

RELAÇÃO ENTRE VOLUME DE CHUVA E ÁREA DE LAGOS DE BACIAS ENDORREICAS UTILIZANDO GEOPROCESSAMENTO: ESTUDO DE CASO DO LAGO CHUNGARÁ

Lucas da Silva Dias

Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, Brasil
dasilvadiaslucas@gmail.com

Rejane Ennes Cicerelli

Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, Brasil
rejaneig@unb.br

Guilherme Gomes Pessoa

Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, Brasil
guilherme.pessoa@unb.br

Jeremie Garnier

Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, Brasil
garnier@unb.br

Tati de Almeida

Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, DF, Brasil
tati_almeida@unb.br

RESUMO

As mudanças climáticas têm sido foco de diversas pesquisas, nas quais o Sensoriamento Remoto (SR) tem se destacado no monitoramento ambiental, impulsionado por ferramentas como o Google Earth Engine (GEE). Neste trabalho, foram determinados os valores da área superficial do Lago Chungará ao longo de 38 anos, correlacionando-os com dados de precipitação anual. O processamento foi realizado por meio de técnicas de SR implementadas no GEE. Os resultados indicam redução da área do lago entre 1986 e 2023 com cerca de 13%, acompanhando a diminuição do regime de chuvas anuais em quase 80%. A correlação geral entre precipitação e área foi significativa ($R^2 = 0,7986$), com destaque para os períodos de 1996-2001 ($R^2 = 0,9756$) e 2001-2009 ($R^2 = 0,8917$). Anomalias em 2017 e 2022 impactaram negativamente o valor de R^2 mais recente (2013-2023), que passou de 0,5222 para 0,8808 com a remoção desses anos, sugerindo possíveis influências externas como ação antrópica ou processos naturais adicionais, tais como antropização da região, recarga de reservatórios subterrâneos, influência do degelo etc. É enfatizada a importância do estudo do impacto das mudanças climáticas em diferentes escalas, além da praticidade de novas tecnologias auxiliando de maneira eficaz as pesquisas.

Palavras-chave: Google Earth Engine. NDWI. Detecção de corpo hídrico. Pluviometria.

RELATIONSHIP BETWEEN RAINFALL AND LAKE AREA IN ENDORHEIC BASINS USING GEOPROCESSING: A CASE STUDY OF CHUNGARÁ LAKE

ABSTRACT

Climate change has been the focus of several research projects, in which Remote Sensing (RS) has stood out in environmental monitoring, driven by tools such as Google Earth Engine (GEE). In this study, the surface area of Lake Chungará over 38 years was determined and correlated with annual precipitation data. Processing was carried out using SR techniques implemented in GEE. The results indicate a reduction in the area of the lake between 1986 and 2023 of around 13%, in line with a decrease in annual rainfall of almost 80%. The overall correlation between rainfall and area was significant ($R^2 = 0.7986$), with the periods 1996-2001 ($R^2 = 0.9756$) and 2001-2009 ($R^2 = 0.8917$) standing out. Anomalies in 2017 and 2022 negatively impacted the most recent R^2 value (2013-2023), which went from 0.5222 to 0.8808 with the removal of these years, suggesting possible external influences such as anthropogenic action or additional natural processes, such as anthropization of the region, recharge of underground reservoirs, influence of thaw, etc. The importance of studying the impact of climate

change on different scales is emphasized, as well as the practicality of new technologies effectively aiding research.

Keywords: Google Earth Engine. NDWI. Water body detection. Pluviometry.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a comunidade científica tem expressado crescente preocupação com as variações climáticas que afetam, de maneiras diversas, regiões ao redor do mundo. Eventos climáticos extremos estão se tornando mais frequentes e intensos, atingindo áreas cada vez maiores (Meseguer-Ruiz et al., 2023). Entre exemplos recentes, destacam-se os menores registros de chuvas no período entre julho e setembro de 2023 nos últimos 40 anos em oito estados do Brasil, o nível recorde mais baixo do Rio Negro, em Manaus, incêndios devastadores no Canadá entre abril e setembro de 2023 e chuvas extremas que causaram enchentes e colapsos de barragens na Líbia (*World Meteorological Organization*, 2023).

Dentro desse cenário, a região dos altiplanos chilenos tem enfrentado secas intensas e prolongadas (Meseguer-Ruiz et al., 2023). Estudos entre os anos de 1965 e 2012 apontam um aumento da temperatura de 0,12 °C a 0,25 °C por década (Seiler et al., 2013; López-Moreno et al., 2015), tais mudanças têm alterado o regime pluviométrico da região. Esses padrões climáticos têm provocado secas mais prolongadas e chuvas concentradas que aumentam a probabilidade de inundações (Fuentealba et al., 2021). A relação entre as mudanças climáticas e seus impactos nos regimes hídricos da região é amplamente documentada por diversos autores (Quintana; Aceituno, 2012; Masiokas et al., 2016; Bolsier et al., 2018), sendo a interferência humana um fator crucial (Vera; Díaz, 2015).

Especificamente no Chile, Serrano-Nativoli et al. (2021) identificaram alta frequência de eventos de seca extrema no final do século XX e início do século XXI, com destaque para a "Mega Seca". Esse fenômeno, caracterizado pela escassez prolongada de chuvas na região centro-sul do país, durou dez anos. A "Mega Seca" ocorreu durante a década mais quente já registrada no Chile, intensificada pelo aumento das queimadas (González et al., 2018).

Um dos impactos diretos da alteração do regime de chuvas, combinado com o aumento da frequência e intensidade das secas, é a redução da área superficial de lagos. Fuentealba et al. (2021) aponta que os lagos chilenos tiveram uma redução de 7% a 25% em decorrência da Mega seca entre 2010-2020, corroborando com o gradiente de chuvas registradas durante o mesmo período no país. Em outro estudo, Dorador et al. (2003) relatam um aumento da temperatura anual de 1,2 °C e uma redução de 6,58% na área superficial do Lago Chungará entre os anos de 1986-1987 e 1998-1999, corroborando com os demais estudos que apontam para as mudanças climáticas e seus reflexos na região dos altiplanos chilenos.

Concomitante à redução da disponibilidade hídrica, conforme demonstrado por diversos estudos que apontam a tendência de diminuição das áreas superficiais dos lagos (Dorador et al., 2003; Satgé, 2017) há um aumento da demanda por esse recurso devido à crescente necessidade dos serviços ecossistêmicos que as bacias hidrográficas oferecem, como abastecimento de água, regulação climática e manutenção da biodiversidade. No caso dos altiplanos chilenos, além dos serviços ecossistêmicos, destaca-se também a presença de atividades de mineração, que são altamente dependentes de recursos hídricos. Esse contexto se torna ainda mais crítico em estudos que buscam modelar a disponibilidade futura de água, como o trabalho de Bozkurt et al. (2018), que prevê uma redução de até 40% na precipitação média anual para a segunda metade do século XXI, podendo resultar no aumento da população global afetada por esses eventos (Spinoni et al., 2021; 2018a).

O cenário de aumento da temperatura, agravamento dos eventos de secas e a crescente demanda por água torna imprescindível a adoção de estratégias específicas para gerenciamento de recursos hídricos. Nesse contexto, e em razão de maior variabilidade climática ao longo do território e em escalas anuais e interanuais (Meseguer-Ruiz et al., 2023), a região dos Altiplanos chilenos configura uma área de alto risco sob qualquer cenário de mudança climática projetado.

