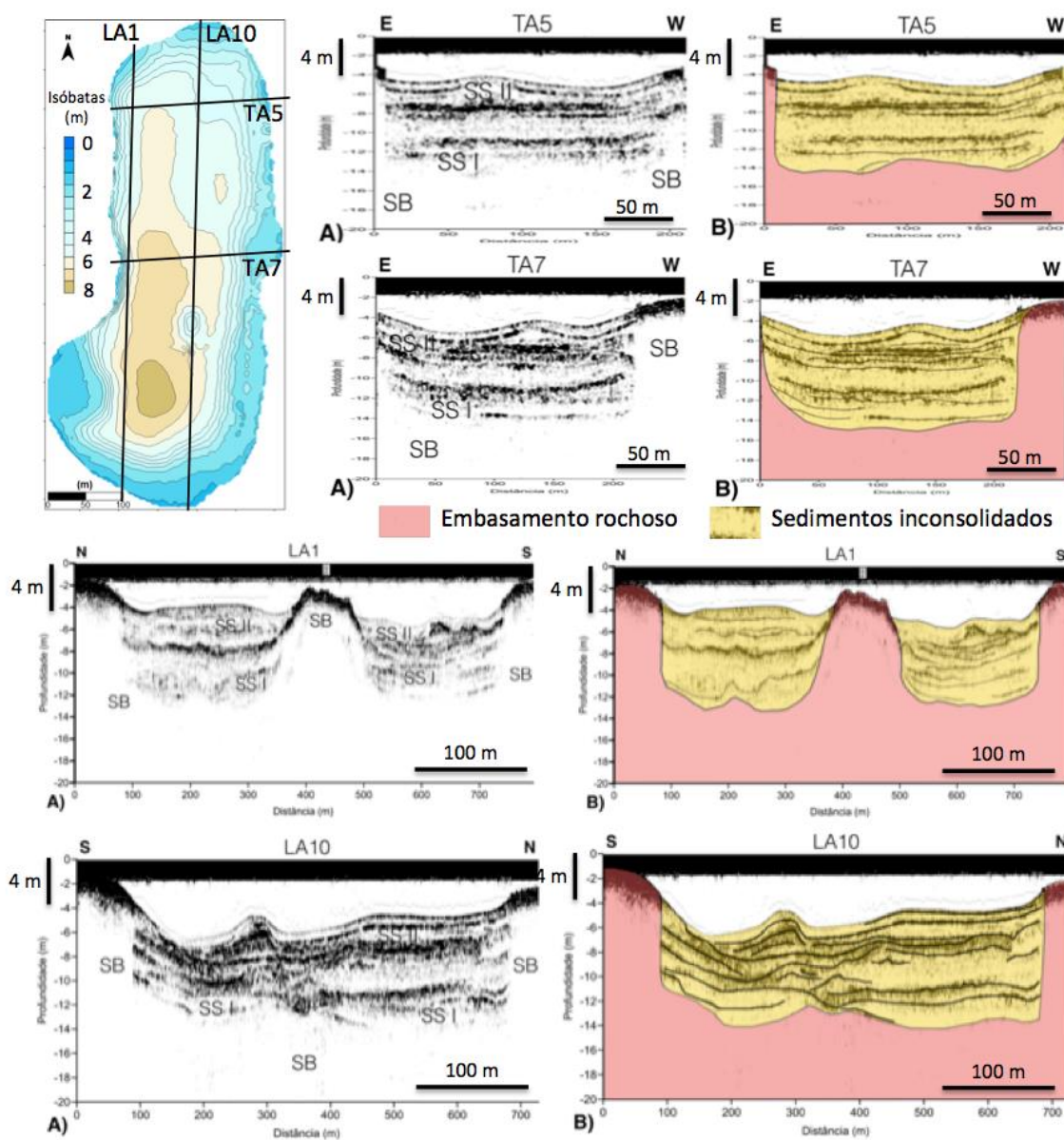
Os perfis sismoestratigráficos mostram as espessuras dos pacotes sedimentares inconsolidados depositados nas lagoas estudadas. Em todas essas lagoas é possível observar sedimentos quaternários, como por exemplo os depósitos da Lagoa do Violão com espessuras médias em torno de 11 m. Com base nas características das reflexões sísmicas observa-se que os sedimentos inconsolidados estão depositados sobre um proeminente refletor basal (crosta laterítica), o qual pode ser traçado em todos os perfis sísmicos. Este refletor estende-se desde o sub-fundo, formando uma superfície horizontal e irregular, até os afloramentos nas margens das lagoas, onde formam uma superfície íngreme, guardando a mesma morfologia da bacia lacustre atual (Figuras 9, 10 e 11).

Figura 9 - Perfis sísmicos mostrando múltiplos refletores, embasamento rochoso e preenchimento sedimentar da Lagoa do Violão. A localização dos perfis é ilustrada no mapa batimétrico.



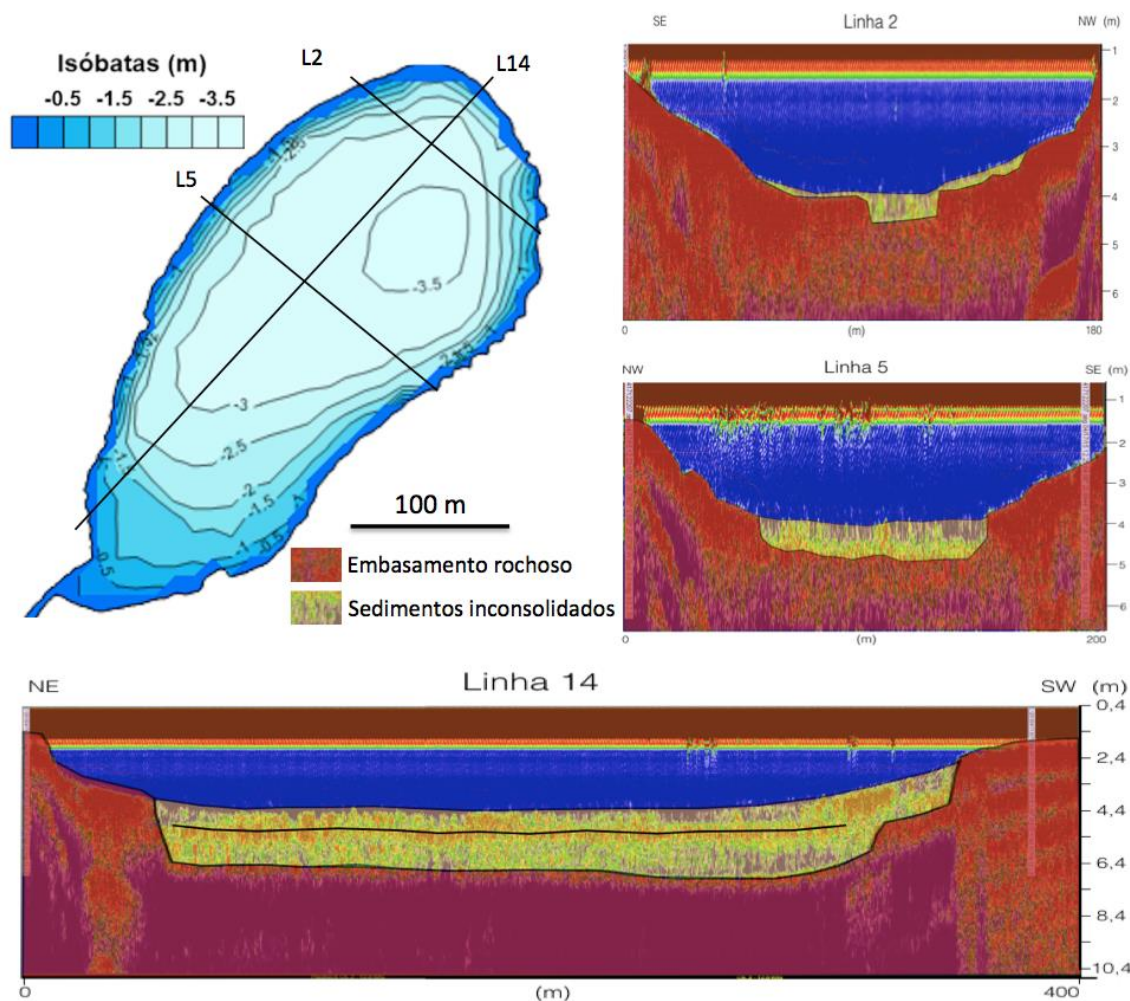
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 10 - Perfis sísmicos mostrando múltiplos reflectores, embasamento rochoso e preenchimento sedimentar da Lagoa do Amendoim. A localização dos perfis é ilustrada no mapa batimétrico.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 11 - Perfis sísmicos mostrando múltiplos refletores, embasamento rochoso e preenchimento sedimentar da Lagoa Três Irmãs 1 (LTi-1). A localização dos perfis é ilustrada no mapa batimétrico.

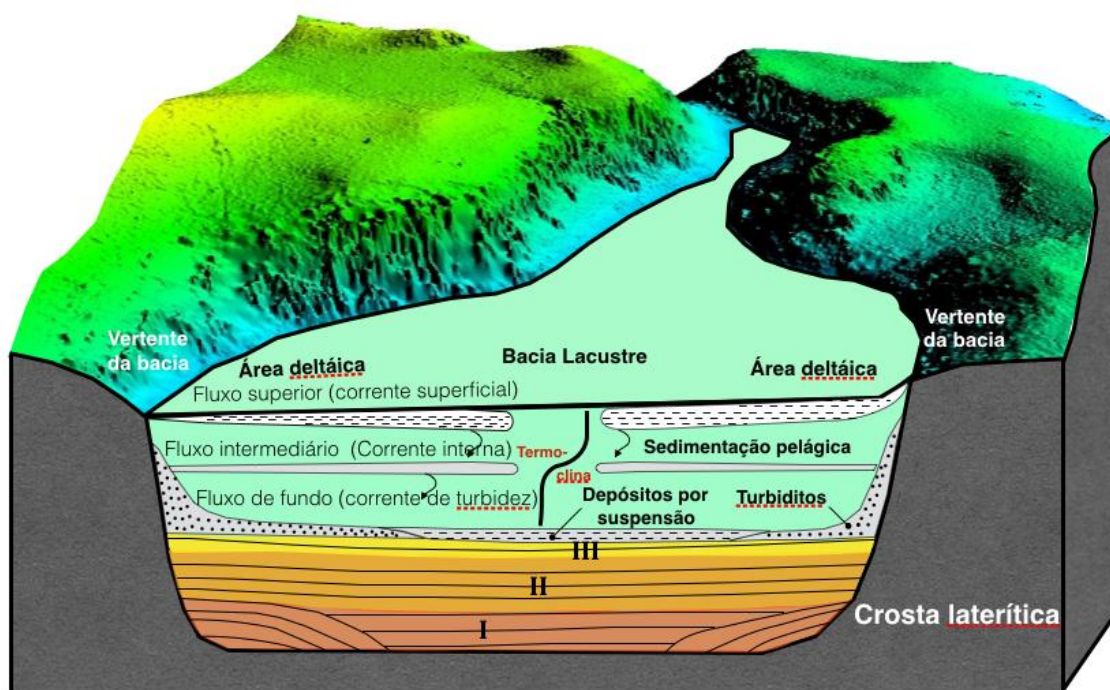


Fonte: próprio autor (2019).

Os preenchimentos sedimentares (sedimentos inconsolidados) das lagoas apresentam espessuras variadas, porém uma arquitetura deposicional semelhante. Os sedimentos das lagoas do Violão e do Amendoim (Figuras 9 e 10) apresentam uma espessura da ordem de 10 m, enquanto foram depositados aproximadamente 3 m de sedimentos na LTi-1 (Figura 11). Em todas as lagoas, o preenchimento inicial (depósitos localizados próximo ao embasamento rochoso) é marcado por refletores inclinados em direção ao depocentro da bacia, que evidencia um transporte de material das vertentes para o interior da lagoa. Esta deposição em forma de lobos deltaicos pode variar lateralmente de acordo com oscilações no nível da lagoa e mudanças nas taxas de intemperismo das bacias de contribuição produzidas por mudanças paleoclimáticas (GUIMARÃES *et al.*, 2016). O preenchimento subsequente é marcado por refletores horizontais e reflete uma deposição a partir de processos de fluxos de detritos no fundo da lagoa e sedimentação por suspensão. Maiores detalhes sobre o processo de preenchimento sedimentar das lagoas podem ser encontrados em Souza Filho *et al.* (2016) que apresentam

um modelo deposicional para a Lagoa do Violão a partir de dados sismoestratigráficos e sedimentológicos (Figura 12).

Figura 12 - Depósitos e processos de sedimentação da Lagoa do Violão. I, II e III – Unidades sismoestratigráficas.

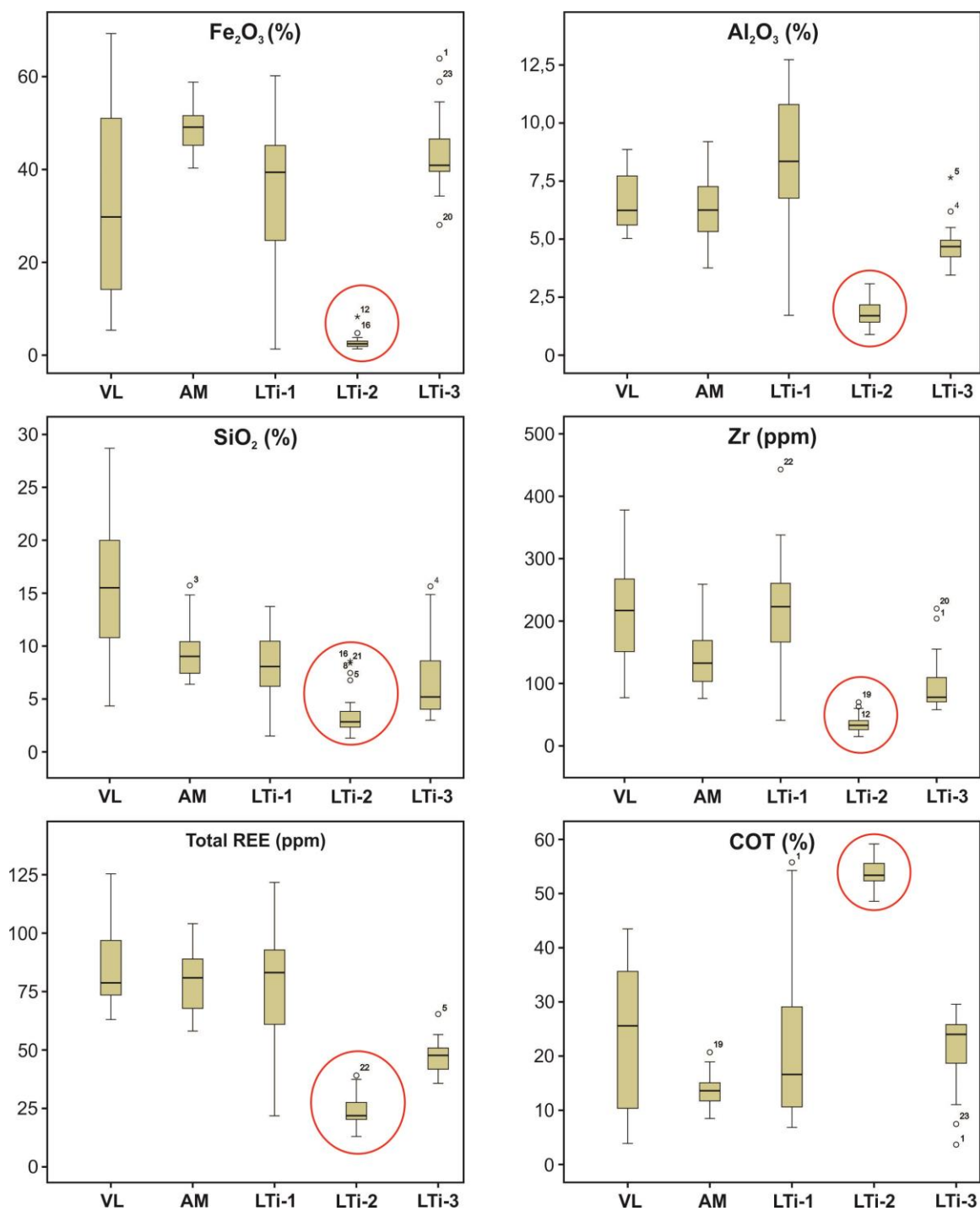


Fonte: Souza Filho *et al.* (2016).

