

REVISTA DE LA ASOCIACIÓN GEOLÓGICA ARGENTINA

www.geologica.org.ar

Caracterización geomorfológica y respuesta hidrológica de los sistemas lacustres Pululos y Chaupijara (Puna norte, Argentina)

Carla D. SANTAMANS^{1,2,3}, Paula A. VIGNONI^{4,5}, Liliana C. LUPO^{1,6}, Achim BRAUER^{4,5} y Francisco E. CÓRDOBA^{1,2,3}

¹Instituto de Ecorregiones Andinas, INECOA-CONICET-UNJu ²Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy

³Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy

⁴Institute of Geosciences, University of Potsdam, Potsdam, Germany

⁵Section Climate Dynamics and Landscape Evolution, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

⁶Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Jujuy

csantamans@idgym.unju.edu.ar; pvignoni@gfz-potsdam.de; lupolc@fca.unju.edu.ar; brau@gfz-potsdam.de; francisco.cordoba@fi.unju.edu.ar

Editor: Ricardo A. Astini

Recibido: 09/03/2024 Aceptado: 19/12/2024

RESUMEN

Las lagunas Chaupijara y Pululos forman parte del sistema lacustre de Vilama (4500 m s.n.m.; Puna Norte de Jujuy), el cual se localiza en un área poco explorada y estudiada de los Andes Centrales, caracterizada por la ausencia de información científica en grandes áreas del conocimiento. Este trabajo presenta una caracterización y un análisis del contexto geomorfológico y las condiciones hidrológicas recientes (1975-2017) de estas lagunas, las cuales se encuentran bajo condiciones climáticas altamente variables y extremas. El objetivo es entender la dinámica ambiental y del paisaje asociada a la respuesta hidrológica reciente de estas lagunas, vinculada a la variabilidad regional de las precipitaciones. Para ello, se generó e integró información hidrográfica y geomorfológica, que permitió identificar y delimitar diversas geoformas y sub-ambientes, asociados a cada laguna. Asimismo, se analizó el funcionamiento actual de ambas lagunas considerando los periodos climáticos con sequías y precipitaciones más extremas de las últimas décadas. La variabilidad climática y sus efectos en el paisaje, se evaluaron mediante cambios que se reflejaron en las superficies lacustres y en los distintos sub-ambientes y geoformas durante los estadios extremos de lluvia/sequía. Los resultados obtenidos evidenciaron la gran variabilidad ambiental y del paisaje que muestran estas lagunas altoandinas frente a los cambios hidroclimáticos interanuales. Estos resultados son indispensables para comprender la dinámica geomorfológica y ambiental de estos sistemas lacustres. Además, sientan un precedente para el análisis respecto a cómo estos ecosistemas podrían resultar afectados por las condiciones ambientales futuras, en especial ante el contexto del cambio climático actual.

Palabras claves: Lagunas de Vilama; Geomorfología; Variabilidad hidroclimática; Andes Centrales

ABSTRACT

Geomorphological Characterization and Hydrological Response of the Pululos and Chaupijara Lake Systems (Northern Puna, Argentina).

The Chaupijara and Pululos lakes are part of the Vilama lake system (4500 m a.s.l.; Northern Puna of Jujuy), which is located in a scarcely explored and studied area of the Central Andes, characterized by the absence of scientific information in large areas of knowledge. This paper presents a characterization and analysis of the geomorphological context and the recent hydrological conditions (1975-2017) of these lakes, which are located under highly variable and extreme climatic conditions. The aim is to understand the environmental and landscape dynamics associated with the recent hydrological response of these lakes to regional rainfall variability. To this end, hydrographic and geomorphological information was generated and integrated to identify and delimit the different

landforms and sub-environments associated with each lake. Likewise, the current functioning of both lakes was analyzed considering the climatic periods with the most extreme droughts and precipitations of the last decades. Climate variability and its effects on the landscape were evaluated through changes reflected in the lake surfaces and in the different sub-environments and landforms during extreme precipitation/drought periods. The obtained results evidenced the significant environmental and landscape variability of these high-Andean lakes in response to interannual hydroclimatic changes. These outcomes are essential for understanding the geomorphological and environmental dynamics of these lake systems. Moreover, they provide a precedent for the analysis about how these ecosystems may be affected by future environmental conditions, especially in the context of current climate change.

Keywords: Lagunas de Vilama; Geomorphology; Hydroclimatic variability; Central Andes

INTRODUCCIÓN

En los Andes Centrales del noroeste argentino (NOA) se localiza la región de la Puna, la cual se caracteriza por una importante escasez de información científica en grandes áreas del conocimiento (i.e. Hidrología, Hidrogeología, Geomorfología, Climatología, entre otras), aun considerando las nuevas tecnologías de sensoramiento remoto que permiten obtener información valiosa de la superficie terrestre. En este sentido, la escasez de datos y estudios hidrológicos, hidrográficos y geomorfológicos conlleva a que resulte complicado comprender la variabilidad ambiental actual, así como su relación con la variabilidad climática en la región. Ante esta problemática, una herramienta efectiva para monitorear el ambiente y los balances hidrológicos en las cuencas cerradas de la Puna, es el estudio de las fluctuaciones de superficies de lagos y lagunas obtenidas a partir de sensores remotos (Ji et al. 2009, Bianchi et al. 2017). En los últimos 20 años se incrementó considerablemente el número de trabajos que propusieron nuevos y diferentes métodos para delinear las superficies de los cuerpos de agua por medio de imágenes satelitales (por ej. Xu 2006, Feyisa 2014, entre otros). Algunas de estas metodologías fueron empleadas para extraer superficies de agua de diferentes lagos del sur de Sudamérica, obteniéndose muy buenos resultados (por ej. Bianchi et al. 2017, Carilla et al. 2013; Guerra et al. 2019). Particularmente, en el plateau Altiplano-Puna, diferentes estudios demostraron la gran sensibilidad de los lagos y lagunas andinas a los cambios climáticos recientes, respondiendo con notables fluctuaciones en sus balances hidrológicos y, consecuentemente, en su extensión areal (por ej. Bao et al. 2015, Morales et al. 2015, Casagranda et al. 2019, Jara et al. 2019). Sin embargo, aún no se cuenta con estudios sobre cómo afectaría esta variabilidad a los diferentes sub-ambientes lacustres ni a las geoformas del mencionado plateau.

En esta región se localiza el sistema lacustre de Vilama, conformado por varias lagunas situadas por encima de los 4500 m s.n.m. en la caldera volcánica homónima. Estas lagunas se emplazan en una zona climática compleja donde interactúan diferentes modos de circulación atmosférica, y cuya variabilidad hidroclimática se vincula fuertemente con el Sistema Monzónico Sudamericano (Garreaud et al. 2003, Garreaud 2009, Santamans et al. 2021). Además, la región se encuentra bajo la influencia de diversos forzantes climáticos regionales, principalmente El Niño Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Decadal del Pacífico, la Oscilación Multidecadal del Atlántico y el Modo Anular del Hemisferio Sur u Oscilación Antártica, los cuales condicionan la intensidad y frecuencia de eventos extremos de lluvias y sequías (Canedo-Rosso et al. 2019, Santamans et al. 2021). Comprender el funcionamiento de estos sistemas lacustres y su respuesta ante la variabilidad hidroclimática resulta esencial ante el contexto del cambio global en curso. Mas aún, si se consideran los escenarios desfavorables que distintos estudios han inferido y propuesto para esta zona (i.e. sequías extremas para las próximas décadas; Neukom et al. 2015, Morales et al. 2020, 2023, IPCC 2023). Estos humedales altoandinos constituyen una importante reserva de agua para la región, y son el sustento principal de la flora y fauna, particularmente por la presencia de especies amenazadas y en peligro de extinción (Di Giacomo et al. 2007, Izquierdo et al. 2016, 2018). Por ello, resulta sumamente necesario que se generen estudios e información de base que permitan generar acciones puntuales para el cuidado y la mitigación de los impactos negativos que pudieran suceder en el futuro.

El presente trabajo se focaliza en la caracterización geomorfológica y el análisis de la variabilidad hidrológica reciente que experimentaron dos lagunas andinas que forman parte del sistema lacustre de Vilama: Chaupijara y Pululos (Fig. 1), teniendo en cuenta las condiciones climáticas actuales y extremas que se presentan en la zona. El objetivo del estudio es generar información de base para esta región del NOA que permita entender la dinámica hidrológica superficial reciente de ambas lagunas. Para ello, se integra la información hidrográfica y geomorfológica generada para ambos cuerpos de agua, lo cual abarca la identificación y diferenciación de diversas geoformas y unidades geomorfológicas, en los sectores más próximos a las lagunas, junto con la de distintos sub-ambientes intra-lacustres.

MARCO GENERAL

Las lagunas Pululos y Chaupijara forman parte del sistema lacustre de Vilama (22°37' S - 66°47' O), el cual se localiza en el departamento Rinconada, en el límite O de la provincia de Jujuy, muy cerca de la triple frontera entre Argentina, Chile y Bolivia (Fig. 1). El sistema se encuentra por encima de los 4500 m s.n.m. en la planicie altoandina de los Andes Centrales conformada por el Altiplano y la Puna, mejor conocida como plateau Altiplano-Puna, o también llamado plateau Andino (~15° S a 26° S; Hong et al. 2018). Este sector del NOA es también conocido como Puna Norte (Troll 1959), el cual abarca, aproximadamente desde los 22° S hasta el límite S de las Salinas Grandes. Particularmente, las lagunas Chaupijara (22° 32' S; 66° 45' O) y Pululos (22° 33' S; 66° 47' O), se localizan al N-NO del sistema lacustre (Fig. 1).

Marco Litológico y Geológico

El plateau Altiplano-Puna se sitúa en un paisaje volcánico complejo caracterizado por una intensa actividad volcánica, asociada al levantamiento de los Andes durante el Cenozoico tardío (Allmendinger y Gubbels 1996, Coira et al. 1996). Esta región de los Andes Centrales se compone mayormente de centros monogenéticos, estratovolcanes y los productos eruptivos de calderas, cuyas edades oscilan entre Eoceno-Oligoceno y Pleistoceno (Soler et al. 2007). Dentro de esta zona volcánica, se generaron grandes erupciones explosivas que originaron extensos campos de ignimbritas de composición predominantemente dacítica (Coira et al. 1996, Soler et



Figura 1. Ubicación del área de estudio. Arriba se observa el sistema lacustre de Vilama en una imagen ASTER G-DEM, que expone la elevada altitud a la que se encuentran las lagunas. Además, se visualiza la delimitación de la cuenca hidrográfica de la laguna Pululos (violeta) y la subcuenca de Chaupijara (verde). Abajo se aprecian fotos panorámicas de Chaupijara (arriba) y Pululos (abajo).