O gerenciamento de recursos hídricos perpassa pelo conhecimento das regiões de interesse, de sua ocupação, do regime pluviométrico e outros fatores ambientais. As principais fontes de informações para esse tipo de análise são obtidas por meio de sensoriamento remoto. No entanto, um dos maiores

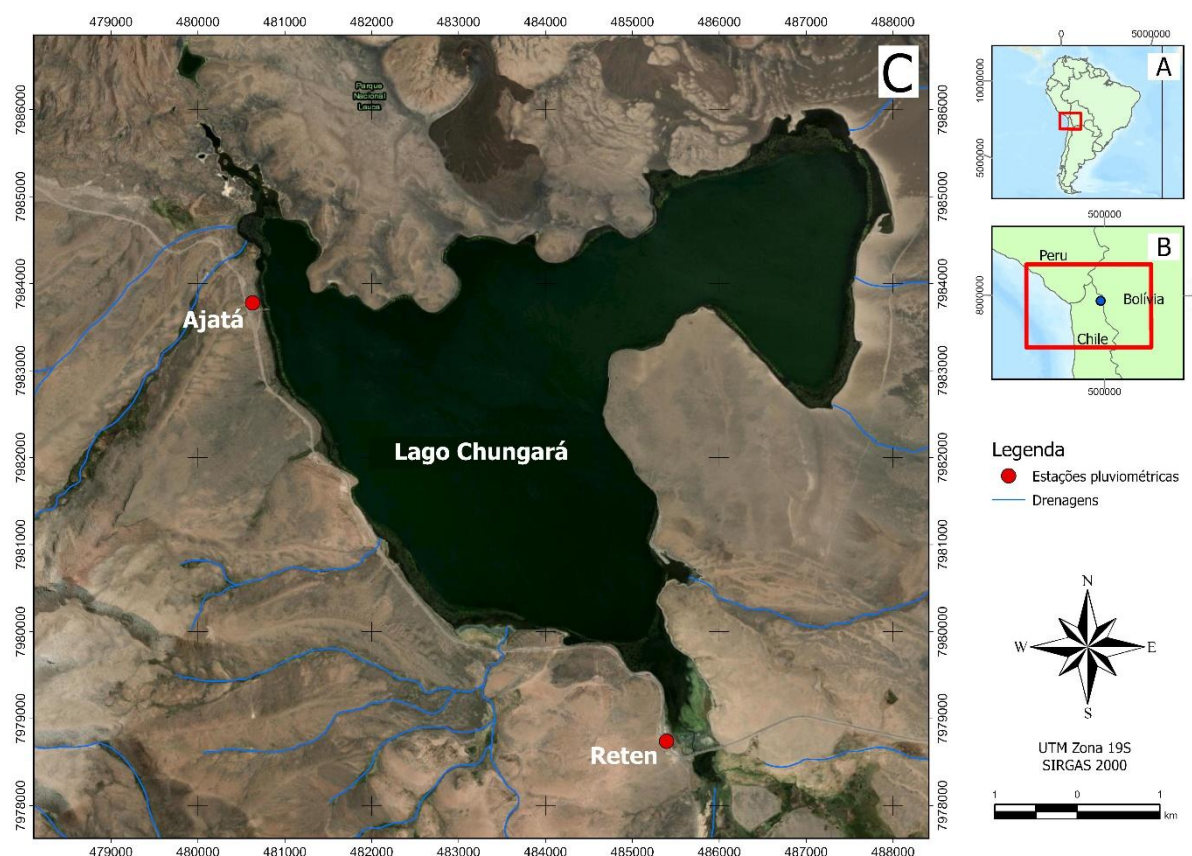
desafios nesse campo é o processamento de grandes volumes de dados, especialmente em aplicações que requerem o monitoramento contínuo de fenômenos ao longo de vários anos. Para superar as limitações das análises multitemporais, a *Google* desenvolveu a plataforma *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick *et al.*, 2016), que vem sendo amplamente utilizada em pesquisas ambientais. O GEE oferece acesso a um vasto catálogo de imagens de satélite, como as da série *Landsat TM*, além de disponibilizar ferramentas e algoritmos avançados para análise de dados de sensoriamento remoto, facilitando significativamente o processamento e a análise de grandes conjuntos de dados.

Diante do contexto de crise climática, este estudo visa analisar a dinâmica da variabilidade climática e seu impacto sobre o Lago Chungará, especificamente em relação à variação das chuvas e a área do lago ao longo dos últimos 38 anos. O objetivo principal é investigar a correlação entre os dados pluviométricos e a área superficial do lago, utilizando dados satelitais e informações de sensores pluviométricos. Através dessa análise, buscamos contribuir para a compreensão das implicações das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da região, além de oferecer subsídios para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável dos recursos hídricos no altiplano chileno.

ÁREA DE ESTUDO

O Altiplano sul-americano é um platô localizado nos Andes centrais, abrangendo territórios de países como Chile, Argentina, Bolívia e Peru, com altitudes que superam 3000 m (Espinoza; Aravena, 2015).

Figura 1 - Mapa de localização do Lago Chungará



Fonte: Os autores, 2024.

O altiplano chileno representa a porção desse platô que se encontra dentro do território do Chile. Essa região é caracterizada por lagos e lagunas de comportamento endorreico, localizados em depressões tectônicas preenchidas por sedimentos clásticos e evaporíticos (Valdivielso *et al.*, 2022).

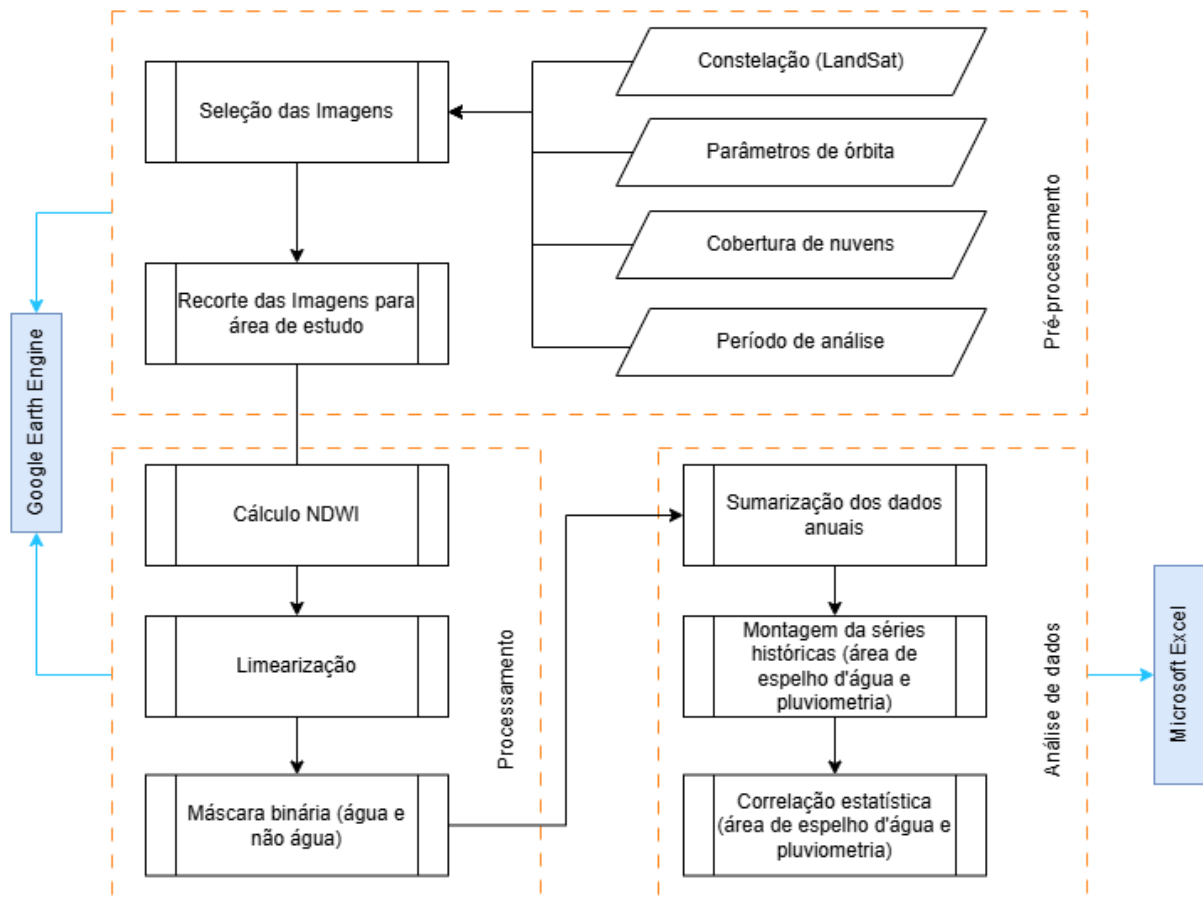
As precipitações nos Andes centrais apresentam características sazonais, influenciadas por um regime regional de circulação de monções durante o verão (Zhou; Lau, 1998). As massas de ar, originárias do Oceano Atlântico, são transportadas pelos ventos alísios através da Bacia do Amazonas, resultando em precipitações do tipo convectiva (Aravena et al., 1989; 1999a), que representam até 80% das chuvas anuais no verão austral (dezembro a março) (Valdivielso et al., 2022).

