## UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA CURSO DE GEOLOGIA

**RODRIGO AGUILAR GUIMARÃES** 

CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DE AMBIENTES EXTREMOS NA CORDILHEIRA DOS ANDES

**CURITIBA** 

#### **RODRIGO AGUILAR GUIMARÃES**

### CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS DE AMBIENTES EXTREMOS NA CORDILHEIRA DOS ANDES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde

**CURITIBA** 

# Dedicatória Dedico este trabalho a todos que lutam para iluminar um pouco deste mundo assombrado pelos demônios. Porque este é, na realidade, o verdadeiro ambiente extremo.

#### **AGRADECIMENTOS**

Por este trabalho e pelo que ele representa, agradeço a dois nomes em especial. Primeiro, ao meu melhor amigo, Leonardo Pegoraro, que foi a melhor companhia que eu poderia pedir durante toda a minha graduação, além de grande apoiador técnicocientífico deste trabalho. Além dele, a meu pai, Gilson Burigo Guimarães, meu modelo e conselheiro acadêmico desde meus primeiros passos na vida e no curso, e o grande responsável por eu ter trilhado o caminho das pedras. No entanto, não haveria como deixar de agradecer às equipes dos dois laboratórios que me proporcionaram a oportunidade de participar desta pesquisa. Aos membros do Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (Lamir) e, em especial, à equipe do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH), que me acolheu por mais de 3 anos, ao longo de iniciações científicas, parcerias e, agora, neste trabalho de conclusão de curso. Desde os técnicos responsáveis pelas análises químicas até meus colegas de trabalho, em especial à Andressa Barreto Lima, sou grato por todo esse tempo de pesquisa juntos. Para os professores Camila de Vasconcelos Müller Athayde e Gustavo Barbosa Athayde, que orientaram minhas atividades em pelo menos algum momento desses anos, meu mais sincero obrigado. Vocês não só proporcionaram meu amadurecimento acadêmico, mas também permitiram que eu trabalhasse em um lugar que hoje enxergo como uma segunda casa.

#### **RESUMO**

Ambientes podem ser considerados extremos em função de diferentes características, incluindo condições de aridez, elevada altitude, veloz ação eólica e alta salinidade. Duas regiões da Cordilheira dos Andes abrigam ambientes notáveis por essas características, a Puna Argentina-Chilena e o sul da Patagônia. Essas áreas contêm inúmeras ambientes hidrológicos que são influenciadas pelos contextos tectônico, geológico, climático e biológico de cada porção da cordilheira, dividida em quatro compartimentos principais de acordo com mudanças na tectônica e vulcanismo. Mais que isso, ambas macrorregiões abrigam organismos microbiais diretamente relacionados com a geologia e clima de cada localidade, e que são fundamentais para a compreensão da presença biológica em ambientes extremos. A Puna encontra-se na Zona Vulcânica Central, caracterizada por expressivo espessamento crustal, altitudes acima de 4000 m e baixíssima pluviosidade. A região da Patagônia encontra-se na Zona Vulcânica Austral, dominada pela influência dos ventos de oeste, baixas altitudes e forte gradiente pluviométrico longitudinal. Três áreas em cada macrorregião foram escolhidas para caracterização hidroquímica superficial, buscando compreender como as variáveis geológicas e climáticas influenciam nas assinaturas das águas de cada local, além de investigar possíveis semelhanças e particularidades hidrológicas desses ambientes na Puna e na Patagônia. Os parâmetros considerados foram temperatura, pH, condutividade elétrica específica, salinidade e concentrações iônicas dissolvidas de cálcio, magnésio, sódio, potássio, ferro, bicarbonato, carbonato, cloreto, sulfato, fosfato, fluoreto e nitrato, junto de valores de sílica dissolvida. Foram usadas três abordagens estatísticas, agrupando as amostras de acordo com as macrorregiões, localidades e por ambientes hidrológicos. Para todos os dados, foram calculados parâmetros estatísticos amostrais descritivos básicos, além da elaboração de boxplots e cartografia das amostras em ambiente SIG, ilustradas de acordo com os percentis de cada distribuição amostral. Ainda, foram elaborados modelos hidroquímico-geológicos conceituais de cada localidade, ilustrativos dos principais componentes geológicos, hídricos e climáticos de cada área estudada. Por fim, a composição da cartografia hidroquímica com os modelos citados foi feita na forma de um atlas representativo dos resultados gerais encontrados. Esse conjunto de resultados demonstrou influências macrorregionais na hidroquímica, principalmente de caráter sódico cloretado e muito salino na Puna e tendência bicarbonatada na Patagônia. Também ficou clara a influência das diferentes composições vulcânicas nas assinaturas das águas superficiais, assim como a importância da ausência de vulcanismo em algumas áreas e feicões. Isso fica especialmente identificável na relevância do caráter hidrotermal nos ambientes hidrológicos, havendo grandes diferenças entre sistemas hidrológicas com e sem a influência de hidrotermalismo. No primeiro caso, há tendência de precipitação mineral rumo à jusante, enquanto na segunda ocorre predomínio de enriquecimento salino. Ainda, foram identificadas diferentes assinaturas de exalações de fluidos termais na Puna e na Patagônia, havendo predomínio de composições sódicas cloretadas na primeira, e bicarbonatadas mistas na segunda, assim como indica a tendência macrorregional identificada previamente. Além disso, os lagos de todos os locais estudados concentram maior salinidade em relação às demais feições, algo derivado tanto da entrada de fluidos salinos nesses ambientes quanto da aridez predominante nesses locais.

Palavras chave: Hidroquímica, Andes, Geoprocessamento, Estatística.

#### **ABSTRACT**

Environments can be considered extreme due to different characteristics, including conditions of aridity, high altitude, wind velocities and high salinity. Two regions of the Andes Cordillera are home to environments notable for these characteristics, the Argentine-Chilean Puna and southern Patagonia. These areas contain numerous water features that are influenced by tectonic, geological, climatic and biological contexts of each portion of the mountain range, which is divided into four main compartments according to changes in tectonics and volcanism. More than that, both macro-regions are home to microbial organisms directly related to the geology and climate of each location, which are fundamental for understanding the biological presence in extreme environments. The Puna is located in the Central Volcanic Zone, characterized by expressive crustal thickening, altitudes above 4000 m and almost absent rainfall, while this portion of Patagonia is located in the Austral Volcanic Zone, dominated by the influence of westerlies, low altitudes and a strong longitudinal rainfall gradient. Three areas in each macro-region were chosen for surface hydrochemical characterization, seeking to understand how geological and climatic variables influence water signatures of each location, in addition to investigating possible hydrological similarities and particularities of these environments in the Puna and Patagonia. The parameters considered were temperature, pH, specific electrical conductivity, salinity and dissolved ionic concentrations of calcium, magnesium, sodium, potassium, iron, bicarbonate, carbonate, chloride, sulfate, phosphate, fluoride and nitrate, together with values of dissolved silica. Three statistical scales were used, grouping the samples according to macro-regions, localities and water features. For all data, basic descriptive sample statistical parameters were calculated, in addition to the elaboration of boxplots and data cartography in a GIS environment, illustrated according to the percentiles of each sample distribution. In addition, conceptual hydrochemical-geological models were developed for each location, illustrating the main geological, water and climatic components of each studied area. Finally, the composition of the hydrochemical cartography with the models mentioned was made in the form of a representative atlas of the general results found. This set of results showed macro-regional influences on hydrochemistry, mainly of a saline sodium chloride character in Puna and a bicarbonate tendency in Patagonia. The influence of different volcanic compositions on surface water signatures was also evident, as well as the importance of the absence of volcanism in some areas and features. This is especially identifiable in the relevance of the hydrothermal character in water features, with great differences between hydrological systems with and without the influence of hydrothermalism. In the first case, mineral precipitation prevails towards downstream, while in the second occurs a predominance of saline enrichment. Furthermore, different signatures of thermal fluid exhalations were identified in Puna and Patagonia, with a predominance of sodium chloride compositions in the first and mixed bicarbonate in the second, as suggested by the macro-regional trend previously identified. In addition, lakes in all the places studied have greater salinity compared to other features, something derived both from the entry of saline fluids in these environments and from the significant aridity of the climatic context.

Keywords: Hydrochemistry, Andes, Geoprocessing, Statistics.

#### **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Mapa de localização	3
Figura 2: Zonas vulcânicas dos Andes	8
Figura 3: Exemplos de microbialitos encontrados nos Andes Centrais	17
Figura 4: Locais das amostragens por região	19
Figura 5: Coleta de dados em campo com a sonda HORIBA	20
Figura 6: Fluxograma simplificado do desenvolvimento do trabalho	21
Figura 7: Exemplo de código utilizado no aplicativo HydroChem-LPH	26
Figura 8: Exemplo de plotagem gráfica do aplicativo HydroChem-LPH	27
Figura 9: Modelos digitais de elevação das áreas estudadas	47
Figura 10: Modelos conceituais das áreas de Cerro Galán e Peinado	50
Figura 11: Modelos conceituais das áreas de Botijuela e Torres del Paine	51
Figura 12: Modelos conceituais das áreas de Pali-Aike e Toro	52
Figura 13: Sistemas hidrológicos de Borijuela	58
LISTA DE TABELAS	
Tabela 1: Número de amostras coletadas por região estudada	22
LISTA DE GRÁFICOS	
Gráfico 1: Boxplots comparativos dos dados macrorregionais	31
Gráfico 2: Diagrama de Piper dos dados macrorregionais	33
Gráfico 3: Boxplots comparativos dos dados locais	35
Gráfico 4: Diagrama de Piper dos dados locais	39

Gráfico 5: Boxplots comparativos dos ambientes hidrológicos	43
Gráfico 6: Diagrama de Piper dos ambientes hidrológicos	45
Gráfico 7: Curvas de solubilidade de sais em função da temperatura	62

#### SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO E PROBLEMA	2
1.2. OBJETIVOS	4
1.3 JUSTIFICATIVA	5
2. REVISÃO TEÓRICA	6
2.1 CONTEXTO TECTÔNICO-ESTRUTURAL	7
2.2 GEOLOGIA LOCAL	11
2.3 ASPECTOS CLIMÁTICOS	13
2.4 MICROBIAIS NOS ANDES	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 ESCALAS DE ABORDAGEM	22
3.2 MÉTODOS ANALÍTICOS	23
3.3 APLICATIVO HYDROCHEM-LPH	24
4. RESULTADOS	28
4.1 ABORDAGEM MACRORREGIONAL	28
4.2 ABORDAGEM LOCAL	33
4.3 ABORDAGEM POR AMBIENTES HIDROLÓGICOS	39
4.4 CARTOGRAFIA HIDROQUÍMICA	45
4.4.1 DESCRIÇÃO GERAL DAS ÁREAS DE ESTUDO	46
4.4.2 CARTOGRAFIA DOS ESTIMADORES ESTATÍSTICOS	53
5. DISCUSSÕES	55
5.1 HIDROQUÍMICA DAS MACRORREGIÕES	55
5.2 HIDROQUÍMICA DE DETALHE	56
5.3 ANÁLISE DE PERFIS HIDROLÓGICO-TOPOGRÁFICOS	60
5.4 MICROBIAIS E ASPECTOS HIDROQUÍMICOS	63
6. CONCLUSÕES	64
7. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS	67
ANEXO I: Banco de dados utilizado	75
ANEXO II: Atlas hidroquímico dos ambientes extremos da Cordilheira dos Andes	76

#### 1. INTRODUÇÃO

A definição do que seria um ambiente extremo é algo totalmente subjetivo, dependendo tanto da concepção do que são condições extremas para o autor quanto dos referenciais considerados "normais". Isto é, dependendo de qual local da superfície do planeta consideramos detentor de condições medianas, um ambiente pode ser avaliado como extremo ou não. Essa concepção também pode mudar se estivermos avaliando diferentes níveis da estrutura da Terra. Por exemplo, é óbvio que parâmetros como temperatura e pressão confinante são muito mais elevados no manto do que na superfície da crosta. No entanto, neste trabalho, nossos referenciais de normalidade e os objetos de estudo em si são todos superficiais, e as variáveis levadas em consideração são meteorológicas, hidroquímicas ou físico-químicas.

Considerando os parâmetros de pluviosidade, incidência de radiação solar e ação eólica regionais, junto de concentrações iônicas dissolvidas elevadas em corpos d'água superficiais, a Cordilheira dos Andes abriga alguns dos exemplos mais notáveis de todo o continente americano. Tal notabilidade se dá justamente porque ocorrem nessa região ambientes com pluviosidade anual praticamente ausente, velocidades de rajadas de vento registradas frequentemente de dezenas de km/h e corpos hídricos continentais com salinidades muito acima dos valores médios registrados para a água marinha – cerca de 35 g/L (Pfeiffer et al., 2018; Favaro et al., 2020; Schäbitz et al., 2013).

Esses ambientes com condições meteorológicas e hidroquímicas extremas são interessantes do ponto de vista científico, dada a natureza anômala em relação a outras porções do continente sul-americano. Cabe destaque que esses locais se tornam ainda mais especiais devido aos fatores geológicos e biológicos associados a eles. Em diversas porções da cordilheira, há não apenas o registro de vulcanismo recente muito próximo ou coincidente com ambientes hidrológicos, mas também edifícios, condutos e exalações vulcânicas ativas por vezes nas cercanias imediatas de lagos, drenagens e nascentes (Richards et al., 2013; Grosse et al., 2020; Sancho-Tomás et al., 2020). Ainda do ponto de vista geológico, outro fator de notável interesse é a presença de precipitações carbonáticas, mesmo em locais com as mais diversas temperaturas, desde próximo a 0°C até quase o ponto de ebulição da água.

Já no aspecto biológico, o inegável valor científico desses locais se dá pela presença de esteiras e colônias microbianas diretamente associadas com ambientes hidrológicos (Solari et al., 2010; Farías, 2020). Mais do que curiosas relações entre a biota e o meio físico, essas ocorrências são especiais justamente pelo fato desses ambientes se mostrarem hostis à grande maioria das outras formas de vida, o que fica evidente pela ausência quase completa de organismos macroscópicos nesses habitats.

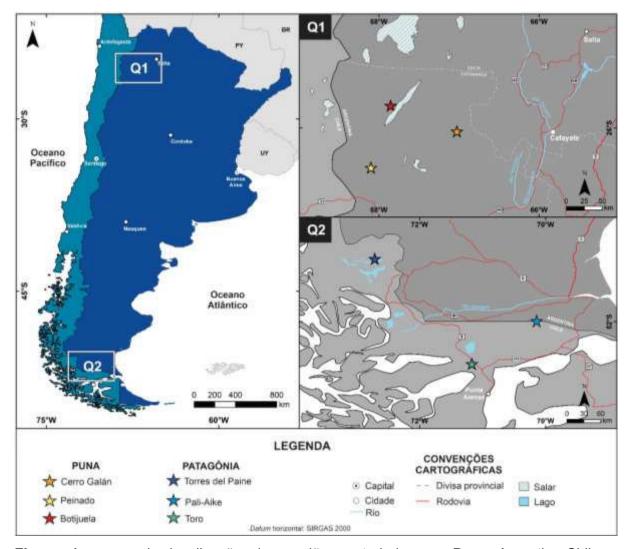
De maneira geral, caracterizações hidroquímicas de superfície possuem ampla aplicabilidade em diversas áreas da geologia. No entanto, esse tipo de abordagem é particularmente interessante em ambientes como os descritos. Isso porque, os ambientes hidrológicos acabam sendo o intermédio entre os diversos aspectos geológicos e a vida, eventualmente presente nesses locais. Além disso, estudos ambientais, climáticos, prospectivos, litológicos, biogeoquímicos e hidrogeológicos são exemplos de aplicações que poderiam fazer uso de dados e discussões acerca da hidrogeoquímica superficial. Dados hidroquímicos superficiais servem, portanto, tanto como atores principais na compreensão da natureza de uma região, quanto como informações adicionais que podem refinar modelos e interpretações de diversas áreas científicas.

#### 1.1. CONTEXTO E PROBLEMA

Este trabalho se propõe a elucidar as principais características hidroquímicas das águas superficiais de 6 porções específicas da Cordilheira dos Andes (Figura 1). Esses locais estão distribuídos em duas macrorregiões, a Patagônia, localizada no extremo meridional da cordilheira, e na Puna Argentina-Chilena, localizada na porção central andina. Dentro do escopo patagônico, foram estudadas as localidades de Torres del Paine (51°S, 72,8°W), Parque Nacional de Pali-Aike (52°S, 70,3°W) e Toro (52,7°S, 71,2°W). Para a Puna, foram estudadas as regiões do Cerro Galán (26,1°S, 67,1°W), Peinado (26,4°S, 68,1°W) e Botijuela (25,7°S, 67,8°W).

Cada uma dessas regiões possui particularidades e contextos geológicos específicos, mas algo que as une é a presença de ambientes hidrológicos que interagem com o substrato rochoso, aspectos meteorológicos influenciando a hidroquímica, e microorganismos atuando como indutores de precipitações minerais.

Tais feições incluem lagos, drenagens, nascentes, exutórios representando a exalação de fluidos hidrotermais (*vents*) e drenagens associadas a esses *vents*. Nem todas essas componentes hidrológicas se mostram presentes em cada região e, mesmo quando acontece de localidades diferentes apresentarem ambientes hidrológicos análogas, é preciso lembrar que os contextos climático, geológico e tectônico podem ser diferentes a ponto de influenciar nas assinaturas químicas, taxas de evaporação e geometrias dessas feições.



**Figura 1:** mapa de localização das regiões estudadas na Puna Argentina-Chilena, individualmente: Cerro-Galán, Peinado e Botijuela; e na Patagônia, sendo elas Torres del Paine, Pali-Aike e Toro (Fontes: IGN; Richards et. al, 2013).

É a partir dessa dinâmica de semelhanças e particularidades entre tais regiões andinas que surgem as questões que este trabalho busca entender melhor. Compreender até que ponto as diferentes variáveis macrorregionais influenciam nas

assinaturas hidroquímicas superficiais, em paralelo com a avaliação de como as singularidades de cada local tornam únicas as condições desses ambientes. Além disso, ponderar até que ponto os diferentes ambientes hidrológicos, recorrentes em múltiplos locais, representam a macrorregião onde estão inseridos, se isso só ocorre em uma escala mais local ou se possuem assinaturas semelhantes entre si, mesmo quando dispostos geográfica e geologicamente distantes uns dos outros.

Em síntese, feições como drenagens na Patagônia possuem assinatura química tão derivada do controle do *background* geoquímico regional a ponto de serem completamente diferentes das drenagens da Puna, ou há semelhanças entre feições análogas, por exemplo? Essa pergunta se estende não apenas a avaliações intrínsecas a cada feição hídrica individual, mas também em termos de como se mostra o cenário do conjunto de todas as feições em cada local.

#### 1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é analisar como ocorrem as distribuições de íons, ânions e compostos aniônicos dissolvidos, e principais parâmetros físico-químicos nos ambientes hidrológicos das regiões citadas. Ainda, de acordo com a espacialização de tais dados, compreender como cada ambiente geológico influencia na composição química das águas dessas porções da Cordilheira dos Andes, seguindo as três escalas analíticas mencionadas – macrorregional, local e por ambientes hidrológicos.

Os objetivos específicos buscados são:

- Cartografia das assinaturas hidroquímicas das amostras coletadas em cada região.
- Elaboração de modelos hidroquímicos conceituais para cada uma das 6 regiões de estudo.

Com esses modelos, não está sendo almejada a caracterização de variações absolutas dos diversos parâmetros hidroquímicos analisados, como poderia ser feita em uma modelagem matemática, pois não há dados suficientes para esse viés geoestatístico. Por outro lado, com modelos esquemáticos que representem a

dinâmica hidroquímica geral de cada local, é possível transmitir a noção geral de como são a geodiversidade hidrogeológica e hidroquímica superficiais.

Isso é útil não apenas para aprimorar o conhecimento científico dessas regiões, mas também para tornar mais fácil a transmissão desse conhecimento, já que se trata de um produto ilustrativo. Tendo em vista que boa parte dos locais aqui estudados também possuem caráter turístico muito expressivo, tais modelos esquemáticos poderiam ser expostos aos visitantes desses locais. Com isso, almeja-se a aproximação da população com o patrimônio geológico, mas também a divulgação da enorme relevância científica desses locais para os que ali antes só viam a beleza cênica.

#### 1.3 JUSTIFICATIVA

A relevância deste trabalho está nas diversas contribuições que poderá gerar para futuras pesquisas que utilizem dados hidroquímicos de superfície nas regiões estudadas, dentro das já citadas inúmeras áreas do conhecimento. Vale especial destaque para a importância dessa caracterização para as inovadoras pesquisas de microbiologia em ambientes extremos, que têm sido desenvolvidas em locais como a Puna (Farías, 2020). Dentre as diversas aplicações desses estudos, cabe ressaltar a relevância para a compreensão da origem da vida e de como foram os primeiros organismos celulares.

Em termos da escolha das áreas, este trabalho está inserido dentro do projeto Diagenesis, parceria entre a multinacional do setor energético Royal Dutch Shell, Instituto Lamir (Laboratório de Análises de Minerais e Rochas) e Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas (LPH). Como a pesquisa fundadora dessa parceria tem como foco o estudo de precipitações carbonáticas continentais em ambientes extremos, naturalmente as regiões aqui analisadas também estão dentro desse contexto. A escolha desses locais como foco do projeto é diretamente associada com a ampla variedade de condições hidrogeoquímicas e geológicas contida neles. Dessa forma, se torna possível estudar uma grande diversidade de contextos em poucas localidades geográficas. No entanto, é válido salientar a relevância de cada um desses locais, independentemente da questão de vínculo com o projeto Diagenesis.

A Puna, de maneira geral, apresenta histórica relevância econômica e acadêmica, tendo em vista as inúmeras explorações de metais e dezenas de publicações referentes a ela, incluindo desde a temática tectônica-estrutural até questões climáticas e biológicas. A escolha do estudo das áreas do Cerro Galán, Peinado e Botijuela é particularmente interessante, pois lá estão presentes o contexto simultâneo de vulcanismo, aridez extrema e alta altitude característicos dessa porção dos Andes.

Já a Patagônia, por sua vez, também é uma região andina com expressividade vulcânica do Cenozoico, e contém condicionantes meteorológicas bastantes únicas, como a forte influência dos ventos de oeste no clima, presença de glaciares, e as compartimentações climáticas latitudinais muito expressivas. Ainda, nestes ambientes ocorrem microbialitos diretamente associados com precipitações carbonáticas, principalmente em Torres del Paine (Solari et al., 2010). Além disso, nos últimos anos, a Patagônia também tem sido o foco de diversos estudos de paleoclimatologia (Hall et al., 2019; Zimmermann et al., 2015).