Figura 2. Marco litológico y geológico en las lagunas Pululos y Chaupijara. Se destaca en la figura el extremo oriental de la caldera Vilama (línea roja). Además, se observa la cuenca hidrográfica de la laguna Pululos, la subcuenca de Chaupijara y la red de drenaje para enmarcar ambas lagunas en las litologías y estructuras de la región. Mapa realizado en base a los trabajos de: Soler et al. (2007), Fracchia (2009) y Fracchia et al. (2010).

al. 2005, 2007). Entre los 21°- 24° S se concentra un gran volumen de ignimbritas neógenas que cubren una superficie de ~ 70.000 km², conocido como Complejo Volcánico Altiplano-Puna, cuyo origen sería resultado del colapso de diversas calderas de grandes dimensiones (De Silva 1989). Entre dichas calderas se destaca la caldera Vilama cuyos depósitos asociados afloran en gran medida en el sistema lacustre homónimo. Esta caldera posee forma alargada en sentido NO-SE y unos 35-40 km de largo por 15-18 km de ancho (Soler 2005, Soler et al. 2007). En la figura 2 se observan las litologías aflorantes en el área de la cuenca hidrográfica de Pululos y la subcuenca Chaupijara, considerando los trabajos de Coira et al. (1996, 2004), Fracchia (2009), Fracchia et al. (2010) y Soler et al. (2005, 2007). La cuenca alta de la laguna Pululos está mayormente conformada por la ignimbrita Vilama, unidad que incluye a los depósitos asociados al colapso de la caldera homónima, con una edad de 8,4-8,5 Ma (Soler et al. 2007). El borde estructural de la caldera se infiere mediante los domos y estratovolcanes que la rodean, los cuales se habrían establecido en la zona de debilidad generada por el colapso de la misma. Entre ellos se tienen: los domos Khastor y Vitichi, los estratovolcanes Khastor, Alcoak, Salle, y Loromayu o Bayo (Soler et al. 2005, Fracchia 2009, Fracchia et al. 2010). La ignimbrita Vilama se compone de flujos ignimbríticos dacíticos, con ausencia de niveles de caída, moderado contenido de pómez, escasez de líticos y alta proporción de cristales (Coira et al. 2004). Por otro lado, en la cuenca alta oriental de Pululos es posible reconocer una unidad de ignimbritas y lavas post-caldera de edad miocena superior-pliocena, de composición dacítica y andesítica, resultante de una actividad volcánica postcolapso vinculada a diversos domos y estratovolcanes (Soler et al. 2007). En la subcuenca baja de la laguna Chaupijara, se presenta la ignimbrita Salle (edad 8,4 Ma) resultante de un volcanismo explosivo dentro del sequndo ciclo evolutivo de la caldera Vilama, y compuesta de flujos piroclásticos andesíticos (Coira et al. 2004). Por otro

lado, en algunos sectores de la cuenca de Pululos es posible encontrar ignimbritas vinculadas a una posible resurgencia de la caldera, ocurrida ~1 Ma después, conformadas por coladas lávicas dacítico–andesíticas provenientes de distintos centros dómicos (Soler 2007). Finalmente, en el área de estudio afloran sedimentos modernos junto con depósitos aluviales-coluviales del Plioceno-Pleistoceno, depósitos lacustres del Pleistoceno-Holoceno y depósitos aluviales y coluviales del Holoceno y actuales, con granulometrías que oscilan entre gravas y arcillas (Coira 2004).

Marco Hidrológico y Geográfico

La actividad volcánica neógena en la región de Vilama generó un relieve irregular y suavizado, con múltiples charcas y lagunas desarrolladas en cuencas cerradas de variadas dimensiones. Las lagunas del sistema lacustre Vilama son someras con profundidades que oscilan entre valores menores a 0.5 metros (por ej. Vilama, Palar; Fig. 1) y las que superan los 4 metros (por ej. Chaupijara, Pululos y Colpayoc), mientras que las restantes lagunas (i.e. Isla Grande, Isla Chica, Catal, Arenal y Laguna Larga; Fig. 1) suelen tener profundidades entre 1 y 2 metros (Caziani y Derlindati 1999, Caziani et al. 2001). Desde un punto de vista hidroquímico, estas lagunas se caracterizan por ser oligosalinas (por ej. Chaupijara, Pululos, Laguna Larga, Isla Grande, Isla Chica; Santamans 2022), polisalina, mesosalina, eusalina (por ej. Catal, Arenal, Palar, respectivamente; Caziani y Derlindati 1999, 2000, Maidana et al. 2009) e hipersalina (laguna Vilama; Santamans 2022).

Desde un punto de vista ecológico, el área de trabajo se encuentra en la región denominada Puna-Seca (Cabrera 1976, Morales et al. 2015), con una cobertura de vegetación menor al 20%. La misma comprende pastizales de Festuca spp., pequeñas especies arbustivas como Parastrephia, Adesmia, Acantholipia, plantas como Azorella compacta, Pycnophyllum, y la única especie arbórea de la región: Polylepis tarapacana (Cabrera 1976, Carilla et al. 2013, Morales et al. 2015). Asimismo, en el paisaje se destacan los humedales o bofedales, conocidos localmente como vegas, dominados por la presencia de plantas en cojín como Oxychloe andina (Juncaceae; Caziani y Derlindati 1999, 2000) y Poaceae del género Deveuxia (Carilla et al. 2023). Por otro lado, cabe destacar que la zona tiene un alto valor de conservación de fauna silvestre para especies de vertebrados como los flamencos andinos (Phoenicoparrus jamesi, P. andinus), ñandúes andinos o suris (Pterocnemia pennata), vicuñas (Vicugna vicugna) y especies de gato montés altoandino como Leopardus colocolo, L. jacobita (Caziani y Derlindati 2000, Carilla et al. 2013). Es importante señalar que el sistema lacustre de Vilama es un área protegida, y a partir del año 2000 fue designado sitio RAMSAR y pertenece a la Reserva Provincial Altoandina Chinchilla, siendo una de las pocas áreas que protegen un ambiente propicio para la chinchilla (*Chinchilla chinchilla*), especie catalogada en peligro de extinción (Cirignoli 2019).

Marco Climático

El clima en la región de estudio es extremo, con elevada radiación solar, alta amplitud térmica diaria (superior a 18 °C), fuertes vientos (con ráfagas superiores a 100 km/h), intensa evaporación y un marcado déficit de precipitación (Buitrago y Larrán 2002, Morales et al. 2015, Santamans et al. 2021). El área se ubica entre los contrastes de precipitación de las vertientes E y O de la cordillera de los Andes, con valores medios anuales de 100-300 mm al E, y menores a 100 mm al O, según la latitud y altitud (Garreaud et al. 2010, Jordan et al. 2019, Santamans et al. 2021). El régimen local de precipitaciones se debe a que la región se encuentra en una compleja zona de transición climática entre la circulación atmosférica tropical y extratropical, resultando en un gradiente de precipitaciones decreciente hacia el O y hacia el S (Garreaud et al. 2003, Garreaud 2009). Las precipitaciones son de tipo convectivo y se concentran mayormente durante el verano austral (Dic-Ene-Feb), con más del 80% del total de precipitaciones anuales entre noviembre y marzo (Vuille y Keimig 2004). La variabilidad de las precipitaciones en el verano austral se produce por la compleja interacción entre la orografía local y diferentes modos de circulación atmosférica en la tropósfera superior (Garreaud y Aceituno 2001, Garreaud et al. 2003, Vuille y Keimig 2004, Garreaud 2009). Durante esta estación, la Baja del Chaco, un centro de baja presión localizado a los ~25° S, contribuye al transporte de humedad desde el Atlántico tropical hacia el continente (Seiler et al., 2013). Además, la humedad proveniente de la cuenca amazónica es conducida hacia las regiones subtropicales por una corriente en chorro de bajo nivel situado a lo largo de las laderas orientales de los Andes (Marengo et al. 2004, Seiler et al. 2013). Al mismo tiempo, la Alta Boliviana, un sistema anticiclónico del nivel superior de la atmósfera, aumenta la advección de humedad desde la Amazonia hacia los Andes subtropicales y tropicales (Vuille et al. 2012). De esta manera, todos estos elementos climáticos conforman el Sistema Monzónico Sudamericano (conocido como SAMS por sus siglas en inglés), responsable de las precipitaciones convectivas del verano austral sobre el plateau Altiplano-Puna (Garreaud et al. 2009, Vuille et al. 2012, Seiler et al. 2013). A finales de marzo, la fase húmeda del SAMS comienza a decaer y la convección profunda asociada a la zona de convergencia intertropical migra hacia Colombia y América Central, lo que provoca una fuerte disminución de las precipitaciones durante el invierno austral en el

plateau. Por otro lado, el desplazamiento hacia el N de la Alta Boliviana favorece el alcance septentrional de los Vientos del Oeste, que regulan el transporte e ingreso de humedad desde las tierras bajas orientales, reduciendo la humedad atmosférica sobre el plateau (Garreaud et al. 2003, Vuille et al. 2012).

Asimismo, las precipitaciones vinculadas a la dinámica del SAMS están significativamente influenciadas por los modos de interacción océano-atmósfera sobre los océanos Pacífico y Atlántico, a través de frecuencias interanuales, decadales y multidecadales (Vuille et al. 2012, Guerra et al. 2019, Santamnas et al. 2021). La región Altiplano-Puna experimenta anomalías de precipitación de alta frecuencia, vinculadas al fenómeno ENOS con fases positivas (El Niño) relacionadas con condiciones más secas, y fases negativas (La Niña) más húmedas para esta región en particular (Garreaud 2009, Carré et al., 2012, Morales et al. 2015, Bustamante et al. 2016, Santamans et al. 2021). Los forzantes de baja frecuencia como la oscilación decadal del Pacífico y la oscilación multidecadal del Atlántico se vinculan a cambios observados en los regímenes de precipitación decadales a multidecadales en parte de América del Sur, lo que también se ve reflejado en la región del plateau Altiplano-Puna (Morales et al. 2015, Canedo-Rosso et al. 2019, Santamans et al. 2021).

METODOLOGÍA

Caracterización hidrográfica

La descripción hidrográfica de las lagunas Pululos y Chaupijara se realizó mediante técnicas de fotointerpretación de imágenes satelitales Google Earth y Bing, y por medio de fotografías aéreas (correspondientes al Plan Cordillera Norte del año 1965). Éstas últimas, se escanearon y georreferenciaron al sistema geográfico con datum WGS84, para la zona 19 del Hemisferio Sur. Se identificaron los cursos fluviales y se delimitaron las principales subcuencas hidrográficas que aportan agua a la laguna Pululos. Toda esta información se generó y analizó con el programa QGis (v. 3.10.2; sujeto a Licencia Pública General GNU). Por otro lado, a lo largo de las diferentes campañas realizadas entre los años 2016, 2017, 2019 y 2021, se recorrieron, describieron y documentaron fotográficamente los principales afluentes que aportan agua a ambas lagunas. Además, se chequeó la información generada de manera remota mediante las fotografías aéreas e imágenes satelitales.

Para la construcción de los mapas batimétricos de las lagunas, se establecieron puntos para la medición de profundidad del pelo de agua que, en el caso particular de Pululos, debido a sus mayores dimensiones se priorizó la caracterización de los ejes principales (Fig. 3). La medición de profundidades se llevó a cabo en distintas campañas: durante 2016-2017 (Chaupijara) y 2019 (Pululos). Para ello, se empleó una soga calibrada con un metro y graduada cada 1 cm, con un peso en su extremo, la cual permitió realizar dichas mediciones durante estadios eutróficos. En estos estadios resultó imposible usar una sonda láser debido a que la gran cantidad de macrófitas impedía que el láser llegara al lecho lacustre, arrojando valores erróneos. Dado que en Chaupijara se realizaron las mediciones en años diferentes, se aplicó un factor de corrección de 0,3 m considerando el cambio de nivel registrado entre 2016 y 2017. Además, se registraron los perímetros de cada laguna marcando puntos GPS durante recorridos realizados a pie. Todos los puntos relevados se interpolaron mediante el método Kriging (Matheron 1963) usando QGIS, con



Figura 3. Puntos de medición de las profundidades de pelo de agua de las lagunas Chaupijara (a) y Pululos (b). La imagen de base es una fotografía aérea del año 1965. Obsérvese la diferencia en la extensión del perímetro de las lagunas en 1965 y al momento de las campañas (2016-2017 para Chaupijara, y 2019 para Pululos), como consecuencia de la menor extensión superficial de ambas lagunas en 1965.

el cual se obtuvieron los mapas batimétricos y el modelado tridimensional de las lagunas.