O Lago Chungará (18°14'33"S, 69°09'09"O) (figura 1) está localizado na porção mais elevada do Altiplano, a 4.520 metros, no extremo oeste da bacia fluviolacustre dos Altiplanos sul-americanos. Este lago situa-se no centro de uma sub-bacia hidrológica fechada, na borda nordeste da Bacia de Lauca, datada do Cenozoico (Moreno et al., 2007). O Lago Chungará foi escolhido para este estudo por não apresentar intensa interferência antrópica, o que permite refletir com fidelidade a relação entre as chuvas e os valores da área do lago a serem identificados. Além disso, a proximidade de estações pluviométricas, que possuem dados desde a década de 1980, contribui para a análise.

METODOLOGIA

O fluxograma (Figura 2) do estudo é dividido em três fases principais, sendo elas: I - pré-processamento e preparação dos dados; II - Classificação dos pixels de água e determinação da área superficial do lago; e III - análise estatística da correlação entre o volume de chuvas e a variação da área superficial do lago. As etapas I e II do método são desenvolvidas por meio da aplicação de ferramentas disponíveis na plataforma GEE, enquanto a etapa III é desenvolvida por meio de ferramentas disponíveis no software *Microsoft Excel* (*Office 365 A1 for students*). O emprego da plataforma GEE permite a realização de processamento em nuvem, eliminando a necessidade de hardwares potentes para armazenamento e processamento.

Figura 2 - Fluxograma esquemático dos procedimentos aplicados.



Fonte: Os autores, 2024.

Pré-processamento e preparação dos dados

O procedimento executado nessa fase é passível de ser realizado em qualquer software com capacidade para operar sobre dados *raster*, no entanto, nesse estudo optou-se por realizar o procedimento por meio de ferramentas disponíveis na plataforma GEE. Em razão do volume de dados e da grande extensão de cobertura das imagens de satélite, as imagens selecionadas foram submetidas a um processo de recorte, visando manter apenas a região de interesse. A região selecionada extrapola a região do espelho d'água do Lago Chungará e o mesmo polígono de recorte foi considerado para todas as imagens, independentemente das variações da área superficial do lago.

Deteção da área de superfície

A etapa II considera a aplicação dos seguintes procedimentos:

- a – Aplicação da fórmula NDWI;
- b – Definição do limiar;
- c – Cálculo e obtenção dos valores de área classificada como água.

Para cada imagem selecionada durante a fase de pré-processamento, foi aplicada a equação (1) do Índice de Diferença Normalizada de Água (NDWI), a fim de possibilitar a detecção dos pixels de água a partir do uso das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do verde. O índice utilizado foi desenvolvido por McFeeters (1996), tendo como princípio a curva de assinatura espectral da água, a qual apresenta um intervalo restrito de reflectância, com o verde (0,498-0,530 μm) apresentando maior valor no espectro eletromagnético, enquanto o NIR (0,76-1,2 μm) é caracterizado por maior absorção da água e reflectância do solo e vegetação.

$$NDWI = \frac{Verde - NIR}{Verde + NIR} \quad (1)$$

Com o cálculo realizado sobre a área de interesse, o resultado é uma imagem composta por pixels com valores variando de 1 a -1. Em geral, valores positivos indicam a superfície em que a água foi identificada; no entanto, esse conceito não se aplica a todas as imagens, sendo necessário que o intérprete determine os intervalos que representem a superfície d'água.

O programa executa as operações requisitadas, resultando, em algumas situações, em imagens que subestimam a extensão real das áreas dos alvos. Isso pode ocorrer devido a fatores como margens rasas ou a presença de vegetação aquática (Satgé et al., 2017). Logo é necessário fazer um ajuste do limiar, ou seja, o valor mínimo de cada pixel resultante no cálculo do NDWI que será classificado como água.

O procedimento para a definição do limiar consistiu em comparar a área classificada como água por meio do NDWI com imagens compostas por bandas combinadas (infravermelho de ondas curtas, infravermelho próximo e vermelho). As imagens resultantes se aproximam das cores que o olho humano geralmente identifica, assim fica possível identificar os limites das margens cobertas por água e comparar se o alcance é o mesmo na imagem produzida pelo processamento do NDWI. Foram medidos vários valores até que se identificasse o que se apresentava mais satisfatório, em que cada valor testado foi aplicado em cada imagem que seria processada nos anos de 1986 a 1990, totalizando 89 imagens testadas. Identificado o valor, foi adotado o mesmo para as imagens seguintes, sendo o limiar de -0,035 considerado como o mais adequado.

Definido o valor de limiar, a imagem da máscara representa de forma satisfatória a porção que compreende o espelho d'água, então é chamada a função que retorna o valor da área de interesse em km^2 . Cada pixel que possuía o valor a partir do limiar definido, era contado para que fosse feita uma soma de suas áreas, visto que todo pixel representa o mesmo valor de área imageada, basta então que seja feita a conversão dos valores para km^2 após a obtenção da soma total.

Análise estatística da correlação entre o volume de chuvas e a área superficial do lago

A terceira etapa do método considera a análise comparativa entre os valores da média da área da superfície do Lago Chungará e os valores pluviométricos anotados para a região de estudo. Embora seja possível a obtenção de um valor de área superficial para cada imagem utilizada no estudo, optou-se por considerar os valores anualizados, a fim de padronizar o estudo, visto que cada ano do período analisado pode ter maior ou menor quantidade de imagens disponíveis. Há também a limitação na obtenção de imagens em períodos chuvosos, pois quando aplicado o filtro de nuvens, as imagens que cobrem o período de chuvas são automaticamente excluídas. Logo haveria situações em que medidas de chuvas não poderiam ser comparadas com nenhuma imagem no mesmo período.

Assim, o primeiro parâmetro é calculado pela média aritmética de todos os valores obtidos de área da superfície de espelho d'água em cada ano, enquanto o segundo é obtido pela soma dos valores registrados pela estação Ajatá e, para preencher lacunas e valores discrepantes, a estação Reten. Nessa fase o foco é analisar o comportamento da variação desses dois parâmetros e identificar possíveis anomalias.