#### 2. REVISÃO TEÓRICA

Para compreender melhor os contextos nos quais as regiões estudadas estão inseridas, é necessário levar em consideração o conhecimento já adquirido acerca de quatro frentes distintas.

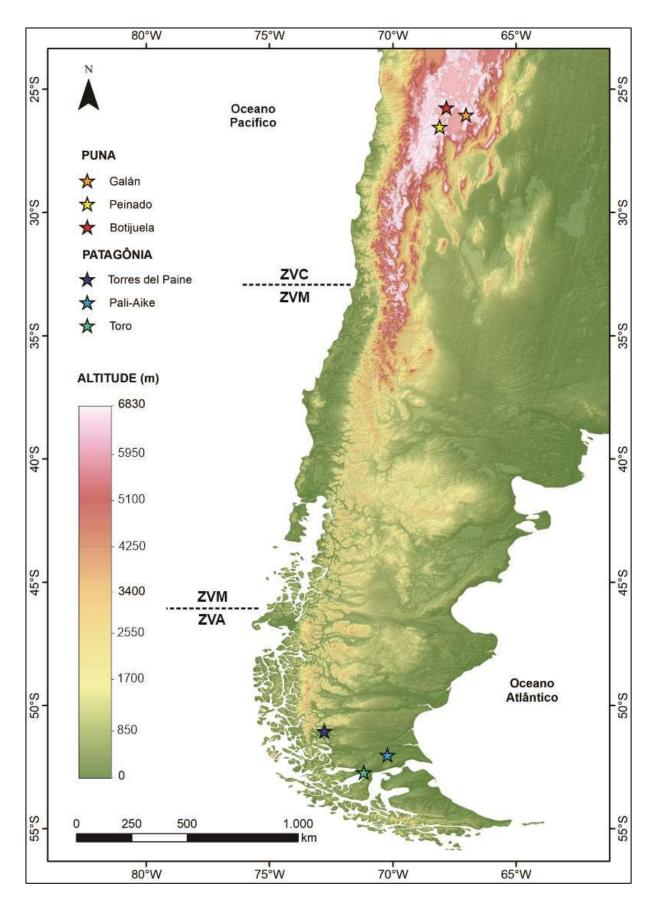
Primeiro, é importante pensar no contexto tectônico que abrange cada porção andina, tendo em vista que a cordilheira não é homogênea ao longo de toda a sua extensão. Depois, é válido avaliar os aspectos geológicos específicos de cada local, como a existência de vulcanismo ativo ou não, natureza dos litotipos presentes e geomorfologia de cada região. Posteriormente, é necessário ter um bom entendimento dos aspectos climáticos atuantes, tais como pluviosidade, incidência de radiação solar e velocidades de vento registradas. Por fim, não seria possível levantar questões sobre a interação dos aspectos físicos e químicos com a biota sem uma boa base sobre a presença microbial nos Andes.

#### 2.1 CONTEXTO TECTÔNICO-ESTRUTURAL

A Cordilheira dos Andes é a maior cadeia montanhosa não colisional do mundo, e apresenta expressivo vulcanismo cenozoico ao longo dos milhares de quilômetros que a compõem (Gianni et al., 2020; Allmendinger et al., 1997). Quatro grandes compartimentos vulcânicos e tectônicos podem ser definidos na cordilheira (Figura 2), sendo eles as Zonas Vulcânicas Setentrional, Central (ZVC), Meridional (ZVM) e Austral (ZVA) (Richards et al., 2013). Na porção central, encontra-se o Platô ou Altiplano Andino, considerado o maior platô acrescionário do planeta, perdendo apenas para o Platô Tibetano em altitude e extensão (Allmendinger et al., 1997).

Há certa discussão sobre os limites exatos de cada zona vulcânica andina na literatura, mas de maneira geral entende-se que a ZVC vai de 15 até 33° de latitude, enquanto a Zona Meridional vai de 33 a 46,5° e a ZVA se estende às latitudes ao Sul disso (Grosse et al., 2020; González-Vidal et al., 2018). Cada uma dessas zonas possui características tectônicas, litológicas e estruturais distintas, justificando a compartimentação do contexto vulcânico andino nessas divisões. A fim de tornar mais clara a compreensão de cada região, este texto abordará cada zona partindo de norte a sul na cadeia montanhosa, começando pelos Andes Centrais.

Características dessa porção da cordilheira, cuja extensão é de 1800 km, são o grande espessamento crustal, que ultrapassa 100 km, e a largura do orógeno, de até 400 km (Zhou et al., 2016; Allmendinger et al., 1997). O platô não é homogêneo em toda sua extensão, tendo dois subcompartimentos principais: o Altiplano Boliviano e a Puna Argentina-Chilena. Em termos topográficos, o Altiplano apresenta altitude média de 3600 metros, enquanto a Puna, mais alta, encontra-se, em média, a 4500 metros acima do nível do mar (Zhou et al., 2016; Allmendinger et al., 1997).



**Figura 2:** variações de altitude nas zonas vulcânicas Central (ZVC), Meridional (ZVM) e Austral (ZVA) da Cordilheira dos Andes (Fontes: Grosse et al., 2020; JAXA).

Diferente das demais porções da Cordilheira dos Andes, a região do Platô Andino, localizada entre as latitudes 13° e 27°S, possui variações no ângulo de subducção da Placa de Nazca que afetam diretamente o arcabouço estrutural e vulcanismo regionais (Gianni et al., 2020; Chernicoff et al., 2002). Segundo os estes autores, rumo ao leste, distanciando-se da trincheira, a placa subductante tende a apresentar inclinações menores, com cerca de 10° de mergulho, destoando dos 30° apresentados em outras porções dos Andes Centrais. Isso faz com que a Placa de Nazca esteja muito mais rasa abaixo da Puna Argentina, estando de 30 a 90 km mais próxima da superfície do que nas demais porções da ZVC (Gianni et al., 2020). Segundo os mesmos autores, essa diminuição do ângulo de subducção teve início no Neo-Oligoceno, quando o mergulho era de cerca de 56°, culminando em valores de até 7° no Mioceno e evoluindo até os 10° atuais no últimos 14 milhões de anos. Tal evolução coincide com a migração do arco magmático ativo da ZVC de oeste para leste, constatada para o mesmo intervalo de tempo, e com o amplo registro deformacional tipo thick-skinned observado na região da Puna (Richards et al., 2013; Zhou et al., 2016).

Exemplos dessa atividade mais recente são o complexo vulcânico de Antofalla (CVA), localização da área de estudo, e complexo vulcânico do Cerro Galán (CVG), além de diversos outros condutos e complexos da região (Richards et al, 2006). No caso específico do CVA, os principais cones vulcânicos apresentam-se a 100 km a leste da sequência principal da ZVC, alinhados de acordo com a direção NW, ao contrário do *trend* NS predominante da região. Isso se deve ao controle estrutural exercido pela intersecção do lineamento de Archibarca e falhas do embasamento com *trend* NNE, feições nas quais o próprio Salar de Antofalla apresenta-se encaixado e por onde poderia haver migração de magma (Chernicoff et al., 2002; Richards et al., 2013).

Passando para a ZVM, há convergência dextral-oblíqua entre a Placa de Nazca e a América do Sul nos Andes Meridionais, com taxa de movimentação tectônica de 7-9 cm/ano ao longo dos últimos 20 Ma (Cembrano & Lara, 2009). Limitando essa zona, o encontro da dorsal do Chile com a América do Sul na junção tríplice do Chile, entre as placas de Nazca, América do Sul e Antártica, marca o limite entre as zonas vulcânicas meridional e austral, e esse ponto também marca o fim dos Andes Centrais

(González-Vidal et al., 2018). A espessura crustal diminui significativamente rumo ao sul, tendo cerca de 50 km em 33°S e apenas 35 km em 46°S (Cembrano & Lara, 2009). Essa tendência decrescente também aparece na diminuição da altitude média da cordilheira, que parte de 5000 m até menos de 2000 m para essas mesmas latitudes.

Entre 33 e 35°S, ocorre o cinturão de dobramento e cavalgamento mesozoico Aconcágua e Malargue, com vergência estrutural para leste (Cembrano & Lara, 2009). Nessa região, há encurtamento crustal menos expressivo, se comparado à zona estrutural análoga dos Andes Centrais (Allmendinger et al., 1997). Entre 36 e 38°S, entra-se no cinturão de deformação neógena El Agrio, na zona de antepaís do lado argentino da cordilheira, com evidências distensivas ortogonais à cadeia montanhosa entre 37 e 38°S. Por fim, entre 38 e 47°S, há controle estrutural associado à zona de falhamento Liquiñe-Ofqui, marcada por estruturas intra-arco de longitudinais à cordilheira, com geometria e cinemática associada tipo *strike-slip* (Cembrano & Lara, 2009; González-Vidal et al., 2018). Essa zona de falhamento estaria ativa há pelo menos 6 Ma, mas há autores que defendem uma idade mais antiga, de 25 Ma (Hervé, 1994).

O início da ZVA é marcado pela junção tríplice das placas de Nazca, América do Sul e Antártida, na latitude 46,5°S (Mazzarini & D'Orazio., 2003). A colisão entre a dorsal do Chile e a trincheira Chile-Peru ocorreu há cerca de 14 Ma, a oeste da atual Terra do Fogo, desenvolvendo a junção tríplice citada, que nos últimos milhões de anos migrou para a atual posição, próxima da península de Taitao (D'Orazio et al., 2000). Essa interação entre a dorsal e a trincheira é a provável causa do intervalo sem registro vulcânico expressivo entre as zonas vulcânicas Meridional e Austral (Corbella & Lara, 2008; D'Orazio et al., 2000) Nessa porção dos Andes, o ângulo de subducção da placa de Nazca é de cerca de 25° (Bohm et al., 2002), e o principal pulso orogênico ocorreu no Mioceno-Superior (Thomson, 2002).

O regime tectônico compressional meso-cenozoico do Andes Austrais possibilitou o desenvolvimento de bacias de antepaís a leste da cordilheira, como é o caso da Bacia de Magalhães, com mais de 7 km de registro sedimentar (Rivera et al., 2020; Gonzales & Aydin, 2008). A orientação dessa bacia segue o contorno dos Andes Austrais, e há a presença de diversas estruturas que condicionaram a deposição dos

sedimentos, como é o caso da Sinclinal Silla, onde estão assentadas as rochas do substrato de Torres del Paine (Gonzales & Aydin, 2008, Solari et al., 2010).

É também nos Andes Austrais que ocorrem feições de magmatismo intracratônico de idade entre o Paleógeno e o Pleistoceno (Haller et al., 2020). Exemplo disso é o Campo Vulcânico Pali-Aike (CVPA), cujos registros vão de 3,78 Ma a apenas 170 mil anos atrás (D'Orazio et al., 2000). A assinatura química alcalina a toleítica dessas rochas indica um modelo de *slab-window* para a origem desse magma (Ross et al., 2011). Além disso, existência de basaltos ricos em xenólitos mantélicos no CVPA indica a presença de um amplo arcabouço de fraturas que conecta a superfície ao manto superior, servindo como condutos para a migração magmática (Mazzarini & D'Orazio., 2003). As estruturas que influem nessa migração magmática têm idade do Neógeno ao Quaternário, e direções NW, SE e EW (Mazzarini & D'Orazio., 2003; D'Orazio et al., 2000). Tais estruturas são reativações de feições mesozoicas NW ou são produto de distensão ao longo do Neógeno-Quaternário.

No extremo sul da América do Sul, há modificação do *trend* N-S observado nas regiões mais a norte, passando para geometria mais próxima de E-W, que aparece tanto em estruturas compressivas quanto transcorrentes (Alcacer et al., 2018). É o caso do sistema deformacional da Falha de Magalhães, uma extensa transcorrência que limita as placas da América do Sul e de Scotia. A dinâmica de interação entre essa estrutura e as demais feições compressivas dos Andes gera um arcabouço estrutural complexo e que abriga tanto estruturas sub-verticais quanto dobras e falhas associadas à compressão (Ammirati et al., 2020; Alcacer et al., 2018).

#### 2.2 GEOLOGIA LOCAL

Com idades a partir de 5,7 Ma, o material vulcânico do CVG é predominantemente de sequências ignimbríticas, o que inclui desde domos riolíticos até púmice e cinzas (Sparks et al., 1985). Tais sequências compreendem um volume de mais de 1200 km³, e são claramente de natureza ácida, com teor de sílica médio de 70% (Folkes et al., 2011). Os episódios eruptivos geradores desses materiais variaram em termos de explosividade, incluindo desde eventos de baixa energia até a formação da atual caldeira (Grocke et al., 2017).

Diferente do CVG, que possui história eruptiva poligenética ácida, o lago Peinado está inserido no contexto de diversos cones vulcânicos monogenéticos de natureza predominantemente máfica associados com vulcanismo poligenético de natureza mais ácida (Grosse et al., 2020). De acordo com os autores, com principais atividades no Plioceno Inferior e no Pleistoceno, há 1 Ma, as feições desse campo vulcânico incluem tufos, cones de cinzas, *maars*, fluxos e domos de lava, além do próprio estratovulcão Peinado. Além do claro controle estrutural das falhas de direção NE, onde o Salar de Antofalla está encaixado (Richards et al., 2006), o vulcanismo dessa região possui características de freatomagmatismo, como a própria presença de *maars* já indica (Haag et al., 2018; Grosse et al., 2020).

A geologia do CVA é dominada pelos produtos vulcânicos do vulcão homônimo, cuja atividade teve início no Mioceno Superior e se estende até o Holoceno (Richards et al., 2013). Inicialmente, há cerca de 11 Ma, os produtos foram ignimbritos de composição riolítica e assinatura fortemente crustal (Richards et al., 2006). De acordo com esse mapeamento, ejeções posteriores são compostas por shoshonitos, andesito-basaltos e andesito-dacitos, com ocorrência subordinada de domos riolíticos, ignimbritos e basalto-andesitos de filiação mantélica. Provavelmente, a única diferença importante dos produtos vulcânicos do CVA em relação ao que costuma ser encontrado na ZVC é de que os litotipos do CVA tendem a ter maiores concentrações de potássio (Richards et al., 2006). Todas as fácies citadas assentam-se sobre embasamento metassedimentar e granítico paleozoico, e são bordejadas pelos evaporitos cenozoicos do Salar de Antofalla (Steinmetz et al., 2018).

Os lagos de Torres del Paine estão sobre as rochas siliciclásticas da Formação Cerro Toro, de idade do final do Cretáceo ao início do Paleógeno (Gozales & Aydin, 2008). Nessa unidade, estão presentes siltitos, arenitos e conglomerados, componentes de sequências de turbiditos em ambiente marinho profundo (Solari et al., 2010). Essas rochas fazem parte da Bacia de Magalhães (Daniels et al., 2019; Gonzales & Aydin, 2008), que se estende até o estreito homônimo, onde está localizada a área de estudo do lago Toro, com a diferença de que as unidades dessa região são mais novas, relacionadas com a geração de espaço de acomodamento no Cenozoico (Rivera et al., 2020).

Algo particular de Torres del Paine, principalmente no que diz respeito aos lagos do local, é a presença de sedimentos glaciais e precipitação carbonática dos últimos milhares de anos (Solari et al., 2010). De acordo com os autores, um sistema de morenas pleistocênicas cerca os principais lagos da região, derivado do último ciclo glacial do Quaternário. Ainda segundo este estudo, nas bordas dos ambientes lacustres, são encontradas estruturas carbonáticas associadas ou não com atividade microbiana, formando colunas e estruturas tabulares de dimensões centimétricas a métricas.

Já na região de Pali-Aike, ainda que exista a presença das rochas mesocenozoicas da Bacia de Magalhães em profundidade (Gonzales & Aydin, 2008), o contexto superficial é dominado pela presença do CVPA, com idades do Quaternário (Haller et al., 2020). O CVPA recobre 4500 km² de rochas sedimentares juromiocênicas da Bacia de Magalhães, e apresenta composição geral alcalina a toleítica (D'Orazio et al., 2000). A geologia do CVPA tem na sua base sequências efusivas basálticas que atingem cerca de 120 m de espessura, sobrepostas por mais de 450 edifícios vulcânicos monogenéticos, que incluem tanto cones de cinzas quanto *maars* e fluxos de lava tipo *aa* (Ross et al., 2011; D'Orazio et al., 2000).

#### 2.3 ASPECTOS CLIMÁTICOS

Característica peculiar da região dos Andes Centrais é a aridez extrema, com pluviosidade variando de acordo com a posição em relação à cordilheira. Na região do Salar de Atacama, localizada a cerca de 2000 metros de altitude, são comuns registros de menos de 1 mm/ano, enquanto acima de 5000 metros ocorrem pluviometrias de cerca de 300 mm anuais (Pfeiffer et al., 2018). A pluviosidade da Puna também pode ser dividida de acordo com a latitude, pois a norte de 24°S a chuva anual ficam em torno de 340 mm, enquanto a sul dessa latitude a pluviometria comumente não alcança 100 mm/ano (Yacobaccio et al., 2017).

Essa baixa pluviosidade, junto com o arcabouço estrutural, vulcanismo e tectônica da região, favorece o desenvolvimento de ambientes evaporíticos tipo *playa lakes*, denominados localmente de salares, compartimentados por serras que seguem o *trend* estrutural NS do orógeno (Steinmetz et al., 2020; Zhou et al., 2016). Nessas planícies, são encontradas salinidades extremamente altas, com altas concentrações

de cloreto de sódio e de diversos metais de interesse econômico, como o lítio (Steinmetz et al., 2018). Apesar destas condições extremas, por vezes são encontradas estruturas orgânicas nesses lagos, tais como biofilmes e esteiras microbianas (Farías, 2020).

Outra componente meteorológica extrema da Puna é a força das rajadas de vento observadas na região, que em diversos locais alcança média de 15 a 35 km/h, em altitudes menores, e 35 a 55 km/h próximo de 5000 m de altitude (Favaro et al., 2020). É nessa região que foi registrada a maior velocidade eólica do planeta, que alcançou 443,2 km/h, em eventos de tempestade entre os anos de 2000 e 2002 (Milana, 2009). De acordo com esse autor, é possível que esse regime eólico seja responsável pela formação das maiores *ripples* eólicas modernas, que alcançam comprimento de onda de mais de 40 metros, e que teriam análogo atual apenas em Marte. Tais características, junto com as altas taxas radiação solar e baixa pluviosidade, tornam a região da Puna um habitat extremo tanto para a biota quanto para assentamentos humanos ao longo do Holoceno (Yacobaccio et al., 2017).

De maneira geral, a pluviosidade nos Andes Centrais é controlada tanto pela barreira orográfica da cordilheira (Pfeiffer et al., 2018) quanto pelo sistema de monções da América do Sul (Zhou & Lau, 1997). Esse sistema é responsável por 80% do volume d'água precipitado na região, que é concentrado entre os meses de dezembro e fevereiro (Vuille & Keimig, 2004). A conjunção da entrada dessa umidade no contexto da cordilheira, junto com as barreiras geográficas das serras e platôs de altitude, gera compartimentos comparativamente mais úmidos e outros com aridez extrema (Garreaud, 2009; Yacobaccio et al., 2017; Pfeiffer et al., 2018).

O predomínio de registro fóssil de gramíneas na região de Torres del Paine, se comparado com outras áreas Patagônicas, sugere que as atuais condições de baixas temperaturas e fortes rajadas eólicas estiveram vigentes ao longo de todo o Holoceno (Heusser et al., 1995). Ocorreram variações na intensidade e padrões dos ventos ao longo dos últimos milhares de anos (Kilian & Lamy, 2012), havendo registro fóssil vegetal de que, no início do Holoceno, as maiores velocidades eólicas estiveram concentradas na latitude de Torres del Paine, propiciando maior umidade e aumento do nível dos lagos (Heusser et al., 1995). Nesse momento, as regiões mais austrais, próximas as Estreito de Magalhães, teriam experienciado condições mais secas

(Massaferro et al., 2013). No final do Holoceno, esse padrão teria invertido, assim como as condições descritas, até alcançar o cenário atual há cerca de 570 anos, novamente com as rajadas de vento mais intensas próximas da latitude 50°S (Moreno et al., 2008; Heusser et al., 1995).

Já na Patagônia, o clima é caracterizado, de maneira geral, por verões amenos e secos e invernos com pluviosidade baixa a moderada, predominantemente controlada pelo regime de ventos do oeste da região (Schäbitz et al., 2013). De acordo com os mesmos autores, os ventos, próximo à latitude 50°S, têm velocidade média de 36 km/h, que pode aumentar para 140 km/h em apenas uma hora durante tempestades. Tais velocidades e direções de vento influenciam diretamente na presença de vegetação, temperaturas, pluviosidade e taxas de evaporação da Patagônia (Kilian & Lamy, 2012; Schäbitz et al., 2013).

Essas condições, junto com a barreira climática das montanhas da região, geram um gradiente de pluviosidade de direção Leste-Oeste muito expressivo (Kilian & Lamy, 2012; Schäbitz et al., 2013)., tendo altíssimas taxas de precipitação a oeste e muito baixas a leste. Na região de Torres del Paine, a pluviometria média é de apenas 639 mm/ano, contrastando com os mais de 10000 mm anuais registrados para a porção ocidental dos glaciares da região (Solari et al., 2010). De acordo com esses autores, a taxa de evaporação desses locais é de 839 mm/ano, gerando déficit hídrico nos lagos do local. Já na região de Pali-Aike, a precipitação anual média fica em torno de 200 a 300 mm (Zimmermann et al., 2015), com eventos de chuva concentrada de taxas de 0,8 mm/h (Schäbitz et al., 2013).

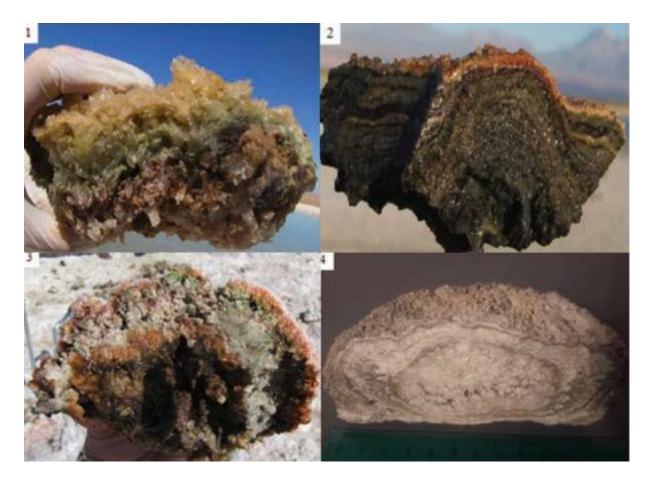
Algo particular da Patagônia é o contexto glacial expressivo, pois, ainda que haja presença de neve nas porções mais elevadas das montanhas da Puna, a quantidade de gelo presente nas latitudes austrais da América do Sul é muito mais relevante (Davies et al., 2020). De maneira geral, os glaciares da Patagônia recuaram para as posições atuais há cerca de 9200 anos, com variações mais antigas e mais novas de cerca de 5 mil anos (Marden, 1997; Hall et al., 2019). As mudanças glaciais holocênicas na Patagônia foram fracamente influenciadas por oscilações na insolação solar, sendo controladas principalmente por variações nas direções, intensidades e latitudes dos ventos de oeste (Kilian & Lamy, 2012; Heusser et al., 1995). A dinâmica de avanço e recuo dos glaciares na região da Cordilheira de Darwin, no extremo sul

da cordilheira dos Andes, ocorreu em escalas de tempo centenária, incluindo avanços glaciais há 750 e 480 anos atrás (Hall et al., 2019), mas cada caso possui uma idade particular.