Delimitación de sub-ambientes, geoformas y unidades geomorfológicas

La delimitación y caracterización de los distintos sub-ambientes intra-lacustres se realizó siguiendo la propuesta de Fregenal Martínez y Meléndez (2010), quienes identificaron las siguientes zonas y ambientes de sedimentación: supralitoral, eulitoral, intralitoral, sublitoral, talud y de cuenca o pelágica. Para ello, se usaron los mapas batimétricos de las lagunas y las observaciones en el terreno.

Por otro lado, se identificaron y delimitaron distintas geoformas y unidades geomorfológicas en las zonas peri-lacustres, las cuales se clasificaron en base a Hardie et al. (1978) y Smoot y Lowenstein (1991). La clasificación de Hardie et al. (1978) incluye las siguientes geoformas y unidades geomorfológicas: abanico aluvial, llanura arenosa, planicie fangosa seca, lago salino efímero formado por un salar interior, lago salino perenne, campo de dunas (depósitos eólicos), llanura de inundación de arroyos perennes, llanura de inundación de arroyos efímeros, manantiales, montículos y láminas de travertino y toba, rasgos costeros (deltas, crestas de playa, escollos, etc.). Smoot y Lowenstein (1991) actualizaron y modificaron la clasificación previa, considerando las siguientes unidades geomorfológicas en ambientes de lagos salinos: lago salino perenne, balsa salina, planicie fangosa salina, planicie fangosa seca, costa, abanico aluvial, planicie de arena, llanura de inundación de arroyo efímero, llanura de inundación de arroyo perenne, campo de dunas eólicas y lámina de arena, manantial, suelo salino.

En esta etapa, se integraron las observaciones realizadas en el terreno y las interpretaciones remotas de las diferentes unidades geomorfológicas, éstas últimas realizadas con imágenes satelitales Bing de alta resolución en QGis (código-fuente de las imágenes Bing: http://ecn.t3.tiles.virtualearth.net/tiles/a{q}.jpeg?g=0&dir=dir_n).

Análisis del funcionamiento y variabilidad actual de los sistemas lacustres

La dinámica hidrológica actual de las lagunas y su respuesta a eventos extremos de lluvias y sequías se realizó por medio del análisis geomorfológico previamente mencionado, en conjunto con los resultados obtenidos por Santamans et al. (2021). En dicha investigación se estudió la variabilidad de las superficies de las lagunas del sistema lacustre de Vilama, en respuesta a las precipitaciones y forzantes climáticos regionales, lo que permitió la caracterización hidroclimática de esta región. Asimismo, Santamans et al. (2021) comprobaron que tanto las precipitaciones del E como del O de Vilama, se relacionan estrechamente con la variabilidad de las superficies lacustres del sistema, y crearon los índices de las precipitaciones del E (EPI) y del O (WPI). En particular, en el presente trabajo se puso foco en la variabilidad de las superficies lacustres y las precipitaciones para el periodo 1975-2017, durante los periodos húmedos/secos más extremos registrados en cada año hidrológico (Jun-Jul). Esto permitió caracterizar y evaluar los movimientos de retracción (fase regresiva) y expansión (fase transgresiva) de ambos cuerpos lacustres.

RESULTADOS

Hidrografía de las lagunas Pululos y Chaupijara

Las características hidrográficas de las lagunas Pululos y Chaupijara se observan en la figura 4. En esta figura se muestran las subcuencas hidrográficas y la red de drenaje de tipo centrípeto-asimétrico que aportan agua a cada laguna. En particular, la cuenca de aporte de Pululos posee una superficie de 198,39 km² (Tabla 1) y en ella se diferencian distintas subcuencas de las cuales, debido a su tamaño, se destacan la subcuenca E (en color verde; Fig. 4), con una superficie de 97,84 km² (representando el 49,32 % del área total de la cuenca), y la subcuenca O (en color anaranjado; Fig. 4), con una superficie de 65,65 km² (representando el 33,09 % del área total). Los restantes afluentes que aportan agua a esta laguna, ubicados en la zona central, forman parte de dos conjuntos de subcuencas menores: el conjunto de subcuencas N (en color rosado claro; Fig. 4) y el conjunto de subcuencas S (en color rosado oscuro; Fig. 4). Ambos conjuntos de subcuencas poseen un número de orden bajo, y sus cursos de agua tienen poco recorrido en el terreno, ubicándose muy próximos a la laguna, abarcando una superficie de aporte de ~13,15 km² y 7,68 km², respectivamente (Tabla 1). Asimismo,

 Tabla 1. Superficies y perímetros de las subcuencas de Pululos. Se indican los porcentajes que representan las superficies de las subcuencas con respecto a la cuenca total de Pululos.

Subcuenca	Perímetro (km)	Superficie (km²)	Porcentaje de superficie de la cuenca (%)
Este	84,50	97,84	49,32
Oeste	46,83	65,65	33,09
Conjunto Norte	24,67	13,15	6,63
Conjunto Sur	14,62	7,68	3,87
Chaupijara	21,61	14,07	7,09
TOTAL (Cuenca- Pululos)	94,76	198,39	100



Figura 4. Subcuencas hidrográficas de Pululos. Se destacan las subcuencas Chaupijara, Este y Oeste, así como los conjuntos de las subcuencas Norte y Sur. Además, se aprecia la red de drenaje con los principales afluentes que drenan hacia las lagunas en color azul, los ríos Toloma (subcuenca oeste) en rojo, Salle (subcuenca este) en anaranjado, y en color celeste se observan los afluentes provenientes de la vega Salle. En amarillo claro se observan las curvas de nivel determinadas a partir de una imagen ASTER GDEM, con una equidistancia de 50 metros.

la subcuenca de la laguna Chaupijara presenta una superficie de 14.07 km², y representa un ~7 % de la superficie total. En la Tabla 1, se resumen los perímetros, las superficies de cada subcuenca de Pululos, y el porcentaje que abarca cada una de ellas con respecto a la superficie total de la cuenca.

Estas dos lagunas poseen características hidrológicas particulares que se describen a continuación. La subcuenca de la laguna Chaupijara presentaría un comportamiento mixto: sin trasvase de subcuenca durante niveles bajos (con dicha laguna como depocentro), y con trasvase hacia la subcuenca E durante niveles altos de la laguna, aportando agua hacia un arroyo que fluye en dirección a la laguna Pululos. Sin embargo, actualmente no se presenta esta situación y dicho arroyo se encuentra seco. Además, ambas lagunas comparten una misma área fuente que aporta agua de forma permanente, mediante un único afluente que nace en el volcán Salle y da lugar a una vega de gran tamaño y desarrollo,

denominada vega Salle (Fig.4). Este curso principal de agua se divide en dos cursos fluviales secundarios mediante un drenaje distributivo, asociado a un cambio en la pendiente del terreno. Uno de estos cursos aporta agua hacia Chaupijara y se lo identificó como tramo-Chaupijara (Fig. 5). El segundo curso fluvial aporta agua a Pululos y se lo identificó como tramo-Pululos (Fig. 5). Ambos afluentes secundarios, de régimen permanente, inician su recorrido aguas abajo en un ambiente típico de humedal de altura o vega, dominado por la presencia de cojines orgánicos (conocidas en inglés como cushion peat). Aguas abajo, los cojines desaparecen y el ambiente evoluciona hacia un sistema fluvial típico con llanuras de inundación que alcanzan un mayor desarrollo en las zonas distales, próximas a las desembocaduras en los cuerpos lacustres. De esta manera, en el terreno se pudieron diferenciar tres sectores o sub-ambientes a lo largo de los dos tramos fluviales que se originan en la vega Salle (Fig. 5):



Figura 5. Vega Salle y sus tramos hacia Pululos (a, b y c) y Chaupijara (d, e y f). a) y c) tramos donde predominan las estructuras orgánicas tipo cojines. b) y d) Tramos de transición entre las estructuras orgánicas tipo cojín y el material fluvial clástico. e) y f) Tramos cercanos al delta de los afluentes, con predominio de material fluvial clástico, gravo-arenoso. g) Vista hacia el norte de la vega Salle, con el volcán homónimo de fondo, y de su división en los dos tramos mencionados (flechas anaranjadas). Hacia la izquierda y derecha, se observan las lagunas Pululos y Chaupijara, respectivamente. En el frente de la foto se aprecian los depósitos clásticos gris claro de un canal que colecta las aguas de la lomada de donde se tomó la fotografía.

 Sector de humedal o vega, donde predominan las estructuras de origen orgánico tipo cojines a lo ancho de ambos cauces fluviales. En el lecho se observa material clástico constituido principalmente por gravas y arenas gruesas, con una importante cantidad de materia orgánica en descomposición (Fig. 5.a y 5.d). Los cojines poseen un sistema de raíces muy denso y resistente, el cual coexiste con la presencia de clastos de variados tamaños, y que superan los 7 cm en su eje principal.

II) Sector de transición entre las estructuras tipo cojines y las llanuras fluviales distales. En estos sectores predomina la presencia de material clástico en los cauces y las estructuras en forma de cojines se sitúan únicamente hacia las márgenes de los cauces principales que desembocan en cada laguna (Fig. 5.b y 5.e);

III) Sector distal, de llanura de inundación típica, conformado por material clástico compuesto por gravas, arenas y limos, y ausencia de estructuras orgánicas en cojines (Fig. 5.c y 5.f). En cercanía de los cuerpos lacustres, los cursos fluviales desarrollan abanicos cuyos materiales distales adquieren forma prismática dentro de los cuerpos de agua conformando fan-deltas que ocupan la extensión total de las costas O de ambas lagunas (Fig. 6).

Por último, el tramo-Pululos de la vega Salle se une a un segundo cauce de mayor tamaño y caudal, aquí llamado río Salle, que concentra los aportes de agua provenientes de la subcuenca E (Fig. 4). El río Salle también tiene su origen en el cerro homónimo, en una vertiente localizada en su ladera E, siguiendo su recorrido en ese mismo sentido, aunque lue-go gira ~180° y continúa fluyendo hacia el O. Por su parte,

la subcuenca O de Pululos, se caracteriza por presentar un mayor aporte de agua a la laguna asociado a la dinámica del río Toloma (Fig. 4). Este río, de régimen permanente, constituye el colector principal de esta subcuenca, y sus depósitos generan un extenso abanico aluvial en su tramo distal, con el desarrollo de un importante fan-delta (Fig. 6.a).

Batimetría de las lagunas Chaupijara y Pululos

Las profundidades registradas para los años 2016 y 2019 oscilaron entre 3,0 y 3,5 metros para Chaupijara y entre 2,8 y 4,6 metros para Pululos, respectivamente. Los respectivos mapas batimétricos, el modelado de los relieves de fondo y los distintos sub-ambientes intra-lacustres se observan en las figuras 7 y 8.