4.5 ANÁLISE GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS DAS LAGOAS

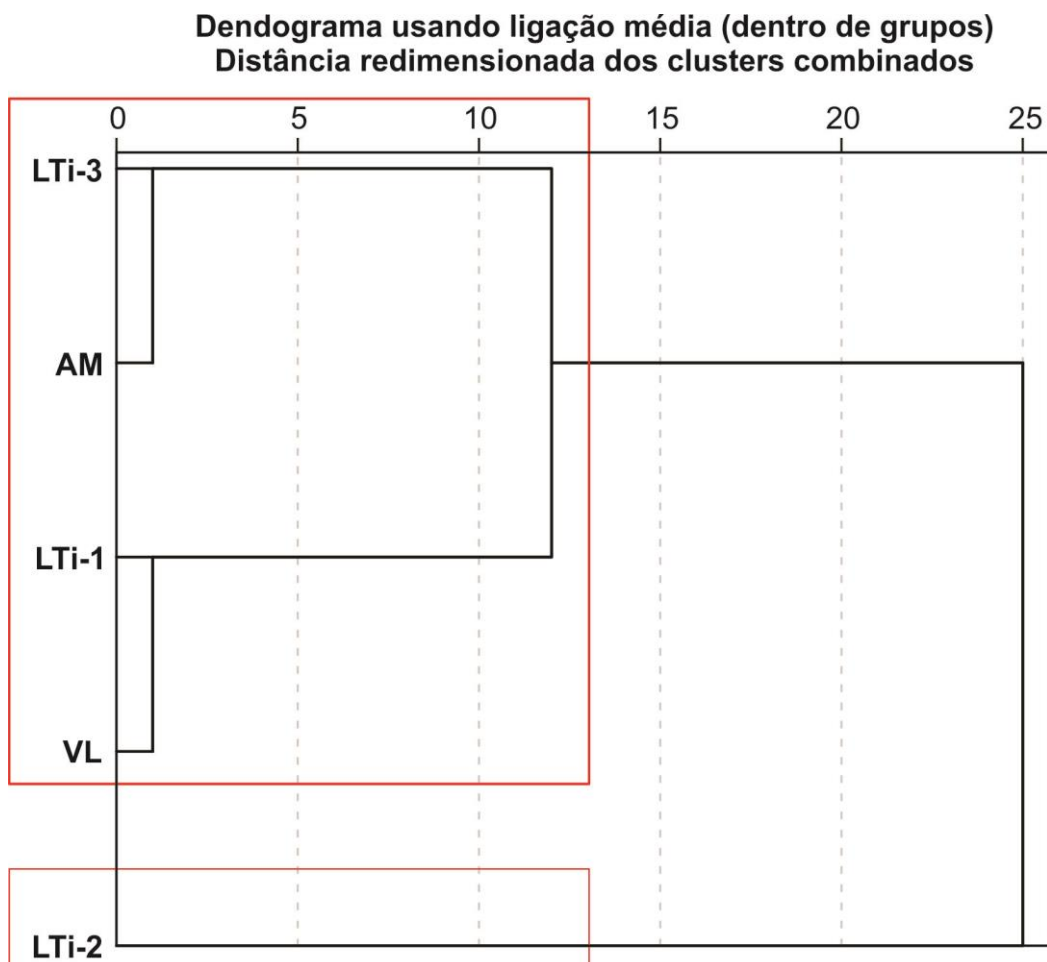
Embora observe-se uma variabilidade nos teores dos elementos químicos contidos nos sedimentos das diferentes lagoas, existem semelhanças geoquímicas entre os sedimentos das lagoas do Violão, Amendoim, Três Irmãs 1 e 3 (LTi-1 e LTi-3, respectivamente) que podem ser caracterizados como predominantemente de origem detrítica ou mista (detrítica-orgânica). Já os sedimentos da Lagoa Três Irmãs 2 (LTi-2) são predominantemente de origem orgânica (Figura 13). Isto é claramente observado a partir da análise de agrupamento hierárquico (HCA). O HCA categoriza lagoas com base em suas concentrações elementares (elementos maiores, traços e terras raras) (Figura 14). A variação de composição nos sedimentos lacustres depende, principalmente, da composição química das rochas que afloram na bacia de drenagem das lagoas (por ex. SAHOO *et al.*, 2015).

Figura 13 - Box plots mostrando as concentrações elementares seletivas em sedimentos lacustres superficiais das lagoas estudadas. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3. REE = terras raras, COT = carbono orgânico total.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 14 - Análise de agrupamento hierárquico (HCA) dos sedimentos lacustres com base nas concentrações dos elementos maiores, traços e terras raras das lagoas estudadas. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3.

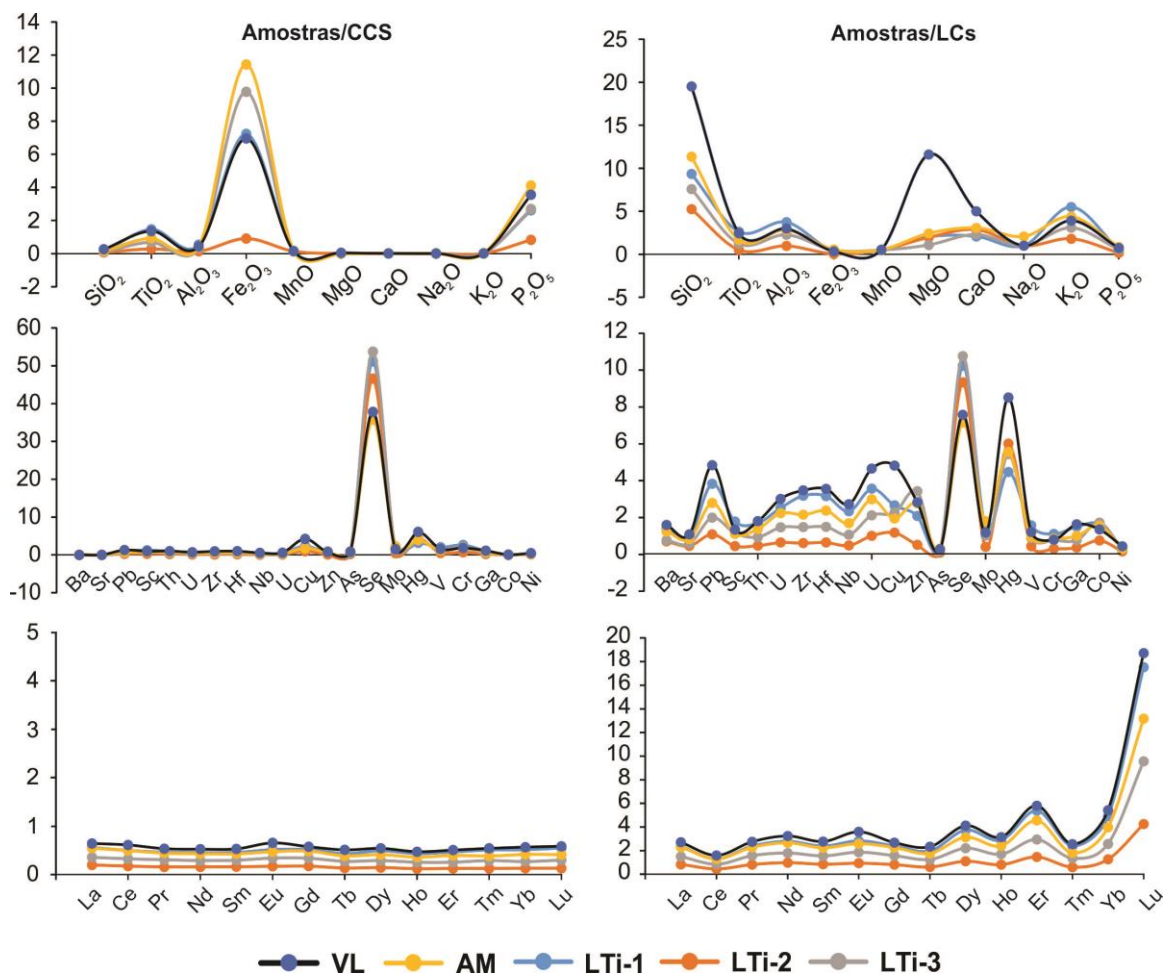


Fonte: próprio autor (2019).

As composições químicas médias dos sedimentos lacustres foram comparadas após normalização com a Crosta Continental Superior (CCS) e com Crostas Lateríticas (CLs) (Figura 15), e mostraram um padrão aproximadamente semelhante entre todas as lagoas, exceto para a LTi-2. Os resultados mostraram que em relação a CCS, quase todas as lagoas são enriquecidas em Fe_2O_3 e P_2O_5 , exceto LTi-2, enquanto os outros óxidos maiores encontram-se empobrecidos. O enriquecimento de Fe_2O_3 está em consonância com a composição química das CLs da bacia de contribuição adjacente. Em comparação com a CLs, os sedimentos são altamente enriquecidos com SiO_2 e moderadamente enriquecidos em Al_2O_3 , TiO_2 e K_2O , com exceção de MgO na Lagoa do Violão. Entre os elementos traços, todos os sedimentos das lagoas são enriquecidos em Se em relação a CCS, e Se, Hg, Pb, U e Cu em relação a LCs. Todos os elementos terras raras (ETR) estão empobrecidos em relação

a CCS, ao passo que se observa geralmente o contrário em relação à CLs, sendo notório o enriquecimento relativo em ETR pesados e, em particular de Lu, nos sedimentos.

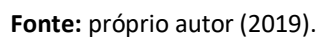
Figura 15 - Composições médias dos sedimentos lacustres normalizados em relação à Crosta Continental Superior (CCS) e crostas lateríticas (CLs) que afloram nas bacias de contribuição das lagoas. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3.



Fonte: próprio autor (2019)

Uma análise fatorial, associada à análise de componentes principais foi realizada para definir diferentes grupos e as suas associações geoquímicas a partir das concentrações de elementos maiores, traços e terras raras em sedimentos coletados nas lagoas estudadas (Figura 16). Isso permitiu compreender melhor os principais fatores que controlam a distribuição geoquímica dos diferentes elementos nos sedimentos lacustres. Os resultados mostram, em geral, uma associação detrítica semelhante em todas as lagoas, com a maior parte dos elementos traços e terras raras agrupados com TiO_2 e Al_2O_3 , indicando uma fonte similar. Tais elementos seriam hospedados por silicatos de Al durante o processo de intemperismo. Embora o Fe seja de origem terrígena, ele tem uma distribuição distinta da do Al_2O_3 em todas as lagoas. Isto é provavelmente devido aos diferentes processos de

Figura 16 - Análise fatorial (componentes rotacionados) dos elementos maiores, traços, terras raras e carbono orgânico total (COT) nos sedimentos lacustres das lagoas estudadas. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3.



4.6 ANÁLISE DA QUALIDADE DE ÁGUA DAS LAGOAS

As lagoas do Violão (VL), Amendoim (AM) e Três Irmãs (LTi) foram caracterizadas com base em suas morfologias, qualidade das águas, estado trófico e biomassa fitoplanctônica, bem como classificadas seguindo resoluções e recomendações de agências ambientais brasileiras e internacionais.

Considerando os parâmetros morfométricos de acordo com a Drinking Water Directive EU (1998), estas lagoas, situadas entre 699 e 722 m de altitude, estão enquadradas na categoria média altitude. A área superficial variando entre 0,0745 e 0,273 km² faz com que estas lagoas sejam classificadas na categoria “muito pequenas”. Adicionalmente, por serem lagoas com profundidade entre 3 a 15 m enquadram-se na categoria “rasa”, exceto para LTi-2, que possui profundidades menores que 3 m e deve ser classificada como “muito rasa”.

