

El recurso hídrico asociado a lagos en los Andes Centrales de Argentina (31°-36° S)

The water resource associated with lakes in the Central Andes of Argentina (31°-36° S)

 <https://doi.org/10.48162/rev.40.008>

Mariana Correas-Gonzalez  orcid.org/0000-0002-3557-0674

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales,
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
 mcorreas@mendoza-conicet.gob.ar

Stella Maris Moreiras  orcid.org/0000-0001-6462-6684

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales,
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Cátedra de Edafología, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo
 moreiras@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Los lagos de montaña son valiosos recursos naturales dado que pueden ser aprovechados como reservas de agua dulce, atractivos turísticos y permiten el desarrollo de ecosistemas naturales de altura. En el contexto del Cambio Climático Global, se prevé un aumento de la cantidad, extensión y volumen de los lagos asociada a la fusión glaciar. Numerosos inventarios de lagos se han realizado en las diferentes regiones del mundo a fin de conocer la evolución de los cuerpos de agua, aunque con un enfoque mayormente ligado a estudios de peligrosidad. El objetivo del presente trabajo fue identificar, inventariar y clasificar los lagos existentes en los Andes Centrales de Argentina (31° - 36° S) en función de su represamiento y cuantificar su volumen para evaluar la reserva hídrica existente. Para ello, procesamos imágenes satelitales Landsat del año 2020 en un entorno SIG. Los cuerpos de agua fueron identificados en base al cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) e interpretación visual y fueron digitalizados de manera manual. El cálculo de los volúmenes se realizó por medio de relaciones empíricas área-volumen. Nuestros resultados revelan un total de 641 lagos cuyo volumen total

se ha estimado en 1.345,6 hm³. Este recurso hídrico preservado en la alta montaña no está asociado exclusivamente a lagunas de origen glaciar. Diferentes tipos de cuerpos lacustres prevalecen en cada cuenca en función de sus características intrínsecas. Así, los lagos asociados a morenas y represados por deslizamientos son más importantes en término de volumen entre los 31° - 32° S, mientras que en los 33° S predominan pequeñas lagunas asociadas a facies de termokarst de glaciares cubiertos. A los 34° S la Laguna del Diamante concentra más de cuatro quintas partes del volumen total estimado, mientras que, entre los 34° y 36° S, los cuerpos de agua parecen estar más forzados por la geología, presentando mayor diversidad en cuanto a tipos y volúmenes más importantes.

PALABRAS CLAVE: génesis de lagos, inventario de lagos, lagos de altura, alta montaña, diques naturales

ABSTRACT

Lakes are valuable natural resources since they can be used as freshwater reserves and tourist attractions while allowing the development of natural high-altitude ecosystems. In the context of Global Climate Change, an increase in the number, size, and volume of these lakes is expected due to glacier melting. Many lake inventories have been done in the world in order to know the evolution of these water bodies, although they were mostly done from a hazard approach. This study aimed to identify, inventory, and classify existing lakes in the Central Andes of Argentina (31 – 36° S) according to their damming process and quantify their volume to evaluate the existing water reserve. For this purpose, we processed Landsat satellite images from the year 2020 in a GIS environment. Lakes were identified utilizing the Normalized Difference Water Index (NDWI) and visual interpretation, and we digitalized them with a manual approach. Volume estimation was done using area-volume empiric relations. Our results reveal a total of 641 lakes whose total volume has been estimated at 1,345.6 hm³. This water resource preserved in the high mountain is not exclusively related to glacier lakes. Different types of water bodies prevail in each region according to their inner characteristics. Thus, moraine-dammed lakes and landslide-dammed lakes are more critical in terms of volume contribution between 31° - 32° S, while at ~33° S, small glacial lakes linked to thermokarst facies over debris-covered glaciers prevail. At ~34° S, the Laguna del Diamante lake represents more than four-fifths of the total volume estimated; while between 34° to 36° S water bodies seem to be forced by geology, presenting a wider lake's type diversity and significant volumes.