El mapa batimétrico de Chaupijara (Fig. 7) revela una zona pelágica reducida y un relieve de fondo irregular, donde las profundidades aumentan gradualmente en sentido NO-SE, de forma tal que el depocentro se localiza muy próximo a la costa SE. Por otro lado, el fan-delta en la costa O, generado por el tramo-Chaupijara proveniente de la vega Salle, genera un relieve de fondo con bajas pendientes en el sector O-NO de la laguna, con un mayor desarrollo de las zonas supralitoral y litoral, a partir de donde la profundidad aumenta progresivamente hacia el depocentro. Desde la costa SE al



Figura 6. Vistas panorámicas de los abanicos aluviales y fan-deltas localizados en Pululos (a) y Chaupijara (b). Se observa el amplio desarrollo de ambos fan-deltas a lo largo de las respectivas costas oeste de las lagunas.

depocentro, se presenta un quiebre de pendiente abrupto, por lo que tanto la zona supralitoral como litoral están ausentes, con desarrollo de un talud con alta pendiente. En cuanto a la laguna Pululos, el mapa batimétrico y los perfiles del relieve de fondo A-A' (sentido O-E) y B-B' (sentido NO-SE) (Fig. 8) permitieron identificar y caracterizar el fondo lacustre de este sistema, el cual se presenta prácticamente plano con una zona pelágica de gran extensión. Además, se observaron zonas litorales y supralitorales más extendidas hacia las costas O y E (Fig. 8., perfil A-A'), asociadas a los fan-delta en las desembocaduras de los ríos Toloma y Salle (Figs. 6 y 10, a). Por el contrario, las zonas litorales y supralitorales se encuentran reducidas hacia las costas N y S, presentando taludes de pendientes más pronunciadas en estas últimas dos direcciones (Fig. 8, perfil B-B').

Los sub-ambientes identificados en Pululos y Chaupijara,

se describen a continuación:

Zona litoral: abarca las zonas eulitoral e intralitoral o supralitoral, y se caracteriza por la exposición subaérea del fondo y la presencia de vegetación enraizada. Es un sub-ambiente fótico y oxigenado, afectado por el oleaje y sus corrientes, en el cual ocurre el ingreso de sedimentos a las lagunas. Se identificó en ambas lagunas con una extensión variable en las costas donde se desarrollan los fan-delta. En los trabajos de campo se reconoció este sub-ambiente en la costa O-NO de Chaupijara, con una extensión cercana a los 100 metros, y menor a los 10 metros hacia las costas NE y S-SE. En el caso de Pululos, este sub-ambiente posee una extensión menor a 20 metros a lo largo de sus costas N y S-SE, y mayor a los 150 metros en las costas E y O.

Zona sublitoral: sector siempre inundado, fótico y oxigenado, con presencia de macrófitas, y periódicamente some-



Figura 7. Mapa batimétrico de la laguna Chaupijara y su modelado tridimensional (a), junto con el relieve del fondo y los principales sub-ambientes de la laguna (b), construidos a partir de las mediciones de profundidad del pelo de agua (en metros).

tida al oleaje. Únicamente identificado en Chaupijara, en los depósitos del fan-delta de la costa O (Fig. 6.b). En Pululos, a pesar de la gran extensión del fan-delta O (Fig. 6.a), este sub-ambiente no se identificó debido a que la zona litoral termina de manera abrupta en un talud de alta pendiente (lóbulo distal del fan-delta del río Toloma).

Talud: constituye el quiebre de pendiente entre las zonas litorales y/o sublitorales y la zona pelágica más profunda del lago. Este sub-ambiente se identificó en ambas lagunas, y está caracterizado por las altas pendientes observadas en los sectores O de las lagunas, aunque en Pululos también se presenta cercano a la costa E.

Zona pelágica, de cuenca o depocentro: corresponde a las zonas más profundas de las lagunas, con un relieve de fondo más plano, donde predominan los procesos de decantación y precipitación química endógena. En el caso de Chaupijara, este sub-ambiente se encuentra reducido (i.e. ~ 200 metros de largo, perfil A-A', Fig. 7) y desplazado hacia la costa SE, como consecuencia de los depósitos sedimentarios asociados al fan-delta de la costa O. Contrariamente, en Pululos este sub-ambiente tiene una gran extensión, mayor a 1200 metros (Fig. 8.b), ocupando gran parte del cuerpo lacustre. Por otro lado, la zona pelágica de Pululos se caracteriza por estar menos desarrollada y estrechada en sentido NO-SE (Fig. 8.b) como consecuencia de los depósitos de los fan-delta localizados en los respectivos extremos O y E de la laguna. Por otra parte, dado que ambas lagunas son someras, los constantes vientos de la región hacen que esta zona no presente estratificación térmica o diferencias de densidad en la columna de agua (Santamans 2022), lo cual suele ocurrir en lagos profundos (i.e. con más de 10 metros de profundidad; Arche 2010).

Variabilidad de las superficies lacustres y su relación con las precipitaciones regionales

El cálculo de las superficies lacustres por medio de imágenes satelitales mostró una gran variabilidad interanual con una fuerte tendencia negativa de reducción de las superficies de ambas lagunas para el periodo 1975-2017 (Santamans et al. 2021), la cual se observa en la figura 9.a. Dentro de esta elevada variabilidad interanual, se destaca que las superficies lacustres más extensas se presentaron antes de 1990, registrándose las máximas superficies en los periodos hidrológicos de 1978-1979 para Chaupijara y en 1984-1986 para Pululos. Por el contrario, durante los periodos 1996-1998 y 2009-2010 ambas lagunas experimentaron una disminución severa en sus superficies (Santamans et al. 2021), siendo este último episodio aquel en el cual se alcanzaron las superficies mínimas del periodo estudiado (Fig. 9.a).



La figura 9.b muestra los índices de las precipitaciones del

Figura 8. Mapa batimétrico de la laguna Pululos, modelado 3D (a) y relieve de fondo según los perfiles A-A' (sentido oeste-este) y B-B' (sentido noroeste-sureste), donde también se observa la localización de los principales sub-ambientes de la laguna. La profundidad del pelo de agua se expresa en metros.



Figura 9. a) Variabilidad de las superficies lacustres de Pululos y Chaupijara. La línea roja refleja la fuerte tendencia negativa en dichas superficies. b) Índices de precipitaciones para el este (EPI) y oeste (WPI) del área de estudio. En ambas figuras se indican con flechas celestes (anaranjadas) los estadios con las máximas (mínimas) superficies para el periodo 1975-2017. Tanto los valores de superficies lacustres como los de los índices de precipitación se encuentran estandarizados. Adaptado de Santamans et al. (2021).

E (EPI) y del O (WPI), para el periodo 1975-2017 (Santamans et al. 2021). Los registros mostraron eventos con abundantes precipitaciones en 1983 para el índice del E (i.e. > 100 mm con respecto al promedio anual), y en los años 1975-1976, 1983-1984, 1986, 1996, 1998-2000, 2010 y 2016 para el índice del O (Fig. 9.b), periodos que explican las máximas superficies lacustres registradas (Santamans et al., 2021). Por el contrario, los eventos de sequías más extremas se registraron en 1976, 1982, 1991-1993, 1995, 1997, 1999, 2001-2007, 2009-2011, 2013 y 2016 para el índice de precipitaciones del E, y en 1981, 1988-1989, 1991, 1999, 2006 y 2008-2009 para el O (Fig. 9.b), periodos que explican las mínimas superficies lacustres observadas.

Geoformas y unidades geomorfológicas de los sistemas lacustres

A continuación, se describen las diferentes geoformas y unidades geomorfológicas identificadas en las proximidades de las lagunas Chaupijara y Pululos (Figs. 10.a y 11.a, respectivamente):

Áreas montañosas con depósitos ignimbríticos: abarcan sectores montañosos, con pendientes mayores a 12° (Santamans 2022), que rodean las lagunas y ejercen un claro límite físico o control geomorfológico para su expansión. Usualmente, en estas áreas fluyen cauces fluviales temporales, que en ciertas ocasiones presentan el desarrollo de vegas. Por otro lado, estas zonas elevadas se encuentran principalmente cubiertas por depósitos piroclásticos, asociados a distintos pulsos eruptivos, y por depósitos volcaniclásticos secundarios.

Afloramientos rocosos: a diferencia de los depósitos ignimbríticos, los afloramientos rocosos se conforman de rocas volcánicas correspondientes a un mismo pulso eruptivo, y de una composición particular, dependiendo de su origen y/o edad. Se destacan afloramientos de las ignimbritas Vilama y Salle (Figs. 10.a y 11.a). Si bien estos afloramientos forman parte de las áreas montañosas, se los diferenció para denotar su importancia en el control del avance de las aguas en estadios de gran humedad y expansión de las superficies lacustres.

Piedemonte: se trata de laderas con medias y altas pendientes (entre 12° y ~ 20°), colindantes a las lagunas, caracterizadas por la acumulación de cantos rodados y clastos angulosos consecuencia de la acción fluvial y gravitatoria. En la cuenca de Pululos esta geoforma constituye la zona de transición entre las áreas montañosas y las playas.

Campos de arena con dunas: en esta unidad geomorfológica se incluyen a las acumulaciones de arenas eólicas, muy bien seleccionadas, que cubren de manera uniforme el relieve. Se caracteriza por la presencia de dunas, cuyas alturas pueden superar los 3-4 metros. Además, esta unidad geomorfológica incluye dunas rampantes que ocupan ciertas laderas con pendientes mayores a 12° de inclinación. Esta unidad se encuentra ampliamente desarrollada en la costa S-SO de Pululos.

Llanura de arena: extensos depósitos de arena muy bien seleccionada y de origen eólico, que se diferencian de la unidad geomorfológica anterior porque presenta pendientes muy bajas a nulas (menores a 5°). En esta unidad geomorfológica sólo se identificaron pequeñas dunas conocidas como *nebkhas*, formadas por acumulaciones de arena atrapada por la vegetación.



Figura 10. a) Geoformas y unidades geomorfológicas identificadas en la laguna Chaupijara. En la imagen se destaca la gran envergadura del fan-delta (en color violeta) desarrollado en la costa NO. b) Variabilidad actual de la superficie de Chaupijara a lo largo de periodos de extrema humedad y sequía de las últimas décadas. En la imagen se puede observar la mayor superficie registrada en Chaupijara, correspondiente al año 1979 (color azul oscuro). Además, se detalla la disminución paulatina del tamaño de la superficie lacustre desde 2005 hasta noviembre de 2010, el momento más seco registrado el periodo 1975-2017.

Playa antigua: presente en ambas lagunas, se trata de rasgos geomorfológicos asociados a antiguos niveles lacustres elevados (i.e. paleolíneas de costa), los cuales se expre-

san como escarpes de variada altitud. En el caso de Pululos, las playas antiguas poseen una altura de 2.5 metros por encima del nivel actual, superando los cuatro metros de altura



Figura 11. a) Geoformas y unidades geomorfológicas identificadas en la laguna Pululos. Se destaca la gran envergadura de los fan-delta (en color violeta) desarrollados en las costas O-NO y E-NE. También se destaca la presencia de las playas antiguas (paleolíneas de costa), fundamentalmente en las costas N y E. b) Variabilidad actual de la superficie de Pululos a lo largo de periodos de extrema humedad y sequía en las últimas décadas. Se puede observar la mayor superficie registrada en el año 1986 (en color azul oscuro). Además, se detalla la disminución paulatina del tamaño de la superficie lacustre desde 2005 hasta noviembre de 2010, el momento más seco registrado en el periodo 1975-2017.

en algunos sectores de la costa S-SO (Fig. 12). En el caso de Chaupijara, las playas antiguas poseen un desnivel y escar-

pes menos marcados, y son frecuentemente alcanzadas por las oscilaciones lacustres interanuales.