A comparação foi realizada em gráficos de dispersão, aplicando a reta de regressão simples e observando o quanto as variáveis estavam correlacionadas, podendo informar se o lago poderia funcionar como uma espécie de "pluviômetro natural." Esse tipo de análise estatística foi aplicado em diferentes escalas temporais, mais precisamente em períodos específicos em que foram identificados ciclos de acréscimo e decréscimo do volume de chuvas, e, se necessário, em datas antes e depois de 2012, a fim de identificar em quais períodos houve maior ou menor correlação e realizar as interpretações.

CONJUNTO DE DADOS EXPLORADOS

Satélites

As imagens utilizadas neste estudo são oriundas das missões *Landsat*, amplamente reconhecidas na literatura por sua extensa cobertura global e pela capacidade de criar uma série histórica de imagens do território terrestre (Wulder et al., 2012; Masek et al., 2006). As missões consideradas incluem o *Landsat 5 TM*, que operou de 1986 a 2011 (Chander et al., 2009); o *Landsat 7 ETM+*, lançado em 1999 (USGS, 2015); o *Landsat 8 OLI/TIRS*, iniciado em 2013 (USGS, 2015); e o *Landsat 9 OLI-2/TIRS-2*, que começou a operar em 2021 (USGS, 2022). Essas missões oferecem bandas espectrais que abrangem uma vasta porção do espectro eletromagnético, sendo apenas duas bandas essenciais para o processamento deste estudo: o Verde e o Infravermelho Próximo.

O *Landsat 5 TM*, lançado em 1984, possui uma resolução espacial de 30 metros e uma resolução radiométrica de 8 bits, com sete bandas espectrais, incluindo o infravermelho próximo e duas bandas de infravermelho de ondas curtas (Chander et al., 2009). Essa missão foi pioneira em fornecer dados que permitiram análises detalhadas da superfície terrestre. O *Landsat 7 ETM+*, introduzido em 1999, trouxe melhorias significativas, como a adição de uma banda pancromática com resolução de 15 metros (USGS, 2015). No entanto, a partir de 2003, este satélite apresentou cortes nas imagens devido a uma falha no corretor de linha do scanner (SLC), o que limitou a qualidade dos produtos (USGS 2015).

Com o lançamento do *Landsat 8 OLI/TIRS* em 2013, houve uma nova era na captura de imagens de satélite. Este satélite mantém uma resolução espacial de 30 metros, mas aprimora a resolução radiométrica para 12 bits, permitindo a captura de imagens mais detalhadas e precisas (USGS, 2015). O sensor OLI possui nove bandas espectrais, incluindo a pancromática, com as bandas de interesse para este estudo sendo as correspondentes ao Verde e ao Infravermelho Próximo.

Finalmente, o *Landsat 9 OLI-2/TIRS-2*, lançado em 2021, introduziu melhorias adicionais nos instrumentos OLI e TIRS, elevando a resolução radiométrica para 14 bits (USGS, 2022). Essa atualização permite ao sensor diferenciar mais de 16 mil tons de cinza, proporcionando uma discretização mais sutil de características da superfície terrestre. A disposição das bandas é similar à do *Landsat 8*, com uma resolução espacial de 15 metros para a banda pancromática.

Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos (Tabela 1) utilizados foram obtidos no Centro de Ciência do Clima e Resiliência ((CR)², centro chileno que disponibiliza ferramenta de visualização de dados climáticos. O (CR)² disponibiliza dados de 816 estações de precipitação acumulada diária e 1145 estações de precipitação acumulada mensal, entre estações de coleta de dados in situ e remotos, compreendendo registros entre os anos de 1930 até os dias atuais. Especificamente para este trabalho foram considerados dados de precipitação coletados pela estação de Chungará Ajata, borda nordeste do Lago Chungará. Dessa estação, são registrados valores de precipitação levantados desde 1983 até o ano de 2023. Para a complementação de dados faltantes ou que apresentaram discordância sequencial, os dados da estação localizada na porção sul do lago, Chungará Reten, também foram incluídos. Para melhor avaliação, os valores também foram dispostos em um gráfico (figura 3).

Tabela 1 - Valores de precipitação anual levantados

Ano	Volume precipitado (mm)	Ano	Volume precipitado (mm)
1986	460,0	2005	419,0
1987	350,0	2006	429,6
1988	384,3	2007	264,0
1989	326,8	2008	247,5
1990	280,5	2009	148,0
1991	312,2	2010	199,0
1992	196,6	2011	250,0
1993	395,6	2012	-
1994	299,9	2013	496,9
1995	175,1	2014	167,0
1996	226,0	2015	215,7
1997	454,5	2016	128,0
1998	247,8	2017	294,6
1999	438,0	2018	414,0
2000	309,6	2019	325,2
2001	642,3	2020	266,3
2002	435,3	2021	108,0
2003	276,3	2022	30,2
2004	412,0	2023	93,3

Fonte: Centro de Ciência do Clima e Resiliência ((CR)². Elaboração: Os autores, 2024.

RESULTADOS

Na seção de resultados estão apresentados os resultados da etapa II e III do método, pois a etapa I consistiu apenas de pré-processamento.

Detecção dos pixels de água e determinação da área superficial do lago

A fase de processamento de imagens e determinação da área de superfície resultaram em 331 valores (Tabela 2). Os anos em que mais de dois satélites foram usados apresentaram maior quantidade de dados. Em 2022 e 2023, o *Landsat 9* forneceu dados complementares, pois o *Landsat 8* não registrou imagens para o processamento ou gerou valores discrepantes. O ano de 2012 foi excluído por falta de imagens.

Os dados foram organizados no *Microsoft Excel* de tal forma que fossem realizados os cálculos de

média anual da área de superfície do espelho d'água do Lago Chungará, podendo organizar esses valores em um gráfico (figura 4). Os dados de média anual da área superficial posteriormente foram comparados com os dados pluviométricos, com vistas a gerar as análises estatísticas exploradas na etapa III do estudo.

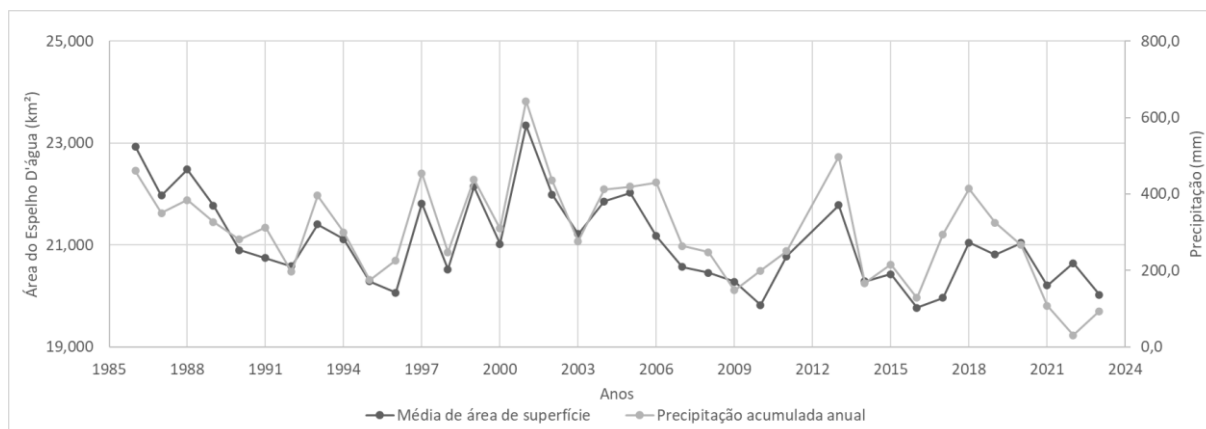
A partir do gráfico (figura 4) é possível notar que em geral há uma alternância de um ano para outro, variando para menor ou maior valor da média de área de superfície, destacando novamente esse comportamento durante o período que compreende os anos de 1996 a 2001. Ao observar a série histórica como um todo, é notável a presença de um comportamento aproximadamente decenal da diminuição da área. Essas mesmas características foram encontradas ao analisar o gráfico de precipitação anual, sinalizando que existe uma harmonia entre os dois fenômenos.