#### 2.4 MICROBIAIS NOS ANDES

Microbialitos são materiais sedimentares gerados através da contribuição mútua de processos geológicos e atividades metabólicas de microbiais (Beeler et al., 2020; Seckbach & Oren, 2010). São feições vinculadas a algumas das formas de vida mais antigas do planeta, remontando ao Paleoproterozoico, e são utilizadas para a compreensão tanto da biota quanto das condições físico-químicas, atmosféricas e geológicas dos períodos inicias da vida na Terra (Allwood et al., 2006; Schopf et al., 2007; Lepot, 2020). É justamente devido a essas características que microbialitos são utilizados na busca de vida exoplanetária, já que as condições conhecidas fora do nosso planeta são hostis à grande maioria dos organismos (Cady et al., 2003). Ou seja, microbialitos são feições-chave na compreensão da interação dos processos geológicos com formas de vida primordiais e, por isso, são tão interessantes para o estudo de regiões extremas como as encontradas nos Andes.

A presença de esteiras e biofilmes microbianos na Cordilheira dos Andes não se limita a uma porção única do continente, pois há trabalhos que focam ou no mínimo se referem a essa biota tanto nos Andes Centrais quanto na Patagônia (Figura 3). Quando se pensa na primeira macrorregião, é impossível não salientar os trabalhos da pesquisadora argentina María Eugenia Farías, que dedicou boa parte da sua carreira à pesquisa e conservação desses organismos da Puna. Livros como o *Microbial Ecosystems in Central Andes Extreme Environments* (Farías, 2020) não apenas auxiliam na compreensão desses organismos nos ambientes da Puna como ajudam na disseminação da importância desse tema para a ciência latino-americana e mundial. No livro, a autora mostra como a dinâmica entre microbiais, condições meteorológicas extremas, vulcanismo e produtos evaporíticos é interligada ao ponto de ser difícil pensar no estudo desses organismos sem levar em consideração todas essas condicionantes externas.



**Figura 3:** exemplos de microbialitos encontrados nos Andes Centrais (Fonte: retirado de Farías, 2020).

Ainda que a ocorrência de microbialitos nos Andes Centrais se espalhe por diversos locais (Farías, 2020; Beeler et al., 2020), vale mencionar de que já se tem conhecimento da existência dessas estruturas em parte das áreas específicas estudadas neste trabalho. No lago Diamante, localizado no Cerro Galán, conhece-se a ocorrência de microbiais que interagem com concentrações significativas de arsênio presentes na água (Sancho-Tomás et al., 2020).

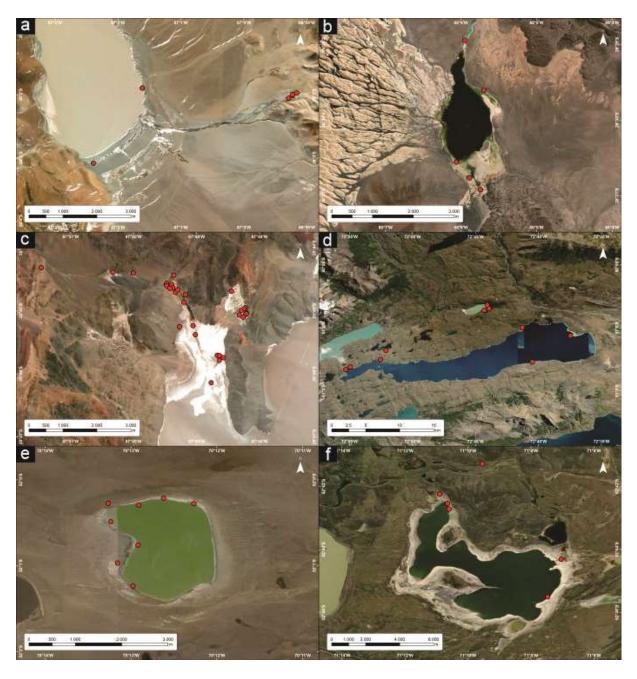
Já na Patagônia, há locais como as bordas do lago Sarmiento e Laguna Amarga, em Torres del Paine, onde ocorrem microbialitos diretamente vinculados à precipitação de estruturas carbonáticas (Solari et al., 2010). De acordo com esses autores, essa precipitação possui variações de protagonismo entre a induções química e biológica, portanto nem sempre os carbonatos presentes no entorno de microbiais correspondem a uma precipitação diretamente derivada deles.

#### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados desse trabalho são baseados em 84 pontos de amostragem de água distribuídos pelas regiões da Patagônia e da Puna (Figura 4). As amostras foram coletadas em campo pelo professor do Departamento de Geologia (DEGEOL) Dr. Gustavo Athayde, e analisadas ao longo dos anos de 2017 a 2019 pela equipe do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas - LPH. Parte das amostras também foi coletada pela equipe coordenada pelo Prof. Dr. Leonardo Fadel Cury, membro do DEGEOL e coordenador do Lamir. Esses procedimentos fizeram parte do levantamento de dados do projeto Diagenesis, dentro do qual este trabalho está inserido.

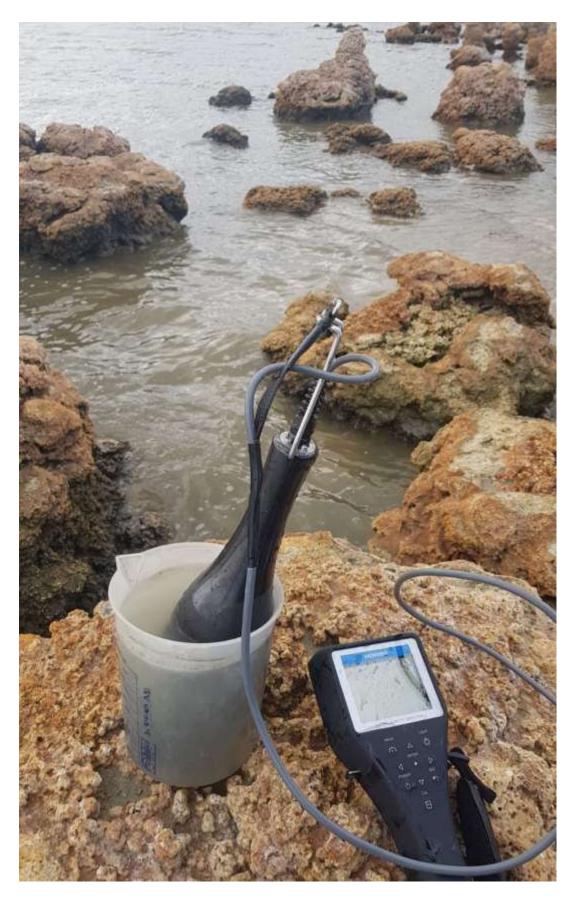
Ao todo, 45 amostras tiveram os parâmetros hidroquímicos de pH e condutividade específica (μS/cm) medidos, junto das concentrações de sílica, bicarbonato, carbonato, cloreto, sulfato, fosfato, nitrato, cálcio, magnésio, sódio, potássio e ferro mensuradas em mg/L, além da concentração de sólidos totais dissolvidos, dureza e alcalinidade total na mesma unidade. Ainda, essas e outras 39 amostras adicionais tiveram medidas de campo coletadas, referentes aos parâmetros físico-químicos de temperatura (°C), pH e condutividade específica (μS/cm). Essas análises *in situ* foram feitas com a sonda multiparâmetros HORIBA, patrimônio do LPH (Figura 5).

Os dados coletados em campo, assim como os obtidos via laudos laboratoriais foram estatisticamente tratados e interpretados. Tal tratamento estatístico uni e multivariado foi feito de maneira híbrida entre o ambiente SIG e mediante aplicativo HydroChem-LPH, com funcionalidade escrita em linguagem programacional *python 3*, desenvolvido pelo autor deste trabalho junto à equipe técnica do LPH. Foram gerados *boxplots* das distribuições de cada parâmetro individual, assim como a comparação delas sempre que necessário. Também, tais distribuições foram separadas por percentis, para buscar os locais que abrigam concentrações regionalmente elevadas de cada parâmetro. Depois, os dados hidroquímicos obtidos foram utilizados para classificar os tipos de água encontrados nos ambientes da Puna e da Patagônia. Após a interpretação hidrogeoquímica dos resultados, foram elaborados modelos conceituais ilustrativos das áreas estudadas (Figura 6).



**Figura 4:** localização dos pontos de amostragem nas regiões de (a) Cerro Galán, (b) Peinado, (c) Botijuela, (d) Torres del Paine, (e) Pali-Aike e (f) Toro (Fonte: ESRI).

Para a interpretação geológica e espacialização dos dados hidroquímicos, foi utilizado principalmente o *software* de informações geográficas ArcGIS, cuja licença pertence ao DEGEOL. Com ele, foram elaborados mapas de concentrações hidroquímicas, topografia, unidades e estruturas geológicas. Para algumas funcionalidades específicas, como obtenção de imagens orbitais e dados de elevação do terreno, foram utilizados os *softwares* Global Mapper, QGIS e Google Earth.



**Figura 5:** coleta de parâmetros físico-químicos em campo com a sonda multiparâmetros HORIBA, propriedade do LPH (Foto: Gustavo Athayde).



**Figura 6:** fluxograma simplificado aplicado no desenvolvimento do trabalho, baseado no tratamento estatístico e cartografia de amostras de água previamente coletadas.

#### 3.1 ESCALAS DE ABORDAGEM

Os tratamentos estatísticos e posteriores interpretações dos dados foram organizadas em três escalas de detalhe progressivamente mais específicas.

Primeiro, as amostras foram separadas de acordo com as duas macrorregiões estudadas (Puna e Patagônia). Essa aproximação inicial visou checar se há tendências hidroquímicas de megaescala atuando sobre as amostras. Tal abordagem ignorou qualquer particularidade de contexto geológico e/ou climático, requirindo apenas que as amostras estivessem dentro da mesma macrorregião para serem consideradas do mesmo grupo estatístico.

A segunda abordagem funcionou como uma ramificação da primeira, pois passaram a ser levados em consideração os locais específicos de cada amostra, ainda que assim haja o agrupamento de ambientes hidrológicos de natureza distinta.

Esses locais foram, para a Patagônia, as regiões de Torres del Paine, Pali-Aike e Lago Toro, havendo 23, 11 e 6 amostras para cada uma, respectivamente. Já para a Puna, a compartimentação foi feita entre as localidades do Cerro Galán, Peinado e Botijuela, com 5, 5 e 34 amostras, respectivamente (Tabela 1).

**Tabela 1:** número de amostras coletadas por região estudada.

Região	Nº de amostras	Com laudo do LPH	Apenas dados de campo
<b>Torres del Paine</b>	23	14	9
Pali-Aike	11	2	9
Toro	6	6	0
Cerro Galán	5	5	0
Peinado	5	5	0
Botijuela	34	13	21
Total	84	45	39

Por fim, ao mesmo tempo que a última abordagem levou em consideração a discriminação dos ambientes hidrológicos, o pertencimento à cada localidade foi desconsiderado para o tratamento estatístico. Ao invés disso, as feições foram separadas de acordo com as macrorregiões correspondentes, para buscar a comparação pontual entre cada tipo de ambiente hídrico da Puna em relação ao análogo da Patagônia.

Assim, os ambientes separados foram *vents*, drenagens de *vents*, drenagens, nascentes e lagos. Vale salientar que na categoria de lago entende-se o destino final da hidrografia endorreica, portanto incluem-se aqui as amostras referentes ao Salar de Antofalla, no caso de Botijuela.

#### 3.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

Os métodos analíticos empregados no LPH são baseados no livro Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Baird et al., 2017). Nem todos os parâmetros físico-químicos das amostras de água são obtidos da mesma forma, nem as concentrações iônicas são medidas utilizando os mesmos equipamentos e técnicas. Além disso, é necessário dizer que para algumas amostras houve a obtenção de parâmetros físico-químicos em campo e a medição desses mesmos parâmetros em ambiente laboratorial. Nesses casos, foi optado pela utilização da informação do laudo laboratorial, ainda que sempre tenha sido feita a comparação dos resultados e a avaliação crítica da utilização de cada um.

A mensuração do pH das amostras foi feita com um PHmetro, via a passagem de uma corrente elétrica por um par de eletrodos. Como há a presença de uma membrana sensível à presença de hidrônio, variações nas concentrações desse íon geram oscilações na diferença de potencial entre os eletrodos e, posteriormente, convertidos em valores de pH. Já a condutividade específica é obtida com um condutivímetro, com princípio também baseado na passagem de uma corrente elétrica pela solução aquosa e posterior conversão das variações de resistência em dados de condutividade.

Medidas de concentrações de sólidos totais são feitas via padronização de 500 ml da amostra, colocados em um cadinho poroso e passados por filtração à vácuo. Em seguida, o material é colocado em um cadinho tarado e inserido em uma estufa a 100°C, com posterior medição de peso. Por outro lado, sólidos totais dissolvidos (STD) são obtidos com base na condutividade, via um fator de correlação que varia de acordo com o intervalo de condutividade observado.

Os parâmetros de alcalinidade, dureza e concentração de cálcio dissolvido são obtidos por titulação com ácido sulfúrico. Com base nesse dado, é calculada a

concentração de magnésio dissolvido. Outras concentrações iônicas são obtidas por espectrometria de ultravioleta visível, como é o caso de Fe <sup>3+</sup>, Mn <sup>2+</sup>, F <sup>-</sup> e Cl <sup>-</sup>, e espectrometria de absorção atômica para Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>. Os valores de fosfato foram calibrados via curvas de calibração de ortofosfato e, como a utilização da espectrometria para as concentrações de sulfato não apresentou dados confiáveis, esse parâmetro foi obtido via curvas de calibração baseadas na turbidez da amostra.

#### 3.3 APLICATIVO HYDROCHEM-LPH

Programas computacionais focados no tratamento e plotagem gráfica de dados hidroquímicos existem no mercado, mas comumente possuem licença paga. As alternativas gratuitas a esses programas normalmente não contêm todas as ferramentas estatísticas usadas em tratamentos robustos, e frequentemente não geram resultados gráficos satisfatórios.

Os bancos de dados do LPH foram, por muito tempo, armazenados, tratados e interpretados com base em planilhas *Excel*. As informações contidas neste trabalho específico estiveram presentes em uma planilha originalmente criada e alimentada pelos professores do DEGEOL Camila de Vasconcelos Müller Athayde e Gustavo Barbosa Athayde. Posteriormente, essa planilha também passou a ser editada pelos alunos de iniciação científica do LPH Rodrigo Aguilar Guimarães e Andressa Barreto Maia.

Ao longo dos anos entre 2018 e 2020, um número cada vez maior de dados foi inserido nessa planilha, tornando progressivamente menos práticos os tratamentos estatísticos e interpretações baseadas nela. O auge desse problema ocorreu a partir de meados de 2019, quando havia mais de 10 mil células preenchidas com dados, interpretações e informações relevantes sobre os dados hidroquímicos. Ainda que tenham sido buscadas alternativas de automatizar funções e tornar a apresentação visual do documento mais prática possível, utilização dessa planilha como mecanismo principal de gerenciamento de dados do laboratório se tornou cada vez mais insustentável.

Buscando solucionar esse problema, o autor deste trabalho escreveu alguns scripts programacionais em linguagem python buscando automatizar o processo de

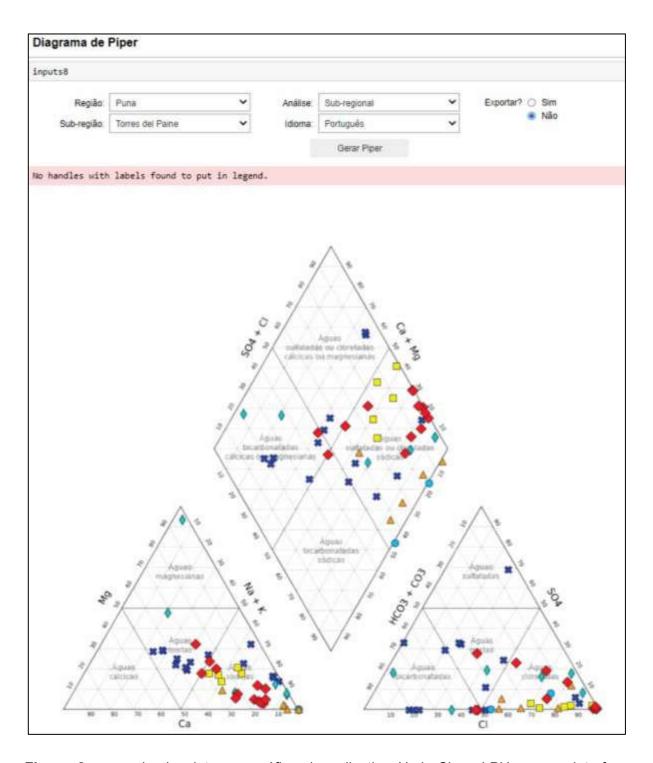
plotagem gráfica dos dados. Ainda havia a necessidade de armazenar os dados em planilhas, mas o armazenamento em si nunca foi o problema principal da utilização desse gerenciamento, e sim a apresentação dos dados. Portanto, parte dos problemas havia sido solucionada, mas o programa originalmente escrito não possuía interface amigável para o usuário, principalmente no caso de ser alguém não familiarizado com escrita de códigos computacionais. Isso porque as funções estatísticas e a apresentação visual dos produtos gerados eram contidas no mesmo local, e para qualquer alteração na plotagem ou tratamento estatístico era necessária a alteração do código pelo próprio usuário (Figura 7).

Como a substituição dos problemas da planilha pelas novas questões trazidas pelo programa original não poderia ser considerada uma solução real, foi criada a versão aperfeiçoada dessa tentativa primordial. Assim, foi criado o aplicativo HydroChem-LPH, que passou a ser capaz de gerar produtos e tratamentos muito mais robustos e visualmente agradáveis que o programa original, e sem a necessidade de o usuário ter contato direto com os códigos utilizados nas funções. Mais que isso, foi criada uma interface que permite a fácil customização da apresentação gráfica e alteração de intervalos estatísticos de maneira muito simples. Ao invés de alterações programacionais por cada usuário novo, o que poderia comprometer a funcionalidade do aplicativo, todas as customizações ativam funções condicionais previamente estabelecidas pelo autor do programa. Essas ativações se baseiam no preenchimento de campos e seleção de parâmetros pelo usuário em uma interface intuitiva e familiar para qualquer usuário de meios digitais (Figura 8).

Por definição, o aplicativo HydroChem-LPH é um programa de *Data Science* escrito em linguagem computacional *python 3*, de extensão tipo *python notebook* (.ipynb). O foco desse aplicativo é o tratamento estatístico de grandes bancos de dados hidroquímicos, utilizando métodos uni e multivariados. Todas as funcionalidades são baseadas em arquivos externos de código (.py) importados para o ambiente do aplicativo. Todas as funções escritas para o programa e utilizadas neste trabalho foram elaboradas pelo autor e não possuem direitos autorais vinculados a terceiros.

```
elif (seleciona idioma, value == 'English'and seleciona reg sub, value == 'Sub-regional'):
  titulo = '{} (mg/L) - {}'.format(var, subregiao)
  eixo = '{} (mg/L)'.format(var)
  if (var == 'pH' or 'CE'):
     titulo = '{} ({})'.format(var, subregiao)
     eixo = '{}'.format(var)
  elif (var == 'T'):
     titulo = '{} (°C) - {}'.format(var, subregiao)
     eixo = '{} (°C)'.format(var)
if (seleciona idioma.value == 'Português' and seleciona reg sub.value == 'Ambiente'):
  titulo = '{} (mg/L) - {}'.format(var, ambiente)
  eixo = '{} (mg/L)'.format(var)
  if (var == 'pH' or var == 'CE'):
     titulo = '{} - {}'.format(var, ambiente)
     eixo = '{}'.format(var)
  elif (var == 'T'):
     titulo = '{} (°C) - {}'.format(var, ambiente)
     eixo = '{} (°C)'.format(var)
elif (seleciona idioma.value == 'English'and seleciona reg sub.value == 'Ambiente'):
  titulo = '{} (mg/L) - {}'.format(var, ambiente)
  eixo = '{} (mg/L)'.format(var)
  if (var == 'pH' or 'CE'):
     titulo = '{} ({})'.format(var, ambiente)
     eixo = '{}'.format(var)
  elif (var == 'T'):
     titulo = '{} (°C) - {}'.format(var, ambiente)
     eixo = '{} (°C)'.format(var)
ax = sns.boxplot(x=var, data=dados2, width = 0.4)
ax.set(xlabel=eixo, ylabel=")
ax.set_title(titulo, fontsize=fonte_titulo_)
ax.tick params(labelsize=fonte eixos)
ax.figure.set size inches(14, 6)
if (salvar imagem.value == 'Sim'and seleciona reg_sub.value == 'Sub-regional'):
  figure = ax.get figure()
  figure.savefig('boxplot_{}_{}).png'.format(var, subregiao), dpi=250)
elif (salvar_imagem.value == 'Sim'and seleciona_reg_sub.value == 'Regional'):
  figure = ax.get figure()
  figure.savefig('boxplot_{}_{png'.format(var, regiao), dpi=250)
elif (salvar imagem.value == 'Sim'and seleciona reg sub.value == 'Ambiente');
  figure = ax.get figure()
  figure.savefig('boxplot_{}_{png'.format(var, ambiente), dpi=250)
```

**Figura 7:** exemplo de código utilizado no programa, equivalente a aproximadamente metade da escrita necessária para a plotagem customizável de um *boxplot* simples.



**Figura 8:** exemplo de plotagem gráfica do aplicativo HydroChem-LPH, com a interface otimizada para fácil utilização do usuário.