Playas: se encuentran rodeando los cuerpos de agua, y su extensión se ve afectada por los cambios en las superficies lacustres a escala interanual. Es decir, que la extensión de esta unidad geomorfológica es variable según los distintos estadios de sequía o humedad que afecta al cuerpo de agua. Esta unidad abarca: depósitos de deltas, playas, barras y planicies con lodos carbonáticos. En ambas lagunas, los depósitos de las playas se componen de materiales mayormente gravosos y arenosos, de orígenes deltaicos, eólicos y gravitacionales.

Abanicos y bajadas aluviales: se identificaron únicamente en la cuenca de Pululos, formados por cauces fluviales de régimen no-permanente (al menos en el periodo actual). En particular, la bajada aluvial se identificó en el piedemonte asociado a la costa N de Pululos. Se habría generado a partir de diversos cursos fluviales, cuyos depósitos en forma de abanicos se encuentran interdigitados.

Fan-Delta: se trata de abanicos aluviales cuyo sector distal se encuentra actualmente sumergido, adentrándose en el cuerpo lacustre (Fig. 6). Sus depósitos generan un relieve deltaico típico en la desembocadura del curso fluvial, generando una mayor extensión de los sub-ambientes litorales y sublitorales. En Chaupijara la distancia entre el ápice del abanico y el pelo de agua es cercana a 1 km y el área total desde el ápice hasta el sector distal del fan-delta de la costa O es de 0,32 km², mientras que el de la costa NE es de 0,01 km². Por su parte, en Pululos la distancia entre el ápice del abanico y el pelo de agua ronda los 2 km, y la superficie de esta geoforma en la costa O es de 3,09 km², mientras que la de la costa NE posee 0,51 km².



Figura 12. Playas antiguas de la laguna Pululos registradas en 2019, las cuales constituyen antiguos niveles lacustres (conocidos como paleolíneas de costa). (a) Vista panorámica de la paleolínea ubicada en la costa N-NE, donde se observa que la misma supera los 1,85 metros de altura considerando a la persona parada como escala de referencia. (b) Vista de la paleolínea de costa desde la parte baja, próxima al nivel de agua actual, donde la distancia entre ambos niveles supera los 30 metros. (costa NE). (c) Playa antigua localizada en la costa S, más cercana al nivel de agua actual de la laguna, con una mayor altitud que aquella localizada en las costas N-NE.

Respuesta hidrológica reciente de Chaupijara y Pululos durante estadios de sequías/lluvias extremas

Los mapas geomorfológicos junto con el análisis de la dinámica de las lagunas asociada a los cambios de precipitación (i.e. periodos con las mayores y menores superficies lacustres), permitieron evaluar y esquematizar la respuesta hidrológica superficial de estas lagunas y cómo podrían resultar afectadas las distintas geoformas, unidades geomorfológicas y sub-ambientes durante eventos climáticos extremos (Figs. 10b y 11b). La figura 10b revela que, durante las etapas con mayores precipitaciones regionales, la principal expansión de la laguna Chaupijara ocurre hacia la costa NO, como así también hacia las costas O-SO y NE. Dichos sectores son susceptibles a ser inundados a lo largo de periodos con balance hídricos positivos. En estos sectores se encuentran los depósitos distales de los abanicos aluviales, responsables de la formación de los fan-delta observados. Por otro lado, durante los estadios de extrema sequía, las aguas se concentran en las zonas pelágicas, hacia la costa SE de la laguna. Los relevamientos realizados en el terreno permitieron constatar que esta laguna se encuentra muy confinada y controlada por el relieve circundante, donde los afloramientos rocosos llegan hasta el inicio de la zona supralitoral, aún en momentos de sequía. En este sentido, se puede observar cómo a lo largo del periodo 2009-2010, el límite de la lámina de agua (línea de costa) se encuentra prácticamente colindante al afloramiento rocoso de la costa SE (Fig. 10b).

La figura 11b revela que la laguna Pululos presenta un movimiento de expansión/retracción en sentido O-ENE que, al igual que en el caso de Chaupijara, se debe a las bajas pendientes generadas por los depósitos de los fan-delta, en conjunto con la ausencia de un control topográfico. Por otra parte, el cuerpo principal de Pululos se conecta con dos lagunas temporales ubicadas en la costa N-NE y una cercana a la costa E, las cuales sólo presentan agua en épocas de



Figura 13. (a) Vista panorámica de la conexión entre Pululos y la laguna temporal ubicada sobre su costa N-NE, registrada en diciembre de 2019. (b) Depósitos de gravas acarreados por el canal que conecta la laguna temporal con el cuerpo principal de Pululos. (c) Acumulación de restos de vegetación en estado de descomposición, depositados por oleaje durante un periodo previo de mayor nivel lacustre.

lluvias abundantes que activan vegas y canales temporales (Fig. 13). Además de estos cuerpos de agua, se activa una cuarta laguna temporal ubicada en una planicie cercana, hacia el sector E-SE, que al colmatarse desborda agua y genera un canal que fluye hacia la laguna temporal próxima a la costa E. Durante la campaña realizada en diciembre de 2019, se pudo constatar la conexión entre la laguna temporal ubicada en la costa N-NE y la laguna principal, por medio de un canal que superaba los 40 cm de profundidad. Esta conexión se observa en la figura 13, donde además se aprecian los depósitos clásticos de fondo, y una gran acumulación de restos de vegetación acuática en descomposición, depositados en las costas luego de un descenso de nivel en las aguas. Respecto a los periodos de extrema seguía identificados en Pululos, (Fig. 11b), la laguna muestra que las aguas se retrajeron hacia el sector E del depocentro en noviembre de 2010, el momento más seco registrado en los 42 años analizados. Igualmente, a lo largo de periodos regresivos, esta laguna se redujo gradualmente en los extremos O y E, en mayor medida que en el sentido transversal (N-S). Las mediciones de profundidad realizadas en la zona pelágica permitieron constatar que Pululos no sólo manifiesta los cambios hidroclimáticos con drásticas variaciones en su superficie, sino que también lo hace en profundidad. Por ejemplo, durante un periodo de sequía que ocurrió en la Puna jujeña en 2016-2017, se registró una profundidad máxima de 2.8 metros (noviembre de 2017), mientras que en diciembre de 2019 la profundidad máxima fue de 4,6 metros.

Por otro lado, durante los periodos húmedos en la cuenca de Pululos se activan gran parte de los tributarios temporales, lo cual incrementa los procesos erosivos en la zona de cabecera, activa los abanicos en las zonas de bajada aluvial y conlleva a un incremento del aporte de material clástico hacia los depocentros. Asimismo, los ríos principales de la cuenca como el Toloma o el Salle, adquieren un carácter torrencial durante los eventos de fuertes tormentas, lo cual se refleja en el material clástico depositado en los respectivos lechos. Por su parte, los eventos de extrema seguía incrementan el área de las playas como consecuencia de la retracción de las lagunas por una disminución drástica los caudales de los tributarios, lo cual genera la frecuente presencia de grietas de desecación tanto en las playas como en los lechos de los cauces fluviales de la cuenca. En el caso de las lagunas temporales de Pululos, las mismas se secan por completo dejando pequeños depocentros de fondo llano y de material limo-arcilloso agrietado que es fácilmente erosionado por los fuertes vientos de la región.

DISCUSIÓN

Acerca de la información geológica e hidrográfica

El análisis de la información geológica previa (i.e. Coira et al. 2004; Soler et al. 2005, 2007; Fracchia 2009) en conjunto con la información hidrográfica generada, permitió evidenciar que la red de drenaje de la cuenca de Pululos se encuentra fuertemente condicionada por la estructura y la presencia de la caldera Vilama (Figs. 2 y 4). El extremo E de esta caldera controla la disposición del río Salle, el cual fluye hacia el E-SE en sus nacientes para luego girar hacia dirección predominantemente O, de forma tal que el valle fluvial sigue el contorno de la caldera. Según Soler et al. (2005), ni el borde estructural ni el topográfico de la caldera se pudieron identificar en el extremo E (sí al O, aunque sólo de forma topográfica). Sin embargo, en el terreno se observó que este río presenta un valle fluvial amplio y un contundente cambio de dirección del curso fluvial. De manera similar, tanto la forma alargada en el sentido O-E de la laguna Pululos, como el área de aporte del conjunto de subcuencas S con afluentes de escasa extensión, permiten inferir que existe un control estructural sobre la topografía y morfografía del sistema, asociado a la caldera de Vilama.

Por otra parte, cabe resaltar que ambas lagunas comparten una misma fuente de aporte de aguas permanentes, que tiene sus nacientes en el volcán Salle, y que fluye en dirección S a través de la vega homónima (Fig. 5). El hecho particular de que este curso fluvial luego se divida en dos, con un tramo para cada laguna, implica que se debe considerar al área de aporte de la laguna Chaupijara como una subcuenca de la cuenca lagunar Pululos. Teniendo en cuenta la variabilidad climática de la región, no gueda claro que ocurriría durante eventos de sequías extremas con el sistema de la vega Salle. Por ejemplo, si ambos cursos se podrían secar o bien, si sólo uno de los tramos prevalecería. Sin embargo, dichas situaciones no se observaron durante los años de trabajo de campo en momentos de sequía, puesto que siempre se observó agua superficial en ambos tramos de la vega. Asimismo, en el caso de la ocurrencia de eventos de lluvias extremas, es posible que la dinámica de esta vega y la configuración de los dos tramos descritos resulte alterada por potenciales aportes de sedimentos en cantidades importantes (material que se encuentra disponible en la cuenca media y alta).

Desde el punto de vista hidrográfico, se considera que ambas lagunas funcionan como sistemas cerrados en la actualidad, es decir que no poseen flujos superficiales que drenen hacia fuera de las mismas. Por medio de las imágenes

satelitales de periodos con abundantes precipitaciones, se pudo apreciar un curso de agua sobre el vértice de la costa O-SO de Chaupijara (Fig. 14.a), el cual, durante estadios de niveles altos de esta laguna, podría aportar agua hacia el tramo Pululos de la vega Salle. Sin embargo, las observaciones de campo sugieren que esto parece improbable, dado que se identificó un resalto topográfico en con un desnivel aproximado de al menos 2,5 metros (Fig. 14.a). Si bien Chaupijara suele crecer en esta dirección durante fases transgresivas, dicha elevación impediría el trasvase de agua, al menos con los valores de precipitaciones observados entre 1975 y 2017. Asimismo, no se encontró evidencia de antiguos niveles lacustres elevados en esta zona (i.e. paleolíneas de costa o marcas de paleo-niveles de agua). Dicho curso de agua temporal es generado por los tributarios temporales de una lomada (ver Fig. 5.g) situada en proximidades a Chaupijara, los cuales se activan durante eventos torrenciales. Respecto a Pululos, tanto los habitantes del lugar como Turner (1982), señalan que cuando esta laguna presenta niveles elevados, cede agua hacia la laguna Vilama, situada al O del sistema (Fig. 1). Esto también se evaluó mediante una imagen Landsat del 23 de marzo de 2014 donde se identificó una potencial conexión entre ambas lagunas mediante un curso de agua. Posteriormente, al valorar esta situación por medio de imágenes Bing y Google Earth de alta resolución, se constató que las aguas de dicho curso parecen provenir tanto de un brazo del abanico aluvial del río Toloma, así como de los arroyos temporales que fluyen por las laderas de los cerros localizados al S-SO de Pululos. Asimismo, en 2019 (donde Pululos se hallaba 1,8 metros por encima de los niveles registrados en años anteriores), se recorrió el terreno y se observó un resalto topográfico que marca el borde distal del abanico aluvial del río Toloma (ver Fig. 14.b), lo que dificultaría el trasvase de aqua hacia Vilama, al menos en momentos actuales. Sin embargo, dada la gran carga de materiales que acarrea este abanico, las pendientes del terreno, y el carácter divagante de sus cursos de agua, es posible que tanto el nivel de base como las líneas de pendientes del abanico cambien a lo largo del tiempo. Por lo tanto, no es posible descartar el hecho de que, en el pasado, el resalto topográfico observado se modificara o no hubiese existido, y que Pululos cediera agua hacia la laguna Vilama durante periodos muy húmedos y balances hídricos positivos (por ej., aquellos generaron los niveles responsables de las playas antiguas o paleolíneas de costa observadas).