Tabela 2 - Quantidade de valores levantados por ano da área do espelho d'água do Lago Chungará

Ano	Missões	Quantidade de valores	Média Anual (km ²)	Ano	Missões	Quantidade de valores	Média Anual (km ²)
1986	Landsat 5	8	22,929	2005	Landsat 5	15	22,022
1987	Landsat 5	10	21,970	2006	Landsat 5	9	21,176
1988	Landsat 5	11	22,477	2007	Landsat 5	9	20,570
1989	Landsat 5	10	21,773	2008	Landsat 5	10	20,451
1990	Landsat 5	10	20,901	2009	Landsat 5	7	20,280
1991	Landsat 5	15	20,743	2010	Landsat 5	7	19,819
1992	Landsat 5	10	20,581	2011	Landsat 5	4	20,775
1993	Landsat 5	11	21,401	2012	Nenhuma	-	-
1994	Landsat 5	9	21,111	2013	Landsat 8	5	21,777
1995	Landsat 5	13	20,282	2014	Landsat 8	11	20,283
1996	Landsat 5	13	20,063	2015	Landsat 8	12	20,428
1997	Landsat 5	7	21,817	2016	Landsat 8	9	19,769
1998	Landsat 5	8	20,519	2017	Landsat 8	12	19,960
1999	Landsat 5	4	22,141	2018	Landsat 8	8	21,045
2000	Landsat 5	15	21,021	2019	Landsat 8	13	20,809
2001	Landsat 5	10	23,340	2020	Landsat 8	13	21,036
2002	Landsat 5	2	21,988	2021	Landsat 8	12	20,203
	Landsat 7	11					
2003	Landsat 5	8	21,211	2022	Landsat 8	16	20,644
					Landsat 9	15	
2004	Landsat 5	9	21,857	2023	Landsat 8	14	20,023
					Landsat 9	14	

Fonte: Os autores, 2024.

Figura 3 - Variação anual da Média de área de superfície e Precipitação acumulada anual



Fonte: Os autores, 2024.

Análise estatística da correlação entre o volume de chuvas e a área superficial do lago

Foi observado que ao longo de todos os anos estudados, em geral, a precipitação se comporta de maneira alternada entre acréscimos e decréscimos de volumes totais de chuvas, comportamento refletido pela média de área de superfície do lago. Essa observação é destacada no período entre os anos de 1996 e 2001, em que o comportamento alternado é mais nítido, tanto no volume de chuvas quanto na média anual da área do espelho d'água.

Ao analisar a correlação para o período total foi obtido o valor de R^2 de 0,7155 (Figura 5), indicando considerada relação entre o volume de chuvas e a área superficial do lago. É possível notar que os pontos que representam os anos mais antigos possuem maior proximidade com a reta da equação, enquanto nos anos mais recentes vão se apresentando mais distantes, sinalizando que pode haver variações na relação entre as chuvas e a área do lago ao longo da série histórica. Ainda vale destacar que os anos mais recentes apresentam menores valores de volume de chuvas e por consequência de área de superfície.

As séries históricas observadas demonstraram que a precipitação anual sobre o Lago Chungará se deu de maneira cíclica ao longo de 38 anos, consistindo em períodos de aproximadamente 10 anos de decréscimo no volume de chuvas, seguido de aumento, chegando a um pico em poucos anos, reiniciando o ciclo. Entre os anos de 1986 e 1995, observou-se uma queda nos valores de precipitação acumulada anual, e a partir de 1996 ocorreu um aumento até chegar ao seu ápice em 2001, sendo este o maior volume registrado no período analisado. Os valores retornaram a decrescer até o ano de 2009, e posteriormente cresceram a partir de 2010, chegando ao pico em 2013. A precipitação voltou a diminuir até ao menor valor registrado em 2022, retornando a crescer no ano seguinte.

O comportamento cíclico descrito anteriormente possibilita definir períodos em que há tendências de redução ou acréscimo nos volumes de chuvas. Tais períodos, uma vez identificados, permitem a avaliação em espaços temporais mais restritos, a fim de compreender o quão correlacionados os dois fenômenos são e como eles podem estar variando ao longo do período levantado. Com isso será possível realizar as devidas interpretações e conclusões acerca do quanto as mudanças climáticas podem estar afetando o lago e se ele pode servir como base para a observação direta sobre os fenômenos climáticos.

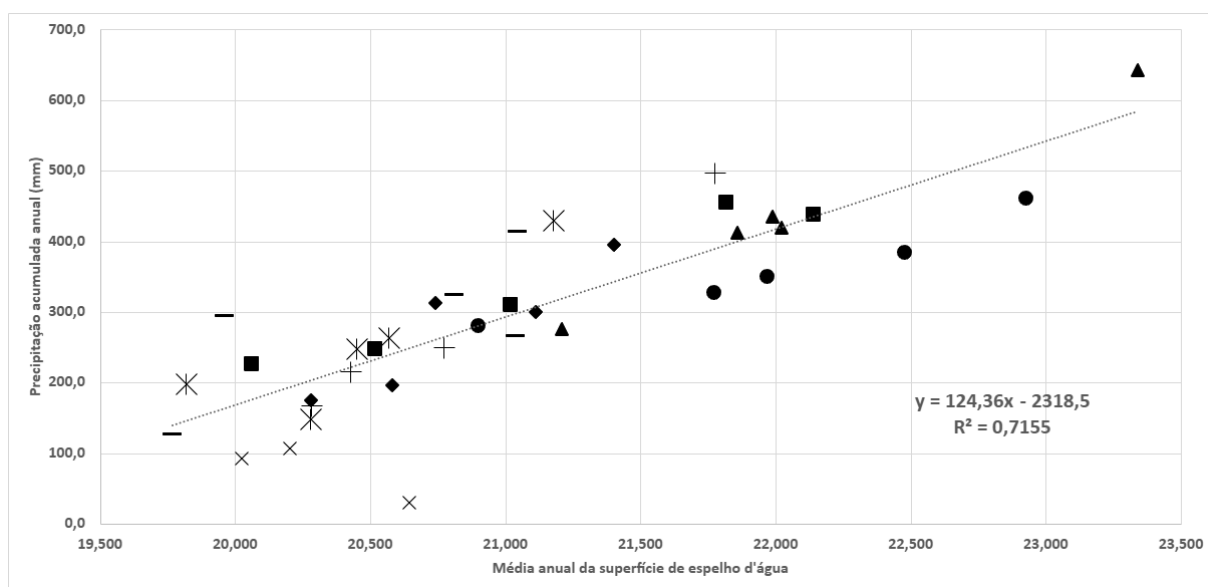
Após identificar os períodos com tendências de aumento e diminuição, foram realizadas análises dos valores de R^2 nos gráficos de regressão simples gerados no Excel. As tendências em destaque que foram escolhidas para as análises estatísticas foram aquelas identificadas como parte de um ciclo com cerca de 10 anos de decréscimo de chuvas e o curto período de acréscimo (Tabela 3).