A inserção de dados no aplicativo deve ser feita via importação de planilhas *Excel* (.xlsx), sendo que o código foi escrito para reconhecer colunas relacionadas aos principais parâmetros hidroquímicos, tais como informações físico-químicas e concentrações iônicas dissolvidas. A manipulação dos bancos de dados inseridos no programa é feita com base na biblioteca *pandas*, associada com a biblioteca

matemática *numpy*. A apresentação dos dados também envolve o uso de *pandas*, mas é essencialmente baseada na biblioteca *seaborn*, que por sua vez é uma adaptação de *matplotlib*. As poucas funções de interatividade dinâmica com o usuário utilizam bibliotecas gratuitas do projeto *plotly*.

Os procedimentos do aplicativo HydroChem-LPH incluem cálculo de parâmetros estatísticos básicos, tais como contagem de amostras, média, mediana, valores mínimo e máximo, quartis e desvio padrão. Além disso, podem ser realizados testes de hipótese, como o de normalidade, além de coeficientes de correlação entre parâmetros, tais como índices de Pearson. Em termos de resultados gráficos, o aplicativo é capaz de produzir *boxplots*, histogramas, diagramas de dispersão, diagramas de Piper (Piper, 1944) para classificação de água e mapas simplificados de posicionamento das amostras.

### 4. RESULTADOS

Como mencionado, a apresentação dos dados segue a lógica estabelecida de aumentar o grau de detalhe da abordagem, partindo do contexto macrorregional, passando pelas localidades e culminando na análise por ambientes hidrológicos. Para todas as escalas de análise, foram gerados *boxplots* comparativos de cada parâmetro hidroquímico entre cada componente correspondente, isto é, entre as macrorregiões, regiões e ambientes hidrológicos. Além disso, o banco de dados foi estatisticamente tratado de acordo com cada uma das abordagens separadamente, portanto as mesmas amostras foram utilizadas para mais de um cálculo de medidas de tendência central, dispersão e limites estatísticos, mas nunca dentro da mesma abordagem. O banco de dados utilizado pode ser observado no **Anexo I**.

### 4.1 ABORDAGEM MACRORREGIONAL

Ao todo, foram analisadas 40 amostras na macrorregião da Patagônia, sendo que 22 tiveram laudo elaborado no LPH e 18 tiveram apenas os dados levantados em campo. Para a Puna, foram analisadas 23 amostras em laboratório, e 21 tiveram medidas físico-químicas coletadas *in situ*, totalizando 44 amostras. Boa parte das distribuições amostrais das amostras, tanto para a Puna quanto para a Patagônia, apresentam assimetria positiva muito evidente, tanto para os parâmetros físico-químicos quanto para as concentrações iônicas (Gráfico 1).

No momento da coleta, as amostras da Patagônia apresentaram temperatura consideravelmente mais baixas que na Puna (**Gráfico 1a**). Com mediana de 10,6°C, nenhuma amostra patagônica apresentou temperatura acima de 20°C. No Andes Centrais, por outro lado, os valores estiveram, em grande maioria, acima desse valor, ainda que algumas temperaturas muito baixas foram observadas, de apenas 3°C. Mais que isso, é válido apontar os dados de dezenas de graus Celsius registrados nessa macrorregião, chegando até mais de 80°C, ainda que a mediana tenha sido de 21,1°C.

Em termos de pH, é muito clara a assinatura mais básica da macrorregião da Patagônia, com mediana de valores de 8,8 (**Gráfico 1b**). Na Puna, são encontrados valores acima disso, mas a maior parte dos dados tem pH menor que 7,6. Nisso, incluem-se valores de até 6,25, enquanto o mínimo observado na Patagônia chega apenas a 6,68. Por outro lado, é apenas na Patagônia que valores de pH acima de 10 são registrados.

Ambas as macrorregiões apresentam condutividade específica e sólidos totais dissolvidos nas amostras muito elevados, com valores muito diferentes do que é aceito para consumo humano (**Gráfico 1c** e **d**). Enquanto as amostras patagônicas apresentam CE e STD acima de 100 mS/cm e g/L, respectivamente, os dados da Puna chegam próximo a 200 mS/cm e g/L para os mesmos parâmetros. Essa tendência de maiores valores para os Andes Centrais também aparece na mediana calculada para as amostras, de 8495  $\mu$ S/cm para a CE e 6675 mg/L nos STD, enquanto as amostras da Patagônia apresentaram medianas de 1850  $\mu$ S/cm e 1045 mg/L para esses parâmetros.

Como já seria de se esperar, tendo os valores de STD maiores para as amostras da Puna, de maneira geral, as concentrações iônicas também foram mais elevadas nas análises dessa região.

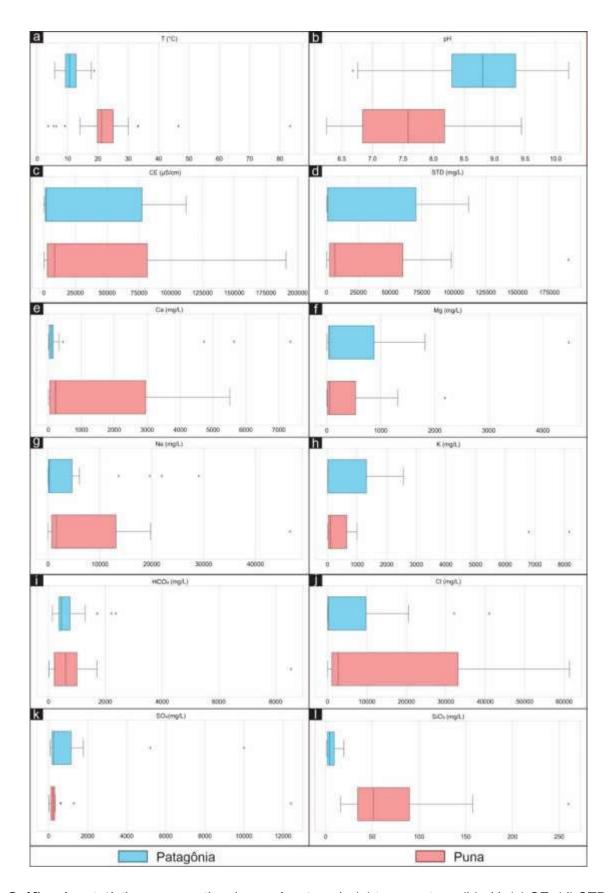
Começando pelos cátions, os valores de cálcio dissolvido foram expressivamente mais altos na Puna, ainda que alguns *outliers* de concentrações elevadas apareçam nas amostras patagônicas (Gráfico 1e). Com valor mediano de 217 mg/L, a tendência central desse parâmetro para os Andes Centrais mostra-se acima do 3º quartil da distribuição da Patagônia, cuja mediana é de apenas 88 mg/L.

Passando para os valores de magnésio, a maioria das amostras da Puna possuem concentrações maiores desse íon em relação à maior parte do observado para a Patagônia, já que a mediana da primeira é de 54 mg/L e da segunda de 43,25 mg/L (Gráfico 1f). No entanto, uma porção considerável da distribuição patagônica aparece além do 3º quartil dos Andes Centrais, incluindo tanto valores dentro do *boxplot* quanto o maior *outlier* obtido, de 4480 mg/L.

A distribuição dos valores de sódio nas amostras da Puna mostra mediana consideravelmente acima da tendência central patagônica, sendo os valores respectivos de 1630 e 255,6 mg/L (Gráfico 1g). Proporcionalmente, uma porção maior de amostras dos Andes Centrais apresentou concentrações de sódio acima de 10 g/L, incluindo um valor muito alto, de mais de 40 g/L. Na Patagônia, existem concentrações acima do limiar de 10 g/L, mas elas não compõem a concentração amostral principal encontrada.

O comportamento das distribuições de potássio dissolvido nas amostras seguiu um padrão semelhante ao observado para o magnésio, com mediana maior nos Andes Centrais, mas com consideráveis ocorrências de concentrações elevadas na Patagônia (Gráfico 1h). Comparativamente, as medianas foram de 100 e 16,5 mg/L, para essas respectivas macrorregiões.

Partindo para os ânions, é notável a atenuação do caráter assimétrico positivo para as distribuições de bicarbonato em ambas macrorregiões, mas em especial no caso da Puna (Gráfico 1i). Novamente, as amostras dos Andes Centrais são mais concentradas que as patagônicas, com medianas respectivas de 549 e 449 mg/L. Portanto, nota-se que as tendências centrais em relação ao bicarbonato tiveram menor afastamento entre as duas macrorregiões, se comparado com o calculado para os demais íons.



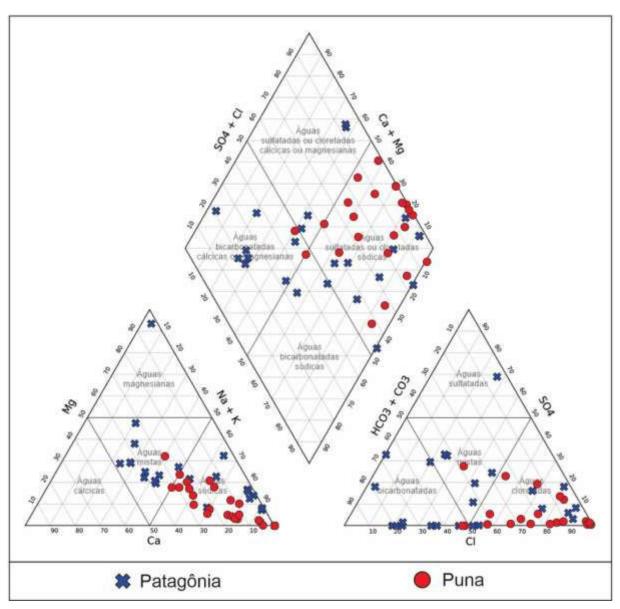
**Gráfico 1:** estatística comparativa dos parâmetros de (a) temperatura, (b) pH, (c) CE, (d) STD, concentrações de (e) cálcio, (f) magnésio, (g) sódio, (h) potássio, (i) bicarbonato, (j) cloreto, (k) sulfato e (l) sílica dissolvidos, em mg/L, segundo a abordagem macrorregional.

Visualmente, as distribuições comparadas de cloreto dissolvido das duas regiões são muito parecidas com as em relação ao sódio (Gráfico 1j). No entanto, os valores absolutos encontrados para o cloreto são duas vezes maiores que no caso do cátion citado. No caso da Puna, valores acima de 80 g/L são encontrados, e dentro dos limites do máximo estatístico amostral, isto é, não são considerados outliers. Em termos de tendências centrais, as medianas encontradas foram de 2700 mg/L para a Puna e 234 mg/L para a Patagônia.

No caso das concentrações de sulfato, houve inversão no que foi observado para os demais parâmetros (Gráfico 1k). Nesse caso, foram as amostras da Patagônia que apresentaram as maiores concentrações desse parâmetro, com mediana de 198 mg/L contra a de 180 mg/L, encontrada para os Andes Centrais. No entanto, vale dizer que o maior *outlier* de todas as amostras foi encontrado na Patagônia, com 30,4 g/L, enquanto o máximo da Puna foi de 12,4 g/L.

Por fim, os valores de sílica dissolvida encontrados revelam concentração dos valores maiores nas amostras da Puna, e de maneira ainda mais expressiva do que em relação aos demais parâmetros (Gráfico 1I). Nessa comparação, o mínimo estatístico dos Andes Centrais está muito próximo do máximo estatístico da Patagônia. Esse deslocamento positivo também fica evidenciado nas medianas de cada macrorregião, sendo de 48,52 mg/L para as amostras da Puna e 0,58 mg/L para as patagônicas.

Com base nessas concentrações iônicas, as classificações de Piper das amostras ficaram distribuídas conforme mostrado no Gráfico 2. De maneira geral, a grande maioria das amostras dos Andes Centrais foram plotadas no campo de águas cloretadas sódicas, enquanto as amostras patagônicas tiveram dispersão mais pronunciadas. Vale ressaltar que nenhuma amostra da Patagônia foi classificada com assinatura cálcica, e que os caráteres bicarbonatado e cloretado dessa macrorregião são os mais presentes, além do misto, principalmente no que se refere aos cátions.



**Gráfico 2:** classificação das amostras de água coletadas na Patagônia e na Puna segundo a discriminação macrorregional.

### **4.2 ABORDAGEM LOCAL**

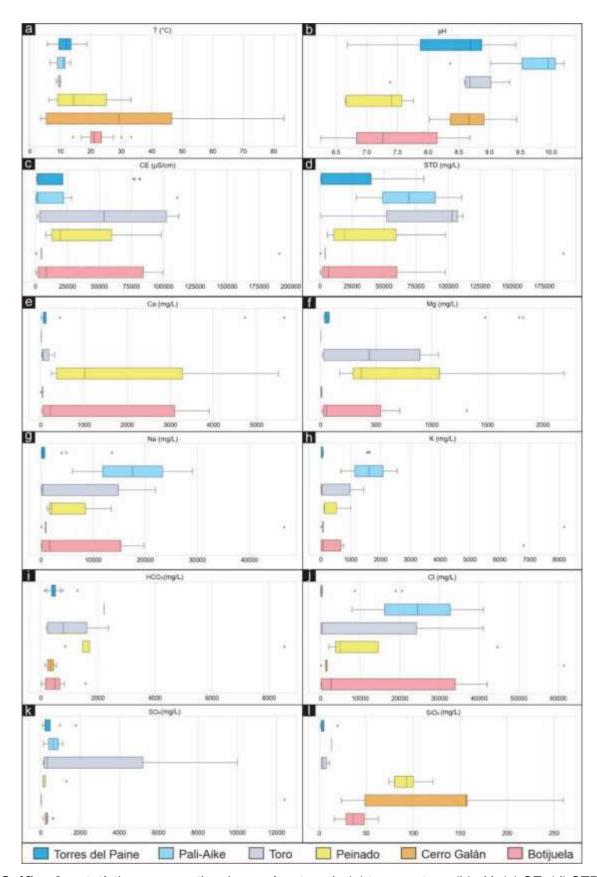
Assim como demonstrado na abordagem regional, as amostras de todas as regiões patagônicas apresentaram temperaturas *in situ* menores que as dos Andes Centrais. No entanto, é interessante salientar a grande variação de temperaturas internas a algumas regiões (Gráfico 3a). É o caso do Cerro Galán, onde são encontrados valores próximos de 0°C e outros acima de 80°C.

Em termos absolutos, as medianas de pH encontradas para as regiões da Patagônia foram de 8,69 para Torres del Paine, 9,95 para Pali-Aike e 8,68 para Toro.

Na Puna, as tendências centrais ficaram em 8,66 para o Cerro Galán, 7,4 para Peinado e 7,26 para Botijuela (Gráfico 3b). O caráter mais ácido, observado para a Puna como um todo, se repete quando as regiões estão discriminadas. No entanto, a distribuição para o Cerro Galán aparece mais próxima do que foi encontrado para Torres del Paine e Toro do que em relação às outras áreas dos Andes Centrais.

Também é interessante notar a grande variação de valores de pH observados para Botijuela, indicando que possivelmente a discriminação local ainda não foi suficiente para representar a hidroquímica desse local. Isso porque, nessa região, ocorrem desde valores ácidos, abaixo de 6,5, até acima de 8,5. Mais que isso, a mediana dessa distribuição não aparece fortemente deslocada para nenhum dos extremos, o que poderia indicar quantidades relevantes de feições associadas tanto com caráteres ácidos quanto mais básicos. Por fim, vale destaque para os valores muito básicos de Pali-Aike, que correspondem aos valores mais altos observados já na abordagem macrorregional – tanto para a Patagônia quanto para as amostras como um todo.

Para os parâmetros de CE e STD, as medianas encontradas foram de 1542  $\mu$ S/cm e 881 mg/L para Torres del Paine, 1945  $\mu$ S/cm e 69388 mg/L para Pali-Aike e 53690  $\mu$ S/cm e 102996 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências centrais ficaram em 4680  $\mu$ S/cm e 3967 mg/L para o Cerro Galán, 19400  $\mu$ S/cm e 19324 mg/L para Peinado e 8495  $\mu$ S/cm e 6555 mg/L para Botijuela (Gráfico 3c e d). Para esses parâmetros, duas características bastante interessantes foram reveladas na abordagem local. Primeiro, levando em conta o número de amostras para cada região, os caráteres de maior condutividade e salinidade para a Puna se mantêm, mas não de maneira homogênea. Isso porque a região do Cerro Galán aparece destoante, com valores muito mais baixos para ambos os parâmetros. Ao mesmo tempo, na Patagônia, as regiões Toro e Pali-Aike se destacam positivamente, a primeira tanto em CE quanto em STD e a outra apenas em STD.



**Gráfico 3:** estatística comparativa dos parâmetros de (a) temperatura, (b) pH, (c) CE, (d) STD, concentrações de (e) cálcio, (f) magnésio, (g) sódio, (h) potássio, (i) bicarbonato, (j) cloreto, (k) sulfato e (l) sílica dissolvidos, em mg/L, segundo a abordagem local.

Partindo para as distribuições dos cátions, as medianas das concentrações de cálcio foram de 95,1 mg/L para Torres del Paine, 8 mg/L para Pali-Aike e 57,29 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências centrais ficaram em 39,29 mg/L para o Cerro Galán, 1013 mg/L para Peinado e 217 mg/L para Botijuela (Gráfico 3e). O caráter cálcico da Puna ficou muito evidente para as regiões de Peinado e Botijuela, mas novamente Cerro Galán aparece com valores comparativamente muito menores. Ainda, mesmo com a distribuição estatística principal abrangendo valores reduzidos, Torres del Paine contém pontos com concentrações muito altas de cálcio, incluindo o maior de todas as amostras analisadas.

Em termos das concentrações de magnésio, as medianas calculadas foram de 52,98 mg/L para Torres del Paine, 1,5 mg/L para Pali-Aike e 439 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências centrais ficaram em 6,81 mg/L para o Cerro Galán, 365 mg/L para Peinado e 54,02 mg/L para Botijuela (Gráfico 3f). Novamente, há discrepância do Cerro Galán em relação às demais regiões da Puna, que concentram os maiores valores observados. No entanto, vale destaque para as concentrações identificadas na região do lago Toro, cuja mediana chega a ultrapassar as de Peinado e Botijuela. As demais áreas patagônicas, contudo, permanecem com valores reduzidos de magnésio dissolvido, ainda que novamente Torres del Paine apresente valores aberrantes bastante elevados, de até 1820 mg/L.

Para as concentrações de sódio, as medianas obtidas foram de 234 mg/L para Torres del Paine, 17562 mg/L para Pali-Aike e 343 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências centrais ficaram em 875 mg/L para o Cerro Galán, 2020 mg/L para Peinado e 1648 mg/L para Botijuela (Gráfico 3g). Essa última, assim como a distribuição de Toro, mostra intervalo significativo desde valores muito reduzidos até quase 20 g/L de sódio dissolvido – no caso da região patagônica, até maior do que isso. Por outro lado, novamente a região de Torres del Paine parece ter um campo amostral de baixas e outro de altas concentrações. Mais uma vez, a distribuição do Cerro Galán se limita a valores muito baixos, diferente das outras regiões da Puna. No entanto, nesse local também há a ocorrência da amostra mais concentrada de todas, o que será melhor investigado na abordagem seguinte.

As concentrações de potássio tiveram medianas de 12,35 mg/L para Torres del Paine, 1615 mg/L para Pali-Aike e 36,1 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências

centrais ficaram em 70 mg/L para o Cerro Galán, 120 mg/L para Peinado e 67 mg/L para Botijuela (Gráfico 3h). Novamente, há concentração de valores baixos com um dado superior aberrante para o Cerro Galán. Toro e Botijuela apresentam assimetria positiva mais evidente do que nas demais distribuições, e valores elevados também são encontrados em Pali-Aike. Para Torres del Paine, se repete a segregação de campos de altas e baixas concentrações.

Já para os valores de bicarbonato, as medianas foram de 449 mg/L para Torres del Paine, 1107 mg/L para Pali-Aike e 783 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências centrais foram 0 mg/L para o Cerro Galán, 1464 mg/L para Peinado e 489 mg/L para Botijuela (Gráfico 3i). Portanto, houve comportamentos bastante distintos para a presença de bicarbonato nos Andes Centrais, já que estão presentes casos de concentração mediana nula, como no Galán, e de altíssimos valores, como em Peinado, cuja maior concentração é de 8537 mg/L. Também são notáveis os caráteres bicarbonatados encontrados em Pali-Aike e Toro, que se aproximam da assinatura identificada para a região mais concentrada da Puna.

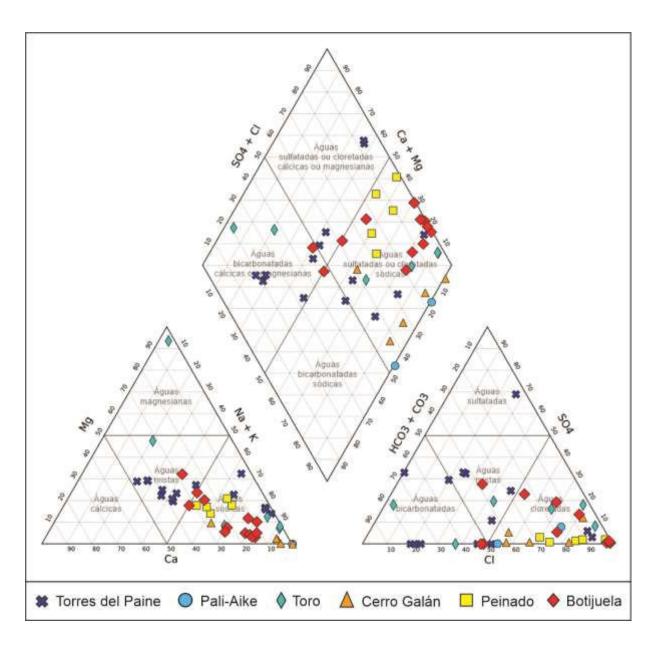
Em termos das concentrações de cloreto, as medianas calculadas foram de 165 mg/L para Torres del Paine, 24450 mg/L para Pali-Aike e 345 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências centrais foram 1500 mg/L para o Cerro Galán, 5000 mg/L para Peinado e 2700 mg/L para Botijuela (Gráfico 3j). É notável a abrangência da distribuição de Botijuela, que contém desde valores de 42,7 mg/L até 42000 mg/L, uma das amostras mais concentradas. Por outro lado, é interessante notar que todas as regiões apresentaram pelo menos um resultado com concentrações acima de 20000 mg/L, mesmo que por vezes o grupo estatístico principal permaneça em valores reduzidos, como são os casos de Torres del Paine e Cerro Galán.

Para os valores de sulfato dissolvido, as medianas encontradas foram de 198 mg/L para Torres del Paine, 635 mg/L para Pali-Aike e 244 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências centrais foram 22 mg/L para o Cerro Galán, 130 mg/L para Peinado e 302 mg/L para Botijuela (Gráfico 3k). Todas as regiões patagônicas se destacam pelos valores elevados, pois mesmo Torres del Paine apresentando mediana comparativamente menor, é ali que se encontra a maior concentração analisada, de 30400 mg/L. No entanto, também vale dizer que os valores de sulfato oscilaram desde próximo de 0 mg/L até centenas de mg/L em quase todas as regiões. Na Puna,

também são encontradas concentrações muito altas, como no Cerro Galán, com até 12400 mg/L, e Peinado, com 1300 mg/L.