KEY WORDS: lakes origin, lake inventory, mountain lakes, high mountains, natural dams

INTRODUCCIÓN

Los lagos de montaña constituyen un valioso recurso natural, son aprovechados como reservas de agua dulce y como puntos de recreación o atractivos turísticos. Desde un punto de vista ambiental, permiten el desarrollo de ecosistemas naturales de altura (Catalan et al., 2006; Haeberli et al., 2016). En el contexto del Cambio Climático Global (CCG), numerosas transformaciones se han producido en los ambientes de montaña y, de modo general, destaca la elevación de la isoterma de 0°C y el derretimiento de las grandes masas de hielo glaciar generando un mayor número de lagos, así como también un aumento en su área y volumen (Carrivick y Tweed, 2013; Shugar et al., 2020). A su vez, el retroceso glaciar y la degradación del permafrost promueve la desestabilización de laderas rocosas (Clague et al., 2012) aumentando la susceptibilidad de procesos de remoción en masa capaces de bloquear un valle y generar un lago aguas arriba (Costa y Schuster, 1988; Korup y Tweed, 2007). En este marco, numerosos inventarios de lagos se han realizado en las diferentes regiones del mundo a fin de conocer la evolución de los cuerpos de agua (Gardelle et al., 2011; Mergili et al., 2013; Cook et al., 2016; Emmer et al., 2016; Buckel et al., 2018), la peligrosidad de crecidas abruptas asociada a los mismos (Emmer et al., 2014; Aggarwal et al., 2017; Emmer et al., 2020) y su vinculación con el CCG (Bajracharya et al., 2007; Clague et al., 2012; Haeberli et al., 2008; Harrison et al., 2018; Shugar et al., 2020). En la región de los Andes Centrales, investigaciones recientes abordan la génesis, distribución espacial y evolución temporal de los lagos de origen estrictamente glaciar (Wilson et al., 2018) así como el análisis de procesos y eventos peligrosos asociados a la criósfera (Iribarren Anacona et al., 2015). Sin embargo, otros tipos de lagos no han sido estudiados con igual nivel de detalle, y solo han sido abordados de manera puntual como resultado de las características catastróficas de su vaciamiento repentino (ej. lago Los Erizos, represado por un deslizamiento, estudiado por D’Odorico et al., 2009; Perucca y Esper Angillieri, 2009; Penna et al., 2013) o como resultados secundarios de investigaciones cuyo principal objeto de estudio no eran los lagos en sí mismos. Así, Trombotto Liaudat et al. (2012) reportan la existencia de un lago represado por un glaciar cubierto en la quebrada del río Colorado (32° 57’ S, 69° 34’ W) y estudios enfocados en inventarios de procesos de remoción en masa dan cuenta de la formación y colapso parcial de la laguna Baya represada por una avalancha de rocas en las nacientes del arroyo de los

Guanacos (Espizúa y Bengochea, 2002; Koslowski y Folguera, 2009). Un caso aparte constituye el lago temporario del Plomo que, formado por el avance extraordinario del glaciar (*surging glacier*) homónimo, produjo el represamiento del río del Plomo en reiteradas ocasiones en tiempos históricos, así como también un evento catastrófico de vaciamiento repentino en 1934 y otros de menor magnitud en 1985, razón por la cual ha sido ampliamente estudiado (King, 1934; Helbling, 1935; Prieto, 1986; Bruce et al., 1987; Espizúa y Bengochea, 1990; Correas-Gonzalez et al, 2020). Por último, las bases de datos geoespaciales de organismos oficiales como la del Instituto Geográfico Nacional (disponible en <https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>) reportan solo algunas decenas de lagos en el área de estudio. En síntesis, la información referida a lagos se encuentra, o bien fragmentada en estudios de caso puntuales, o bien restringida a un tipo exclusivo de lagos; evidenciando la falta de un inventario a nivel regional que abarque todos los cuerpos lacustres existentes.