No primeiro ciclo identificado, entre 1986 e 1995 (Figura 6A), a correlação entre a precipitação e a média da área anual foi expressiva ($R^2 = 0,782$), indicando uma sincronia natural entre o volume do lago e as chuvas. Em seguida, foi observado um aumento anômalo no período de 1996 a 2001 (Figura 6B), com um valor elevado de $R^2 = 0,9756$, o que sinaliza que, apesar da alta variabilidade na

precipitação anual, o lago apresentou uma resposta precisa em relação ao seu volume. No ciclo seguinte, de 2001 a 2009 (Figura 6C), a correlação permaneceu elevada ($R^2 = 0,8917$) sendo a segunda maior de todo o período estudado. O terceiro grande ciclo, de 2013 a 2023 (Figura 6D), apresentou o menor valor de correlação ($R^2 = 0,5222$), sugerindo uma perda da estabilidade na relação entre precipitação e volume do lago.

Ao analisar com mais detalhadamente o último gráfico, destacam-se dois pontos discrepantes, 2017 e 2022, que provavelmente contribuíram para a baixa correlação. Ao remover esses pontos, o valor de R^2 aumentou significativamente para 0,8808, reforçando a hipótese de que esses anos foram anômalos. Ainda excluindo os dois anos citados, quando analisado o período como um todo, o valor de R^2 eleva para 0,7986, deixando a relação mais significativa entre os dois fenômenos estudados.

Figura 4 - Gráfico de dispersão comparando a precipitação anual acumulada e a média anual da área do lago. 1986-1990 (círculos), 1991-1995 (losangos), 1996-2000 (quadrados), 2001-2005 (triângulos), 2006-2010 (estrelas), 2011-2015 (cruzes), 2016-2020 (traços), 2021-2023 (X);



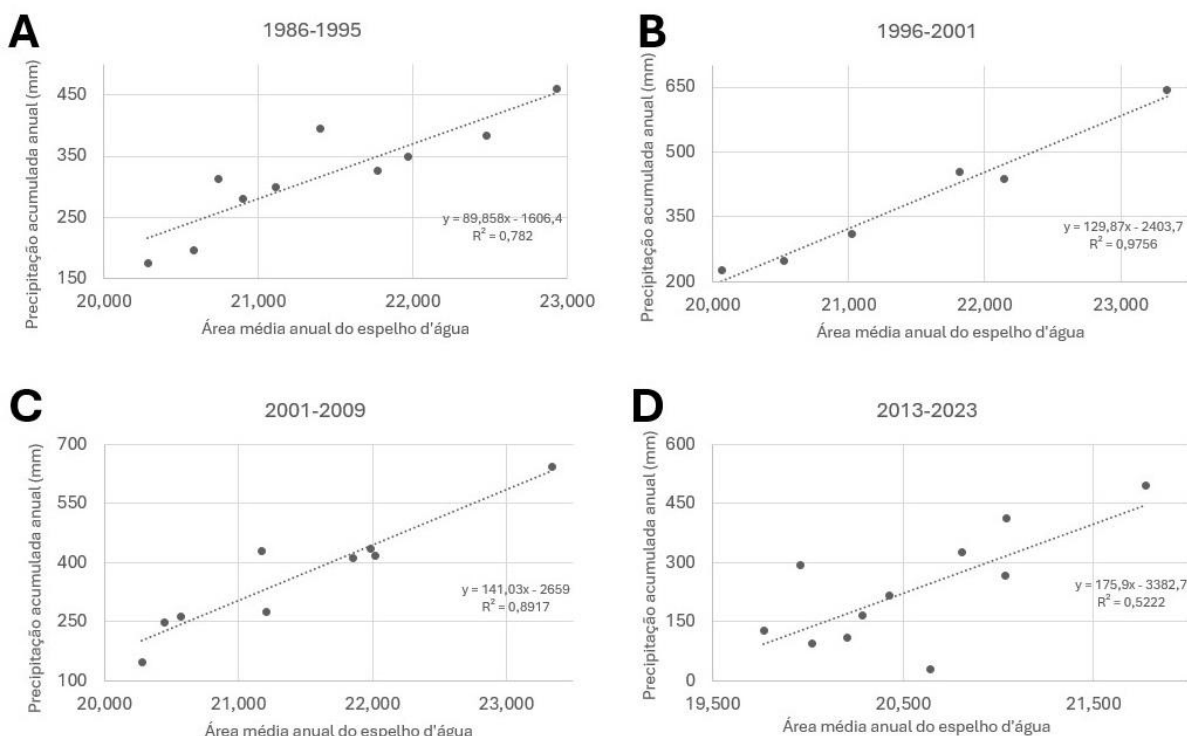
Fonte: Os autores, 2024.

Tabela 3 - Valores de R^2 de cada segmento de ciclo identificado; *Segmento quando excluídos os anos de 2017 e 2022

Período	R^2	Período	R^2
1986-2023	0,7155	1986-1995	0,782
		1996-2001	0,8756
		2001-2009	0,8717
		2013-2023	0,5222
1986-2023*	0,7986	2013-2023*	0,8917

Fonte: Os autores, 2024.

Figura 5 - Regressão analisada em gráficos de dispersão em períodos de diminuição do volume anual de precipitação (A, C e D) e aumento (B)



Fonte: Os autores, 2024.

DISCUSSÕES

Os valores observados de pluviosidade anual e média anual da área do lago apresentam variabilidade ao longo da série histórica, com alternância de aumentos e decréscimos, ainda assim foi possível observar períodos com tendências de acréscimos e decréscimos. As tendências observadas corroboram a característica sazonal dos ciclos de chuvas da região estuda. O reflexo dessa mesma tendência sazonal das chuvas observado na variação da área do lago corrobora com as análises dos gráficos de dispersão, indicando forte correlação entre estes dois fenômenos estudados.

Analisando os ciclos de forma individual, é notável a diminuição no volume de chuvas nos anos mais recentes, e por consequência redução da área do Lago Chungará. Esse fato pode ser facilmente observado ao se analisar o gráfico de dispersão da precipitação anual versus área da superfície do lago, no qual é possível verificar a maior concentração dos pontos referentes aos anos mais atuais (2006-2010, 2011-2015, 2016-2020, e 2021-2023 na porção inferior esquerda, indicando menores valores de pluviosidade e de área do lago. Outra forma de verificar o fato narrado anteriormente consiste na análise dos valores apresentados nos gráficos de variação do volume de chuvas e da área do lago, nos quais nota-se uma tendência de redução dos valores observados. Os dados analisados sugerem uma tendência na diminuição de chuvas na região à cada ciclo que se avança no tempo, sendo acompanhado na redução da área do lago, que, por sua vez, tem reflexo direto no volume de água armazenado.

As causas da elevada variação nos parâmetros climatológicos ao longo do tempo têm sido amplamente discutidas na literatura, como o aumento significativo das temperaturas, que leva a uma relação negativa no Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padrão (SPEI). Esse fenômeno pode explicar a irregularidade das precipitações interanuais e a escassez de chuvas (Meseguer-Ruiz et al., 2023), porém cabe destacar que, o SPEI não é o único responsável pela intensificação das secas. Serrano-Notivoli et al. (2021) também identificaram que, desde a segunda metade do século XX, os eventos úmidos se tornaram menos frequentes, enquanto os períodos secos têm sido mais comuns e

prolongados.