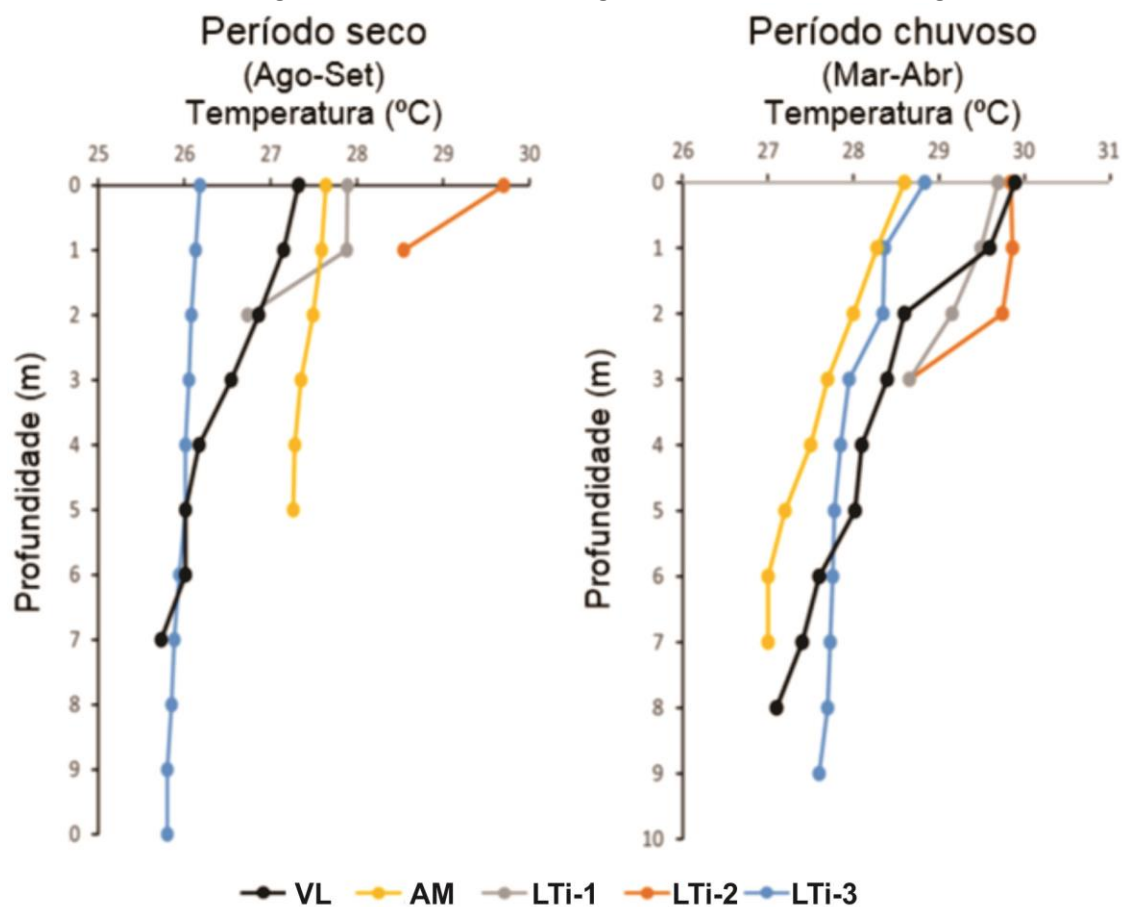
A temperatura da água ao longo de perfis verticais (Figura 17) varia de 25,7-27,3°C (VL), 27,3-27,6°C (AM), 26,7-27,9°C (LTi-1), 28,5-29,7°C (LTi-2) e 25,8-26,2°C (LTi-3) no período seco, para temperaturas mais elevadas no período chuvoso com oscilações entre 27,1-29,9°C (VL), 27-28,6°C (AM), 28,6-29,7°C (LTi-1), 28,6-29,85°C (LTi-2) e 27,6-28,8°C (LTi-3). A ocorrência de altas temperaturas nas lagoas mais rasas (LTi-1, LTi-2) indica que este parâmetro é influenciado pela profundidade da água. Ao longo do perfil vertical, VL revelou diminuição moderada da temperatura em direção ao fundo em ambos os períodos, e AM mostrou uma leve tendência de diminuição somente no período chuvoso, enquanto LTi-3 (mais profunda) não apresentou variações significativas. A diferença máxima de temperatura entre a superfície e fundo da água é muito pequena (~1,5°C) (Figura 17). Isto indica que as lagoas são homogêneas e fracamente estratificadas. Este resultado sugere a atuação de mecanismos, tais como turbulência induzida pelo vento, alta precipitação e mistura por convecção, que favorecem a mistura das massas d'água, e resultam em uma baixa amplitude da temperatura da água (Podsetchine e Schernewski, 1999).

A maioria dos parâmetros analisados em amostras de água estão abaixo do limite de detecção. Neste sentido, somente os parâmetros detectados foram avaliados neste trabalho. De acordo com a classificação da Resolução CONAMA 357/2007 (MMA, 2005), somente os níveis de oxigênio dissolvido (OD) e demanda biológica do oxigênio (DBO) apresentam valores que podem ser enquadrados dentro dos limites da Classe 1 (Tabela 5). Nas lagoas VL e LTi-1, os níveis de Clorofila-a enquadram-se em águas da Classe 2, enquanto os níveis de fósforo total (FT) nas lagoas VL, LTi-1 e LTi-3 enquadram-se nas classes 2 e 3. Entretanto, considerando os valores médios de FT, somente as águas do VL enquadram-se na Classe 3. As concentrações de Al e Fe dissolvidos podem apresentar características semelhantes as águas da Classe 1, exceto Al na VL e Fe na LTi-1. Entretanto, os valores médios de Al para as águas do VL sugerem enquadramento na classe 1. Assim, como as lagoas estudadas estão inseridas dentro de uma unidade de conservação de uso sustentável (Floresta Nacional de Carajás), este estudo sugere o enquadramento de suas águas dentro da Classe 2 da Resolução Conama 357/2005 (MMA, 2005).

Considerando a dureza, com base nas concentrações de Ca e Mg, as águas das lagoas podem ser classificadas como “leves”. A alcalinidade das águas é menor que 5. o que as

caracteriza como águas com “baixa alcalinidade”. O pH varia de 4 a 7,6, e é, portanto, “baixo-moderado” e com menor capacidade de amortecimento e alto grau de sensibilidade a influxos ácidos.

Figura 17 - Perfis verticais de temperatura das lagoas em estudo. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3.



Fonte: próprio autor (2019).

Tabela 5 - Classificação das águas das lagoas baseada na Resolução CONAMA 357 (MMA, 2005). VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3. Cl.=Classe. As concentrações apresentadas são mínima (média) máxima.

Parâmetros	VL	AM	LTi-1	LTi-2	LTi-3	Resolução CONAMA 357/2005		
						Cl. 1	Cl. 2	Cl. 3
OD (mg/l)	6,2 (7,9) 12,3	7,1 (7,7) 13	6,6 (9,1) 11,7	10,4 (11,3) 12,3	6,4 (8,1) 10,5	>6	>5	>4
NH₄ (mg/l)	<0,1	<0,1 (<0,1) 0,13	<0,1	0,11 (<0,1) 0,2	<0,1	0, 02	0,02	0,02
DBO (mg/l)	<3	<3	<3	<3	<3	3	5	10
FT (µg/l)	<10 (32,2) 150	<10 (<10) 20	<10 (16,2) 40	<10	<10 (13,5) 40	20	30	50
Turbidez (NTU)	1,6 (2,8) 4,5	0,5 (1,28) 2,1	3,6 (4,6) 5,9	6,9 (7,2) 7,5	0,4 (0,96) 2,3	40	100	100
Cl- (mg/l)	<1 (<1) 1,4	<1	<1 (<1) 1,5	<1 (<1) 1,8	<1 (<1) 4,4	25 0	250	250
Coliformes fecais (UFC/100ml)	<1 (5) 10	<1 (<1) 5	1 (2) 4	<1 (2) 4	<1 (<1) 1	20 0	1000	4000
Nitrato (mg/l)	<2,2 (<2,2) 9,3	<2,2 (<2,2) 2,6	<2,2	<2,2	<2,2	10	10	10
Nitrito (mg/l)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1	1	1
SO₄ (mg/l)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	25 0	250	250
Al dissolvido (mg/l)	0,06 (0,05) 0,24	0,005 (0,02) 0,12	0,01 (0,02) 0,035	0,06 (0,06) 0,07	0,009 (0,006) 0,01	0, 1	0,1	0,2
Fe dissolvido (mg/l)	0,02 (0,14) 0,3	0,05 (0,12) 0,28	0,12 (0,37) 0,63	0,16 (0,17) 0,18	<0,001 (0,03) 0,05	0, 3	0,3	5
Clorofila-a (µg/l)	1 (7,2) 38	1 (<1) 5	3 (14) 46	<3	3 (<3) 12	10	30	60

Fonte: próprio autor (2019).

Fósforo e nitrogênio totais foram utilizados como indicadores de potencial de eutrofização das lagoas. As concentrações de nitrogênio total em níveis de risco potencial estão descritas na Tabela 6 (VOLLENWEIDER *et al.*, 1976; OECD, 1982; CARDOSO *et al.*, 2001). Estes valores estão de acordo com os limites ecológicos reportados em outros estudos (DURAND *et al.*, 2011). Nas lagoas estudadas, o nitrogênio total variou de <0.5 a 0.59 mg/l, indicativo de um menor risco a eutrofização por nitrogênio. Além disso, as concentrações de nitrato e amônia situam-se abaixo de 1 mg/l, indicando que os compostos de nitrogênio não são ameaça para as lagoas (EPA, 2003). Entretanto, os níveis de fósforo nas lagoas VL, LTi-1 e LTi-3 situam-se em torno de 30 µg/l, ou seja estão no limite mínimo sugerido como favorável para promover o crescimento acelerado de algas e desenvolvimento de condições eutróficas.

Tabela 6 - Classes de potencial de risco a eutrofização para águas superficiais relacionadas à concentração de nitrogênio. VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3.

Lagoas	N (mg/l)	Nível potencial de eutrofização
VL	<0,5	baixo
AL	<0,5	baixo
LTi-1	<0,57	baixo
LTi-2	<0,59	baixo
LTi-3	<0,5	baixo

Fonte: próprio autor (2019).

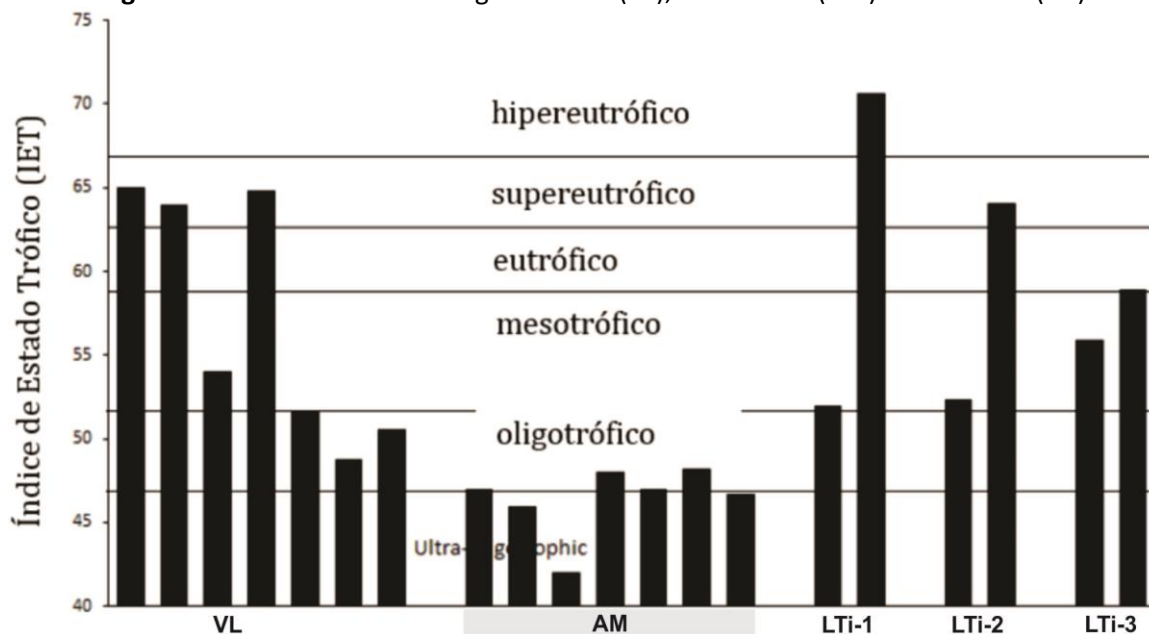
O Carbono Orgânico Total (COT) é um excelente indicador de biomassa e pode ser comparado com medidas convencionais de produtividade. Como o valor de COT é independente das condições de células e distribuição de espécies, ele permite estimar o enriquecimento geral de nutrientes e material orgânico em suspensão (Daniel and Malone, 1987). De acordo com os valores de COT obtidos nas lagoas estudadas, as suas águas podem ser classificadas como “excelente-bom”.

O índice de estado trófico (IET) para as lagoas em estudo foi obtido através da classificação de Carlson (1977) modificada por Lamparelli (2004) com o uso de três variáveis-chaves (Clorofila-a, profundidade Secchi e FT). A Figura 18 mostra que as lagoas VL, LTi-1 e LTi-2 apresentam estado trófico mais elevado, enquanto que LTi-3 foi classificada como mesotrófica e AM como ultra-oligotrófica a levemente oligotrófica.

Considerando os resultados do potencial de eutrofização das lagoas e IET, o enriquecimento em fósforo nas águas das lagoas VL, LTi-1 e LTi-3 pode ser explicado pelas características geológicas e fisiográficas de suas bacias de contribuição. Estas lagoas estão inseridas em um sistema de bacias fechadas sem deságue ou escoadores superficiais. Além disso, somente estas lagoas apresentam em suas bacias afloramentos de rochas máficas, que possuem concentrações de fósforo muito superiores às das crostas lateríticas (Sahoo et al., 2016).

Baseado na concentração de *Escherichia coli* (Tabela 7), as lagoas podem ser classificadas como Classe 1 de acordo com a Resolução CONAMA 537 (MMA, 2005), uma vez que as concentrações não excedem 10 MPN/100ml.

Figura 18 - Estado trófico das lagoas Violão (VL), Amendoim (AM) e Três Irmãs (LTi).



Fonte: próprio autor (2019).

Tabela 7 - Classificação das águas das lagoas com base nos coliformes fecais (*E. coli*). VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTI-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTI-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTI-3 = Lagoa Três Irmãs-3.

Lagoas	Coliformes fecais (MPN/100ml)	CONAMA	Usos	Risco de potabilidade
VL	<1 a 10	Classe I	natação, pesca	Sem risco
AL	<1 a 5	Classe I	natação, pesca	Sem risco
LTI-1	<1 a 9	Classe I	natação, pesca	Sem risco
LTI-2	<1 a 4	Classe I	natação, pesca	Sem risco
LTI-3	<1	Classe I	natação, pesca	Sem risco

Fonte: próprio autor (2019).

De acordo com Chorus e Bartram (1999), com base na densidade de cianobactérias, as águas das lagoas apresentam baixa probabilidade de afetar a saúde humana, exceto a lagoa LTI-3 que atinge índice baixo a moderado (Tabela 8).

Tabela 8 - Probabilidade de efeitos a saúde devido a exposição a cianobactérias Chorus e Bartram (1999). VL = Lagoa do Violão, AM = Lagoa do Amendoim, LTi-1 = Lagoa Três Irmãs-1, LTi-2 = Lagoa Três Irmãs-2 e LTi-3 = Lagoa Três Irmãs-3.

Lagoas	Cianobactéria (cel./ml)	Probabilidade relativa de efeitos na saúde
VL	< 3-7328	baixa
AM	< 3-120	baixa
LTi-1	< 3-603	baixa
LTi-2	<3	baixa
LTi-3	35-44200	baixa-moderada

Fonte: próprio autor (2019).