El presente trabajo tuvo dos objetivos principales: a) identificar, inventariar y clasificar los lagos existentes en los Andes Centrales de Argentina (31º - 36º S) en función de su represamiento y b) estimar el volumen de agua almacenado en los mismos para evaluar la reserva hídrica asociada. Para ello, se empleó un enfoque semi-automatizado basado en el cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) sobre imágenes satelitales Landsat del año 2020 y supervisado con interpretación visual, lo que permitió identificar los lagos. La digitalización de los mismos se realizó de manera manual y el cálculo de los volúmenes se realizó por medio de relaciones empíricas área-volumen. Nuestros resultados revelan un total de 641 lagos cuyo volumen total se ha estimado en 1.345,6 hm³. Este trabajo constituye el primer censo global de lagos en el área de estudio y un aporte para la estimación del recurso hídrico asociado a los mismos en la región de los Andes Centrales. Este recurso lacustre cobra vital importancia para los ecosistemas de altura y para el sistema de recarga de los ríos como para las comunidades andinas, por lo que recomendamos fuertemente su protección y el estudio periódico de los mismos a fin de evaluar su evolución.

Área de estudio

El área de estudio se extiende desde los 31° S al norte hasta los 36°S al sur; y desde la cota de 2.000 m snm al este hasta el límite con Chile al oeste, abarcando parte de las provincias de San Juan y Mendoza. Comprende la vertiente oriental de los Andes Centrales (31° - 36° S) según la regionalización climático – glaciológica propuesta por Liboutry (1998) y modificada por Masiokas et al., (2009). Esta porción de los Andes se caracteriza por presentar una altura media de 3.500 m snm, con un marcado gradiente altitudinal hacia el sur y con las máximas alturas en la porción septentrional (Cº Mercedario, 6.770 m snm; Cº Aconcagua, 6.961 m snm) (**Figura 1**).

El clima del área de estudio es del tipo polar de tundra (ETH) y polar de hielos eternos (EF) en las zonas de mayor altura de acuerdo a la clasificación climática de Köppen actualizada por Peel et al. (2007). En el clima ETH la temperatura media del mes más cálido está entre 0°C y 10°C, mientras que en el tipo EF la temperatura media del mes más cálido no supera los 0°C. El régimen de precipitaciones es nival y está ligado al dominio de las masas de aire húmedo provenientes del Anticiclón del Pacífico Sur que ejercen mayor influencia en los meses invernales. El sector norte (~ 31°S) registra precipitaciones cercanas a los 100 mm anuales y al sur de los 32°S se produce un marcado gradiente este – oeste de las isohietas hasta alcanzar ca. 800 mm anuales a los ~ 35°S (Viale y Nuñez, 2011)(**Figura 2**).

Las condiciones climáticas descritas y la topografía montañosa favorecen la existencia de un sistema de glaciares que cubre aproximadamente 1.696 km² en las cabeceras de las cuencas (IANIGLA-ING, 2018). En general, los glaciares de la región han experimentado un marcado retroceso asociado a un aumento de las temperaturas y una mayor tasa de ablación, situación agravada por la reducción en las precipitaciones invernales (Masiokas et al., 2009). Por otra parte, el dominio periglacial se extiende sobre la isoterma de 0°C a los 3.735 (+/- 197) m snm (Trombotto, 2003; Drewes et al., 2018; Tapia Baldis y Trombotto, 2015). Se distinguen siete cuencas hidrográficas caracterizadas por un régimen fluvial nivoglacial asociado a la fusión del manto nival y el aumento de las temperaturas durante la primavera y el verano (Lauro et al., 2019). En años secos la fusión glaciar sería particularmente importante para mantener los caudales de los ríos (Masiokas et al., 2013).