Os valores observados de R^2 para a série histórica completa e para os períodos de tendência apresentam valores de 0,782 a 0,892, indicando que a correlação entre os fenômenos estudados se manteve estável. A estabilidade da correlação indica que o Lago responde de maneira estável às variações dos volumes de chuva, tanto para os períodos com tendência de acréscimo quanto para aqueles com tendência de decréscimo. Os resultados obtidos corroboram, em parte, as observações de Garnier et al. (2024), com algumas diferenças. Destaca-se que a série histórica deste estudo abrange 38 anos, enquanto o trabalho de Garnier abrange 31 anos. Neste estudo, foi calculada a média anual da área superficial, enquanto Garnier et al. (2024) consideraram os dados logo após o período de chuvas. Em ambos os trabalhos, o Lago Chungará responde à variação anual de precipitação, mas essa relação não é completa devendo ainda ser observados fatores adversos que possam interferir nos valores observados.

Apesar da correlação para os períodos analisados é importante apontar a ocorrência dos anos anômalos de 2017 e 2022, em que os volumes de chuva e do lago divergiram, podendo esse efeito ser resultante da falha na identificação dos pixels que representam o espelho d'água, especialmente nas bordas do lago, que tendem a não ser detectadas quando o nível da água está muito baixo (Satgé et al., 2017), ou da imprecisão no registro das estações pluviométricas. Outro fator a ser considerado é a morfologia do Lago Chungará, cuja curvatura suave do fundo provoca uma perda de estabilidade do corpo d'água à medida que o volume diminui, afetando a resposta do lago às chuvas incidentes (Dorador et al., 2003). Porém, vale notar que esses anos anômalos não apresentaram os menores valores de área de superfície d'água como registrado em 2016.

Estudos que consideram outros fatores que tem influência na relação do volume de chuvas com a área do lago devem ser realizados na busca pela melhor compreensão da relação do ciclo hidrológico da região e a recarga do lago. Dentre os fatores em potencial, Garnier et al. (2024) sugere a influência de fatores como a recarga de reservatórios subterrâneos, a dinâmica da água superficial com o solo, a influência do degelo contribuem para essa correlação, demanda hídrica da vegetação. Outro fator relevante consiste na dinâmica entre o fluxo de entrada de água por infiltração e a saída pela evaporação, típica de um corpo hídrico endorreico.

Outro fator relevante é a interferência humana. No Chile, o aumento de incêndios foi associado ao aumento das temperaturas e à persistência das secas (Urrutia-Jalabert et al., 2018). Esses problemas estão relacionados ao uso da terra, com monoculturas de eucalipto e pinheiros, que não apenas servem como combustível para as queimadas, mas também são apontadas como uma das principais causas de variações hidrológicas em ecossistemas lacustres (Fuentealba et al., 2021). Além disso, os incêndios na Amazônia podem afetar o regime de chuvas no Chile, já que parte da umidade necessária para as precipitações na região do Lago Chungará tem origem na floresta tropical brasileira (Aravena et al., 1989, 1999a).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos dados confirma a eficiência do GEE como uma ferramenta prática para o monitoramento ambiental, desde que o pesquisador tenha domínio na programação para desenvolver scripts adequados ao estudo em questão. A facilidade de acesso aos dados pluviométricos da plataforma (CR)², aliada à proximidade das estações consultadas, proporcionou maior confiança na qualidade dos dados utilizados. Esses aspectos reforçam que é viável realizar estudos em ambientes remotos e produzir análises tanto de curto quanto de longo prazo.

A elevada alternância observada no gráfico de pluviosidade e na área do lago, em destaque nas grandes amplitudes observadas no período de 1996 a 2001, pode ser explicada por fenômenos naturais já conhecidos, como por exemplo o El Niño. Tal fenômeno é considerado um importante fator climático que interfere na pluviosidade no pacífico sul, sendo apontado como a causa na variação de chuvas, secas e temperaturas extremas na América do Sul (Gulizia; Pirotte, 2022).

Os gráficos de dispersão em diferentes escalas temporais revelam que, nos anos mais recentes, fatores adicionais têm influenciado a dinâmica natural do Lago Chungará, além da precipitação. Fenômenos como o aumento das temperaturas e o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) exercem influência significativa sobre o volume de chuvas e, conseqüentemente, sobre o lago. As mudanças climáticas, exacerbadas

por atividades humanas, como o desmatamento e os incêndios no Chile, também afetam diretamente a região, como relatado em outros estudos (González et al., 2018). Diante disso, há necessidade de estudos mais abrangentes, que considerem outros parâmetros, como evapotranspiração e fluxos de entrada e saída de água, a fim de proporcionar uma compreensão mais detalhada das variações do volume do lago.

O Lago Chungará demonstra potencial para funcionar como um indicador natural das condições climáticas na região, apresentando forte correlação entre sua área superficial e o volume de chuvas anuais. Quando essa correspondência é interrompida, isso pode ser interpretado como um sinal de desequilíbrio climático, alertando os gestores hídricos para a necessidade de intervenções a fim de prevenir problemas relacionados à escassez de água. Os resultados deste estudo indicam que os recursos hídricos em regiões áridas do Chile podem estar sob ameaça, mesmo dentro de áreas protegidas, e requerem monitoramento contínuo e cuidadoso.

Em resumo, o presente estudo reforça a importância do uso de ferramentas de sensoriamento remoto e a análise de séries temporais para monitoramento ambiental. A correlação entre as chuvas e o volume do Lago Chungará, apesar de ser significativa em períodos anteriores, tem diminuído recentemente, o que demanda atenção e investigação sobre o futuro do lago. Porém os valores que levam a esta constatação devem ser analisados com cuidado, visto que apenas dois anos anômalos que determinaram a diminuição da correlação nos anos mais recentes. Assim, espera-se que os resultados aqui apresentados possam contribuir para a tomada de decisões mais eficazes na gestão hídrica e na preservação dos recursos naturais da região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Universidade de Brasília (UnB), por meio do Edital DPI/DPG nº 04/2024, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio à formação acadêmica por meio da concessão de bolsa de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ARAVENA, R., PEÑA, H., GRILLI, A., SUZUKI, O. AND MORDECKAI, M. Evolución isotópica de las lluvias y origen de las masas de aire en el Altiplano chileno. *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina*. **IAEA-TECDOC-502**. IAEA, Vienna. p. 129-142, 1989.
- ARAVENA, R., SUZUKI, O., PEÑA, H., POLLASTRI, A., FUENZALIDA, H., GRILLI, A. Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. **Applied Geochemistry**, v. 14, Issue 4, p. 411-422, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00067-5).
- BOZKURT, D., ROJAS, M., BOISIER, J.P., VALDIVIESO, J. Projected hydroclimate changes over Andean basins in Central Chile from downscaled CMIP5 models under the low and high emission scenarios. **Climatic Change**, v. 150, p. 131–147, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2246-7>.
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L., HELDER, D. L. Summary of Current Radiometric Calibration of *Landsat* Sensors. **Remote Sensing of Environment**, 113(6), 893-903, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- DORADOR, C., PARDO, R., VILA, I. Variaciones temporales de parámetros físicos, químicos y biológicos de un lago de altura: el caso del Lago Chungará . **Revista Chilena de Historia Natural**, v. 76, p. 15–22, 2003. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2003000100002>
- ESPINOZA, P.S. ARAVENA, H. R., Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. **Revista de geografía Norte Grande**, v. 62, p. 169-183. 2015. Santiago. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000300010>
- EXPLORADOR CLIMÁTICO (CR2). CENTRO DEL CIENCIA DEL CLIMA Y RESILIENCIA (CR)², 2023. METEODATA. Disponível em: <https://explorador.cr2.cl/>. Acesso em: dezembro de 2023
- FUENTEALBA, M., BAHAMÓNDEZ, C., SARRICOLEA, P., MESEGUER-RUIZ, OLIVER., LATORRE,

C. The 2010-2020 'megadrought' drives reduction in lake surface area in the Andes of central Chile (32° - 36°S). **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 38, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100952>

FUENZALIDA, H., RUTLAND, J.C. Estudio sobre el origen del vapor de agua que precipita en el invierno altiplanico. **Informe Final**. Convenio Direccion General de Aguas University de Chile.