O Índice de qualidade das águas (IQA) utiliza parâmetros de caracterização da qualidade da água como temperatura, pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica do oxigênio, coliformes termotolerantes, nitrogênio inorgânico dissolvido, fósforo total, sólidos totais e turbidez. Os índices de qualidade das águas das lagoas variam de 66 a 81 (VL), 63 a 80 (AM), 61 a 81 (LTi-1), 66 a 79 (LTi-2), e 64 a 80 (LTi-3), que indicam águas com qualidade excelente a boa.

4.7 CHUVA POLÍNICA MODERNA

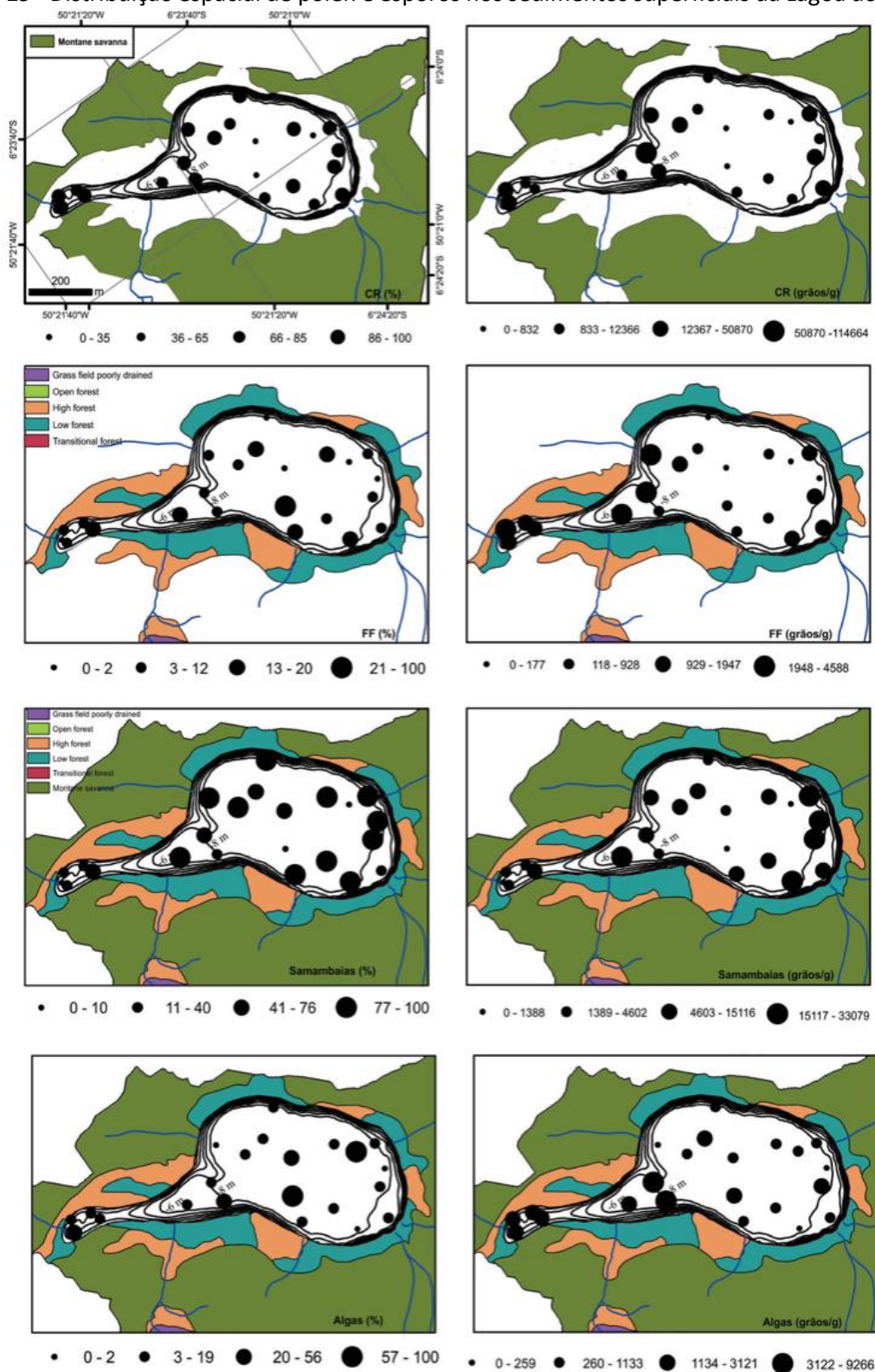
Considerando a distribuição espacial dos principais grupos de pólen e esporos (campos rupestres – CR; formação florestal – FF; samambaia – SM, algas – AG) identificados na Lagoa do Violão (Guimarães et al. 2014), pólen de CR apresentou as mais altas percentagens e concentrações nas porções leste e oeste, e os valores mais baixos foram observados na porção central da lagoa (Figura 19). Como principal representante, grãos de Poaceae seguem o mesmo padrão. Pólen de FF tem uma distribuição dispersa de suas percentagens mais altas, mas baseado nos valores de concentração, FF está principalmente concentrado no braço da Lagoa do Violão. Esporos de SM são predominantes nas bordas da Lagoa do Violão, enquanto que esporos de AG estão principalmente concentrados na porção central em direção ao braço da lagoa. Espículas de esponjas são observadas principalmente na porção sul da Lagoa do Violão. A análise comparativa entre os dados de inventário florístico da bacia e de pólen dos sedimentos superficiais da lagoa indica que os grãos de pólen de CR nos sedimentos lacustres tendem a apresentar um sinal da vegetação regional (fora da bacia de contribuição), desenvolvido sobre crostas ferruginosas na Serra do Carajás, enquanto pólen atual da FF representa um sinal da vegetação local (dentro da bacia de contribuição).

As tipologias identificadas a partir da distribuição espacial dos grupos de pólen e esporos na Lagoa do Amendoim foram campos rupestres (CR), formação florestal (FF), que inclui floresta ombrófila e capão florestal, samambaias (SM), macrófitas (MC) e algas (AG). FF é predominante na superfície dos sedimentos, exceto na porção sul e central onde as

percentagens e concentrações são mais baixas (Figura 20). CR é levemente abundante na porção oeste da lagoa. As porções sudoeste e leste possuem concentrações altas de palmeiras. MC são levemente predominantes na porção noroeste, enquanto SM estão principalmente concentradas na porção central da lagoa. As porções sul e central mostram altas concentrações de AG. A análise comparativa entre os dados de inventário florístico da bacia e de pólen dos sedimentos superficiais da lagoa indicam um sinal polínico mais forte da floresta ombrófila das encostas do platô da Serra Sul (fora da bacia da Lagoa do Amendoim), distante ≥ 1 km da lagoa, do que do capão florestal a leste da lagoa. Isto é esperado, uma vez o capão florestal cobre somente 0.4% da bacia de contribuição da lagoa. Por outro lado, CR representam mais de 90% da bacia de contribuição, mas seus grãos de pólen não são predominantes nos sedimentos, o que sugere eficiência mais elevada da produção e dispersão de pólen pelas florestas. Assim, a chuva polínica moderna das lagoas do Violão e Amendoim pode ser utilizada para identificar alterações na estrutura das florestas adjacentes a estas lagoas.

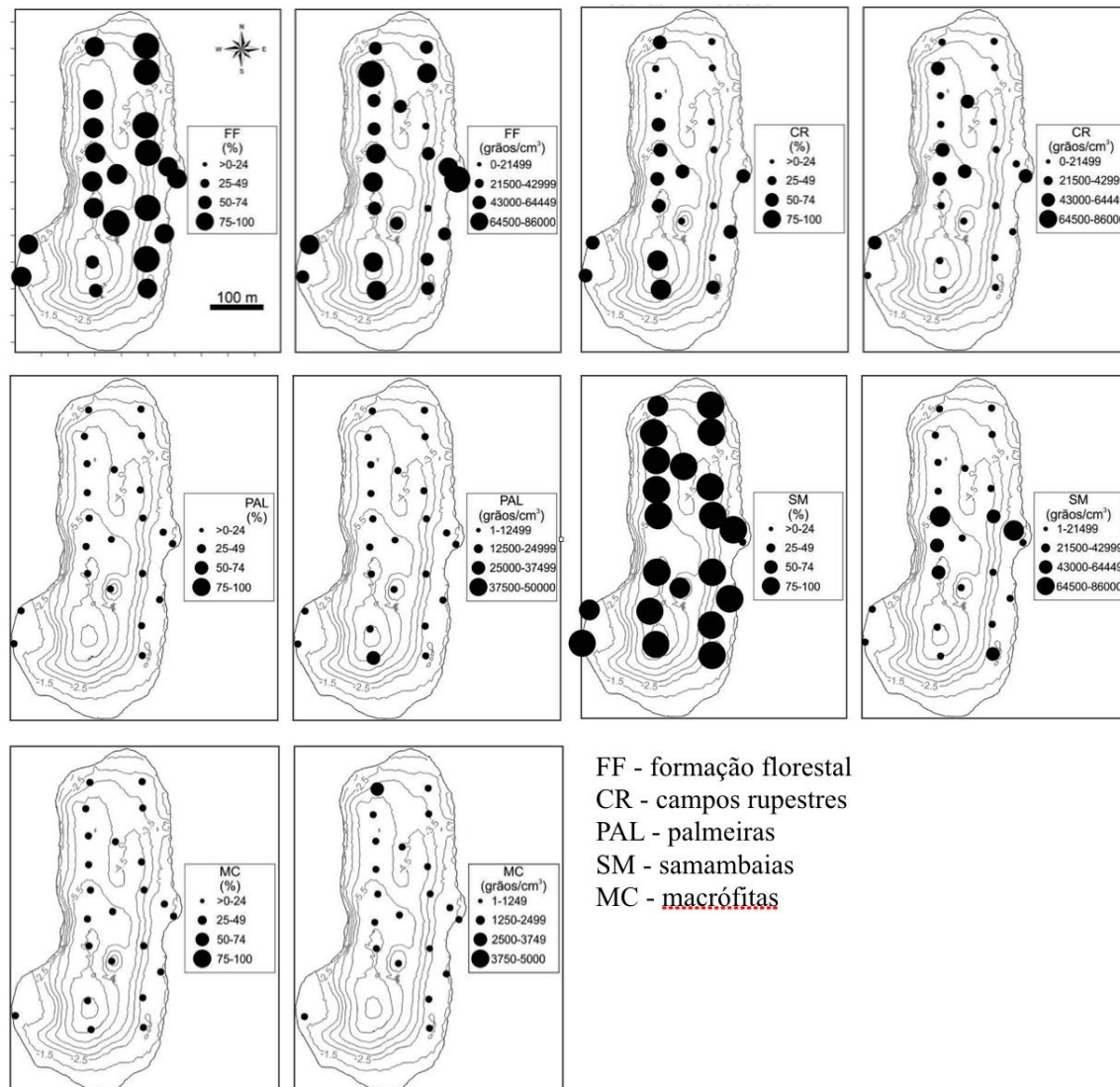
Os dados sobre chuva polínica moderna da Lagoa Três Irmãs ainda estão sendo processados.

Figura 19 - Distribuição espacial de pólen e esporos nos sedimentos superficiais da Lagoa do Violão.



Fonte: Guimarães *et. al.* (2014).

Figura 20 - Distribuição espacial de pólen e esporos nos sedimentos superficiais da Lagoa do Amendoim.



Fonte: Guimarães *et. al.* (2017).

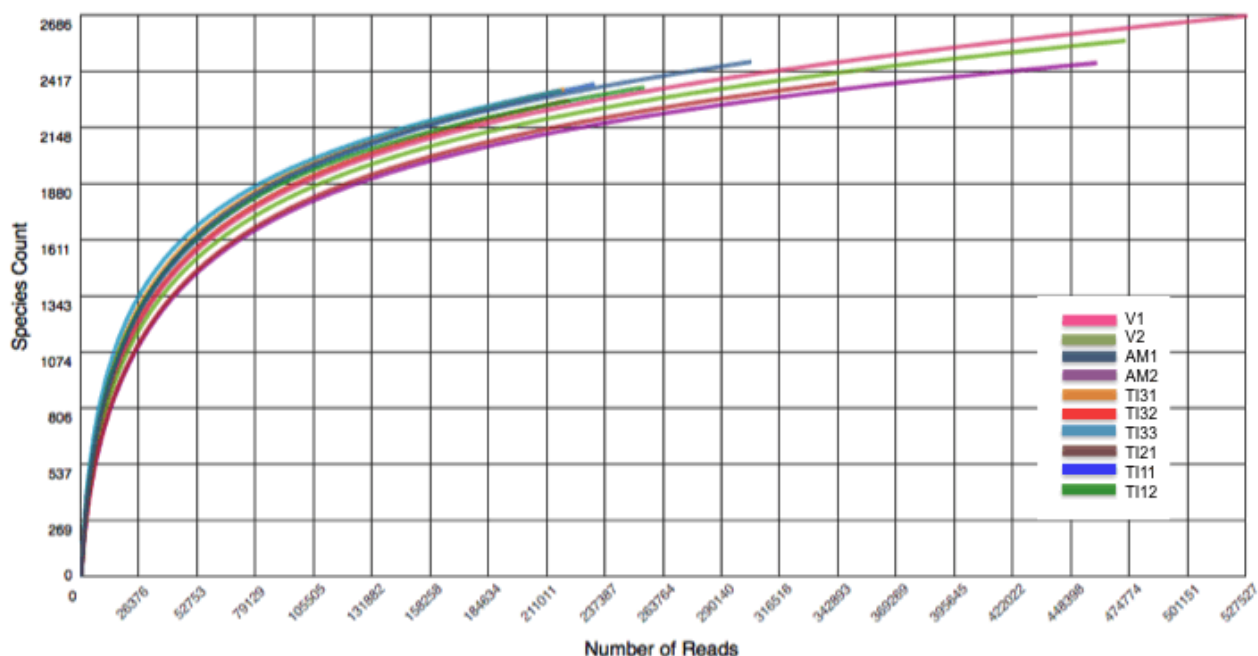
4.8. ANÁLISE GENÔMICA DOS SEDIMENTOS DAS LAGOAS

As análises foram feitas para avaliar dois aspectos da microbiota das lagoas. O primeiro é a composição taxonômica dos microorganismos do sedimento, a partir da sua respectiva abundância relativa. A segunda linha analítica aborda aspectos funcionais da microbiota. A primeira avaliação consiste em verificar a cobertura do sequenciamento através de curvas de rarefação. Esta medida calcula o número esperado de espécies em cada amostra para um tamanho de amostra padrão. Nossos resultados mostraram que o número de sequências obtidas foi suficiente para avaliar a diversidade da comunidade de microrganismos desses sedimentos, já que as curvas tenderam a alcançar um platô para todas as 10 amostras (Figura 21). Já a Figura 22 indica que as lagoas são taxonômicamente

similares tanto do ponto de vista de filo quanto de espécies que são encontradas nas lagoas. Um exemplo de visualização *bi-plot* é introduzido na Figura 23-A. A matriz de observação, contendo a quantificação dos microrganismos nas lagoas, é projetada em cima dos dois principais componentes obtidos pela RDA, verificando-se a distribuição dos microrganismos (pequenos quadrados em cores) espacialmente entre as lagoas (legendas em marrom). Efeitos abióticos são projetados como vetores (flechas em azul), quanto maior o vetor maior a correlação do efeito no quadrante. Estudos de RDA mostram que as pequenas diferenças encontradas podem separar as lagoas em dois grupos.