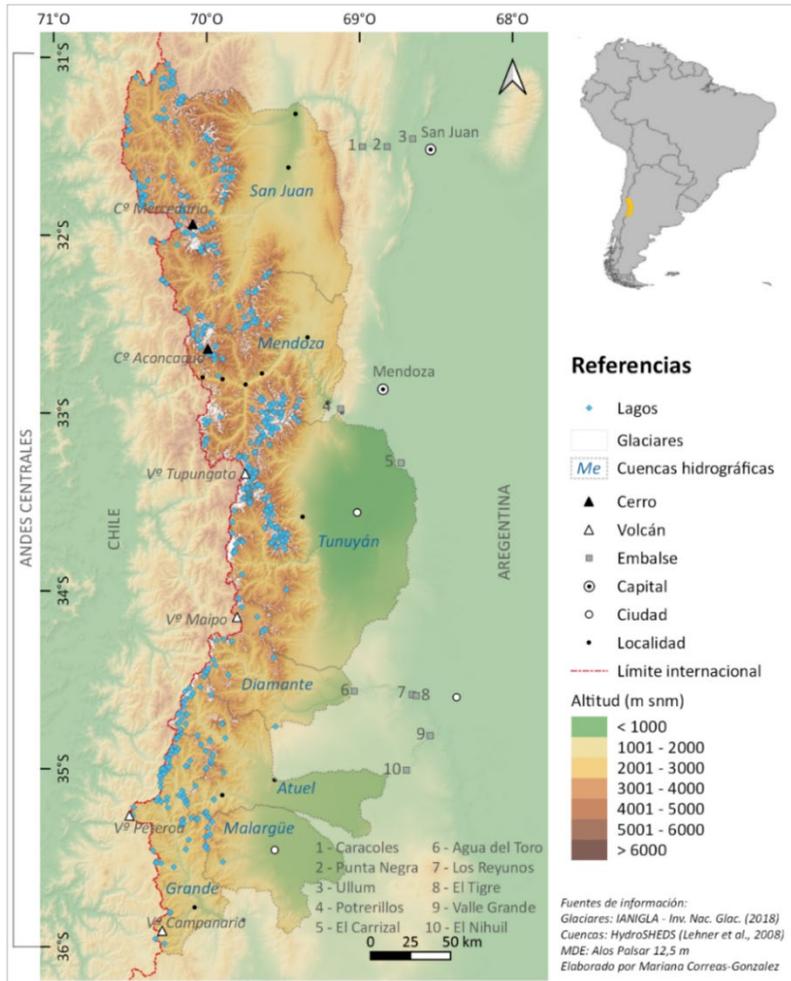


Figura 1. Localización del área de estudio que muestra la Cordillera de los Andes con la ubicación de los lagos identificados y las cuencas hidrográficas de los principales ríos. El área inventariada corresponde a la vertiente oriental de los Andes que coincide con el límite internacional al oeste y hasta la cota de 2.000 m snm al este. Se indican las principales ciudades y embalses de agua.

Entre los 28° - 33° S existe una importante actividad tectónica asociada a la subducción sub-horizontal de la placa de Nazca con registros de sismos históricos de

intensidad > 7 en la escala de Mercalli Modificada (Moreiras y Páez, 2015). Al sur de los 33° S, con una subducción normal, aparece la actividad volcánica (Ramos, 1999) (**Figura 1**). Esta actividad tectónica ha favorecido la generación de deslizamientos que bloquearon los valles, obstruyendo el normal flujo de los ríos y generando lagos aguas arriba (Moreiras et al., 2012).