Los sub-ambientes y unidades geomorfológicas de Chaupijara y Pululos

Los mapas batimétricos de las lagunas Chaupijara y Pululos permitieron identificar y caracterizar los diferentes sub-ambientes intra-lacustres. En el caso de Chaupijara, se observó que el depocentro se emplaza en el extremo SE del cuerpo de agua, limitado hacia la costa por un talud de fuerte pendiente el cual es consecuencia del afloramiento rocoso ubicado en dicha costa (Figs. 7 y 10), y que condiciona la extensión areal del cuerpo de agua en periodos de gran humedad y niveles



Figura 14. Canales que podrían indicar un potencial trasvase de agua entre las lagunas Chaupijara y Pululos (a; trayecto violeta, perfil A-B) y entre Pululos y Vilama (b; trayecto anaranjado, perfil C-D). Los pines señalan los respectivos resaltos topográficos que impedirían el trasvase de agua, los cuales se observan en la sección inferior, y que representan la cota máxima de los trayectos marcados. Imágenes Google Earth, con fecha de octubre del año 2020.

altos. De forma opuesta, el sub-ambiente talud no tiene continuidad y se ausenta en la costa O-NO, como consecuencia de los depósitos del fan-delta que se encuentran muy extendidos en la región litoral y sub-litoral. Asimismo, si se trazara un perfil transversal en dirección NNO-S, también se observarían zonas de taludes con fuertes pendientes y sub-ambientes litorales y sublitorales muy reducidos, lo cual se corroboró en el terreno. Esta información lleva a la conclusión de que esta laguna se encuentra fuertemente condicionada por la topografía, con unidades geomorfológicas específicas, como los afloramientos rocosos de las áreas montañosas que colindan con el cuerpo de agua, que generan una reducción de las zonas litorales y taludes de alta pendiente, lo que favorecería el ascenso de sus aguas en la vertical durante los periodos húmedos.

El mapa batimétrico de Pululos evidencia que las zonas litorales y sublitorales se hallan ampliamente extendidas en sentido O-E, como consecuencia de los depósitos de los fan-deltas generados por los ríos Toloma (costa O) y Salle (costa E; Fig. 11.a). Asimismo, se determinó que esta laguna posee un relieve de fondo de amplio desarrollo y prácticamente plano, a diferencia de Chaupijara que posee un fondo irregular con la presencia de zonas ligeramente más elevadas, probablemente como consecuencia de los depósitos clásticos por caída de material de los afloramientos rocosos cercanos al depocentro (Fig. 7). Cabe destacar que en el perfil A-A' de Pululos (Fig. 8), se aprecia que la zona litoral y sublitoral no tendría mucho desarrollo ni extensión areal, lo cual se refutó en el campo al observar que este sub-ambiente se extiende considerablemente aguas adentro. Sin embargo, los lóbulos frontales de los fan-delta de Pululos generaron taludes de pendientes altas en el sector O y E-NE de la laguna (Fig. 8). De forma similar a Chaupijara, Pululos también se encuentra controlada por la topografía, donde los afloramientos rocosos y áreas montañosas están muy próximos al cuerpo de agua y condicionan la extensión de las playas y zonas litorales, ejerciendo un fuerte control en la expansión areal de la laguna durante eventos de gran humedad. Esto ocurre principalmente en dirección N-S (fundamentalmente hacia la costa N), evidenciando grandes áreas de expansión/retracción de la laguna en sentido E-O durante eventos extremos (Fig. 11.b). Asimismo, esto se aprecia con mayor claridad a partir de las paleolíneas de las costas E-NE, mientras que las paleolíneas de la costa S son alcanzadas con mayor frecuencia por el avance de las aguas durante los eventos húmedos analizados.

Con respecto a las geoformas y unidades geomorfológicas de estos ambientes lacustres, se mencionó previamente cómo los afloramientos rocosos y las áreas montañosas con depósitos ignimbríticos actúan como un límite claro y un control topográfico en los movimientos de expansión de ambas lagunas a lo largo de periodos con balances hídricos positivos. Por otra parte, se observó cómo los procesos geomorfológicos de naturaleza gravitatoria y eólica cobran gran importancia en la zona de estudio. Esto guedó en evidencia por la presencia de: i) acumulaciones de derrubios y caídas de roca en las laderas circundantes, como consecuencia de movimientos gravitacionales principalmente de tipo caída; ii) flujos secos observados en cercanías de la zona de cabecera de la vega Salle, compuestos de detritos ignimbríticos angulosos (no indicados en los mapas de las Figs. 10 y 11 por su representatividad y escala); ii) depósitos eólicos dispuestos en campos de arenas con nebkhas, en ambas lagunas, y por campos de arenas con dunas de mayor envergadura en el caso del área de Pululos. Por su parte, los abanicos aluviales se sitúan en cercanía de dicha laguna, originados por los cursos fluviales de bajo orden con orientación N-S, preferentemente, que luego se suelen interdigitar en sus sectores distales. Estas zonas que configuran mayormente bajadas aluviales se caracterizan por presentar flujos de agua intermitentes, por lo cual no se observaron humedales de tipo vegas. Asimismo, se destaca la presencia de paleolíneas de costa que constituyen playas antiguas, principalmente en Pululos, localizadas a 20-45 metros de la posición actual de la laguna, y con alturas que superan los dos metros (Fig. 12). Estas paleolíneas son evidencia de niveles antiguos que alcanzó la laguna, y plantea algunos interrogantes sobre si los mismos se debieron a razones netamente hidroclimáticas (balances hidrológicos positivos) o si bien el actual nivel de base en el sistema cambió como resultado de la actividad tectónica neógena en la región (Alonso et al. 2006, Strecker et al. 2007, 2012). Asimismo, es posible considerar una combinación de ambos factores, climático-tectónico (Pingel et al. 2016). Cabe resaltar que la extensión areal de las playas varía según las fases transgresivas o regresivas observadas en las últimas décadas. En el caso de Chaupijara se observó que, a escala interanual, la laguna alcanza con frecuencia el límite de las paleolíneas de costa identificadas. Esto se debe a que los movimientos de expansión-retracción del cuerpo de agua se encuentran limitados y controlados fuertemente por el relieve, alcanzando con frecuencia este sector durante los niveles altos, con un aumento en su profundidad, pero con poca expresión y variabilidad en su superficie (Fig. 10 b). Por el contrario, en Pululos el relieve solamente restringe y limita el movimiento de expansión-retracción del sistema en los sectores donde se encuentran los afloramientos rocosos (i.e. costas N-S). De hecho, Santamans et al. (2021), observaron que Pululos mostró una alta variabilidad temporal durante el periodo 1975-2017 (Fig. 9 a), pero nunca alcanzó la zona donde se encuentran las paleolíneas de costa, aún en los períodos más húmedos (Fig. 11.b). Por último, se puede destacar la extensión y desarrollo que tienen los fan-delta asociados a la dinámica fluvial de los cursos principales, los cuales aportan agua de manera permanente a los sistemas lacustres. La importancia de estas geoformas, su extensión y arquitectura, asociada a la significativa cantidad de sedimentos acumulados, habría condicionado la distribución de algunos sub-ambientes intra-lacustres, principalmente de las zonas litoral, supra y sublitoral (Figs. 7 y 8). El volumen de los depósitos de los fan-delta determinó la altura del pelo agua y, en consecuencia, la disponibilidad de luz para el desarrollo de distintos tipos de vegetación acuática observada en estos sectores.

Respuesta y variabilidad lacustre actual ante eventos extremos

Los cambios en las superficies de las lagunas Chaupijara y Pululos (Figs. 9.a, 10.b y 11.b) muestran cómo estos sistemas lacustres reflejan la variabilidad hidroclimática regional. En particular, Santamans et al. (2021), caracterizaron y analizaron en detalle la variabilidad hidroclimática en el sistema lacustre de Vilama y su vínculo con ciertos forzantes climáticos. Sin embargo, dicho trabajo no abordó la respuesta hidrológica y el control geomorfológico que ejerce el relieve en los cambios de superficie (expansión/contracción) de cada laguna en particular, ni cómo son afectados los distintos sub-ambientes o las geoformas asociadas a estos ambientes lacustres. Además de la variación areal que experimentan los cuerpos de agua asociada a la variabilidad hidroclimática regional (Santamans et al. 2021), es probable que el principal cambio morfométrico se manifieste en la profundidad y en el volumen de agua de estos sistemas. Más aún si se tienen en cuenta el control topográfico del relieve, principalmente en Chaupijara. Dicho control sumado a la distribución de los depósitos sedimentarios de los fan-delta, condicionan la respuesta superficial de las lagunas a lo largo de periodos con lluvias y/o seguías extremas, de forma tal que la variabilidad superficial se observa principalmente en las respectivas zonas litorales (Figs. 10.b y 11.b). Por otra parte, en Pululos se mencionó el potencial trasvase de agua que podría existir desde este cuerpo de agua hacia la laguna de Vilama durante niveles lacustres altos asociados a balances hídricos positivos. En la actualidad, dicho trasvase estaría impedido por un umbral geomorfológico conformado por un leve resalto topográfico resultado de los depósitos del fan-delta del río Toloma. Este umbral geomorfológico podría ser modificado durante sucesivos eventos de gran humedad y/o niveles lacustres altos. Por lo tanto, no se puede afirmar que esta laguna se comportó como un sistema hidrológicamente cerrado a lo largo de toda su historia.

Además, se destaca que, dentro del periodo analizado, dos lagunas que se encuentran en una misma cuenca y a menos de 3 km de distancia, registraron las máximas superficies de pelo de agua en diferentes años (i.e. años 1979 para Chaupijara y 1986 para Pululos; Fig. 9.a). Asimismo, las lagunas presentaron momentos en los cuales funcionaron en fase, mostrando tamaños mayores (por ej. 1976, 1979, 1991; Fig. 9.a) y menores (por ej. 1977, 1996) de forma contemporánea. Todo esto demuestra cuan complejo es el funcionamiento y la respuesta hidrológica de estos sistemas. Las causas de ello podrían ser diversas, entre las cuales se pueden mencionar: i) los diferentes tamaños de las cuencas de aporte de cada laguna, ii) una mayor cantidad de afluentes que aportarían mayores caudales a Pululos durante eventos de mayor humedad, iii) tiempos de respuesta hidrológica diferentes en cada laguna, e incluso iv) la posibilidad de trasvase de agua hacia Vilama, y de Chaupijara hacia Pululos durante niveles lacustres altos. Asimismo, es importante señalar que, durante periodos de gran humedad y balances hídricos positivos (por ej. 1983-1986, 2004; Fig. 9), se desarrollan hasta cuatro cuerpos de agua menores que al colmatarse drenan sus aguas hacia la laguna, e incluso se unen con el cuerpo de agua principal (Fig. 10.b). De hecho, en la figura 10 se encuentran representadas distintas paleolíneas de costa que se corresponden con estos cuerpos de agua temporales, lo que evidencia la gran extensión que alcanzaron en el pasado. Por otra parte, el periodo de mayor seguía registrado entre los años 1975 y 2017 (Fig. 9.b), fue un episodio a nivel regional registrado en todas las lagunas del sistema entre 2009 y 2010, algunas de las cuales se secaron por completo (por ej. Isla Grande, Isla Chica, Palar; Fig. 1; Santamans et al. 2021). Asimismo, a lo largo de este periodo extremadamente seco, la laguna Pululos resultó aquella que disminuyó su superficie de forma más abrupta en todo el sistema lacustre de Vilama (Santamans et al. 2021). Un período similar con déficit de precipitaciones se registró en la presa Santa Juana (centro de Chile) entre 2007 y 2009 (Salas et al. 2016), mientras que el año 2010 fue descrito como uno de los más secos de las últimas décadas en la cuenca amazónica (Bustamante et al. 2016, Espinoza et al. 2011), con lo cual se evidencia que dicho periodo de sequía tuvo alcance regional.