O primeiro grupo formado pela lagoa Violão e um segundo grupo formado pelas lagoas do Amendoim e Três Irmãs (Figura 23B). Os grupos taxonômicos se diferenciam de acordo com fatores abióticos presentes nas lagoas. Os metais presentes nas lagoas de canga são o principal fator de diferenciação da quantidade relativa de alguns filos encontrados nesta lagoa (Figura 24A). O fato de lagoas distantes como Amendoim e Três Irmãs ocorrerem agrupadas indica que, na presença de fatores abióticos semelhantes, a quantidade de cada filo presente também é semelhante (Figura 24B). Resultados similares foram obtidos ao fazermos as análises no âmbito de espécies. Entretanto é possível observar três grupos, devido à mudança de granularidade de informação na matriz de observação, ou seja, existe uma dispersão maior na distribuição a partir de uma granularidade mais fina (espécies). Novamente Violão se diferencia pelos fatores abióticos que influenciam a abundância relativa de cada táxon. Porém, nesta análise uma das amostras de Amendoim (AM2) possui maior similaridade com Violão (Grupo 2), enquanto a outra (AM1) com amostras da lagoa 3 de Três Irmãs (Grupo 1). Os pontos de amostragem das lagoas 1 e 2 de Três Irmãs formam um outro grupo (Grupo 3). É também interessante notar que ao expandirmos a amostra de espécies que ocorrem em cada lagoa percebemos que as espécies são as mesmas, o que muda é a quantidade relativa de sequências do estudo de metagenômica encontradas que pertencem a cada espécie. As análises foram feitas com os filos e espécies mais frequentes. Porém a expansão de 15 para 50 espécies demonstra que as mesmas estão distribuídas em todos os pontos de coleta, o que diferencia os locais ou lagoas é a frequência com que cada taxa ocorre (Figura 25). Desta forma a visão taxonômica das lagoas é que as mesmas categorias taxonômicas ocorrem, mas fatores abióticos correlacionam-se com a expansão de certos grupos taxonômicos, notadamente na lagoa Violão (Figuras 23 e 24).

Figura 21 - Curva de rarefação da riqueza de espécies gerada a partir das amostras de sedimentos das lagoas Violão (V1 e V2), Amendoim (AM1 e AM2) e Três Irmãs (TI11, TI12, TI21, TI31, TI32 e TI33).

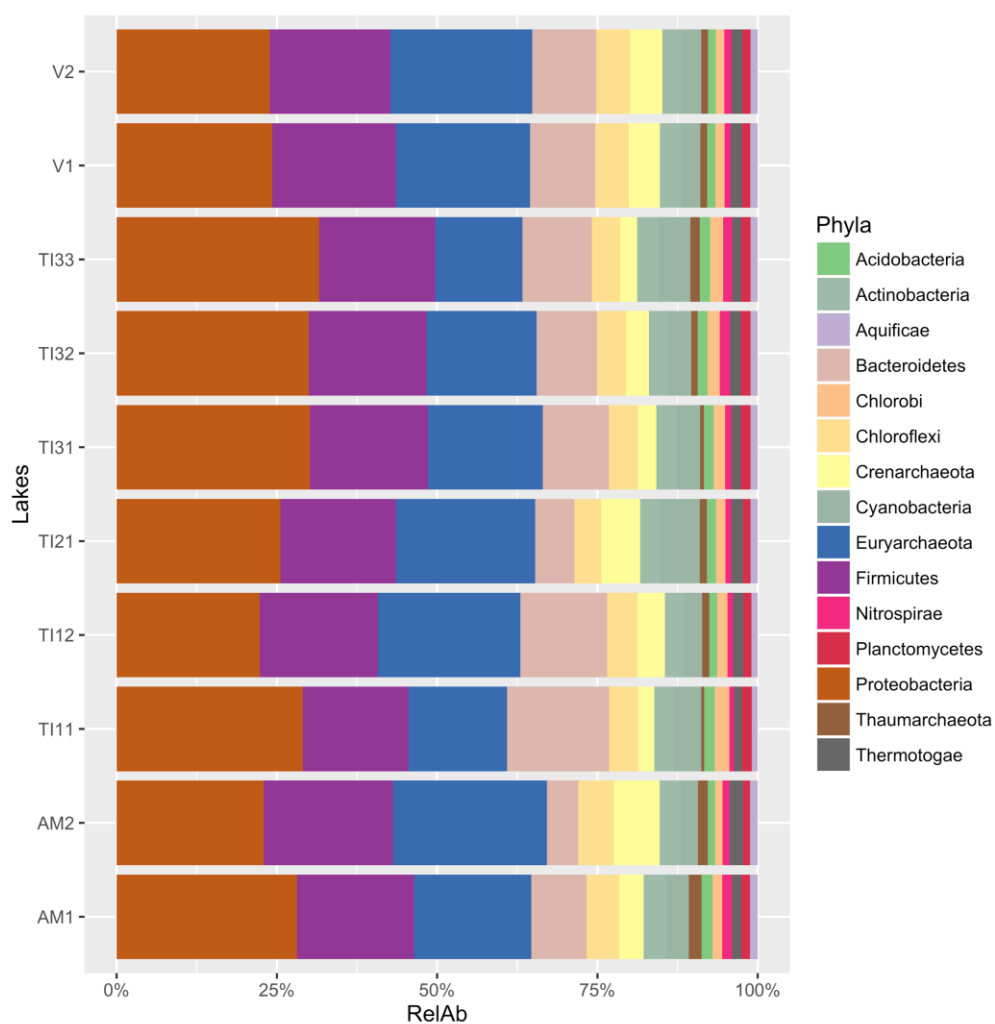


Fonte: próprio autor (2019).

Além de análises relativas à composição taxonômica, foram realizados estudos relativos às funções que os microrganismos expressam nestes ambientes. As funções a partir de Gene Ontology são mostradas na Figura 26. A Figura 26 (A, B e C) mostra que há uma similaridade aparente a partir do perfil de cores que representam diferentes funcionalidades. Nota-se que as funcionalidades diferem em abundância e não em categoria.

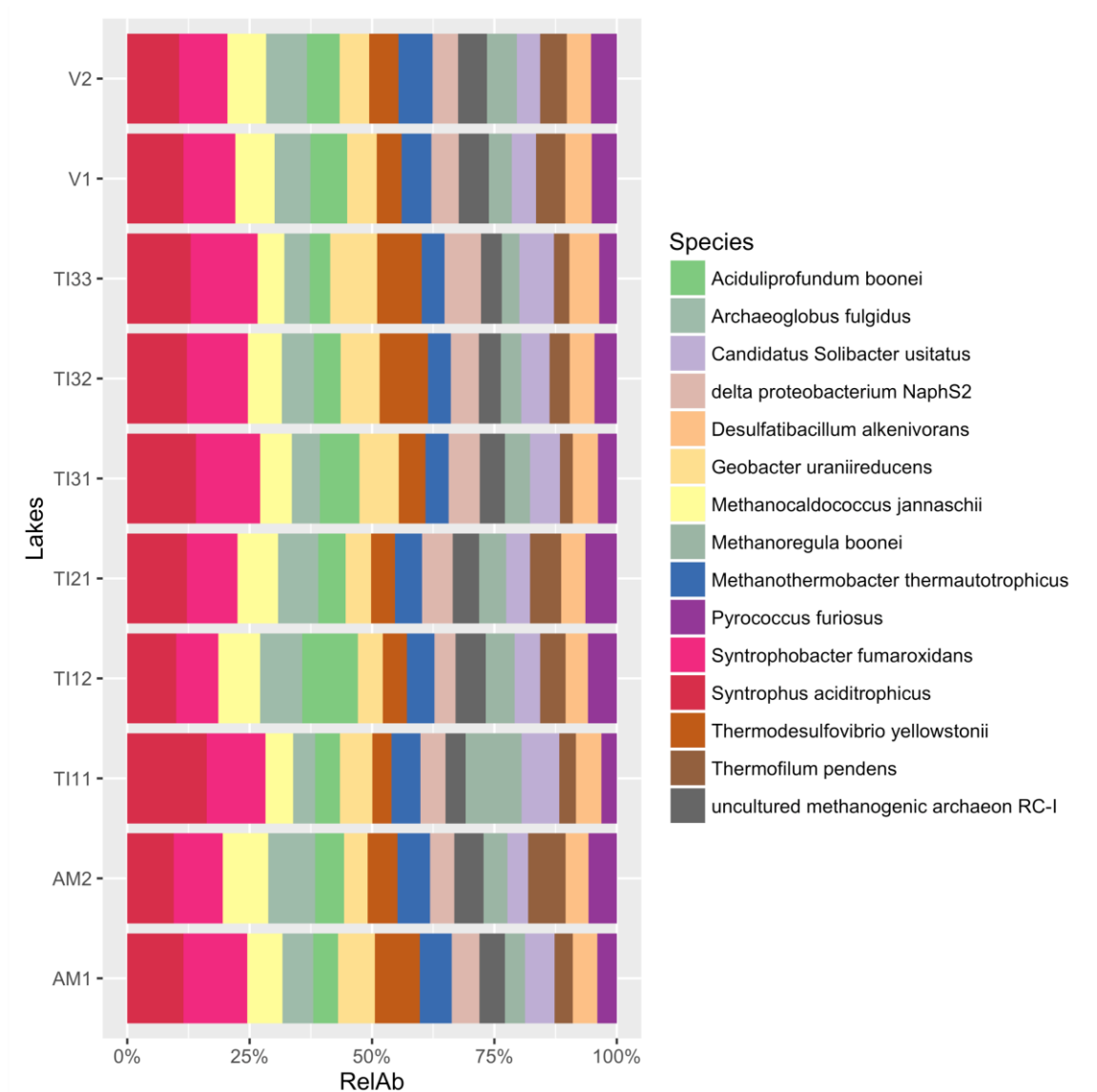
O agrupamento das amostras de acordo com o perfil funcional agrupa a amostra AM2 de Amendoim com as amostras de Violão. Interessantemente este mesmo agrupamento aparece quando as amostras são agrupadas de acordo com o perfil taxonômico. Uma interpretação para esta observação é que as funcionalidades variam de acordo com o perfil taxonômico expandido ou contraído em cada um dos pontos. Por outro lado, não detectamos a exclusividade de grupo taxonômico ou funcional em nenhum dos locais amostrados. É importante ressaltar que a análise funcional tem em conta as 50 funções mais representativas nas amostras. Portanto, para cada ramo de observação de função *Gene Ontology* (BP=Biological Process, MF=Molecular Function, e CC=Cellular Component) foi calculado um agrupamento hierárquico (Figura 27) com base nessas 50 funções. Nota-se uma similaridade funcional entre o ponto AM2 (Lagoa do Amendoim) com a Lagoa do Violão (V1 e V2). Esta similaridade não sugere necessariamente uma funcionalidade ecológica entre as lagoas do Amendoim e Violão, e sim uma similaridade nas amostras.

Figura 22A - Classificação taxonômica das lagoas no âmbito de Filo. São mostradas as abundâncias relativas das 15 espécies mais frequentemente encontradas em cada uma das lagoas (V – Violão; AM – Amendoim; TI – Três Irmãs. O número indica o ponto de amostragem.



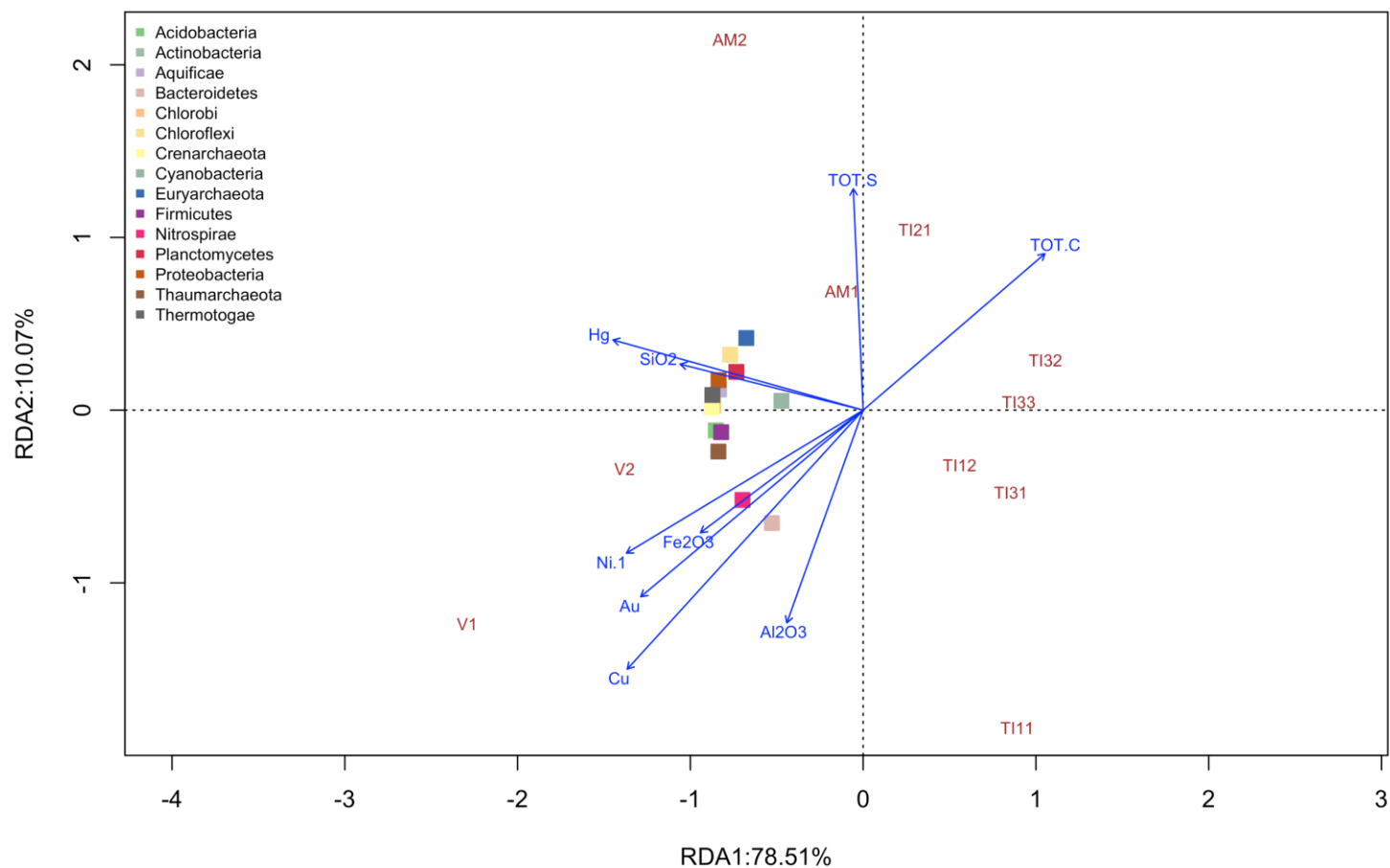
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 22B - Classificação taxonômica das lagoas no âmbito de Espécies. São mostradas as abundâncias relativas das 15 espécies mais frequentemente encontradas em cada uma das lagoas (V – Violão; AM – Amendoim; TI – Três Irmãs. O número indica o ponto de amostragem).