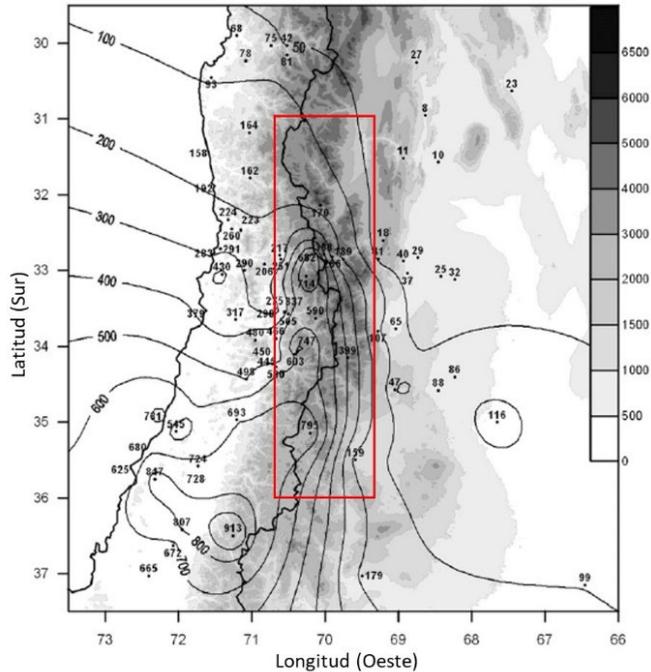


Figura 2. Distribución de las precipitaciones invernales en la región de los Andes Áridos Centrales (31-36°S). El recuadro rojo indica aproximadamente el área de estudio. Tomado y modificado de Viale y Nuñez (2011).

Las provincias de San Juan y Mendoza albergan una población total de 2,4 millones de habitantes (INDEC, 2010), concentrada mayormente en las ciudades capitales; mientras que en el sector de montaña la población se agrupa en localidades emplazadas en los fondos de los valles en coincidencia con la traza de las principales rutas. El corredor bioceánico (RN 7) atraviesa el valle del río Mendoza, es la principal vía de circulación y concentra el 65% del transporte terrestre de la región (BID, 2010).

Esta ruta alberga el paso fronterizo de Los Libertadores que junto con el paso Pehuenche (RN 226) constituyen las únicas vías de comunicación terrestres con Chile dentro del área de estudio. En general, el territorio se organiza en función de la disponibilidad del recurso hídrico a partir de oasis productivos (Zamorano, 2008). Existen diez embalses que son claves para el abastecimiento de agua y la generación hidroeléctrica (**Figura 1**).

MATERIALES Y MÉTODO

Identificación y delimitación de los lagos

El inventario de lagos se realizó de manera manual empleando imágenes satelitales Landsat 8 para el año 2020 (**Tabla 1**). Se seleccionaron imágenes correspondientes a los meses estivales a fin de evitar la cobertura nival. Las mismas fueron descargadas del sitio web <https://earthexplorer.usgs.gov/> de la United States Geological Survey (USGS, por sus siglas en inglés). Los límites de las cuencas hidrográficas corresponden al proyecto HydroSHEDS (Lehner et al., 2008) disponibles en <http://www.hydrosheds.org>.

Fecha	Número ID imagen	Path/Row	Cobertura nubosa (%)
23-03-2020	LC82320822020083LGN00	232/082	0,01
	LC82320832020083LGN00	232/083	0,14
	LC82320842020083LGN00	232/084	0,44
	LC82320852020083LGN00	232/085	0,59
27-02-2020	LC82330822020058LGN00	233/082	2,34
	LC82330832020058LGN00	233/083	13,23

Tabla 1. Listado de escenas Landsat 8 OLI (resolución espacial de 30 x 30 m) utilizadas en este estudio.

Los lagos fueron identificados en base a la inspección visual de las imágenes satelitales complementada por el cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado o *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Este índice facilita la diferenciación de

los cuerpos de agua de otras superficies basándose en el contraste de las firmas espectrales de los diferentes materiales (agua, hielo, etc.) en las distintas bandas de una imagen satelital multiespectral. Se empleó el índice NDWI propuesto por Huggel et al. (2002) detallado en la Ecuación 1 que utiliza las bandas espectrales del azul e infrarrojo cercano dado que en ellas se registran la máxima y mínima reflectancia del agua respectivamente.