Los eventos y periodos prolongados de extrema humedad y sequía condicionan el ecosistema de la región, afectando de forma directa la disponibilidad de agua en el sistema lacustre de Vilama. La red de humedales y vegas se activa a lo largo estadios húmedos, los cauces aumentan sus caudales y la formación de cojinetes está en pleno desarrollo. Dicho desarrollo es clave, puesto que en estas estructuras orgánicas se encuentra el alimento principal de llamas y vicuñas, las cuales sirven de sustento para los pobladores de la región. Asimismo, las vegas junto con las lagunas constituyen sitios de alimentación y descanso de diversas especies de aves migratorias neárticas, además de albergar un porcentaje significativo especies endémicas del Altiplano (por ej. Larus serranus, Recurvirostra andina, Anas puna, Charadrius alticola, Gallinago andina, entre otras; Derlindati y Marconi s.f.). Particularmente, los estadios húmedos y secos modifican de forma directa la química (i.e. salinidad, pH, oxígeno disuelto) de las aguas de lagunas y afluentes (Santamans 2022). Esto, a su vez, condiciona a las poblaciones de macrófitas, fitoplancton y zooplancton en las lagunas y por ende la disponibilidad de alimento para las distintas especies de flamencos que alberga el sistema lacustre (Caziani y Derlindati 2000, Caziani et al. 2001). Por todo ello, comprender cómo afecta la disponibilidad de agua a estos sistemas lacustres altoandinos es de vital importancia para la conservación de los mismos. Mas aún, teniendo en cuenta el incremento de las actividades vinculadas a la extracción de litio y otros minerales junto con las proyecciones climáticas futuras bajo el contexto del cambio climático, las cuales prevén condiciones de seguía extrema para los próximo 100 años (Neukom et al. 2015, Morales et al. 2020). Este conjunto de factores resulta es una amenaza real para el ecosistema y las actividades pastoriles de los pobladores locales (Chávez et al. 2023).

CONCLUSIONES

Los resultados desarrollados previamente permiten caracterizar la dinámica temporal de las lagunas Chaupijara y Pululos, y comprender cómo responden estos sistemas naturales a la variabilidad hidroclimática regional. El presente trabajo aporta información novedosa sobre la geomorfología, los sub-ambientes intra-lacustres y el funcionamiento actual de lagunas altoandinas ubicadas en un área clave del NOA. Estas lagunas se caracterizan por presentar muy poca intervención antrópica y ser altamente sensibles a la variabilidad climática. Por lo cual, comprender el funcionamiento actual de este tipo de sistemas lacustres es crítico y sienta un precedente para el análisis de las condiciones ambientales futuras en esta región, más aún en el contexto del cambio climático en curso.

Los aspectos más relevantes obtenidos de la caracterización hidrográfica, de la identificación y delimitación de geoformas y unidades geomorfológicas, así como del análisis hidrometeorológico reciente se presentan a continuación:

1) La cuenca de aporte de la laguna Pululos incluye varias subcuencas entre las que se destaca la de la laguna Chaupijara.

2) Ambas lagunas presentan un área común de aporte de agua, la cual corresponde al río Salle, de régimen permanente y cuyo curso fluvial principal se divide en dos cursos que fluyen hacia cada laguna. Además, la laguna Pululos recibe aportes del río Toloma, también de carácter permanente.

3) Los cursos fluviales permanentes tienen gran importancia geomorfológica en ambas lagunas ya que desarrollan amplios fan-deltas que condicionan los sub-ambientes intra-lacustres, generando zonas litorales de gran extensión.

4) En ciertos sectores, las lagunas presentan zonas litorales muy reducidas condicionadas principalmente por afloramientos rocosos próximos a los cuerpos de agua, los cuales limitan la expansión areal de las lagunas hacia esos sectores. Esto genera, además, zonas de taludes con altas pendientes identificados y delimitados claramente en ambos sistemas lacustres.

5) La zona pelágica de laguna Pululos presenta una gran extensión en comparación con Chaupijara. Esta información resulta de gran utilidad para la planificación y obtención de testigos sedimentarios para estudios paleolimnológicos.

6) Los cambios observados en las superficies lacustres durante el periodo de estudio (1975-2017), reflejan la alta variabilidad y sensibilidad de estas lagunas a los cambios hidrometeorológicos regionales.

7) Durante periodos con aumento de precipitaciones y balances hídricos positivos, la laguna Pululos expande su superficie de agua en sentido O-ENE, a lo largo de las zonas litorales donde se encuentran los fan-delta. Lo mismo sucede en la laguna Chaupijara, pero en sentido O-NO.

8) En periodos de extrema sequía, las lagunas se contraen superficialmente en el mismo sentido y las aguas se concentran en los depocentros, ubicados hacia las respectivas costas SE de ambos sistemas.

9) La presencia de paleolíneas de costa, principalmente en Pululos, son una evidencia de que estas lagunas experimentaron en el pasado, un aumento de nivel y extensiones de agua mucho mayores a las registradas en el periodo analizado (1975-2017), sugiriendo condiciones hidroclimáticas mucho más húmedas que las actuales.

Resulta fundamental cuantificar y estudiar, desde una perspectiva multidisciplinaria, la variabilidad que experimentan estos sistemas lacustres altoandinos ante las fluctuaciones climáticas, dado que la disponibilidad de agua condiciona el equilibrio de estos ecosistemas que suelen albergar fauna endémica y en peligro de extinción, y afecta de forma directa las actividades agro-pastoriles de los pobladores locales. Si bien la información que aporta este estudio es relevante, queda de manifiesto la necesidad de que las y los investigadores de diversas áreas de la ciencia continúen aportando información en esta región clave del norte argentino.

AGRADECIMIENTOS

Carla Daniela Santamans agradece especialmente a CO-NICET por la beca doctoral otorgada durante la cual se llevó a cabo esta investigación. Se agradece al Dr. Pablo Caffe por sus observaciones y consejos desinteresados para la realización del mapa geológico. También se agradece de forma especial a los revisores de este trabajo que contribuyeron con sus sugerencias a generar una mejor versión del manuscrito.

Esta investigación se desarrolló en el marco del proyecto binacional argentino-alemán Strategy CONICET (GII StRATEGy 163-A 1.1) y DeutscheForschungsgemeinschaft (StRATEGy DFG 373/34-1) en el Grupo Internacional de Formación en Investigación IGK2018 "SuRfAce processes, TEctonics and Georesources: The Andean foreland basin of Argentina". Además, esta investigación también se llevó a cabo en el marco de los siguientes proyectos de investigación argentinos: Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT-2019-01336), CONICET (PUE 2017-22920170100027CO) y SECTER - Universidad Nacional de Jujuy (SeCTER- E/G011 y E/1001/-Integrar).

Asimismo, se agradece al Ministerio de Ambiente y Cambio Climático de la Provincia de Jujuy, y especialmente a la Comunidad Originaria de Lagunillas del Farallón, por los permisos de acceso y permanencia al Sistema Lacustre de Vilama, un área protegida (sitio RAMSAR y pertenece a la Reserva Provincial Altoandina Chinchilla).

REFERENCIAS

- Allmendinger, R. y Gubbels, T. 1996. Pure and simple shear plateau uplift, Altiplano-Puna, Argentina and Bolivia. Tectonophysics 259: 1–13.
- Alonso, R., Bookhagen, B., Carrapa, B., Coutand, I., Haschke, M., Hilley, G., Schoenbohm L., Sobel, E., Strecker, M., Trauth, M. y Villanueva, A. 2006. Tectonics, Climate, and Landscape Evolution of the Southern Central Andes: the Argentine Puna Plateau and Adjacent Regions between 22 and 30°S. The Andes: active subduction orogeny: 265-283.
- Arche, A. (Ed.). 2010. Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Textos Universitarios 46, 1287 p. Madrid.
- Bao, R., Hernández, A., Sáez, A., Giralt, S., Prego, R., Pueyo, J., Moreno, A. y Valero-Garcés, B. 2015. Climatic and lacustrine morphometric

controls of diatom paleoproductivity in a tropical Andean lake. Quaternary Science Reviews 129: 96–110.

- Bianchi, L., Rivera, J., Rojas, F., Britos Navarro, M. y Villalba, R. 2017. A regional water balance indicator inferred from satellite images of an Andean endorheic basin in central-western Argentina. Hydrological Science Journal 62: 533–545.
- Buitrago, L. y Larrán, M. 2002 El clima de la Provincia de Jujuy. Il Edición. Universidad Nacional de Jujuy, 38 p. Jujuy.
- Bustamante, M., Cruz, F., Vuille, M., Apaéstegui, J., Strikis, N., Panizo, G., Novello, F., Deininger, M., Sifeddine, A., Cheng, H., Moquet, J., Guyot, J., Santos, R., Segura, H. y Edwards, R. 2016. Holocene changes in monsoon precipitation in the Andes of NE Peru based on δ180 speleothem records. Quaternary Science Reviews 146: 274–287.
- Cabrera, A. 1976. Regiones Fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, 2° ed. Tomo II. Editorial ACME SACI, 85 p., Buenos Aires.
- Canedo-Rosso, C., Uvo, C. B. y Berndtsson, R. 2019. Precipitation variability and its relation to climate anomalies in the Bolivian Altiplano. International Journal of Climatology 39: 2096–2107.
- Carilla, J., Aráoz, E., Foguet, J., Casagranda, E., Halloy, S. y Grau, A. 2023. Hydroclimate and vegetation variability of high Andean ecosystems. Frontiers in Plant Science 13: 1–16.
- Carilla, J., Grau, R., Paolini, L. y Morales, M. 2013. Online appendix-lake fluctuations, plant productivity, and long-term variability in high-elevation tropical andean ecosystems. Arctic, Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 45: 179–189.
- Carré, M., Azzoug, M., Bentaleb, I., Chase, B. M., Fontugne, M., Jackson, D., Ledru M., Maldonado, A., Sachs, J. y Schauer, A. 2012. Mid-Holocene mean climate in the south eastern Pacific and its influence on South America. Quaternary International 253: 55–66.
- Casagranda, E., Navarro, C., Grau, H. e Izquierdo, A. 2019. Interannual lake fluctuations in the Argentine Puna: relationships with its associated peatlands and climate change. Regional Environmental Change 19: 1737–1750.
- Caziani, S. y Derlindati, E. 1999. Humedales Altoandinos del Noroeste de Argentina: su Contribucion a la biodiversidad regional. Tópicos sobre Humedales Subtropicales y Templados de Sudamérica: 1–13.
- Caziani, S. y Derlindati, E. 2000. Abundance and habitat of High Andes Flamingos in Northwestern Argentina. Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology 23: 121–133.
- Caziani S. M., Derlindati E. J., Tálamo A., Sureda A., Trucco C. y Nicolossi G. 2001. Waterbird richness in altiplano wetlands of northwestern Argentina. Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology 24: 103–117.
- Chávez, R., Meseguer-Ruiz, O., Olea, M., Calderón-Seguel, M., Yager, K., Isela Meneses, R., Lastra, J.A., Núñez Hidalgo, I., Sarricolea, P., Serrano Notivoli, R., Prieto, M. 2023. Andean peatlands at risk? Spatiotemporal patterns of extreme NDVI anomalies, water extraction and drought severity in a large-scale mining area of Atacama, northern

Chile. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 116: 103138.