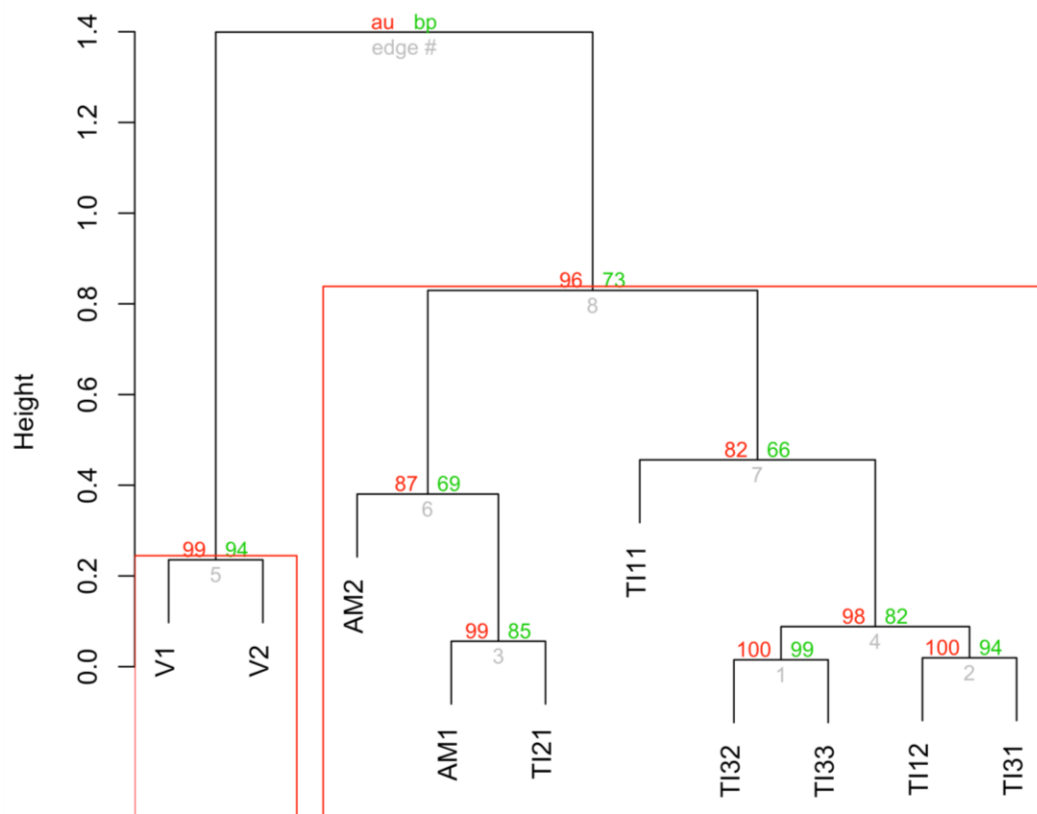
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 23A - Análise de RDA das lagoas. 15 grupos taxonômicos (Filo) são diferenciados em 2 grupos (Figura 23-B) de acordo com a frequência com que cada grupo taxonômico é identificado. As linhas azuis indicam os fatores abióticos que são diferenciados com os grupos taxonômicos.



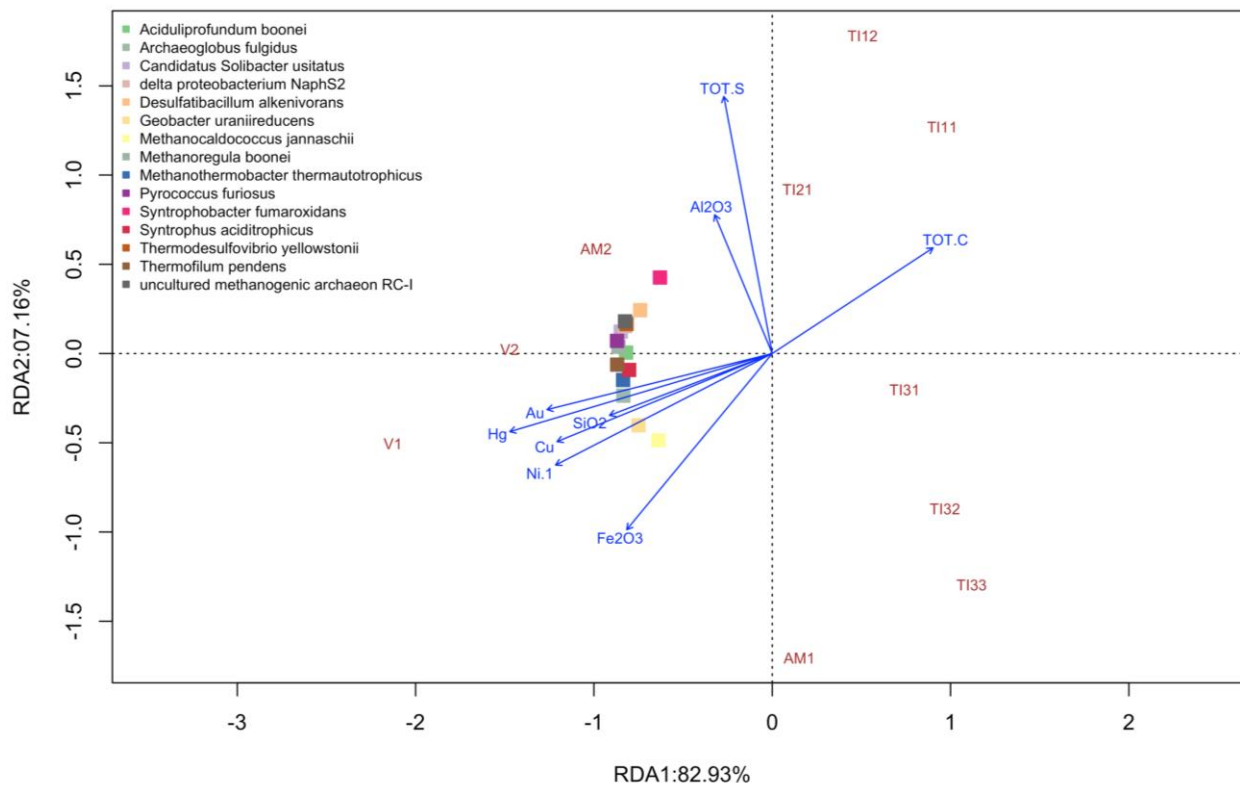
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 23B - A análise de agrupamentos, sugere a formação de 2 grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.44) indicados pelos retângulos em vermelho. A diferença entre os dois grupos também é significativa (H t2-test : T.2 = 144.92, df1 = 15, df2 = 14, p-value = 1.037e-12).



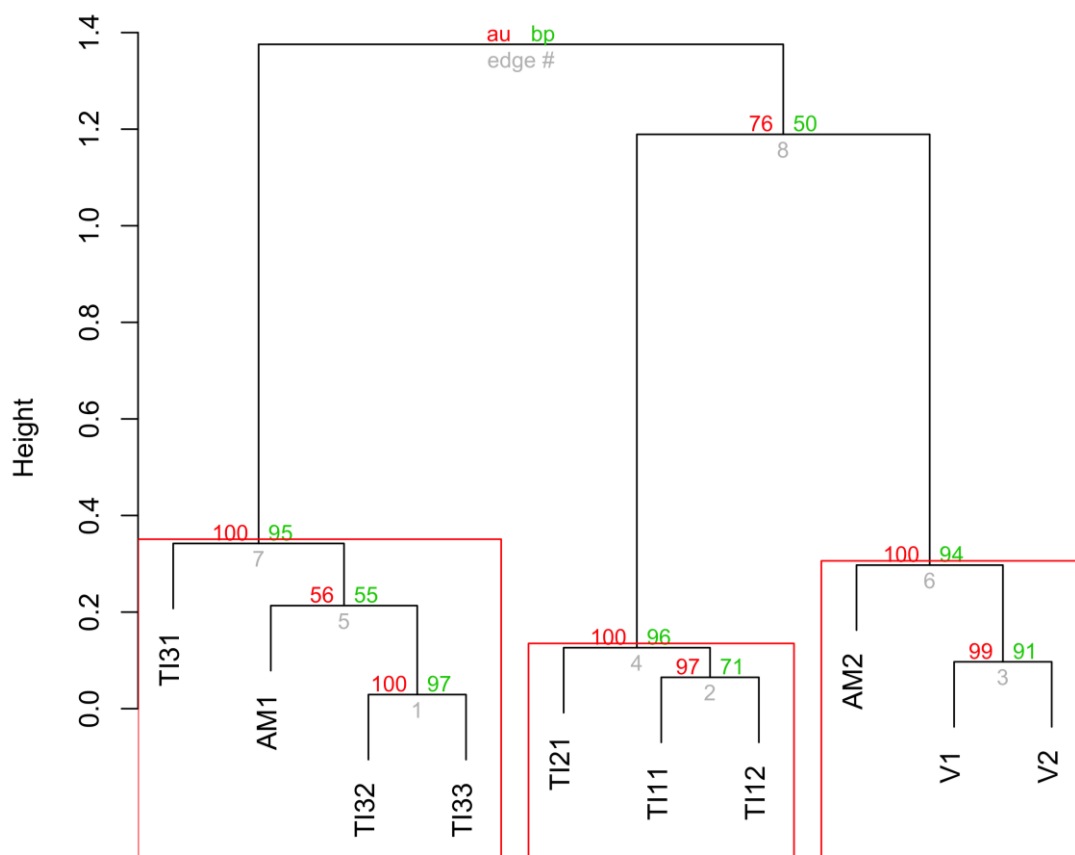
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 24A - Análise de RDA das lagoas. 15 grupos taxonômicos (Espécie) são diferenciados em 3 grupos (Figura 23-B) de acordo com a frequência com que cada grupo taxonômico é identificado. As linhas azuis indicam os fatores abióticos que são diferenciados com os grupos taxonômicos.



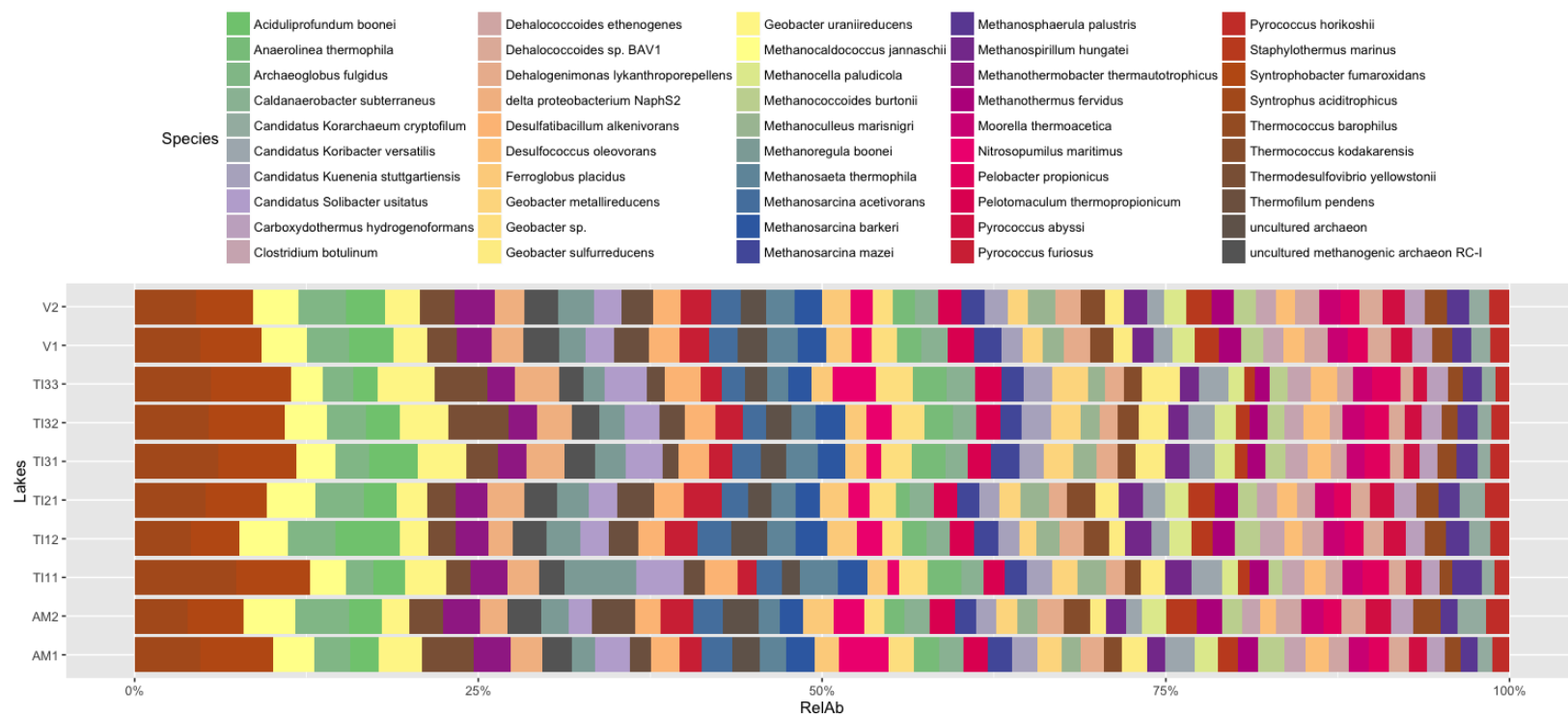
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 24B - A análise de agrupamentos, sugere uma formação de três grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.56) indicados pelos retângulos em vermelho. A diferença entre grupos é significativa: i) [C1, C2] H t2-test : $T.2 = 7.6242$, $df1 = 15$, $df2 = 14$, p-value = 0.000235; ii) [C1, C3] H t2-test : $T.2 = 12.86$, $df1 = 15$, $df2 = 14$, p-value = 1.071e-05). Observa-se uma maior diferenciação entre os grupos C1 e C3.