GARNIER, J., CICERELLI, R. E., DE ALMEIDA, T., BELO, J. C. R., CURTO, J., RAMOS, A. P. M., VALADÃO, L. V., SATGE, F., BONNET, M-P. Water Resources Monitoring in a Remote Region: Earth Observation-Based Study of Endorheic Lakes. **Remote Sensing**. 2024, 16, 2790.

<https://doi.org/10.3390/rs16152790>

GONZÁLEZ, M.E., GÓMEZ-GONZÁLEZ, S., LARA, A., GARREAUD, R. AND DÍAZ-HORMAZÁBAL, I. The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. **Ecosphere**, v. 9 (8), 2018. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2300>.

GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D., MOORE R., Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing Environment**, v. 202, p. 18-27, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

GULIZIA, C., PIROTTE, M.N. Characterization of simulated extreme El Nino ~ events and projected impacts on south American climate extremes by a set of coupled Model Intercomparison Project phase 5 global climate models. **International Journal Climatology**, v. 42, p 48–62, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7231>.

LÓPEZ-MORENO, J.I. MORÁN-TEJEDA, E. VICENTE-SERRANO, S.M. BAZO, J. AZORIN-MOLINA, C. REVUELTO, J. SÁNCHEZ-LORENZO, A. NAVARRO-SERRANO, F. AGUILAR, E. CHURA, O. Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru. **International Journal Climatology**, v. 36(4), p. 1773–1796 2015, <https://doi.org/10.1002/joc.4459>

MASEK, J. G., et al. A *Landsat* Surface Reflectance Dataset for North America, 1990–2000. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 44(7), 1843-1851, 2006. <http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2005.857030>

MASIOKAS, M., CHRISTIE, D., LUCKMAN, B. AND NUSSBAUMER, S. Reconstructing the annual mass balance of the Echaurren Norte glacier (Central Andes, 33.5°S) using local and regional hydroclimatic data. **The Cryosphere**, v. 10, p. 927, 2016. <https://doi.org/10.5194/tc-10-927-2016>

McFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, p. 1425-1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

MESEGUER-RUIZ, O., CORTESIB, C., GUIJARROC, J.A., SARRICOLEA, P. Weather regimes linked to daily precipitation anomalies in Northern Chile. **Atmospheric Research**., v. 236, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104802>

MESEGUER-RUIZ, O., SERRANO-NOTIVOLI, R., ARANGUIZ-ACUNA, A., FUENTEALBAA, M., NÚÑEZ-HIDALGO, I., SARRICOLEA, P., GARREAUD, R., Comparing SPI and SPEI to detect different precipitation and temperature regimes in Chile throughout the last four decades. **Atmospheric Research**., v. 297, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107085>

MORENO, A., GIRALT, S., VALERO-GARCÉS, B., SÁEZ, A., BAO, R., PREGO, R., TABERNER, C. A 14 kyr record of the tropical Andes: the Lago Chungará sequence (18 S, northern Chilean Altiplano) **Quaternary International**., v. 161 (1), p. 4-21, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.10.020>.

QUINTANA, J. M.; ACEITUNO, P. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. **Atmósfera**, v. 25 (1), p. 1-22, 2012. Cidade do México. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56523435001>

SATGÉ F., Recursos Hídricos do Altiplano Andino: Contribuição do Sensoriamento Remoto. 213p. (Doutorado em Geociências Aplicadas) - **Instituto de Geociências**, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/24339>

SEILER, C., HUTJES, R.W. A., KABAT, P. Climate variability and trends in Bolivia. **Journal of applied meteorology and climatology**, v. 52, v. 130–146. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0105.1>

SERRANO-NOTIVOLI, R., TEJEDOR, E., SARRICOLEA, P., MESEGUER-RUIZ, O., VUILLE, M., FUENTEALBA, M., DE LUIS, M., Hydroclimatic variability in Santiago (Chile) since the 16th century. **International Journal of Climatology**, v.41 (1), p. 2015–2030, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.6828>

SPINONI, J., VOGT, J.V., NAUMANN, G., BARBOSA, P., DOSIO, A. Will drought events become more frequent and severe in Europe? **International Journal of Climatology**. v. 38, p. 1718–1736, 2018. <https://doi.org/10.1002/joc.529>.

SPINONI, J., BARBOSA, P., BUCCHIGNANI, E., CASSANO, J., CAVAZOS, T., CESCATTI, A., CHRISTENSEN, J.H., CHRISTENSEN, O.B., COPPOLA, E., EVANS, J., FORZIERI, G., GEYER, B., GIORGI, F., JACOB, D., KATZFEY, J., KOENIGK, T., LAPRISE, R., LENNARD, C.J., KURNAZ, M.L., LI, D., LLOPART, M., MCCORMIK, N., NAUMANN, G., NIKULIN, G., OXTURK, T., PANITZ, H.J., DA ROCHA, R.P., SOLMAN, S.A., SYKTUS, J., TANGANG, F., TEICHMANN, C., VAUTARD, R., VOGT, J.V., WINGER, K., ZITTIS, G., DOSIO, A. Global exposure of population and land-use to meteorological droughts under different warming levels and shared socioeconomic pathways: a coordinated regional climate downscaling experiment based study. **International Journal of Climatology** v. 41, p. 6825–6853, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7302>.

URRUTIA-JALABERT, R., GONZÁLEZ, M. E., GONZÁLEZ-REYES, A., LARA, A., GARREAUD, R. Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. **Ecosphere**. V. 9(4), e02171, 2018 <https://doi.org/10.1002/ecs2.2171>.

U.S. Geological Survey. *Landsat—Earth observation satellites* (ver. 1.4, August 2022): U.S. Geological Survey Fact Sheet 2015–3081, 4 p., 2015. <https://doi.org/10.3133/fs20153081>

U.S. Geological Survey. **Landsat 9 Overview Data Users Handbook**. NASA Earth Science Division, 2022. Disponível em: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-2082_L9-Data-Users-Handbook_v1.pdf

VERA, C. AND DÍAZ, L. Anthropogenic influence on summer precipitation trends over South America in CMIP5 models. **International Journal of Climatology**, v. 35(10), p. 3172–3177, 2015. <https://doi.org/10.1002/joc.4153>

VALDIVIELSO S, VÁZQUEZ-SUÑÉ E, HERRERA C, CUSTODIO E. Characterization of precipitation and recharge in the peripheral aquifer of the Salar de Atacama. **Science of The Total Environment**. V. 806(1), 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150271>

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. State of the Global Climate 2023. **WMO. No. 1347**, Geneva. 2024. Disponível em: <https://library.wmo.int/idurl/4/56247>

WULDER, M. A., et al. The Role of *Landsat* Satellite Data in the Assessment of Forest Change. **Remote Sensing of Environment**, 122, 64-73, 2012.

ZHOU, J., & LAU, K. Does a Monsoon Climate Exist over South America? **Journal of Climate**, v. 11(5), p. 1020-1040, 1998. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DAMCEO>2.0.CO;2)

Recebido em: 24/10/2024

Aceito para publicação em: 07/05/2025