- Cirignoli, S. 2019. Chinchilla chinchilla. En: SAyDS–SAREM. Categorizacion 2019 de los mamíferos de Argentina según su riesgo de extincion Lista Roja de los mamíferos de Argentina. Version digital: http://cma. sarem.org.ar.
- Coira, B., Caffe, P., Mahlburg,S., Díaz, A. y Ramírez, A. 1996. Complejo volcanico Vilama - Sistema caldérico del Cenozoico superior en Puna, Jujuy. XIII Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 603-620, Buenos Aires.
- Coira, B., Caffe, P., Ramírez, A., Chayle, W., Díaz, A., Rosas, S., Pérez, A., Pérez, B., Orozco, O. y Martínez, M. 2004. Hoja Geológica 2366-I/2166-III. Mina Pirquitas., Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250.000. SEGEMAR, Boletín 269, 122 p., Buenos Aires.
- De Silva, S.1989. Altiplano-Puna volcanic complex of the Central Andes. Geology 17: 1102–1106.
- Derlindati, E. y Marconi, P. s.f. Ficha Ramsar Lagunas de Vilama. Red de Humedales de importancia para la conservación de Flamencos Altoandinos. Grupo de Conservación Flamencos Altoandinos. En: www. ramsar.org.
- Di Giacomo, A., De Francesco, M. y Coconier, E. (eds.), 2007. Áreas importantes para la conservación de las aves en Argentina. Sitios Prioritarios para la conservacion de la biodiversidad. Temas de Naturaleza y Conservación 5: 1-514. Aves Argentinas/Asociación ornitológica del Plata, Buenos Aires.
- Espinoza, J., Ronchail, J., Guyot, J., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., Drapeau, G. y Pombosa, R., 2011. Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): understanding the exceptional 2010 drought. Geophysical Research Letters 38: 1–6.
- Feyisa, G., Meilby, H., Fensholt, R. y Proud, S. 2014. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing Environmental 140: 23–35.
- Fracchia, D. 2009. Volcanismo postcolapso de la caldera Vilama, Mioceno superior, Mecanismos eruptivos y Petrogénesis. Facultad de Ciencias Naturales y Museo Universidad Nacional de La Plata. Tesis Doctoral: "(inédita)". 458 p.
- Fracchia, D., Polo, L., Caffe, P. y Coira, B. 2010. Redefinición estratigráfica de la Ignimbrita Pululus (Puna Norte): Implicancias volcanológicas y metalogenéticas. Revista de la Asociación Geológica Argentina 66: 271–281.
- Fregenal Martínez, M. y Meléndez, N. 2010. Lagos y sistemas lacustres. En: Arche (ed.), Sedimentología, del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC): 299–396, Madrid.
- Garreaud, R. 2009. The Andes climate and weather. Advances in GeoScience 22: 3–11.

Garreaud, R. y Aceituno, P. 2001. Interannual rainfall variability over the

South American Altiplano. Journal of Climate 14: 2779–2789.

- Garreaud, R., Vuille, M. y Clement, A. 2003. The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 194: 5–22.
- Garreaud, R., Vuille, M., Compagnucci, R. y Marengo, J. 2009. Present-day South American climate. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 281: 180–195.
- Garreaud, R., Molina, A. y Farias, M. 2010. Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. Earth Planetary Science Letters 292: 39–50.
- Guerra, L., Martini, M., Córdoba, F., Ariztegui, D. y Piovano, E. 2019. Multi-annual response of a Pampean shallow lake from central Argentina to regional and large-scale climate forcings. Climate Dynamics 52: 6847–6861.
- Hardie, L., Smoot, J. y Eugster H. 1978. Saline Lakes and their Deposits: A Sedimentological Approach. Modern and ancient lake sediments 2: 7–41.
- Hong, F., Montero López C., Guzmán, S. y Aramayo, A. 2018. 1-Geología. En: Grau, H., Babot, M., Izquierdo, A. y Grau, A. (eds.), La Puna Argentina: Naturaleza y cultura. Fundación Miguel Lillo. Serie Conservación de la Naturaleza 24, 13-29, Tucumán.
- IPCC. 2023. Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment report (AR6). Summary for Policymakers. Disponible en: https://doi.org/10.59327/ IPCC/AR6-9789291691647.001
- Izquierdo, A., Foguet, J. y Grau, H. 2016. Hidroecosistemas de la Puna y Altos Andes de Argentina. Acta Geológica Lilloana 28: 390–402.
- Izquierdo, A., Aragón, R., Navarro, C. y Casagranda, E. 2018. Humedales de la Puna: principales proveedores de servicios ecosistémicos de la región. En: Grau, H., Babot, M., Izquierdo, A. y Grau, A. (eds.), La Puna Argentina: Naturaleza y cultura. Fundación Miguel Lillo. Serie de Conservación de la Naturaleza 24: 96-111, Tucumán.
- Jara, I., Maldonado, A., González, L., Hernández, A., Sáez, A., Giralt, S., Bao, R.y Valero-Garcés, B. 2019. Centennial-scale precipitation anomalies in the southern Altiplano (18°S) suggest an extra-tropical driver for the South American Summer Monsoon during the late Holocene. Climate Past Discussions 15: 1–30.
- Ji, L., Zhang, L., Wylie, B., 2009. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 75: 1307–1317.
- Jordan, T., Herrera, L., Godfrey, L., Colucci, S., Gamboa, P., Urrutia, M., González, L. y Paul, J. 2019. Isotopic characteristics and paleoclimate implications of the extreme precipitation event of march 2015 in Northern Chile. Andean Geology 46: 1–31.
- Maidana, N., Seeligmann, C. y Morales, M.R. 2009. Bacillariophyceae del complejo lagunar Vilama (Jujuy, Argentina). Bolentín de la Sociedad Argentina Botánica 44: 257–271.
- Marengo, J., Soares, W., Saulo, C. y Nicolini, M. 2004. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. Journal of Climate

652

17: 2261–2280.

- Matheron, G., 1963. Principles of geostatistics. Economic Geology 58: 1246–1266.
- Morales, M.S., Carilla, J., Grau, H. y Villalba, R. 2015. Multi-century lake area changes in the Southern Altiplano: A tree-ring-based reconstruction. Climate of the Past 11: 1139–1152.
- Morales, M.S., Cook, E., Barichivich, J., Christie, D., Villalba, R., LeQuesne, C., Srur, A., et al. 2020. Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 117: 16816–16823.
- Morales, M.S., Crispín De La Cruz, D., Álvarez, C., Christie, D., Ferrero, E., Andreu Hayles, L., Villalba, R., Guerra, A., Ticse Otarola, G., Rodríguez Ramírez, E., Llocclla Martínez, R., Sanchez Ferrer, J. y Requena Rojas, E. 2023. Drought increased since the mid-20th century in the northern South American Altiplano revealed by a 389-year precipitation record. Climate of the Past Discussion 19: 457–476.
- Nemec, W. y Steel, R. 1988. What is a fan delta and how do we recognize it?. En: Nemec, W y Steel, R. (eds.). Fan deltas: sedimentology and tectonic settings. Blackie and Son. 3–13
- Neukom, R., Rohrer, M., Calanca, P., Salzmann, N., Huggel, C., Acuña, D., Christie, D. y Morales, M.S. 2015. Facing unprecedented drying of the Central Andes? Precipitation variability over the period AD 1000-2100. Environmental Research Letters 10: 084017.
- Pingel, H., Mulch, A., Alonso, R., Cottle, J., Hynek, S., Poletti, J., Rohrmann, A., Schmitt, A. K., Stockli, D. y Strecker, M. 2016. Surface uplift and convective rainfall along the southern Central Andes (Angastaco Basin, NW Argentina). Earth Planet. Science Letters 440: 33–42.
- Salas, I., Herrera, C., Luque, J., Delgado, J., Urrutia, J., Jordan, T. 2016. Recent climatic events controlling the hydrological and the aquifer dynamics at arid areas: the case of
- Huasco River watershed, northern Chile. Science of the Total Environment 571: 178–194.
- Santamans, C. 2022. Reconstrucciones Paleoambientales y Paleoclimáticas durante el Holoceno tardío en Vilama, Andes Centrales. Universidad Nacional de Córdoba. Tesis Doctoral (inédita). 422 p., Córdoba.
- Santamans, C., Cordoba, F., Franco, M., Vignoni, P. y Lupo, L. 2021. Hydro-climatological variability in Lagunas de Vilama System, Argentinean Altiplano-Puna Plateau, Southern Tropical Andes (22° S), and its response to large-scale climate forcings. Science of the Total Environment 767: 144926.

- Seiler, C., Hutjes, R. y Kabat, P. 2013. Climate variability and trends in bolivia. Journal of Applied Meteorology and Climatology 52: 130–146.
- Smoot, J. y Lowenstein, T. 1991. Depositional Environments of non-marine evaporites. Chapter 3. En: Melvin, J (ed.). Development in Sedimentology, Vol. 50 Elseiver. 189-347 p., Berlin.
- Soler, M., Caffe, P., Coira, B., Onoe, A. y Mahlburg-Kay, S. 2007. Geology of the Vilama caldera: A new interpretation of a large-scale explosive event in the Central Andean plateau during the Upper Miocene. Journal of Volcanology and Geothermal Research 164: 27–53.
- Soler, M., Caffe, P., Coira, B. y Onoe, A. 2005. La caldera Vilama y el complejo caldérico Eduardo Avaroa, Puna Argentina - Altiplano Boliviano. XVI Congreso. Geológico Argentino, Actas: 673–678.
- Strecker, M., Alonso, R., Bookhagen, B., Carrapa, B., Hilley, G., Sobel,
 E. y Trauth, M. 2007. Tectonics and climate of the southern central Andes. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 35: 747–787.
- Strecker, M., Hilley, G., Bookhagen, B. y Sobel E. 2012. Structural, Geomorphic, and Depositional Characteristics of Contiguous and Broken Foreland Basins: Examples from the Eastern Flanks of the Central Andes in Bolivia and NW Argentina. En: Busby, C. Azor, A. (eds.), Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances. Blackwell Publishing Ltd. pp. 508–521.
- Troll, C., 1959. Die tropischen Gebirge. Ihre dreidimensionale klimastische und pflnzengeographische Nonierung. Bonner Geogr. Abhandl., 25: 1-93
- Turner, J. 1982. Descripción Geológica de la Hoja 3 ab, Mina Pirquitas. Provincia de Jujuy. Boletín N°187, Secretaría de Estado de Industria y minería. Subsecretaría de Minería. República Argentina.
- Vuille, M. y 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.
- Vuille, M., Burns, S., Taylor, B., Cruz, F., Bird, B., Abbott, M., Kanner, L., Cheng, H. y Novello, V. 2012. A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. Climate of the Past 8: 1309–1321.
- Xu, H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing 27: 3025–3033.