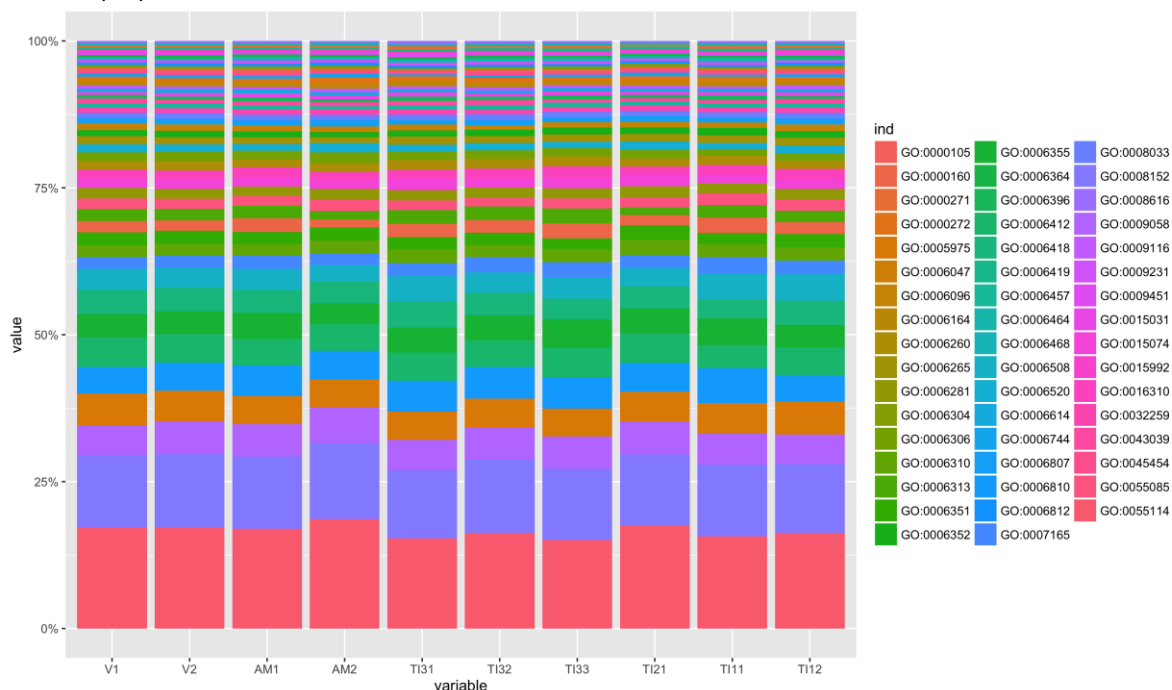
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 25 - Análise comparativa das 50 principais espécies de bactérias que ocorrem nas lagoas amostradas.



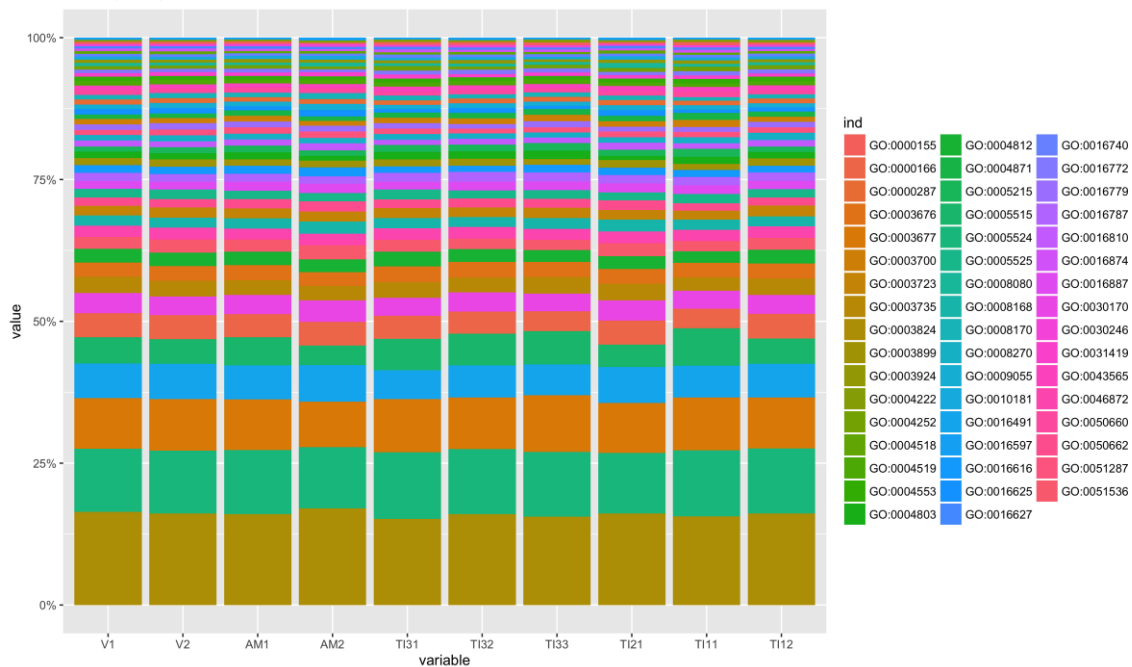
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 26A - Perfil funcional a partir de análise de Gene Ontology, 50 categorias funcionais mais representadas. Os perfis funcionais das lagoas foram analisados a partir de anotações de Biological Process (BP).



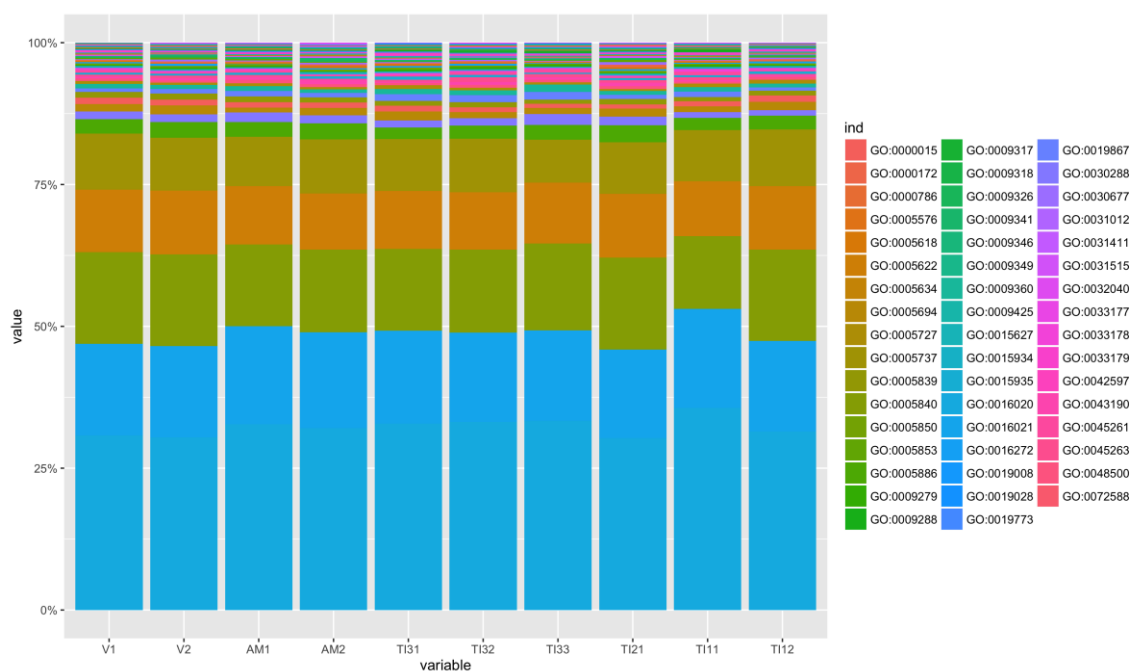
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 26B - Perfil funcional a partir de análise de Gene Ontology, 50 categorias funcionais mais representadas. Os perfis funcionais das lagoas foram analisados a partir de anotações de Molecular Function (MF).



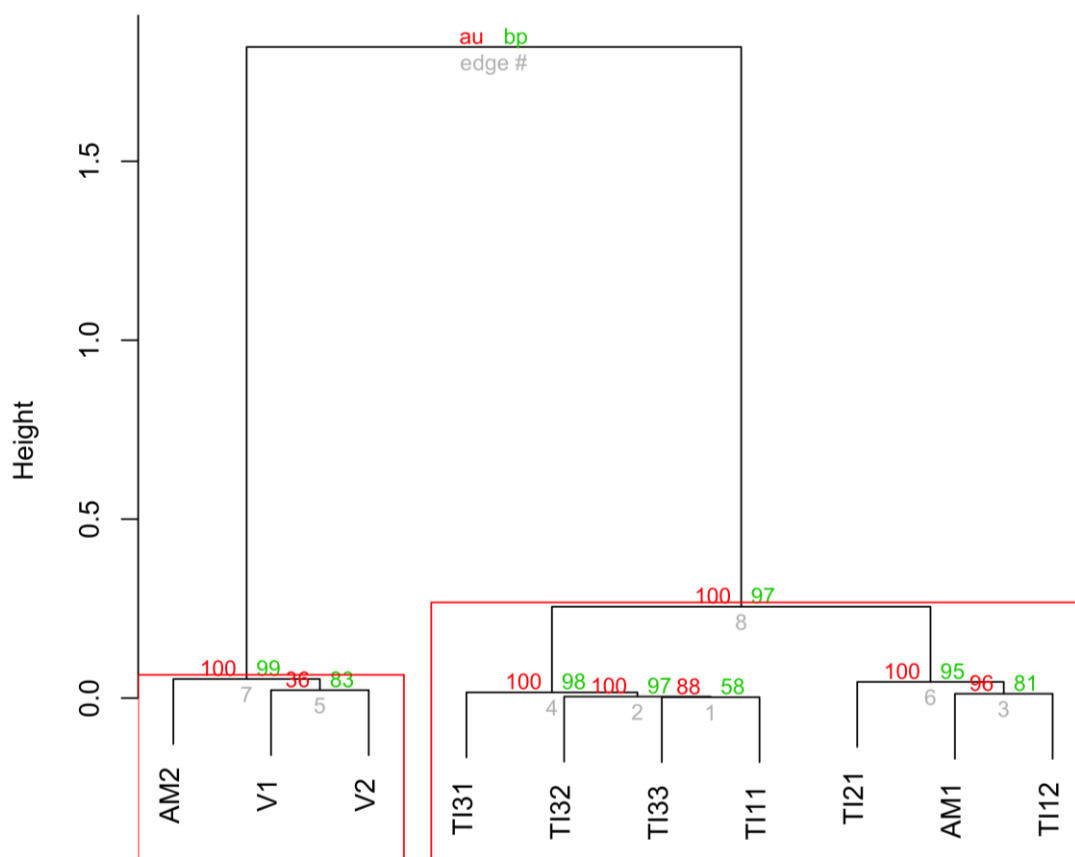
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 26C - Perfil funcional a partir de análise de Gene Ontology, 50 categorias funcionais mais representadas. Os perfis funcionais das lagoas foram analisados a partir de anotações de Cellular Component (CC).



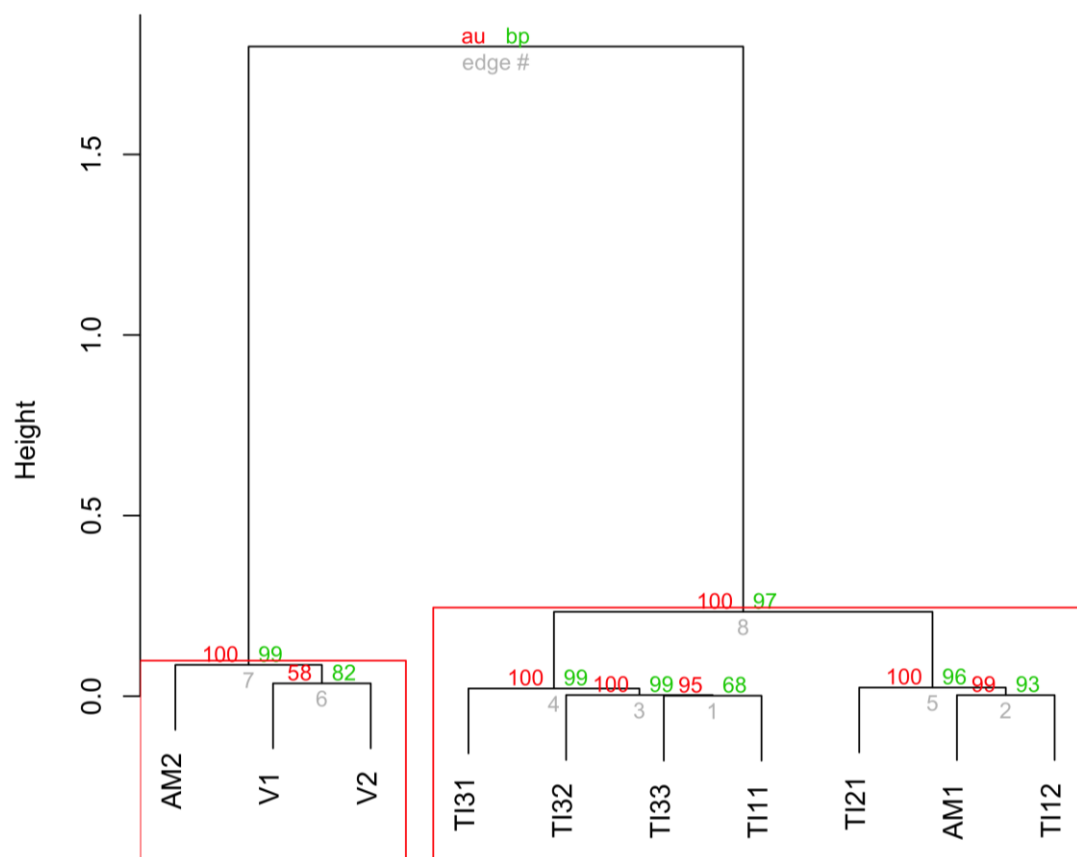
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 27A - A análise de agrupamentos (GO = BP), sugere uma formação de dois grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.74) indicados pelos retângulos em vermelho.