Por fim, as medianas das concentrações de sílica foram de 2,85 mg/L para Torres del Paine, 6,5 mg/L para Pali-Aike e 3,7 mg/L para Toro. Na Puna, as tendências centrais foram 156 mg/L para o Cerro Galán, 93 mg/L para Peinado e 35 mg/L para Botijuela (Gráfico 3I). Ainda que as duas outras regiões dos Andes Centrais tenham concentrações de sílica dissolvida muito acima do encontrado na Patagônia, é evidente a presença incrivelmente maior desse parâmetro nas amostras do Cerro Galán. Os valores máximos patagônicos não alcançam os mínimos das regiões da Puna, ainda que em alguns casos a distribuição de valores seja bastante ampla, como ocorre no Cerro Galán.

De acordo com essas concentrações, o mesmo diagrama de Piper da abordagem macrorregional pode ser obtido, mas agora com a discriminação das regiões da Patagônia e da Puna (Gráfico 4). Até certa medida, as localidades dos Andes Centrais ficam isoladas umas das outras, havendo caráter mais sódico na ordem Cerro Galán, Botijuela e Peinado. Já para as amostras patagônicas, a maior dispersão ocorreu para Torres del Paine, com amostras classificadas em todos os campos de ânions e predominantemente na zona de caráter misto para os cátions. As amostras de Toro também tiveram grande dispersão, ainda que tenham sido classificadas predominantemente como sódicas e cloretadas, assim como as duas de Pali-Aike.



**Gráfico 4:** classificação das amostras de água coletadas na Patagônia e na Puna segundo a discriminação local, compartimentando-as entre as regiões de Torres del Paine, Pali-Aike, Toro, Cerro Galán, Peinado e Botijuela.

### 4.3 ABORDAGEM POR AMBIENTES HIDROLÓGICOS

A separação dos dados por ambientes hidrológicos demonstrou que as componentes da Patagônia apresentaram menores temperaturas que os análogos da Puna em todos os cenários (Gráfico 5a). Mas, de maneira geral, em ambas macrorregiões são os lagos que contêm os valores mais baixos, enquanto os *vents* apresentam as maiores temperaturas, de mais de 80°C na Puna. No caso da Patagônia, as drenagens de *vent* possuem valores mais altos que os das exalações

em si, por uma diferença de tendência central de apenas 4°C. Em ambas macrorregiões, as nascentes ocupam o segundo lugar em termos de menores temperaturas, sendo as drenagens levemente mais aquecidas que essas fontes de água doce. No caso da Patagônia, as drenagens de *vent* apresentaram valores de temperatura mais altos que as drenagens sem relação com hidrotermalismo, mas essa diferença, no caso da Puna, é estatisticamente irrisória frente ao número de amostras.

Em termos de pH, em quase todos os cenários, os ambientes patagônicos apresentaram caráter mais básico que os dos Andes Centrais, com a única exceção das nascentes, que possuem valores mais elevados na Puna (Gráfico 5b). O pH mais elevado da Patagônia, identificado nas outras abordagens, está concentrado principalmente em lagos e drenagens, enquanto *vents* e drenagens associadas possuem um caráter comparativamente mais ácido. Isso também aparece no caso da Puna, cujos *vents* aparecem como as feições mais ácidas dentre todas as analisadas. Dessa forma, as fontes que representam a passagem do ambiente subterrâneo para o superficial, no caso, as nascentes e *vents*, aparecem com pH menor que o encontrado nos cursos d'água que seguem à jusante, principalmente no caso da Puna. Além disso, como mencionado, as drenagens não relacionadas com hidrotermalismo apresentam caráter mais básico que que as derivadas de *vents* nas duas macrorregiões analisadas.

Em termos de condutividade e STD, como há grandes concentrações em diversas feições diferentes, vale destaque para as que apresentam valores menores desses parâmetros (Gráfico 5c e d). Drenagens e nascentes aparecem com valores menores de condutividade e concentrações de sólidos reduzidas, quando comparado com os demais ambientes. Os lagos concentram os maiores valores para ambos os parâmetros, mas cabe destaque para o caso patagônico, no qual a ampla abrangência entre o primeiro e terceiro quartis indica que há quantidades consideráveis tanto de lagos com baixas quanto de altas salinidades. Tendo como base principalmente os dados da Puna, também vale destacar os valores mais elevados de CE e STD para as feições associadas com hidrotermalismo. Nesse sentido, a comparação entre os dois tipos de drenagem permite distinção muito clara, já que a mediana dos cursos d'água vinculados a *vents* fica próxima do máximo estatístico das drenagens comuns.

Como já havia sido observado nas outras abordagens, o caráter cálcico é muito mais concentrado nos ambientes hidrológicos dos Andes Centrais (Gráfico 5e). No entanto, fica agora demonstrado que os valores elevados presentes na Patagônia estão principalmente em *vents*, mas também em lagos, incluindo a amostra mais concentrada de todas as analisadas, com 5640 mg/L de cálcio dissolvido. Para a Puna, os lagos também concentram as maiores assinaturas cálcicas, mas a presença desse parâmetro vinculado ao hidrotermalismo aparece tanto nos *vents*, como na Patagônia, quanto nas drenagens a eles associadas. As nascentes de ambas macrorregiões mostram baixos valores de cálcio dissolvido, mas as drenagens da Puna alcançam valores consideravelmente elevados, de até mais de 2000 mg/L.

Em termos das concentrações de magnésio, os lagos de ambas as regiões apresentam valores elevados, principalmente no caso dos Andes Centrais, onde a mediana chega a 1070 mg/L (Gráfico 5f). No entanto, é notável a presença de magnésio dissolvido nas amostras de *vents* de ambas macrorregiões, assim como nas drenagens dessas feições na Puna. Por outro lado, os valores encontrados desse parâmetro para as nascentes da Patagônia e dos Andes Centrais são, em grande maioria, muito baixos, o que se estende para as drenagens patagônicas. Essas feições da Puna, no entanto, possuem assinaturas magnesianas consideráveis, ainda que muito menos que as vinculadas aos *vents*.

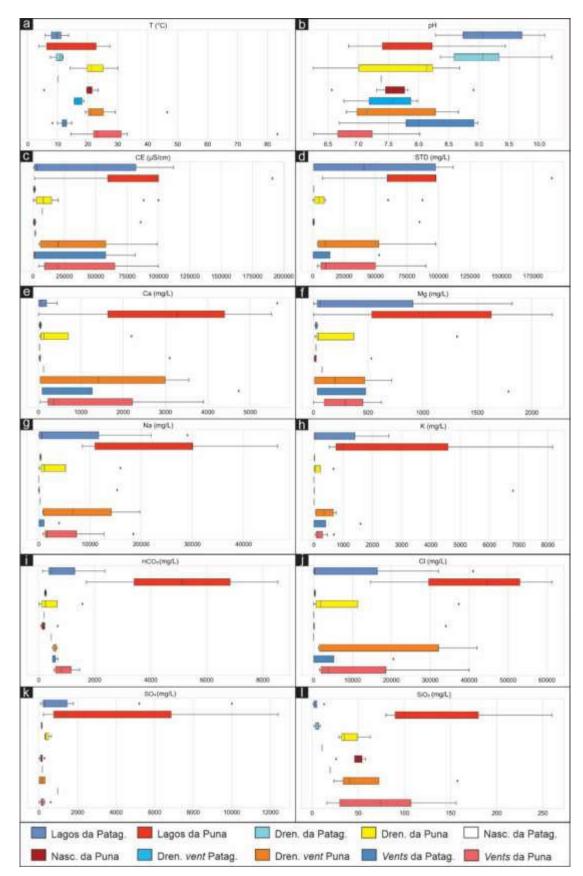
Em ambas macrorregiões, as maiores concentrações de sódio estão nos lagos, que aparecem muito mais concentrados na Puna do que na Patagônia, já que a mediana desse ambiente nos Andes Centrais fica acima do terceiro quartil da distribuição patagônica (Gráfico 5g). Mais que isso, levando em consideração todas as amostras analisadas, são os lagos da Puna que não só atingem os maiores valores, mas o fazem dentro do intervalo interquartílico. Mais uma vez, altas concentrações são encontradas também nas feições associadas a hidrotermalismo, sendo que, mais uma vez, as assinaturas dessas feições são muito mais concentradas nos Andes Centrais. É ali também que drenagens comuns apresentam valores elevados de sódio dissolvido, com alguns milhares de mg/L. Em ambas as macrorregiões, contudo, as nascentes são pouco concentradas nesse cátion.

A distribuição de potássio nas feições analisadas é comparável ao que ocorre com a distribuição de magnésio (Gráfico 5h). Novamente, os maiores valores estão

presentes nos ambientes lacustres, mas aqui a discrepância entre Puna e Patagônia fica evidente estatisticamente de forma distinta. Isso porque, ao contrário do que ocorre para as concentrações de magnésio, a mediana da distribuição de potássio nos lagos dos Andes Centrais fica abaixo do terceiro quartil patagônico. No entanto, tanto a distribuição principal quanto o máximo estatístico dos lagos da Puna se estendem muito além do máximo estatístico dos lagos da Patagônia. Algo que também é parecido com o caso do parâmetro anterior são os valores elevados nos ambientes hidrotermais de ambas as regiões. Contudo, como o alcance da distribuição das concentrações dos lagos da Puna é muito alto, os valores desses ambientes ficam ofuscados pela análise comparativa. Além disso, novamente as nascentes apresentam baixas concentrações em ambas macrorregiões.

Partindo para os valores dos ânions, as maiores concentrações de bicarbonato foram, de longe, as presentes nos lagos da Puna (Gráfico 5i). Com mediana acima de todos os máximos das outras feições, a distribuição nos lagos dos Andes Centrais também apresentou máximo de 8537 mg/L, a maior concentração de todas as amostras. Mais que isso, a distribuição de bicarbonato nesse ambiente teve mínimo estatístico acima de quase todos os máximos, com a única exceção dos lagos patagônicos, que também se destacam na macrorregião da Patagônia. Também se destacam em suas respectivas macrorregiões os ambientes vinculados ao hidrotermalismo, assim como ocorreu em relação aos demais parâmetros.

As concentrações de cloreto são muito elevadas em todos os ambientes da Puna, com exceção das nascentes (Gráfico 5j). Contudo, vale destaque novamente para os altos valores encontrados nos lagos dessa macrorregião, assim como para os vents e drenagens associadas. Nesse caso, as feições hidrotermais apresentam maior protagonismo em relação aos valores elevados do que o que foi observado para a maioria dos outros parâmetros. As drenagens da Puna aparecem mais concentradas do que as da Patagônia, mas as nascentes de ambas macrorregiões novamente aparecem com valores baixos, próximos de zero.

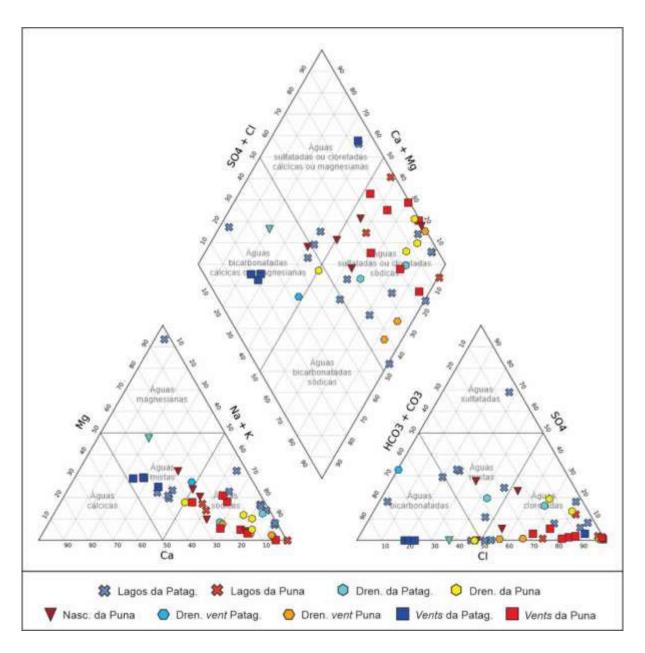


**Gráfico 5:** estatística comparativa dos parâmetros de (a) temperatura, (b) pH, (c) CE, (d) STD, concentrações de (e) cálcio, (f) magnésio, (g) sódio, (h) potássio, (i) bicarbonato, (j) cloreto, (k) sulfato e (l) sílica dissolvidos, em mg/L, segundo a abordagem por ambientes hidrológicos.

Já para as concentrações de sulfato, são os ambientes lacustres que abrigam as maiores concentrações, tanto na Puna quanto na Patagônia (Gráfico 5k). Nesse sentido, ainda que o intervalo interquartílico patagônico não seja tão amplo como o dos Andes Centrais, ali ocorrem valores aberrantes de altíssimas concentrações, incluindo o maior de todos, citado já nas abordagens anteriores e que, por ser tão elevado, nem foi plotado no Gráfico 5. Deixando de lado a escala necessária para abranger os valores encontrados nos lagos, destacam-se novamente as concentrações dos ambientes hidrotermais. Mas mesmo as drenagens comuns da Puna apresentam valores tão elevados quanto esses ambientes, ainda que esse comportamento não ocorra da mesma forma na Patagônia.

Por fim, como já seria de se esperar pelos resultados das análises macrorregional e local, os valores de sílica dissolvida encontrados nas feições dos Andes Centrais são expressivamente maiores que nos respectivos análogos patagônicos (Gráfico 5I). Isso fica especialmente evidente para os contextos lacustres, com valores comumente acima de 100 mg/L nos lagos da Puna e sempre abaixo de 20 mg/L nos da Patagônia. Inclusive, os lagos representam a feição hídrica mais concentrada em sílica nos Andes Centrais, enquanto as drenagens possuem esse papel na Patagônia. Mais uma vez, são dignos de destaque os valores desse parâmetro nas feições hidrotermais da Puna, mas também nas nascentes, o que não ocorreu em nenhuma análise comparativa de distribuições de concentrações iônicas.

Com isso, o mesmo diagrama de Piper apresentado nas abordagens anteriores pode ser melhor discriminado de acordo com a classificação por ambientes hidrológicos (Gráfico 6). Percebe-se que a maior dispersão de dados patagônicos se deve principalmente à variedade composicional dos lagos dessa macrorregião. Os vents da Patagônia apresentaram forte concentração no caráter bicarbonatado, enquanto os da Puna se concentram na composição cloretada. As drenagens associadas aos vents não mantêm o caráter bicarbonatado na Patagônia, mas as dos Andes Centrais permanecem com a assinatura cloretada dos vents. É notável também que, mesmo sem apresentar concentrações altas como as outras feições da Puna, as nascentes possuem o caráter predominantemente sódico e cloretado, presente na macrorregião como um todo.



**Gráfico 6:** classificação das amostras de água coletadas na Patagônia e na Puna segundo a discriminação por ambientes hidrológicos, discriminando entre lagos, drenagens, nascentes, drenagens de *vents* e *vents* de cada macrorregião.

### 4.4 CARTOGRAFIA HIDROQUÍMICA

A espacialização dos dados utilizados nas três abordagens anteriores pode ser observada no Atlas Hidroquímico dos Ambientes Extremos da Cordilheira dos Andes (Anexo II). Nessa representação dos dados, o tratamento estatístico escolhido foi o uso de percentis para discriminar as amostras em relação à macrorregião na qual estão inseridas. Ou seja, cada limite estatístico leva em consideração apenas os valores absolutos de cada parâmetro, independente de em qual localidade as

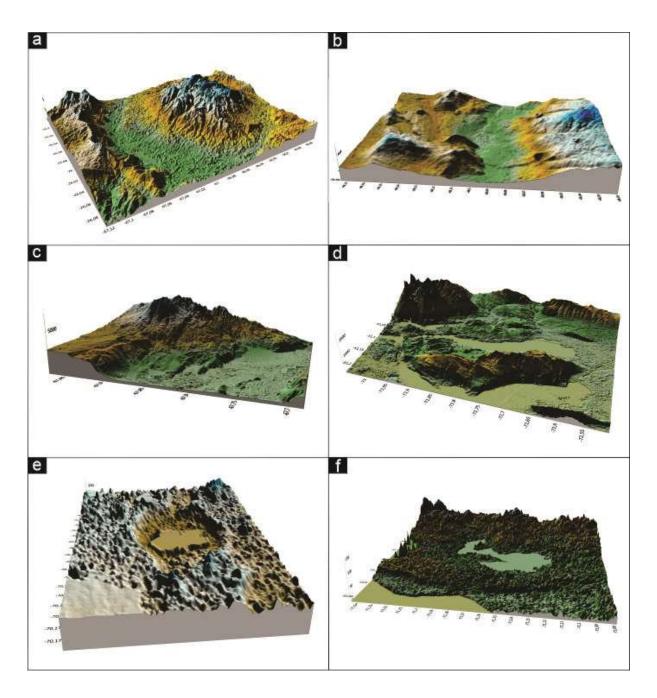
amostras estão inseridas ou em quais ambientes hidrológicos as coletas foram feitas. Os limites utilizados foram os percentis de 5, 15, 25, 40, 50, 65, 75, 85, 90, 91, 93, 95, 97, 98, 99 e 100%. Nos casos em que não havia amostras suficientes para a separação em percentis, foi optado pela separação por quintis.

De maneira geral, o panorama estatístico representado nesses mapas é o mesmo abordado em conjunto nas três escalas analíticas prévias. No entanto, há as diferenças de haver maior detalhamento de classes estatísticas, isto é, com percentis ao invés de quartis, e também de ser possível identificar pontualmente quais amostras destoam do panorama macrorregional que estão inseridas, quanto destoam e onde estão posicionadas. Já que aqui passam a ser importantes considerações de posicionamento de maior detalhe, coube fazer a caracterização dos locais estudados via análise remota em ambiente SIG, uso de informações dos campos de coleta das amostras e dados bibliográficos sobre essas regiões.

# 4.4.1 DESCRIÇÃO GERAL DAS ÁREAS DE ESTUDO

Do ponto de vista de geoprocessamento, além de consulta a imagens de satélite e medida das geometrias dos ambientes hidrológicos, foram gerados modelos tridimensionais da topografia de cada local estudado, com base nos dados do sensor ASTER, do satélite TERRA, parceria da NASA com a Agência Aeroespacial Japonesa (JAXA). Os modelos tridimensionais foram utilizados apenas como base de referência, não sendo foco deste estudo e, portanto, não foram matematicamente tratados até um nível em que possam ser usados como referência de detalhe dessas áreas, mas apenas como panorama geral da topografia (Figura 9).

Com esse panorama, são possíveis identificações como compartimentação dos ambientes hidrológicos em função da topografia, proximidade com ambientes litorâneos, vertentes que podem abrigar escoamento superficial, feições geológicas, dentre outros.



**Figura 9:** modelos digitais de elevação das áreas de estudo, sendo (a) Cerro Galán, (b) Peinado, (c) Botijuela, (d) Torres del Paine, (e) Pali-Aike e (f) Toro.

Com isso em mente, é possível caracterizar a localidade de Cerro Galán como um ambiente imerso no contexto vulcânico na caldeira homônima, com ambientes hidrológicos de lagos, nascentes, *vents* e drenagens a eles associadas. O local onde o lago está inserido é limitado tanto por escombros e produtos vulcânicos da caldeira quanto por serras, e está dentro do contexto de aridez da Puna (Sparks et al., 1985; Pfeiffer et al., 2018). No Lago Diamante, que está no cenário descrito, há presença microbial relatada na bibliografia (Sancho-Tomás et al., 2020).

Nesse contexto de baixa pluviosidade, também estão as áreas de Peinado e Botijuela, e ambas também estão vinculadas ao cenário vulcânico dos Andes Centrais. No entanto, o vulcanismo de cada uma é diverso, já que Botijuela está sob a influência principal do vulção Antofalla, enquanto Peinado está dentro de um campo vulçânico com diversos edifícios de diferentes composições (Richards et al., 2006; Grosse et al., 2020). No caso de Botijuela, algo particular é o fato de não haver a presença de lagos, sendo o salar de Antofalla o destino geográfico final dos fluxos fluviais dessa localidade (Steinmetz et al., 2018). Outra feição vinculada a essa aridez extrema é a presença de legues aluvionares muito amplos, que indicam eventos episódicos de maior pluviosidade na região. Ali, também estão presentes nascentes e drenagens que concentram as poucas ocorrências de vegetação rasteira do local e são a fonte de consumo dos poucos moradores da área. Além disso, há a presença de vents e drenagens vinculadas em outras porções das encostas, cujos fluidos confluem com os das nascentes e drenagens comuns antes de alcançar o salar. Nas regiões que apresentam vents e drenagens associadas, ocorrem estruturas carbonáticas associadas com precipitações ao longo dos cursos d'água. Essas estruturas apresentam morfologias diversas, mas comumente na forma de pequenas piscinas sequenciais, em formato de escada.

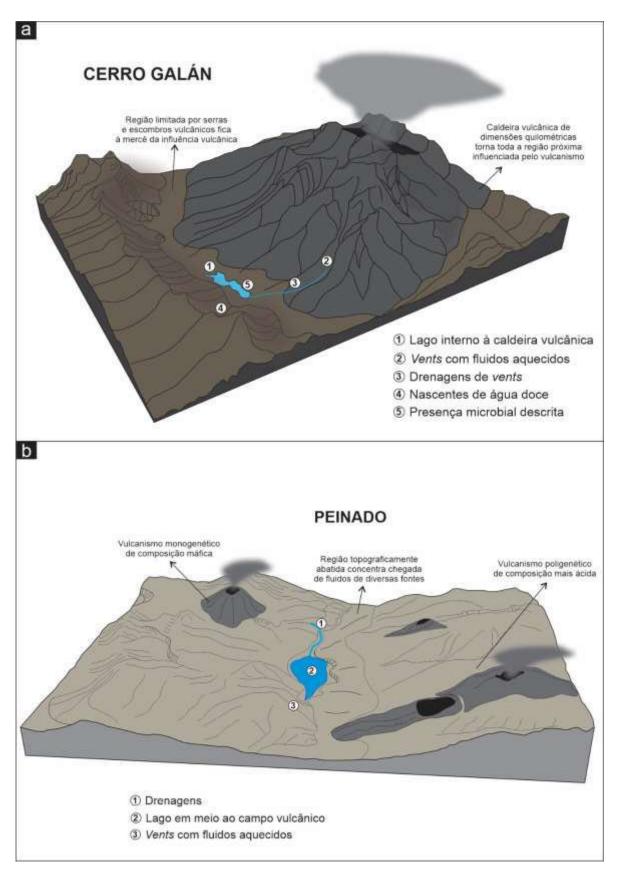
Na patagônia, a região de Torres del Paine é caracterizada pela presença de lagos de diversas proporções, desde alguns milhares de m² até centenas de km², como é o caso do Lago Sarmiento. Esses lagos são separados por morenas glaciais, criando sistemas hidrológicos que são, pelo menos do ponto de vista superficial, isolados entre si. Parte dos lagos de Torres del Paine também é influenciada por hidrotermalismo, como ocorre na Laguna Amarga, enquanto outros não apresentam sinais disso. Ainda, há presença da componente glacial nessa região, além da presença conhecida de microbialitos nas margens lacustres.