$$NDWI = (B_{NIR} - B_{Blue}) / (B_{NIR} + B_{Blue})$$

Ecuación 1

Dónde: B_{NIR} corresponde a la banda del infrarrojo cercano; B_{Blue} es la banda del azul. Como resultado, se obtiene un raster en el que los píxeles correspondientes a cuerpos de agua aparecen indicados con valores de reflectancia que oscilan entre -0,60 y -0,85 (Huggel et al., 2002), aunque para el área de estudio se han observado valores que ascienden hasta -0,20, posiblemente asociado a lagos poco profundos. Para facilitar la comprobación visual de la clasificación obtenida, se realizó el refinado pancromático de las imágenes a fin de mejorar su resolución espacial de 30 a 15 m y se empleó un mapa de relieve sombreado elaborado a partir del MDE Alos Palsar (12,5 m) para descartar que pendientes sombrías fueran clasificadas como lagos. La superficie mínima mapeada es de 900 m² en base a la identificación de un pixel puro de 30 x 30 m indicado como agua por medio del NDWI. El procesamiento de las imágenes satelitales, los análisis realizados y la cartografía obtenida se realizó con el programa de libre acceso QGIS 3.10.6.

Clasificación de los lagos

Los lagos se clasifican usualmente en función de su localización, así como también de los procesos asociados a su formación. Típicamente, se reconocen tres clases principales de lagos en función del tipo de represamiento, a saber, lagos represados por deslizamientos, por glaciares o por morenas (Costa y Schuster, 1988). Esta clasificación de base ha sido adaptada a las diferentes regiones del mundo y se han agregado nuevas clases acorde a las particularidades de cada región (Korup y Tweed, 2007; Gardelle et al., 2011; ICIMOD, 2011; Emmer et al., 2015, 2016; Wilson et al., 2018). En este trabajo, los cuerpos de agua fueron clasificados según el tipo de

represamiento (**Figura 3**) agregando nuevas clases y subtipos en función de las características regionales.

A cada lago se le asignó un identificador único (ID) y se calcularon las siguientes variables: altitud, latitud, longitud, cuenca, superficie y volumen. El cálculo del área y de la altitud se realizó en base al MDE Alos Palsar. Por último, se realizó un chequeo en campo de algunos lagos a fin de verificar la clasificación realizada. Los lagos revisados fueron Laguna Blanca (31° 50'S, 69° 58'W), Horcones (32° 48'S, 69° 56'W), Diamante (34° 10'S, 69° 41'W), Atuel (34° 33'S, 70° 5'W), Las Orejas (35° S, 70° 18'W), Escondida (35° 6'S, 70° 7'W), Valle Hermoso (35° 9'S, 70° 12'W), Las Cargas (35° 10'S, 70° 19'W), Baya (35° 59'S, 70° 21'W) y Pehuenche (35° 58'S, 70° 25'W).

Cálculo de volúmenes

Finalmente, para la estimación del volumen en este trabajo empleamos un modelo empírico propuesto por Cook y Quincey (2015). Si bien esta relación fue determinada para lagos glaciares, aquí la hemos aplicado a todos los tipos de lagos inventariados, a fin de aproximar *grosso modo* el volumen contenido en los lagos (esta y otras limitaciones son abordadas en profundidad en la sección Discusión).

$$V = 2 \times 10^{-7} A^{1,3719} \quad (r^2 = 0,91) \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde V corresponde al volumen del lago (en millones m^3) y A al área (en m^2).

Clase	Definición	Sub-clase	Ref.
Lago glaciar (LG)	Represado por un glaciar de escombros	LGE	a
	Represado por un glaciar cubierto	LGC	b
	Represado por un glaciar descubierta	LGD	c
	Represado por un glaciar en surgencia	LGS	d
	Supraglaciar de termokarst	LST	e
Lago asociado a una morena (LM)	Represado por una morena lateral o frontal	LM	f
	Formado sobre la superficie <i>hummocky</i> de la morena	LHM	g
Lago asociado a erosión glaciar (LB)	Represado por una barra rocosa o afloramiento erosionado por el glaciar	LB	h
Lago represado por deslizamiento (LD)	Represado por un deslizamiento	LD	i
	Represado por flujos de detritos (abanico aluvial o coluvial)	LDT	j
Lago kárstico (LK)	Formado por disolución de rocas carbonáticas o yesíferas	LK	k
Lago volcánico (LV)	Represado por una colada de lava	LV	l
Lago mixto (LMX)	Dos o más elementos retienen el agua del lago	LMX	m