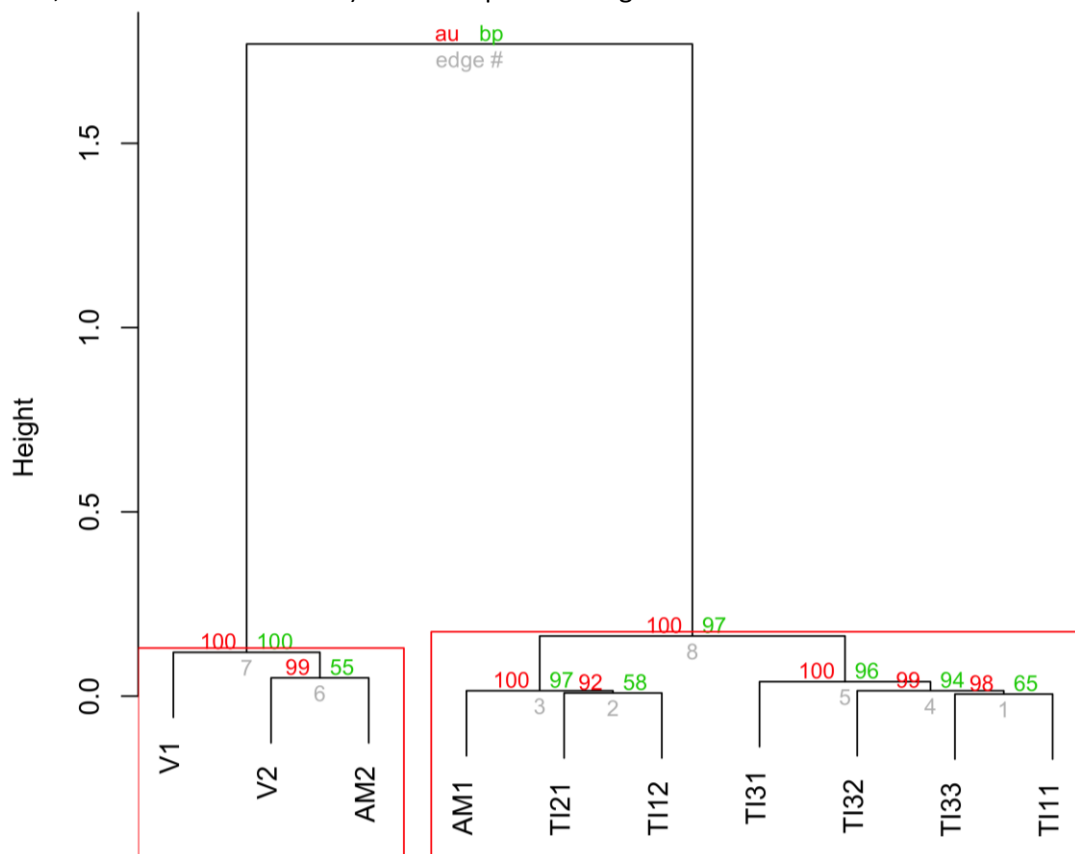
Fonte: próprio autor (2019).

Figura 27B - A análise de agrupamentos (GO = MF), sugere uma formação de dois grupos (p-valor $\geq 95\%$, silhouette médio = 0.73) indicados pelos retângulos em vermelho.



Fonte: próprio autor (2019).

Figura 27C - A análise de agrupamentos (GO = CC), sugere uma formação de dois grupos (p-valor $\geq$ 95%, silhouette médio = 0.72) indicados pelos retângulos em vermelho.



Fonte: próprio autor (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Os processos erosivos observados nas bacias hidrográficas das lagoas estudadas da Serra Sul de Carajás estão associados às drenagens intermitentes escavadas principalmente sobre a canga detrítica. Os pontos terminais destas drenagens são nas lagoas, onde se formam depósitos de sedimentos deltaicos submersos.
- Os tipos de sedimentos de fundo das lagoas são produtos da litologia da bacia de drenagem, com rochas altamente resistentes ao intemperismo físico, e do baixo fluxo de energia das águas das lagoas favorecendo o intemperismo químico e deposição predominante por suspensão. O influxo de material orgânico para as lagoas é muito elevado e é produto da vegetação de cobertura da bacia, das macrófitas e da produtividade primária, cujos macrofragmentos são rapidamente decompostos no fundo das lagoas. A lagoa Três Irmãs 2 apresenta características faciológicas muito similares a outras lagoas preenchidas, e colonizadas por macrófitas, da Serra dos Carajás.

- Embora exista variações na proporção dos elementos químicos nas diferentes lagoas, existem semelhanças geoquímicas entre elas. Os sedimentos das lagoas do Violão, Amendoim, Três Irmãs 1 e 3 podem ser caracterizados como predominantemente de origens detríticas ou mistas (detrítica-orgânicos), enquanto os sedimentos da Lagoa Três Irmãs 2 são predominantemente orgânicos. Assim, com a integração dos dados faciológicos, é possível sugerir que esta última lagoa foi preenchida e colonizada por macrófitas, mas devido a um processo recente de abatimento, geração de espaço adicional de acomodação e aumento da lâmina d'água, esta lagoa transformou-se em uma lagoa relativamente ativa.
- Considerando os parâmetros morfométricos analisados é possível indicar que as lagoas do Violão e Três Irmãs 3 podem ser estatisticamente semelhantes, bem como Amendoim e Três Irmãs 1 e 2.
- Em comparação com outros lagos e lagoas do Brasil e do mundo, as lagoas de Carajás apresentam baixa concentração de nutrientes e produtividade muito baixa.
- A chuva polínica moderna das lagoas do Violão e Amendoim pode ser utilizada para identificar alterações na estrutura das florestas adjacentes a estas lagoas, bem como fornecer subsídios para auxiliar na determinação da extensão geográfica das espécies de canga desta região.
- As lagoas apresentam os mesmos grupos taxonômicos, porém com abundância variável.
- As análises metagenômicas foram realizadas com uma intensidade de sequenciamento que gerou em média 3.5 milhões de fragmentos de sequência de DNA, alcançando uma cobertura de 2500 microrganismos.
- A análise funcional realizada para as funções biológicas mais representativas sugere uma alta afinidade funcional dessas nas lagoas estudadas.

6 CONCLUSÃO

A avaliação comparativa das características gerais das lagoas definidas pelos estudos multidisciplinares do ITV, indica que as lagoas do Violão, Amendoim e Três Irmãs, da Serra Sul de Carajás, apresentam similaridades em suas características abióticas (morfometria, sismoestratigrafia, geoquímica, sedimentos de fundo e qualidade de água) e bióticas (microrganismos e palinomorfos).

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, p. 711-728, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9898:1987 - Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Brasília-DF: ABNT, 1987.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTAL. Resolução No357, de 17 de março de 2005. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63. 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>.

BRAZILIAN EASTERN AMAZONIA. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. v. 87, p. 2097-2110, 2015.

CANADIAN drinking water quality summary Table Prepared by Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water of the Federal-Provincial-Territorial Committee on Health and the Environment. 2014. Disponível em: http://maxxam.ca/wp-content/uploads/2015/07/sum_guide-res_recom-eng.pdf.

CARDOSO, A. C. *et al.* **Criteria for the identification of freshwaters subject to eutrophication: their use for the implementation of the Nitrates and Urban Waste Water treatment Directives**. Luxembourg: European Commission Joint Research Centre, 2001.

CARLSON, R. E. Atrophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**. v. 22, p. 361-369, 1977.

CARREIRA, L. M. M. *et al.* **Catalogo de Pólen das Leguminosas da Amazônia Brasileira**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1996.

CARREIRA, L. M. M.; BARTH, O. M. **Atlas de Pólen da vegetação de canga da Serra de Carajás (Pará, Brasil)**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003.

CATUNEANU, O. *et al.* Towards the standardization of sequence stratigraphy. **Earth-Science Reviews**. v. 92, p. 1-33, 2009.

CHORUS, I.; BARTRAM, J. **Toxic cyanobacteria in water**. A guide to their public health consequences, monitoring and management. E & FN Spon on behalf of the World Health Organization. 1999.

COLINVAUX, P. A.; DE OLIVEIRA, P. E.; PATIÑO, J. E. M. **Amazon Pollen Manual and Atlas = Manual e Atlas Palinológico da Amazônia**. Amsterdam: Hardwood Academic. 1999.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Report on the Quality of Waters in the Interior of São Paulo State (Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo), São Paulo State Environmental Agency (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB), São Paulo, 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Dispõe sobre a homologação da revisão da Norma Técnica L5.303 - Fitoplâncton de Água Doce - Métodos Qualitativo e Quantitativo (Método de Ensaio) - dez/2005. Companhia de Tecnologia de

Saneamento Ambiental, Secretária de Meio Ambiente, Estado de São Paulo. 2006. Disponível em: <http://www.bmn.com.br/plan-leg/ma/est-sp/decis/cetesb42-06.pdf>

DANIEL, G. B.; MALONE, R. A classification of freshwater Louisiana lakes based on water quality and user perception data. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 9, p. 179-193, 1987.

DRINKING WATER DIRECTIVE (1998/83/EC) of 3rd November 1998 on the quality of water intended for human consumption. Brussels: Official Journal of the European Communities, L330/32, 5th December 1998.

DURAND, P. *et al.* Nitrogen processes in aquatic ecosystems. In: SUTTON, M.A. *et al.* **The European Nitrogen Assessment**. (S. I.): Cambridge University Press, 2011.

EPA. Method 9060A - Total organic carbon. 5P. Revision 1. United States Environmental Protection Agency. 2004.

FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos River bar, a study in the significance of grain size parameters. **J. Sediment. Petrol.** v. 27, p. 3, 1957.

GOLDER Anexo IV – Geologia. Estudo de Impacto Ambiental, EIA Projeto Ferro Carajás S11D. 2010.

GUIMARÃES, J. T. F. *et al.* Source and distribution of pollen and spores in surface sediments of a plateau lake in south-eastern Amazonia. **Quatern Int.** v. 352, p. 181-196, 2014.

GUIMARÃES, J. T. F. *et al.* Late Quaternary environmental and climate changes registered in lacustrine sediments of the Serra Sul de Carajás, southeast Amazonia. **J. Quatern Sci.** v. 31, p. 61-74, 2016.

GUIMARÃES, J. T. F. *et al.* Modern pollen rain as a background for palaeoenvironmental studies in the Serra dos Carajás, southeastern Amazonia. **The Holocene**. v. 27, p. 1055-1066, 2017.

HAKANSON, L. **Lakes: Form and Function**. Uppsala: The Blackburn Press. 2004.

LAMBOU, V.W. *et al.* Comparison of trophic state measurements. **Water Res.** v. 17, p. 1619-1983, 1983.

LAMPARELLI, M. C. **Degrees of trophy in water bodies of São Paulo**: Evaluation of monitoring methods. São Paulo: Doctoral Thesis, Institute of Biosciences, University of São Paulo. 2004.

MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Geocronologia da Província mineral Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. v. 7, p. 263-288, 1995.

MAURITY, C. W.; KOTSCHOUBEY, B. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 – Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. v. 7, p. 331-362, 1995.

MOLISANI, M. M. *et al.* Trophic state, phytoplankton assemblages and limnological diagnosis of the Castanhão Reservoir, CE, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**. v. 22, p. 1-12, 2010.

NUNES, J. A. **Florística, Estrutura e Relações Solo-Vegetação em Gradiente Fitofisionômico Sobre Canga, na Serra Sul, Flona de Carajás-Pará**. Master Thesis, Universidade Federal de Viçosa. 2009.

NUNES, J. A. *et al.* Soil-vegetation relationships on a banded ironstone 'island', Carajás Plateau,

OECD. Eutrophication of Water, Monitoring, Assessment and Control, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris. 1982.

OLSZEWSKI, W. J. *et al.* The age, origin, and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting. **Precambrian Res.** v. 42, p. 229–254, 1989.

PORTO, M. L.; SILVA, M. F. F. Tipos de vegetação metalófila em áreas da Serra de Carajás e de Minas Gerais, Brasil. **Acta Botanica Brasilica.** v. 3, p. 13-21, 1989.

PODSECHINE, V.; SCHERNEWSKI, G. The influence of spatial Wind inhomogeneity on flow patterns in a small lake. **Water Research.** v. 33, p. 3348-3356, 1999.

RÄMÖ, O.T. *et al.* 1.88 Ga oxidized A-Type granites of the Rio Maria Region, eastern Amazonian craton, Brazil: Positively Anorogenic. **Journal of Geology.** v. 110, p. 603-610, 2002.

REIS, L. S. *et al.* 2017. New insights about vegetation and environmental changes in Serra Sul dos Carajás, southeastern Amazonia, during the late Pleistocene and Holocene. **Quaternary International.**

REZENDE, N. P.; BARBOSA, A. L. M. **Relatório de pesquisa de minério de ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará**. Belém: AMZA, 1972.

ROUBIK, D. W.; MORENO, J. E. P. **Pollen and Spores of Barro Colorado Island**. Monographs in Systematic Botany, v. 36, St. Louis. 1991.

SAHOO, P. K. *et al.* 2016. : Influence of seasonal variation on the hydro-biogeochemical characteristics of two upland lakes in the Southeastern Amazon, Brazil, *Anais da Academia Brasileira Ciências*.

SAHOO, P. K. *et al.* A multi-proxy geochemical study of surface sediments in a plateau lake of Carajas in the southeastern Amazon region: implication for provenance and post depositional processes. **Appl Geochem.** v. 52, p. 130-146, 2015.

SCHNURRENBERGER, D.; RUSSELL, J.; KERRY, K. Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. **Journal of Paleolimnology.** v. 29, p. 141-154, 2003.

Skirycz, A. *et al.* Canga biodiversity, a matter of mining. **Frontiers in Plant Science.** v. 5, p.1-9, 2014.

SMEWW. 1060 - Collection and preservation of samples. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 2005.

SOUZA-FILHO, P. W. M. *et al.* Basin morphology, sedimentology and seismic stratigraphy of an upland lake from Serra dos Carajás, southeastern Amazon, Brazil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. v. 11, p. 71-83, 2016.

TUREKIAN, K. K.; WEDEPOHL, K. H. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. **Geol. Soc. Am. Bull.** v. 72, p. 175-192, 1961.

UPDIKE, T.; COMP, C. **Radiometric Use of WorldView-2 Imagery. Technical Note, DigitalGlobe, Colorado.** 2010. Disponível em: www.digitalglobe.com/downloads/Radiometric_Use_of_WorldView-2_Imagery.pdf.

VAIL, P. R.; MITCHUM, R. M. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 1: Overview, In: PAYTON, C.E. Seismic Stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration. **AAPG Memoir**. v. 26, p. 51-52, 1977.

VOLLENWEIDER, R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. **Memorie dell'Istituto Italiana di Idrologia**. v. 33, p. 53 –83, 1976.

WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust, *Geochem. Cosmochim. Acta*. v. 59, p. 1232-1277, 1995.

WENTWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of Geology**. v. 30, p. 377-392, 1922.

WHO. Guidelines for drinking-water quality. Incorporating the first and second agenda, Volume 1. Recommendations guidelines for drinking water quality, World health organization, 3rd Edition, Geneva. 2008. Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/fulltext.pdf.