A região de Pali-Aike tem como característica principal a presença dos ambientes lacustres dentro das crateras do campo vulcânico homônimo. Essas feições são derivadas do freatomagmatismo quaternário da região, cuja composição litológica é descrita como alcalina e toleítica na bibliografia (D'Orazio et al., 2000; Ross et al., 2011). Algo interessante dessa região é que não ocorrem grandes edifícios

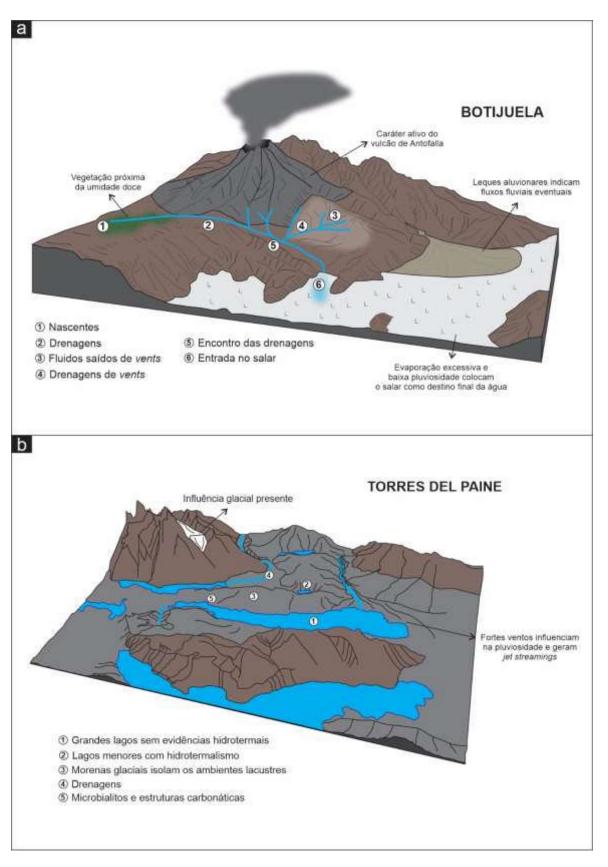
vulcânicos, mas sim uma diversidade de crateras espalhadas pelo cenário desolado, sendo que boa parte delas contém lagos internos.

Já a região de Toro é caracterizada pela presença do lago homônimo, drenagens e nascentes. Além disso, também é um local sujeito à influência das baixas temperaturas e fortes ventos da região patagônica (Schäbitz et al., 2013), além de estar muito próximo do oceano e, portanto, do contexto costeiro. Além disso, permanece-se dentro de um contexto onde há déficit hídrico acentuado, também em função da dinâmica dos ventos de oeste na Patagônia (Zimmermann et al., 2015). Outra característica digna de nota em relação à região de Toro é a presença de criações pecuárias de camelídeos por moradores locais. Esses animais ficam a maior parte do tempo fora de confinamento e, consequentemente, em contato com os ambientes hidrológicos do local, tais quais o próprio Lago Toro.

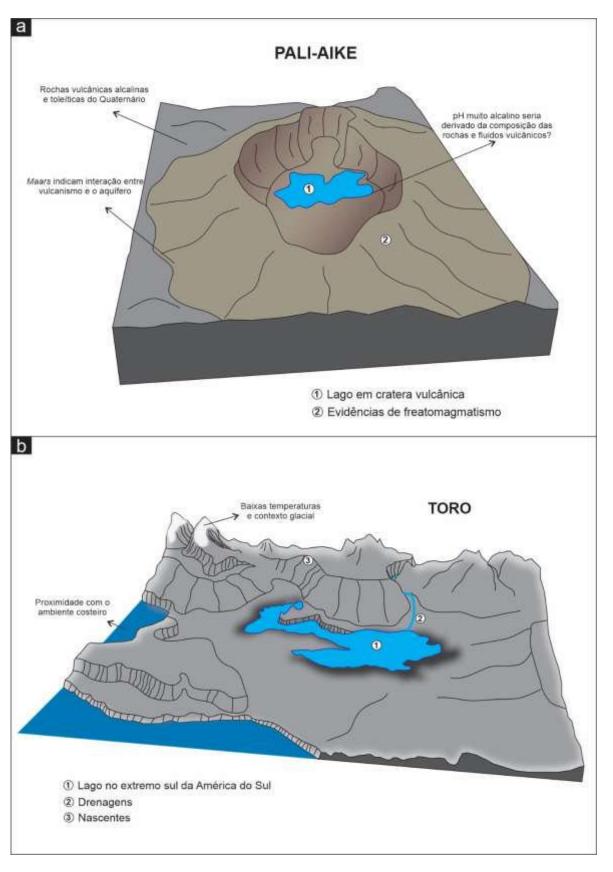
Com base nessas características e nos modelos digitais de relevo elaborados para cada área, foram concebidos 6 modelos conceituais representativos das regiões estudadas (Figuras 10, 11 e 12). O objetivo dessas ilustrações é transmitir a noção dos elementos geológicos mais influentes na hidroquímica de cada região, além de contextualizar em quais condições climáticas cada local se encontra. Isto é, buscouse aqui ilustrar o tipo de vulcanismo presente em cada região, feições geológicas dignas de nota e quais as posições dos ambientes hidrológicos em relação aos edifícios vulcânicos, barreiras topográficas, ambientes costeiros, etc. Os modelos conceituais completos também podem ser observados no Anexo II.



**Figura 10:** modelos conceituais ilustrativos das áreas de estudo de (a) Cerro Galán e (b) Peinado, com indicações de ambientes hidrológicos e elementos geológico-climáticos relevantes.



**Figura 11:** modelos conceituais ilustrativos das áreas de estudo de (a) Botijuela e (b) Torres del Paine, com indicações de ambientes hidrológicos e elementos geológico-climáticos relevantes.



**Figura 12:** modelos conceituais ilustrativos das áreas de estudo de (a) Pali-Aike e (b) Toro, com indicações de ambientes hidrológicos e elementos geológico-climáticos relevantes.

## 4.4.2 CARTOGRAFIA DOS ESTIMADORES ESTATÍSTICOS

O maior detalhamento obtido através do georreferenciamento e tratamento dos dados via percentis permitiu a identificação da necessidade de segmentar ainda mais algumas regiões e, ainda mais importante, de como as assinaturas encontradas nos ambientes hidrológicos se relacionam geograficamente. Isto é, através da elaboração dos mapas foi possível identificar onde cada amostra está posicionada desde a montante até a jusante de cada sistema hidrológico endorreico.

Em Torres del Paine, algo que já era sugestivo pelas abordagens estatísticas tradicionais foi confirmado, a presença de pelo menos dois ambientes hidroquimicamente muito distintos. Estes ambientes correspondem ao Lago Sarmiento e à Laguna Amarga, dois lagos com características geométricas e geológicas muito distintas. De um lado, o Lago Sarmiento possui mais de 80 km² de cobertura areal, enquanto a Laguna Amarga é um lago de alguns milhares de m². Mas, apesar de ser necessária cautela em função da discrepância de área, é relevante o fato de haver evidências de hidrotermalismo na Laguna Amarga, sendo que, ao menos nos pontos visitados, isso não ocorre no Lago Sarmiento.

Essa diferença também aparece na composição das amostras posicionadas em cada ambiente. Os pontos amostrados na Laguna Amarga apresentam caráter mais ácido, mais condutivo, com maior salinidade e apresentam maiores concentrações de quase todos os parâmetros analisados, principalmente de sulfato, incluindo o maior valor encontrado de todas as análises. O único composto que aparece com maior concentração no lago Sarmiento é o fosfato, mas que está acima dos valores encontrados para 75% das amostras na Patagônia.

As altas concentrações da Laguna Amarga não são apenas maiores do que as do Lago Sarmiento, pois ali também ocorrem valores de todos os parâmetros, exceto de fosfato, acima de, no mínimo, 80% das amostras patagônicas. Em termos absolutos, esses limiares aparecem para condutividade (85%), STD (85%), cálcio (97%), magnésio (97%), sódio (90%), potássio (91%), nitrato (93%), ferro (100%), bicarbonato (85%), carbonato (90%), cloreto (90%), sulfato (100%), fluoreto (98%) e sílica (99%). Ou seja, de maneira geral, a Laguna Amarga aparece como o local com as maiores concentrações de toda a Patagônia, e não apenas de Torres del Paine.

A característica mais particular de Pali-Aike, de concentrar os valores mais básicos de pH, já havia sido apontada nas outras escalas de abordagem, mas foi reforçada pela cartografia hidroquímica. Não apenas ali está o valor mais alto de todos, mas a amostra mais ácida dessa região ainda é 90% mais básica que todas as demais da Patagônia. Associado a isso, aparece a alta concentração de carbonato (100%) em Pali-Aike, se comparado com outras regiões patagônicas. Além disso, ali estão presentes concentrações de álcalis muito elevadas, com potássio e sódio 99% acima do encontrado em outros locais dessa macrorregião, além de nitrato com esse mesmo limiar. É importante lembrar que nesse local há criação pecuária de camelídeos, cuja influência será debatida a seguir.

Já a região de Toro se destaca pela alta salinidade e pelas altas concentrações de sódio (97%), bicarbonato (97%) e cloreto (99%). No entanto, é evidente que esse comportamento mais salino diz respeito ao lago de Toro, pois as assinaturas encontradas para as nascentes da região apresentam concentrações muito menores desses elementos. Contudo, como não há hidrotermalismo identificado nessa região, tornando essas altas concentrações diferentes das encontradas nos demais ambientes. A discussão do que poderia gerar isso será feita adiante.

Para as áreas da Puna, a análise estatística mostrou que os valores mais ácidos de pH são encontrados na região de Botijuela e Peinado, enquanto, o Cerro Galán contém os valores mais básicos, principalmente no ponto referente ao lago Diamante. No caso de Botijuela, onde há boa cobertura amostral das redes de drenagens associadas e não associadas com hidrotermalismo, é muito evidente a distinção da assinatura ácida dos *vents* em relação à básica das nascentes. Nos pontos após a confluência dos dois sistemas, prevalece o caráter mais básico.

Na Puna como um todo, algo que fica muito evidente é localização das maiores concentrações iônicas principalmente nos lagos. No entanto, os ambientes hidrológicos vinculados ao hidrotermalismo também tendem a apresentar maiores salinidades em relação aos demais. Isso pode ser observado tanto no já citado sistema hidrotermal de Botijuela quanto nos *vents* de Peinado ou Cerro Galán.

## 5. DISCUSSÕES

As discussões dos dados apresentados, assim como na seção dos resultados, foram feitas seguindo a ordem da escala mais abrangente, macrorregional, para as de maior detalhe, local e por ambientes hidrológicos. No entanto, como as abordagens local e das componentes hidrológicas são muito complementares, foram agrupadas em uma única seção.

## 5.1 HIDROQUÍMICA DAS MACRORREGIÕES

O uso de diferentes escalas de abordagem cumpriu o objetivo proposto, isto é, de investigar possíveis características das águas superficiais de acordo com cada nível de detalhe de separação das amostras. Como esperado, o tratamento estatístico macrorregional das amostras foi apenas capaz de demonstrar tendências hidroquímicas muito gerais. Ainda que útil para avaliar tendências presentes em diversas localidades, essa abordagem se mostrou insuficiente para elucidar a compreensão sobre a interação entre as águas superficiais e as condicionantes hidroquímcias naturais, como aspectos climáticos e geológicos.

Isso porque, ao agrupar ambientes hidrológicos distintas e de locais diferentes, ainda que da mesma macrorregião, tende-se a mascarar valores intermediários de cada parâmetro. Por exemplo, havendo concentrações de valores nos extremos da distribuição, os dados intermediários passam a ser mal representados. Outro possível problema é de que pontos nos extremos amostrais podem ser apresentados apenas como *outliers*, não é possível inferir a quais feições geológicas eles correspondem, e nem mesmo onde estão localizados. Por esses motivos, essa não seria é uma abordagem recomendada como forma única, ou mesmo principal, de compreensão hidroquímica de regiões geologicamente complexas como as aqui estudadas.

Feitas essas ressalvas, os resultados macrorregionais demonstram que há tendência mais ácida na água superficial da Puna, com um predomínio de maior salinidade nos Andes Centrais em relação à Patagônia. Essa maior salinidade se reflete em maiores concentrações iônicas, de maneira geral, mas há importantes exceções nos casos patagônicos, como em relação à concentração recorde de sulfato. Além disso, mesmo havendo maiores concentrações na Puna, as amostras patagônicas demonstram caráter bicarbonatado bastante evidente. Esses altos teores

patagônicos são correlacionáveis com a presença de estruturas carbonáticas descritas em ambientes como Torres del Paine (Solari et al., 2010). Por outro lado, as águas superficiais dos Andes Centrais apresentam caráter cloretado sódico muito preponderante. Isso corrobora com as assinaturas da maioria dos sais encontrados na região, que compõem os maiores volumes de evaporitos da maior parte dos salares (Steinmetz et al., 2018).

Algo notável são as altas concentrações de sílica dissolvida nas amostras dos Andes Centrais, muitas vezes maiores que as patagônicas. Essa característica corrobora com o alto teor de sílica encontrado nos produtos vulcânicos dessa região da cordilheira (Folkes et al., 2011; Grosse et al., 2020; Richards et al., 2013), algo que não aparece com tanta frequência na Patagônia (Haller et al., 2020; Gonzales & Aydin, 2008). Ainda que variações nesse caráter ocorram na Puna, a tendência geral ainda é de maior acidez nas rochas aflorantes da região. Dessa forma, fica evidente que aspectos geológicos de ampla escala da Cordilheira dos Andes são refletidos na composição química hídrica superficial.

## **5.2 HIDROQUÍMICA DE DETALHE**

Partindo do pressuposto de que a composição química da água superficial é produto da interação entre fluidos, substrato, biota, atmosfera e ações antrópicas, não seria grande extrapolação inferir que as assinaturas hidroquímicas apresentadas derivam em grande parte da geologia de cada local. Algo interessante das regiões aqui estudadas é de que, justamente por abrigarem ambientes extremos, de habitabilidade dificultada (Yacobaccio et al., 2017), a presença antrópica é muito reduzida. Portanto, as variáveis naturais se tornam, sem dúvida, as responsáveis diretas pela composição desses corpos hídricos.

Essas variáveis geológicas dizem respeito, principalmente, à composição das rochas que compõem o cenário e se há presença de vulcanismo ativo com influência nos ambientes hidrológicos de cada local. Essa influência pode ser direta, pela presença de exalações hidrotermais, como indireta, pelo enclausuramento de ambientes hidrológicos pelos materiais vulcânicos. Exemplos do primeiro caso são todas as localidades da Puna e a Laguna Amarga, em Torres del Paine. Do segundo, há o caso do Lago Diamante, no Cerro Galán (Sancho-Tomás et al., 2020), e também

dos lagos das crateras vulcânicas de Pali-Aike (Haller et al., 2020). O caso de Peinado também poderia ser incluído nessa categoria de maneira parcial, tendo em vista que o lago ali presente está cercado pelo campo vulcânico (Grosse et al., 2020; Haag et al., 2018), mas não está incrustado em uma cratera ou caldeira vulcânica.

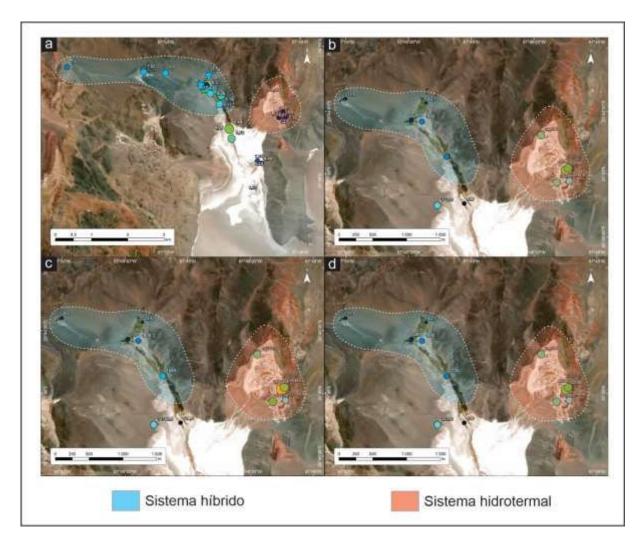
A abordagem por ambientes hidrológicos demonstrou de maneira muito clara os caráteres hidroquímicos distintos entre ambientes hidrotermais e os sem essa influência. Nos casos derivados do hidrotermalismo, independente da macrorregião, as concentrações iônicas tendem a ser maiores para todos os parâmetros, mas em especial para sódio, cloreto e magnésio dissolvidos. Além disso, tanto na Puna quanto na Patagônia, os *vents* possuem pH mais ácido que os demais ambientes, o que muito provavelmente deriva das composições dos fluidos magmáticos em profundidade.

Talvez o caso mais expressivo dessa diferença entre ter a presença hidrotermal ou não ocorra em Torres del Paine, entre a Laguna Amarga e o Lago Sarmiento. Isso porque são dois lagos que estão condicionados pelas mesmas características climáticas e, geologicamente, estão sobre as rochas da Fm. Cerro Toro (Gonzales & Aydin, 2008). A grande diferença entre esses ambientes é justamente o fato de a Laguna Amarga apresentar hidrotermalismo no seu entorno e isso não ocorrer para o lago Sarmiento. O resultado dessa disparidade é ilustrado pelas assinaturas hidroquímicas muito mais concentradas encontradas na Laguna Amarga, principalmente para parâmetros que podem ser diretamente associados com hidrotermalismo, tais como sulfato e nitrato. Essa diferença fica ainda mais marcante levando em consideração que a Laguna Amarga aparece como foco de altas concentrações não apenas para Torres del Paine, mas para a Patagônia como um todo.

Algo digno de nota, no caso da Laguna Amarga em relação ao Lago Sarmiento, é a geomorfologia de Torres del Paine, que permite o isolamento de ambientes com composições hidroquímicas tão distintas. Isso porque os lagos da região são separados por morenas do último ciclo glacial pleistocênico (Solari et al., 2010), que impedem, no mínimo, a conectividade superficial entre os lagos. Não cabe a este estudo avaliar a conectividade subterrânea entre as águas de Torres del Paine, mas é fato que as assinaturas químicas limnológicas encontradas nesses dois casos são

diferentes a ponto de indicar que o intercâmbio de fluidos entre eles é, no mínimo, muito pequeno.

Outro caso onde a relevância do caráter hidrotermal fica muito bem expressada ocorre em Botijuela. Nesse local, são as diferenças hidroquímicas entre os dois sistemas de drenagens amostrados que refletem essa discrepância (Figura 13). Isso fica evidente desde a saída da água do ambiente subterrâneo, por *vents* num caso e por nascentes no outro, até o escoamento pelas encostas em drenagens associadas predominantemente ou não com as exalações hidrotermais. Nos casos com característica menos evidente, as concentrações iônicas são menores e, novamente, a tendência é para maior basicidade de pH, ainda que, de maneira geral, essa não seja uma característica de Botijuela.



**Figura 13:** os dois sistemas de drenagem encontrados em Botijuela, sendo o mais oriental vinculado a hidrotermalismo e o mais ocidental com característica híbrida. As diferenças

hidroquímicas aparecem tanto no pH (a) e salinidade (b) quanto nas concentrações iônicas, tais como Na e Cl (c, d).

Pensando na influência indireta do vulcanismo, o caso mais evidente ocorre no Cerro Galán. As dimensões quilométricas da caldeira vulcânica homônima, tanto pela área que abrange quanto pelos obstáculos topográficos gerados pelos produtos vulcânicos, criam um sistema hidrológico interno ao Cerro Galán. Portanto, as fontes de fluidos desse local necessariamente interagem basicamente com os materiais derivados da atividade desse vulcão, tendo pouquíssima influência de fontes externas. Por isso, é bastante compreensível a ocorrência de altos valores de sílica dissolvida nas amostras de água dessa localidade, tendo em vista o caráter predominantemente ácido do vulcanismo do Cerro Galán (Sparks et al., 1985; Folkes et al., 2011).

No entanto, algo que aparece como disparidade, e que também diz respeito à interação com as rochas do substrato, é o caso de Pali-Aike. Ali, não há amostragem de fluidos hidrotermais, mas a própria natureza freatomagmática dos *maars* do CVPA sugerem interação entre o magma e o aquífero (Haller et al., 2020; D'Orazio et al., 2000; Ross et al., 2011). Todos os *proxies* aqui utilizados são superficiais, mas, assumindo a extrapolação interpretativa de que há intercâmbio da água subterrânea com a superfície, a composição dessas amostras também pode ter relação com a atividade vulcânica. O que torna essa região tão única em relação às demais é a composição muito alcalina e de pH muito básico para todas as amostras. A correlação dessas características hidroquímicas com a composição alcalina do vulcanismo do CVPA (D'Orazio et al., 2000) é muito direta, e fica muito emblemática, tendo em vista a diferença da hidroquímica encontrada para regiões com vulcanismo ácido ou intermediário, como na Puna. Assim como as unidades litológicas do CVPA são ricas em álcalis, como sódio e potássio, também o são os lagos dos *maars* dessa região.

Referente à região de Toro, uma componente que não aparece em outras localidades, e que pode influenciar nas assinaturas hidroquímicas, é a criação pecuária de camelídeos citada anteriormente. A presença desses animais, em especial dos dejetos deles, pode estar enriquecendo as águas superficiais em nitrato dissolvido. Não seria surpreendente que tais animais escolhessem ambientes como o Lago Toro para hidratação e, estando ali, acabassem defecando na proximidade da

água. Esse material certamente teria influência na assinatura do lago, principalmente em termos de concentrações de nitrato.

Também, outra influência que pode estar presente na hidroquímica dos ambientes é a proximidade com o contexto costeiro. Essa influência ficaria evidente no caso do Lago Toro, que é o local mais próximo do oceano dentre todas as regiões e que, de maneira muito expressiva, apresenta alta salinidade. É importante dizer que não foram encontradas evidências de hidrotermalismo nessa região, portanto se faz necessária uma explicação alternativa para as altas concentrações iônicas dissolvidas constatadas. Essa explicação poderia vir da associação do contato das águas continentais com as marinhas e do déficit hídrico vigente no local. Pela interação com o mar, os ambientes costeiros poderiam ficar ionicamente mais concentrados, enquanto a perda de volume d'água por evaporação torna os ambientes relativamente mais concentrados. Essa interpretação corroboraria com os valores elevados de íons como sódio e cloreto encontrados no Lago Toro.

Algo que ficou bastante claro com a plotagem das classificações das amostras de acordo com os ambientes hidrológicos, ilustrado no Gráfico 6, foi a diferença entre as composições dos *vents* dos Andes Centrais e da Patagônia. No primeiro caso, ainda que haja certa dispersão dos dados, é evidente o caráter sódico cloretado das amostras, enquanto os *vents* patagônicos apresentam assinaturas bicarbonatadas mistas. Essas composições refletem diretamente as diferenças químicas macrorregionais citadas anteriormente. Algo curioso é que essa segregação é muito mais evidente nos *vents* do que nas demais ambientes hidrológicos analisadas. Portanto, é possível que boa parte da influência macrorregional na hidroquímica desses ambientes andinos seja derivada das composições de fluidos vinculados ao magmatismo do orógeno.

## 5.3 ANÁLISE DE PERFIS HIDROLÓGICO-TOPOGRÁFICOS

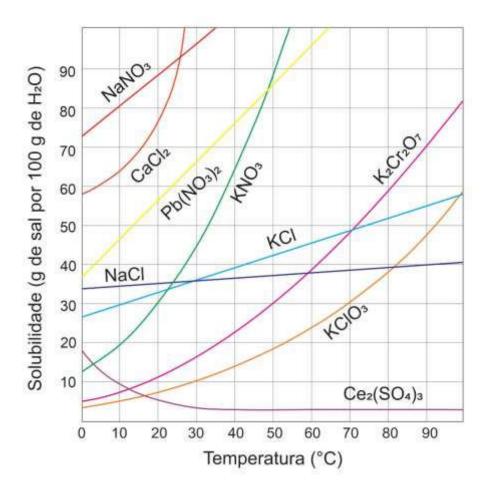
Ao longo dos perfis hidrológicos, desde a saída do ambiente subterrâneo nos vents e nascentes até os lagos e salares, ocorrem aumentos e diminuições nas concentrações iônicas e nos caráteres físico-químicos das amostras. Essas variações, como mostrado no caso de Botijuela, têm influência da presença de hidrotermalismo, então devem ser avaliadas separadamente. Com base nas posições dos pontos de coleta, há dois perfis nos quais é possível avaliar mudanças na composição das águas de montante para a jusante (Figura 13). Esses perfis estão na já citada localidade de Botijuela, onde foram feitas amostragens desde a saída de água dos *vents* e nascentes até o salar. Os mapas que representam esses dois sistemas podem ser observados no Anexo II.

De maneira geral, de montante para jusante, há maior tendência de precipitação para o sistema hidrotermal. Isso porque há diminuição na salinidade, indicada pelo rebaixamento dos valores de condutividade e STD, e diminuição das concentrações de cálcio, potássio, ferro, bicarbonato e cloreto. Por outro lado, há aumento do pH e das concentrações de magnésio, fosfato, fluoreto, nitrato e sílica em solução. No sistema híbrido, por outro lado, não há diminuição de nenhum parâmetro, no máximo há comportamento de interpretação dúbia, como nos casos das concentrações de magnésio, potássio e sílica.

Primeiramente, é preciso lembrar que diferentes sais possuem diferentes taxas de solubilidade em funções da temperatura (Atkins & Paula, 2006), como ilustrado no Gráfico 7. Como é possível observar, enquanto a maioria das substâncias se tornam mais solúveis com o aumento de temperatura, outras tendem à precipitação nessa evolução. Além disso, as inclinações das curvas em função da variação de temperatura são muito distintas, com sais muito sensíveis a essas variações, como nitrato de potássio, e outros com pouca oscilação, como cloreto de sódio. Em termos das feições analisadas nos sistemas hidrotermais, os pontos à montante apresentam maiores temperaturas que os da jusante, pois são os *vents* que concentram as maiores temperaturas. Como os resultados de concentrações iônicas aqui apresentados já estão na forma de massa/volume, e não apenas como massa absoluta encontrada nas amostras, corpos hídricos com diferentes volumes de solvente podem ser comparados.

Portanto, do ponto de vista físico-químico, faz sentido que o sistema onde há diminuição progressiva de temperatura também apresente progressiva diminuição nas concentrações de sais dissolvidos. No caso, é exatamente isso que ocorre com no sistema hidrotermal, onde o rebaixamento da solubilidade gera as precipitações ao longo dos cursos d'água descritas anteriormente. No sistema híbrido, ocorre algo praticamente inverso, porque as águas chegam no ambiente superficial sem

apresentar concentrações expressivas em relação ao ambiente saturado, estão "famintas" por material a ser solubilizado. Quando essas drenagens fluem pelas encostas, lixiviam os sais da superfície, se tornando progressivamente mais mineralizadas.



**Gráfico 7:** curvas de solubilidade de sais em função da temperatura (Fonte: adaptado de Atkins & Paula, 2006).

A ausência de tendência de aumento ou diminuição de concentrações para sódio e potássio em pelo menos um dos sistemas também faz sentido dentro dessa lógica. Como a composição dos sais de Botijuela é basicamente de cloretos (Steinmetz et al., 2018; Richards et al., 2006), principalmente de sódio, provavelmente esses dois metais também precipitam na forma ligada com o ânion cloreto. De acordo com o Gráfico 7, as solubilidades desses sais são pouco sensíveis às variações de temperatura e, portanto, permitem certa consistência de valores de concentração em ambos sistemas hidrológicos.

Algo marcante em praticamente todas as análises de parâmetros por ambientes hidrológicos foi a alta concentração iônica nos ambientes lacustres. Isso fica especialmente evidente na Puna, mas também em locais como a Laguna Amarga e o Lago Toro, onde diversas espécies iônicas alcançam concentrações de dezenas de milhares de mg/L. Provavelmente, a explicação para essa característica dos lagos é de que, sendo eles os receptores dos fluxos oriundos das demais fontes, ocorre a soma das massas de material dissolvido dessas outras feições no ambiente lacustre. Como as regiões estudadas apresentam altas taxas de evaporação, devido à aridez preponderante (Pfeiffer et al., 2018; Vuille & Keimig, 2004), as massas de sais que chegam nos lagos são mais relevantes que o volume de solvente que as carregam. Isto é, já que ocorre déficit hídrico nas regiões, os lagos se tornam progressivamente mais concentrados em relação às demais feições, já que o volume de água diminui enquanto a massa de sais aumenta.

## 5.4 MICROBIAIS E ASPECTOS HIDROQUÍMICOS

Ainda que a presença microbial não tenha sido o foco deste trabalho, foi feita a caracterização do meio aquoso no qual eles estão por vezes imersos ou são diretamente influenciados. A presença de água aparece como agente fundamental na existência desses organismos, não é coincidência que os relatos de ocorrência microbial sempre estejam associados com pontos com pelo menos algum volume d'água. Os lagos aparecem, tanto na literatura quanto pelos relatos de campo de coleta das amostras deste trabalho, como principais ambientes hidrológicos que abrigam tais organismos (Sancho-Tomás et al., 2020; Farías, 2020; Solari et al., 2010). Por isso, vale especial atenção às assinaturas hidroquímicas desses ambientes para compreender melhor as condições ambientais suportadas e condicionantes da existência microbial.

Algo muito interessante é o quão diferentes são as assinaturas químicas dos lagos que abrigam esses organismos. Enquanto há relatos de microbiais no Lago Diamante, com assinatura muito concentrada em sódio, potássio, nitrato, fosfato, sulfato, fluoreto e sílica, também há presença no Lago Sarmiento, cujas concentrações iônicas tendem a ser muito menos expressivas. Os próprios caráteres das águas que contêm esses organismos também são diversos, havendo predomínio de composição cloretada sódica na Puna e bicarbonatada mista na Patagônia.

## 6. CONCLUSÕES

Ainda que tanto a Puna quanto a Patagônia possam ser caracterizadas como detentoras de ambientes extremos e que haja uma série de semelhanças geológicas e climáticas entre elas, existem expressivas diferenças nas assinaturas das águas superficiais desses contextos. Essas diferenças aparecem tanto em escala ampla como nos menores detalhes, ou seja, desde as tendências macrorregionais gerais até particularidades nas assinaturas dos ambientes hidrológicos de cada região. Enquanto as águas dos Andes Centrais apresentam forte caráter ácido, cloretado e sódico e têm salinidades altíssimas, a Patagônia aparece como detentora de importante caráter bicarbonatado, alcalino e básico. Essas assinaturas são refletidas nas diferenças composicionais das exalações hidrotermais de cada macrorregião, principalmente no que diz respeito aos tipos de água, com *vents* cloretados sódicos na Puna e bicarbonatados mistos na Patagônia.

Mais do que isso, ficou comprovado como as assinaturas hidroquímicas refletem diretamente a geologia de cada localidade. Mudanças nas composições de rochas do substrato e, principalmente, dos produtos vulcânicos na Cordilheira dos Andes geram composições hidroquímicas distintas tanto na Puna como na Patagônia. Mais do que isso, os ambientes hidrológicos diretamente ligados com a atividade vulcânica expressam de maneira ainda mais clara essa relação com o magmatismo de cada região. Em casos de vulcanismo mais ácido, como no Cerro Galán, isso aparece nas maiores concentrações de sílica dissolvida dos ambientes hidrológicos. Por outro lado, composições vulcânicas básicas e alcalinas, como ocorre em Pali-Aike, também são expressadas na hidroquímica superficial, com pH mais básico e enriquecimento em álcalis, como sódio e potássio.

No entanto, também há semelhanças nos sistemas hidroquímicos das regiões estudadas, mesmo entre as mais distantes geográfica e geologicamente. Ficou claro o papel dos lagos como receptáculos dos materiais dissolvidos, seja nos Andes Centrais ou na Patagônia. Ainda, independentemente da região, as feições ligadas ao hidrotermalismo são mais ionicamente mais concentradas — salva a exceção dos lagos — e apresentam caráter mais ácido do que os demais elementos hidrológicos dos seus respectivos locais. Mais que isso, quando comparados sistemas com e sem hidrotermalismo dominante, identifica-se tendência de precipitação mineral à jusante,

no primeiro caso, e de dissolução de sais da superfície no segundo. Em campo, essa diferença pode ser identificada pela presença de estruturas precipitadas, em grande parte carbonáticas, que acompanham os cursos d'água hidrotermais.

Por fim, ficou evidente que a presença microbial associada aos ambientes hidrológicos da Cordilheira dos Andes não é limitada por uma única assinatura hidroquímica. Com ocorrências quase exclusivas em lagos, esses organismos suportam tanto condições muito concentradas em íons como sódio e cloreto, como no caso do Lago Diamante, quanto contextos menos salinos, com caráter bicarbonatado, tal qual ocorre no Lago Sarmiento.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

São inúmeros os possíveis vieses de pesquisa que poderiam ser adotados tanto para refinar os dados e interpretações aqui apresentados quanto para investigar questões vinculadas ao escopo da pesquisa aqui tratada. Por exemplo, seria possível, e muito bem-vinda, a coleta sistemática de amostras de água em cada região em número suficientemente grande para que tratamentos estatísticos mais robustos pudessem ser aplicados. Tratamentos como testes de hipóteses, análises curvas de distribuição amostral, cálculo de coeficientes de correlação, etc., demandariam no mínimo algumas dezenas de pontos de coleta para cada área. Com isso, seria viável assumir, por ventura, as interpretações aqui propostas ou, em caso de contradição com os dados aqui apresentados, apresentar novas discussões tendo amparo em parâmetros estatísticos mais sólidos.

Mais do que aumentar o número amostral, também poderia ser ampliado o número de parâmetros analisados para cada amostra. Algo que poderia ser especialmente útil seria a análise de elementos menores, com destaque para metais como lítio e semimetais como o Boro, importantíssimos na dinâmica evaporítica. Ainda, poderiam ser usadas análises de isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio para investigar origens hidrogeológicas e influências climáticas na hidrologia.

Além disso, mapeamentos geológicos de detalhe das áreas estudadas poderiam elucidar melhor os fatores envolvidos na dinâmica hidrogeológica. Isso tanto pelo maior conhecimento de quais litotipos estão envolvidos nessa dinâmica quanto pela compreensão de como o arcabouço estrutural local pode conectar ambientes

superficiais e subterrâneos, condicionar migrações de fluidos ou até impedir a conectividade entre ambientes hidrológicos. Aliado a isso, análises litogeoquímicas dessas rochas poderiam auxiliar na investigação das fontes diretas dos elementos dissolvidos nas águas superficiais, principalmente se feitas levando em consideração todos os ambientes hidrológicos presentes nos sistemas hidrológicos de cada região.

Tendo em vista que não foi identificada uma única assinatura hidroquímica que abriga os organismos microbiais, seriam interessantes investigações sobre as diferenças biológicas entre essas colônias. Possivelmente, diferentes ambientes hidroquímicos selecionam variedades distintas de microbiais, e não haja grande homogeneidade quanto às espécies encontradas em diferentes áreas da Cordilheira dos Andes. Portanto, estudos de sequenciamento genético e análises microbiológicas poderiam elucidar questões metabólicas, fisiológicas e estruturais particulares a grupos diferentes de microbiais.

Uma das frentes de pesquisa que mais poderia complementar as discussões aqui apresentadas seria o estudo dos balanços hídricos de cada região. Avaliar com precisão as taxas de evaporação, pluviosidade e escoamento superficial das áreas dos Andes Centrais e da Patagônia poderia tornar melhor a compreensão de como são os contextos evaporíticos dessas macrorregiões. Aliado a isso, pesquisas que levassem em consideração modelagens de fluxo e investigações de circulação de fluidos subterrâneos poderiam identificar não apenas o volume de água transportada em cada ambiente, mas também possíveis conexões em profundidade de sistemas hidrológicos superficialmente separados.

## **REFERÊNCIAS**

- Alcacer J. M., Onorato M. R., Perucca L. P., Miranda S. 2018. Preliminary study of gravimetric anomalies in the Magallanes-Fagnano fault system, South America. *Geodesy and Geodynamics*, **9**: 42-49.
- Allmendinger R. W., Jordan T. E., Kay S. M., Isacks B. L. 1997. The Evolution of the Altiplano-Puna Plateau of the Central Andes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **25**: 139-174.
- Allwood A. C., Wlater M. R., Kamber B. S., Marshall C. P., Burch I. W. 2006. Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. *Nature*, **441**: 714-718. doi.org/10.1038/nature04764
- Ammirati J. B., Flores M. C., Ruiz S. 2020. Seismicity along the Magallanes-Fagnano fault system. *Journal of South American Earth Sciences*, **103**: 102799. doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102799
- Atkins P., Paula J. 2006. Atkins Physical Chemistry. 8ed. W. H. Freeman and Company, Nova Iorque, 1087 pp. ISBN: 0-7167-8759-8
- Baird R. B., Eaton A. D., Rice E. W. 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23ed. American Public Health Association, Washington, 1545 pp. ISSN: 55-1979
- Beeler S. R., Gomez F. J., Bradley A. S. 2020. Controls of extreme isotopic enrichment in modern microbialites and associated abiogenic carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **269**: 136-149. doi.org/10.1016/j.gca.2019.10.022
- Bohm M., Lüth S., Echtler H., Asch G., Bataille K., Bruhn C., Rietbrock A., Wigger P. 2002. The Southern Andes between 36j and 40jS latitude: seismicity and average seismic velocities. *Tectonophysics*, **356**: 275-289. doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00399-2
- Cady A. L., Farmer J. D., Grotzinger J. P., Schopf W., Steele A. 2004. Morphological Biosignatures and the Search for Life on Mars. *Astrobiology*, **3**: 351-368. doi.org/10.1089/153110703769016442

- Cembrano J., Lara L. 2009. The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: A review. *Tectonophysics*, **471**: 96-113. doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.038
- Chernicoff C. J., Richards J. P., Zappettini E. O. 2002. Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical, and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews*, **21**: 127-155.
- Corbella H., Lara L. 2008. Late Cenozoic Quaternary Volcanism in Patagonia and Tierra del Fuego. *Developments in Quaternary Sciences*, **11**: 95-119. doi.org/10.1016/S1571-0866(07)10006-3
- Daniels B. G., Hubbard S. M., Romans B. W., Malkowski M. A., Matthews W. A., Bernhardt A., Kaempfe S. A., Jobe Z. R., Fosdick J. C., Schwartz T. M., Fildani A., Graham S. A. 2019. Revised chronostratigraphic framework for the Cretaceous Magallanes-Austral Basin, Última Esperanza Province, Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, **94**: 102209. doi.org/10.1016/j.jsames.2019.05.025
- Davies B. J., Darvill C. M., Lovell H., Bendle J. M., Dowdeswell J. A., Fabel D., García J. L., Geiger A., Glasser N. F., Gheorghiu D. M., Harrison S., Hein A. S., Kaplan M. R., Martin J. R. V., Mendelova M., Palmer A., Pelto M., Rodés A., Sagrado E. A., Smedley R. K., Smelie J. L., Thorndycraft V. R. 2020. The evolution of the Patagonian Ice Sheet from 35 ka to the present day (PATICE). *Earth-Science Reviews*, 204: 103152. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103152
- D'Orazio M., Agostini S., Mazzarini F., Innocenti F., Manetti P., Haller M. J., Lahsen A. 2000. The Pali Aike Volcanic Field, Patagonia: slab-window magmatism near the tip of South America. *Tectonophysics*, **321**: 407-427. doi.org/10.1016/j.tecto.2009.02.038
- ESRI 2021. Esri Satellite Map. Disponível em: https://maps.esri.com/rc/sat/index.html. Acessado em 25 de junho de 2021.
- Farías M. E. 2020. *Microbial Ecosystems in Central Andes Extreme Environments: Biofilms, Microbial Mats, Microbialites and Endoevaporites*. Springer, Cham, 298
  pp. doi.org/10.1007/978-3-030-36192-1

- Folkes C. B., Wright H. M., Cas R. A. F., Silva S. L., Lesti C., Viramonte J. G. 2011. A re-appraisal of the stratigraphy and volcanology of the Cerro Galán volcanic system, NW Argentina. *Bulletin of Volcanology*, 73: 1427-1454. doi.org/10.1007/s00445-011-0459-y
- Garreaud R. D. 2009, The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22: 3-11. doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009
- Gianni G. M., García H. P. A., Pesce A., Lupari M., González M., Giambiagi L. 2020.

  Oligocene to present shallow subduction beneath the southern Puna plateau. *Tectonophysics*, **780**: 228402. doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228402
- Gonzales J., Aydin A. 2008. The origin of oriented lakes in the Andean foreland, Parque Nacional Torres del Paine (Chilean Patagonia). Geomorphology, **97**: 502-515. doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.001
- González-Vidal D., Obermann A., Tassara A., Bataille K., Lupi M. 2018. Crustal model of the Southern Central Andes derived from ambient seismic noise Rayleigh-wave tomography. *Tectonophysics*, **744**: 215-226. doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.004
- GOOGLE 2021. Google Earth website. Disponível em: http://earth.google.com/. Acessado em 2 de março de 2021.
- Grocke S. B., Andrews B. J., Silva S. L. 2017. Experimental and petrological constraints on long-term magma dynamics and post-climactic eruptions at the Cerro Galán caldera system, NW Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **347**: 296-311. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.09.021
- Grosse P., Ramacciotti M. L. O., Fochi F. E., Guzmán S., Orihashi Y., Sumino H. 2020. Geomorphology, morphometry, spatial distribution and ages of mafic monogenetic volcanoes of the Peinado and Incahuasi fields, southernmost Central Volcanic Zone of the Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **401**: 106966. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106966
- Haag M. B., Baez W. A., Sommer C. A., Arnosio J. M., Filipovich R. E. 2019. Geomorphology and spatial distribution of monogenetic volcanoes in the southern

- Puna Plateau (NW Argentina). *Geomorphology*, **342**: 196-209. doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.008
- Hall B. L., Lowell T. V., Bromley G. R. M., Denton G. H., Putnam A. E. 2019. Holocene glacier fluctuations on the northern flank of Cordillera Darwin, southernmost South America. *Quaternary Science Reviews*, 222: 105904. doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105904
- Haller M. J., Massaferro G. I., Alric V. I., Navarrete C. R., Menegatti N. 2020. Cenozoic intraplate magmatism of central Patagonia, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, **102**: 102650. doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102650
- Heusser C. J. 1995. Three Late Quaternary pollen diagrams from Southern Patagonia and their palaeoecological implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **118**: 1-24. doi.org/10.1016/0031-0182(94)00138-X
- IGN INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL 2021. Información Geoespacial.
   Disponível em:
   https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial. Acessado em 2 de março de 2021.
- Kilian R., Lamy F. 2012. A review of Glacial and Holocene paleoclimate records from southernmost Patagonia (49-55°S). *Quaternary Science Reviews*, **53**: 1-23. doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.07.017
- Lepot K. 2020. Signatures of early microbial life from the Archean (4 to 2.5 Ga) eon. *Earth-Science Reviews*, **209**: 103296. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103296
- Marden C. J. Late-glacial fluctuations of south patagonian icefield, Torres del Paine National Park, southern Chile. *Quaternary International*, **38**: 61-68. doi.org/10.1016/S1040-6182(96)00019-5
- Massaferro J., Recasens C., Larocque-Tobler I., Zolitschka B., Maidana N. I. 2013. Major lake level fluctuations and climate changes for the past 16,000 years as reflected by diatoms and chironomids preserved in the sediment of Laguna Potrok Aike, southern Patagonia. *Quaternary Science Reviews*, **71**: 167-174. doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.07.026

- Mazzarini F., D'Orazio M. 2003. Spatial distribution of cones and satellite-detected lineaments in the Pali Aike Volcanic Field (southernmost Patagonia): insights into the tectonic setting of a Neogene rift system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **125**: 291-305. doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00120-3
- Milana J. P. 2009. Largest wind ripples on Earth? *Geology*, **37**: 343-346. doi.org/10.1130/G25382A.1
- Moreno P. I., François J. P., Villa-Martínez R. P., Moy C. M. 2009. Millennial-scale variability in Southern Hemisphere westerly wind activity over the last 5000 years in SW Patagonia. *Quaternary Science Reviews*, 28: 25-38. doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.10.009
- NASA 2021. Aster Sensor Imagery. Disponível em: https://search.asf.alaska.edu/#/.
  Acessado em 25 de junho de 2021.
- Pfeiffer M., Latorre C., Santoro C. M., Gayo E. M., Rojas R., Carrevedo M. L., McRoastie V. B., Finstad K. M., Heimsath A., Jungers M. C., Pol-Holz R., Amundson R. 2018. Chronology, stratigraphy and hydrological modelling of extensivewetlands and paleolakes in the hyperarid core of the Atacama Desert during the late quaternary. *Quaternary Science Reviews*, **197**: 224-245. doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.08.001
- Piper A.M. 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union Transactions*, **25**: 914-923. doi.org/10.1029/TR025i006p00914
- Richards J. P., Ulrich T., Kerrich R. 2006. The Late Miocene-Quaternary Antofalla volcanic complex, Southern Puna, NW Argentina: Protracted history, diverse petrology and economic potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **156**: 197-239. doi:10.1016/j.jvolgeores.2005.10.006
- Richards J. P., Jourdan F., Creaser R. A., Maldonado G., DuFrane S. A. 2013. Geology, geochemistry, geochronology, and economic potential of Neogene volcanic rocks in Laguna Pedernal and Salar de Aguas Calientes segments of the Archibarca lineament, northwest Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **258**: 47-73. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.04.004

- Rivera H. A., Le Roux J. P., Farías M., Gutiérrez N. M., Sánchez A., Palma-Heldt S. 2020. Tectonic controls on the Maastrichtian-Danian transgression in the Magallanes-Austral foreland basin (Chile): Implications for the growth of the Southern Patagonian Andes. *Sedimentary Geology*, **403**: 105645. doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105645
- Ross P. S., Delpit S., Haller M. J., Németh K., Corbella H. 2011. Influence of the substrate on maar–diatreme volcanoes An example of a mixed setting from the Pali Aike volcanic field, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **201**: 253-271. doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.07.018
- Sancho-Tomás M., Somogyi A., Medjoubi K., Bergamaschi A., Visscher P. T., Driessche A. E. S., Gérard E., Farías M. E., Contreras M., Philippot P. 2020. Geochemical evidence for arsenic cycling in living microbialites of a High Altitude Andean Lake (Laguna Diamante, Argentina). *Chemical Geology*, **549**: 119681. doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119681
- Schäbitz F., Wille M., François J. P., Haberzettl T., Quintana F., Mayr C., Lücke A., Ohlendorf C., Mancini V., Paez M. M., Prieto A. R., Zolitschka B. 2013. Reconstruction of palaeoprecipitation based on pollen transfer functions e the record of the last 16 ka from Laguna Potrok Aike, southern Patagonia. *Quaternary Science Reviews*, **71**: 175-190. doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.12.006
- Schopf J. W., Kudryavtsev A. B., Czaja A. D., Tripathi A. B. 2007. Evidence of Archean life: Stromatolites and microfossils. *Precambrian Research*, **158**: 141-155. doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.009
- Seckbach J., Oren A. 2010. *Microbial Mats Modern and Ancient Microorganisms in Stratified Systems*. Springer, Nova Iorque, 595 pp. ISBN: 978-90-481-3798-5
- Solari M. A., Hervé F., Le Roux J. P., Airo A., Sial A. N. 2010. Paleoclimatic significance of lacustrine microbialites: A stable isotope case study of two lakes at Torres del Paine, southern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **297**: 70-82. doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.07.016
- Sparks R. S. J., Francis P. W., Hamer R. D., Pankhurst R. J., O'Callaghan L. O., Thorpe R. S., Page R. 1985. Ignimbrites of the Cerro Galan caldera, NW Argentina.

- Journal of Volcanology and Geothermal Research, **24**: 205-248. doi.org/10.1016/0377-0273(85)90071-X
- Steinmetz R. L. L., Salvi S., García M. G., Arnold Y. P., Béziat D., Franco G., Constantini O., Córdoba F. E., Caffe P. J. 2018. Northern Puna Plateau-scale survey of Li brine-type deposits in the Andes of NW Argentina. *Journal of Geochemical Exploration*, **190**: 26-38. doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.013
- Steinmetz R. L. L., Ávila P., Dávila F. M. 2020. Landscape and drainage evolution during the Cenozoic in the Salinas Grandes Basin, Andean Plateau of NW Argentina. *Geomorphology*, **353**: 107032. doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107032
- Thomson S. N. 2002. Late Cenozoic geomorphic and tectonic evolution of the Patagonian Andes between latitudes 428S and 468S: An appraisal based on fission-track results from the transpressional intra-arc Liquiñe-Ofqui fault zone. *Geological Society of America Bulletin*, **114**: 1159-1173.
- Vuille M., Keimig F. 2004. Interannual Variability of Summertime Convective Cloudiness and Precipitation in the Central Andes Derived from ISCCP-B3 Data. *Journal of Climate*, **17**: 3334-3348. doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3334:IVOSCC>2.0.CO;2
- Yacobaccio H. D., Morales M. R., Hoguin R. 2017. Habitats of ancient hunter-gatherers in the Puna: Resilience and discontinuities during the Holocene. *Journal of Anthropological Archaeology*, **46**: 92-100. doi.org/10.1016/j.jaa.2016.08.004
- Zhou R., Schoenbohm L. M., Sobel E. R., Carrapa B., Davis D. W. 2016. Sedimentary record of regional deformation and dynamics of the thick-skinned southern Puna Plateau, central Andes (26-27°S). *Earth and Planetary Earth Sciences Letters*, **433**: 317-325. doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.0
- Zimmermann C., Jouve G., Pienitz R., Francus P., Maidana N. I. 2015. Late Glacial and Early Holocene cyclic changes in paleowind conditions and lake levels inferred from diatom assemblage shifts in Laguna Potrok Aike sediments (southern Patagonia, Argentina). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **427**: 20-31. doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.03.006

							-ísico-química	Unidade: mg/L										1					
						T <sub>(°C)</sub> pH	(1-0.01.1)	(g. = /	Sílica				Ânions	•			0.	0.	Cátions		2.		
Amostra 18237	Região Patagônia	Sub-região Torres del Paine	Lago Sarmiento Pruchov	-50,99933404	<b>Long</b> -72,68803302	9,9 8,28		<b>STD</b> 871	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> - 446,27	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	<b>CI</b> <sup>-</sup> 271,83	<b>F</b>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	<b>Ca<sup>2+</sup></b> 87.5	Mg <sup>2+</sup> 35,3	<b>Na</b> <sup>+</sup> 113	<b>K</b> <sup>+</sup> 16	Fe <sup>3+</sup>	Classificação Cloretada sódio-cálcica	Ambiente Lago da Patagônia
18238	Patagonia	Torres del Paine	Lago Sarmiento Pruchov  Lago Sarmiento Península	-51,01022219	-72,68603302 -72,6242198	6,7 8,73		876	0	202,52	108,54	206,03	0	0	0	0	98,5	30,5	120	13	0	Cloreto-carbonatada Sódio-cálcica	Lago da Patagônia
18239	Patagônia	Torres del Paine	Lago Sarmiento Trombólito	-51,04469852	-72,67483137	5,7 8,69		886	0	141,88	139,56	262,81	0	0	84	0	108	35,7	129	14	0	Cloreto-carbonatada Sódio-cálcica	Lago da Patagônia
18240	Patagônia	Torres del Paine	Laguna Amarga entre os Vents	-50,97027745	-72,73360585	9,5 8,85		53307	0	759,14	997,18	18972,76	0	0	1780	0	5640	1820	4850	1540	0	Cloretada cálcio-sódica	Lago da Patagônia
18241 18242	Patagônia Patagônia	Torres del Paine Torres del Paine	Laguna Amarga Vent principal Laguna Amarga	-50,97669745 -50,97669745	-72,73629918 -72,73629918	12,8 7,62 13,1 7,89		697 494	0	690,01 509,33	0	94,39 76,76	0	0	0	0	88,5	40,5 35,6	62	5 6	0	Bicarbonatada cálcio-magnesiana Bicarbonatada cálcio-magnesiana	Vent da Patagônia Vent da Patagônia
18243	Patagônia	Torres del Paine	Laguna Amarga	-50,97669745	-72,73629918	9,8 7,85	,	511	0	500,84	0	87,1	0	0	0	0	91,7	37,1	64	5	0	Bicarbonatada cálcio-magnesiana	Vent da Patagônia
18244	Patagônia	Torres del Paine	Laguna Amarga	-50,97669745	-72,73629918	8,2 8,89		52871	0	0	1335,94	20522,6	0	0	970	0	4730	1786	3980	1590	0	Cloretada cálcio-sódica	Vent da Patagônia
0190/19 0191/19	Patagônia Patagônia	Torres del Paine Torres del Paine	Sarmiento sem vento Sarmiento sistema vivo	-51,0550904 -51,05161177	-72,92177189 -72,91582052	7,65 8,76 7,86 8,77			3,7 1,17	368,44 363,56	0 2,4	124,55 116,28	0	0 3,8	220 220	0	16,2 13,37	61,02 59,97	560 220	11,7 9 1	0,07 0.08	Bicarbonatada-sulfatada sódica Bicarbonatada-sulfatada sódica	Lago da Patagônia Lago da Patagônia
0192/19	Patagônia	Torres del Paine	Amarga TP11 LAGO (I)	-50,976772	-72,73688	14,67 8,98			1,17	000,00	۷, ٦	110,20	Ü	0,0	220	Ü	10,01	00,07	220	0, 1	0,00	Dicarbonatada sunatada socioa	Vent da Patagônia
0193/19	Patagônia	Torres del Paine	Amarga TP11 (A) VENT	-50,976755	-72,736952	17,8 6,76	2020		19,48	450,91	2,64	1,4	0	0	176	0	121,91	79,06	264	7,6	15,96	Bicarbonatada sódio-magnesiana	Dren. de vent da Patagônia
0194/19 0195/19	Patagônia Patagônia	Torres del Paine Torres del Paine	Amarga TP11 (B) Amarga TP11 (D)	-50,97672 -50,976657	-72,736982 -72,736971	18,69 7,32 15,42 7,83																	Dren. de vent da Patagônia Dren. de vent da Patagônia
0196/19	Patagônia Patagônia	Torres del Paine	Amarga TP11 (D) Amarga TP11 (G)	-50,976621	-72,736987 -72,736987	15,42 7,63																	Dren. de vent da Patagônia
0197/19	Patagônia	Torres del Paine	Amarga TP10 LAGO	-50,974399	-72,732351	13,55 9,1	77800																Lago da Patagônia
0198/19	Patagônia	Torres del Paine	Amarga drenagem (borda oeste)	-50,978633	-72,763944	11,73 9,06																	Drenagem da Patagônia
0199/19 0200/19	Patagônia Patagônia	Torres del Paine Torres del Paine	Amarga TP9 (A) Amarga TP9 (C)	-50,969513 -50,969513	-72,734526 -72,734526	12,77 6,68 12 8,1	1290																Vent da Patagônia Vent da Patagônia
0201/19	Patagônia	Torres del Paine	Amarga TP9 (F) LAGO	-50,969825	-72,734867	12,53 8,98																	Vent da l'atagonia Vent da Patagônia
0202/19	•	Torres del Paine	Cisne	-51,029667	-72,868485	10,29 9,43	3150		0	457,74	4,08	440	0	0	314	0	12,72	67,46	740	80	,	Bicarbonatada-cloretada sódica	Lago da Patagônia
0203/19	•	Toro	Toro Lago	-52,708952	-71,177497	8,71 9,13			2,4	1720,2	40,8	44,4	0	0,6	324	0,3	46,58	911,14	45,8 460	45,7	,	Bicarbonatada magnesiana	Lago da Patagônia
0204/19 0205/19	Patagônia Patagônia	Toro Toro	Toro Drenagem Toro Poço	-52,703965 -52,687935	-71,181734 -71,159064	10,1 9,33 10 7,38			8,65 10,7	212,77 191,05	0,96 0,84	500 65,3	0	0,7 0	164 0	0	18,79 26,41	37,12 23,41	460 18,2	26,5 2,2	0,59 0,5	Cloretada sódica Bicarbonatada magnesiana-cálcica	Drenagem da Patagônia Nascente da Patagônia
20211	Patagônia	Pali-Aike	Timone	-51,029667	-72,868485	9,71		110567	0	0	29997,43	41000	12,5	110	140	358,15	9	3	29076	2560	-,-	Cloretada sódica	Lago da Patagônia
20212	Patagônia	Pali-Aike	ANA-19	-52,06248	-69,792359	9,02	28320	28209	13	2214,72	422,87	7900	1,48	18,9	1130	1,3	7	0	6048	670	0,03	Cloretada sódica	Lago da Patagônia
20213 20214	Patagônia Patagônia	Torres del Paine Torres del Paine	Amarga Sarmiento	-50,974399 -51,05161177	-72,732351 -72,91582052	8,84 8,62		81102 1045	2	1279,58 373,91	585,43 58,36	8650 110	2,12 1.8	2,2 0	30400 224	23,82	440 <i>4</i> 1	1480 46	13608 247 2	1640 11,2	0,03	Sulfatada sódica Bicarbonatada-sulfatada sódica	Lago da Patagônia Lago da Patagônia
20214	Patagonia Patagônia	Torres del Paine	Toro (drenagem)	-51,05161177 -52,703965	-72,91582052 -71,181734	8,59		866	2	278,03	8,25	190	0,54	1,3	224 120	1,3	68	15	247,2 226,6	11,2	0,08	Cloretada-bicarbonatada sódica	Drenagem da Patagônia
20216	Patagônia	Toro	Toro (Ponto 1)	-52,708952	-71,177497	8,66		102996	5	1287,39	412,01	32100	1,93	2,4	10000	74,05	320	840	19618	1280	0,12	Cloretada sódica	Lago da Patagônia
20217	Patagônia	Toro	Toro (Ponto 7)	-52,687935	-71,159064	8,7	112100	111662	2	2368,03	67,39	41000	1,99	3,2	5200	66,33	220	1060	21960	1440	0,14	Cloretada sódica	Lago da Patagônia
20012 20011	Puna Puna	Peinado Peinado	Peinado 5 Peinado 4	-26,51530556 -26,51277778	-68,09572222 -68,09808333	33,13 6,65 25,1 6,66		5600 19324	121 93	1463,66 1463,56	0	2100 5000	46 55	0,3 0,1	130 120	0	243 1012,5	170,17 364,65	1160 2020	100 120	0 0.4	Cloretada sódica Cloretada sódica	Vent da Puna Vent da Puna
20010	Puna	Peinado	Peinado 3	-26,50927778	-68,10102778	14,3 7,57		10809	74	853,74	0	3800	53	0,6	120	0	364,5	291,72	1630	120	0,4	Cloretada sódica	Vent da Puna
20009	Puna	Peinado	Peinado 2	-26,49341667	-68,09497222	9,15 7,76		59337	100	8537,4	0	14590	59	0,5	230	1,526	3280,5	1069,64	8520	520	0	Cloretada sódica	Lago da Puna
20008	Puna	Peinado	Peinado 1	-26,48238889	-68,09911111	6,3 7,4		98006	80	1707,49	0	44600	116	1,5	1300	5,975	5508	2187,9	13480	1000	0	Cloretada sódica	Lago da Puna
20007 20006	Puna Puna	Galán Galán	Diamante Meio Diamante Veja Sul	-26,03152778 -26,05138889	-67,02691667 -67,03983333	3,6 9,44 5,4 8,91		190055 434.27	260 48,52	0 129,28	3838,84 13,2	61320 128	624 1,48	240 0,4	12400 17	71,377 0	2 32.4	∠ 6,81	46680 76,8	8160 13,2	0	Cloretada sódica Cloretada sódica	Lago da Puna Nascente da Puna
20005	Puna	Galán	Geiser Galan ponto c/Carbonato	-26,03325	-66,98716667	46,5 8,66		3967,1	157,5	0	531,54	1250	21,5	1	22	0	44,55	9,72	930	60	0,02	Cloretada sódica	Dren. de vent da Puna
20004	Puna	Galán	Geiser Galan	-26,03283333	-66,98605556	83,3 8,02		3823,6	156	548,84	0	1500	5,5	5,6	20	0	39,29	0,73	875	80		Cloretada sódica	Vent da Puna
20003 20461	Puna Puna	Galán Botijuela	Geiser Esferulito BOT 20 I A	-26,03419444 -25,74920992	-66,98816667 -67,80382404	29,2 8,36 22,81 6,66		4094,8 90079	23,5 34	0 641,21	1049,88	1650 40000	21 1,56	5,3 1	25 305	0	40,91 3431,23	11,91 621,68	790 18480	70 680	,	Cloretada sódica Cloretada sódica	Dren. de vent da Puna Vent da Puna
20460	Puna	Botijuela	BOT 20   D	-25,74949266	-67,80302404	20,5 6,82		95030	37	667,77	0	42000	1,75	2,5	307	0	2802,24	385,8	19776,4	630	,	Cloretada sódica	Dren. de vent da Puna
20462	Puna	Botijuela	BOT 20 I i	-25,75111853	-67,80535026	25 6,83		87258	0	1565,81	0	37300	1,65	3,1	302	4,85		1314,98		670	,	Cloretada sódica	Drenagem da Puna
20455	Puna	Botijuela	BOT 20 III C	-25,75091518	-67,80367735	20 6,8		97960	44	489,1	0	28800	1,61	0	314	1,22	3552,19		12308,8	760		Cloretada sódica	Dren. de vent da Puna
20458 20465	Puna Puna	Botijuela Botijuela	BOT 20 IV A BOT 20 1	-25,75391831 -25,74483326	-67,81761552 -67,80741699	30,02 8,44 20,23 6,56		2541 84981	63 26	15,43 679,43	141,34 0	900 34000	1,76 1,56	1,6 0	350 280	14,23 5,97	62,5 3100,61	41,48 529,18	614,2 15320,5	28 6800 01		Cloretada sódica Cloretada sódica	Drenagem da Puna Nascente da Puna
20454	Puna	Botijuela	BOT 20 IV HA	-25,74303878	-67,82323626	33,2 6,84		5145	16	823,36	0	1800	1,68	0	180	0	216,92	29,56	1400,2	46	,	Cloretada sódica	Vent da Puna
20459	Puna	Botijuela	BOT 20 IV HB	-25,74056939	-67,82268238	22,56 7,71	-	218	58	79,58	0	42,7	0,78	0	0	3,93	16,53	11,38	23,8	5,8		Bicarbonatada-cloretada sódio-magnesiana	Nascente da Puna
20466 20456	Puna Puna	Botijuela Botijuela	BOT 20 IV HC BOT 20 IV HF	-25,74278791 -25,74770742	-67,82459456 -67,81997005	19,61 7,6 24,58 8,13	•	828 8089	46 35	156,58 348,4	0 25,63	200 2700	0,82 1,83	0 1.5	118 630	2,07 12,67	46,37 207,65	22,43 54,02	110 1648	10,7 67	,	Cloretada sódica Cloretada sódica	Nascente da Puna Drenagem da Puna
20457	Puna	Botijuela	BOT 20 IV HG	-25,75416393	-67,82118244	23,42 6,26		79398	26	573,97	0	32200	1,59	0	608	1,06	3902,98	540,44	12746,8	460	•	Cloretada sódica	Vent da Puna
20463	Puna	Botijuela	BOT 20 VI HA	-25,74001453	-67,83339465	19,86 7,7	1110	743	54	221,6	0	113	1,17	0,9	125	5,07	44,76	24,15	93	9	,	Bicarbonatada-cloretada sódio-cálcica	Nascente da Puna
20464	Puna	Botijuela Botijuela	Vega Antofalla	-25,50431288 25,74096970	-67,62648783	27,23 8,68	-	249	29	155,37	12,45	93	1,38	1,1	0	7,37	42,34	13,88	70	8,5	0,04	Cloretada-bicarbonatada sódio-cálcica	Drenagem da Puna
-	Puna Puna	Botijuela Botijuela	BOT- 20 - I - F BOT- 20 - III - A	-25,74986879 -25,75052574	-67,80489418 -67,8035317	21,1 7,14 16,9 7,23		10000 10000															Dren. de vent da Puna Vent da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - III - B	-25,75077845	-67,8035192	21,1 7,14		10000															Dren. de vent da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - III - F	-25,7516156	-67,80430841	22,5 6,87		10000															Vent da Puna
-	Puna Puna	Botijuela Botijuela	BOT- 20 - IV - HA2 BOT- 20 - IV - HA3	-25,74303878 -25,74303878	-67,82323626 -67,82323626	26,12 7,19 25,16 7,76		5360 5340															Drenagem da Puna Drenagem da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - IV - HA4	-25,74303878	-67,82323626	21,14 7,83		5110															Drenagem da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - IV - HD	-25,74333871	-67,82459911	20,56 8,18	2980	1910															Drenagem da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - IV - HE BOT- 20 - IV - HH	-25,74509852 -25,75628779	-67,8222589 -67,81698386	19 8,15 27,36 8,22		3040 7750															Drenagem da Puna
-	Puna Puna	Botijuela Botijuela	BOT- 20 - IV - HI	-25,75628779 -25,74570903	-67,81698386	19,95 8,19		7750 245															Lago da Puna Drenagem da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - IV - HJ	-25,74445251	-67,82164716	21,11 8,26	683	437															Drenagem da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - IV - HK	-25,74393919	-67,82292831	19,22 8,2		4410															Dren. de vent da Puna
-	Puna Puna	Botijuela Botijuela	BOT- 20 - IV - HL BOT - 20 -VI - HB	-25,74402689 -25,73975977	-67,823725 -67,83880038	18,28 8,42 19,91 7,82		1580 1310															Drenagem da Puna Nascente da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT - 20 -VI - HC	-25,73856455	-67,85778302	23,5 7,3		510															Nascente da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - 2	-25,76900276	-67,81281937	14,1 6,35	20000	10000															Drenagem da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - 3	-25,76310741	-67,81067443	19,81 6,28		60000															Drenagem da Puna
-	Puna Puna	Botijuela Botijuela	BOT- 20 - 4 BOT- 20 - 5	-25,76175725 -25,76184264	-67,81118643 -67,81058733	21,06 6,25 21,77 7,21		60000 60000															Drenagem da Puna Vent da Puna
-	Puna	Botijuela	BOT- 20 - 6	-25,76235788	-67,80955519	22,75 6,84		60000															Lago da Puna
	Patagônia	Pali-Aike				7,5 8,36																	Drenagem da Patagônia
	Patagônia Patagônia	Pali-Aike Pali-Aike				6,6 10,0 13,4 9,95																	Lago da Patagônia Lago da Patagônia
	-	Pali-Aike Pali-Aike				13,4 9,95																	Drenagem da Patagônia
	Patagônia	Pali-Aike				12 10,0	3																Lago da Patagônia
	•	Pali-Aike				11,2 10,0																	Lago da Patagônia
	Patagônia Patagônia	Pali-Aike Pali-Aike				10,6 9,35 11 9,71																	Lago da Patagônia Lago da Patagônia
	. alagorila	/ 1110				5,1																	