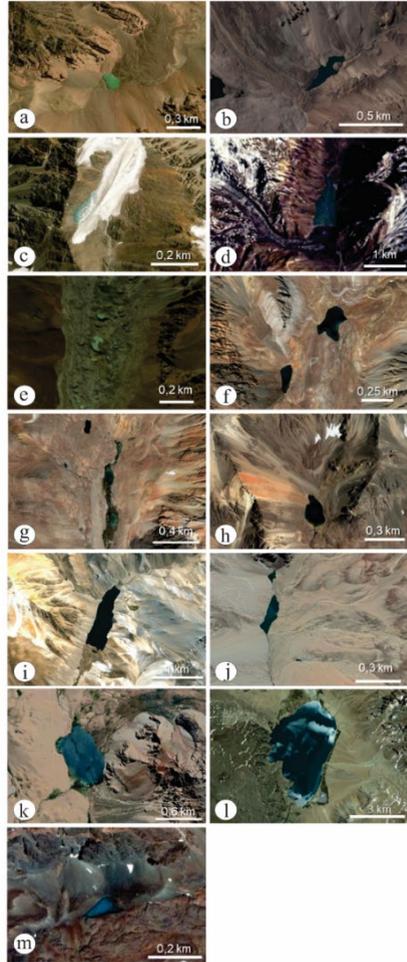


Figura 2. Clasificación de lagos propuesta según su represamiento e imágenes ejemplificativas de cada subtipo. Nótese que las imágenes están fuera de escala.

RESULTADOS

Distribución de los lagos por cuenca

El inventario de lagos de los Andes Centrales de Argentina (31°-36° S) arrojó un total de 641 cuerpos de agua para el año 2020. Los lagos identificados sumaron una superficie total de 24,78 km² y un volumen aproximado de 1.345,59 hm³. Todos los resultados aquí referidos corresponden al fin del verano del año 2020.

En la **Figura 4** se presenta la distribución de los cuerpos de agua teniendo en cuenta la tipología de lago y los volúmenes correspondientes a cada uno de ellos. Entre los 31°-32° S todos los tipos de lagos están presentes, a excepción del tipo kárstico (LK), y existe al menos una decena de lagos cuyos volúmenes oscilan entre 1 y 3,4 hm³. En la franja correspondiente a los 32°-34° S se observa un predominio de pequeños lagos tipo LST (0,001 a 0,029 km²) cuyo volumen promedio es 0,04 hm³. A los 34° S destaca la presencia de un único lago de origen volcánico (Laguna del Diamante) cuyo volumen representa el máximo identificado en la zona (1.152,7 hm³). Por último, al sur de los 34° S se observa nuevamente una diversificación de los tipos de lagos y una mayor frecuencia de lagos cuyos volúmenes se encuentran comprendidos entre los 3,4 a 15,1 hm³ y los 15,1 a 28,3 hm³. La **Figura 4.a** indica el volumen acumulado en cada tipología de lago. Destaca que los lagos tipo LV aportan el 87,7% del volumen total, de los cuales 85,7 % corresponden a la Laguna del Diamante. Las demás clases representan en conjunto el 12,3% del volumen total, correspondiendo a los lagos represados por deslizamientos un volumen de 56,4 hm³ (4,19 %) seguido de los represamientos por morenas con 43,38 hm³ (3,22 %) y los lagos de tipo kársticos con 31,1 hm³ (2,31 %). Por último, las tipologías de lagos LB, LG y LMX computan un volumen total de 34,58 hm³ que representa 2,57% del volumen global.

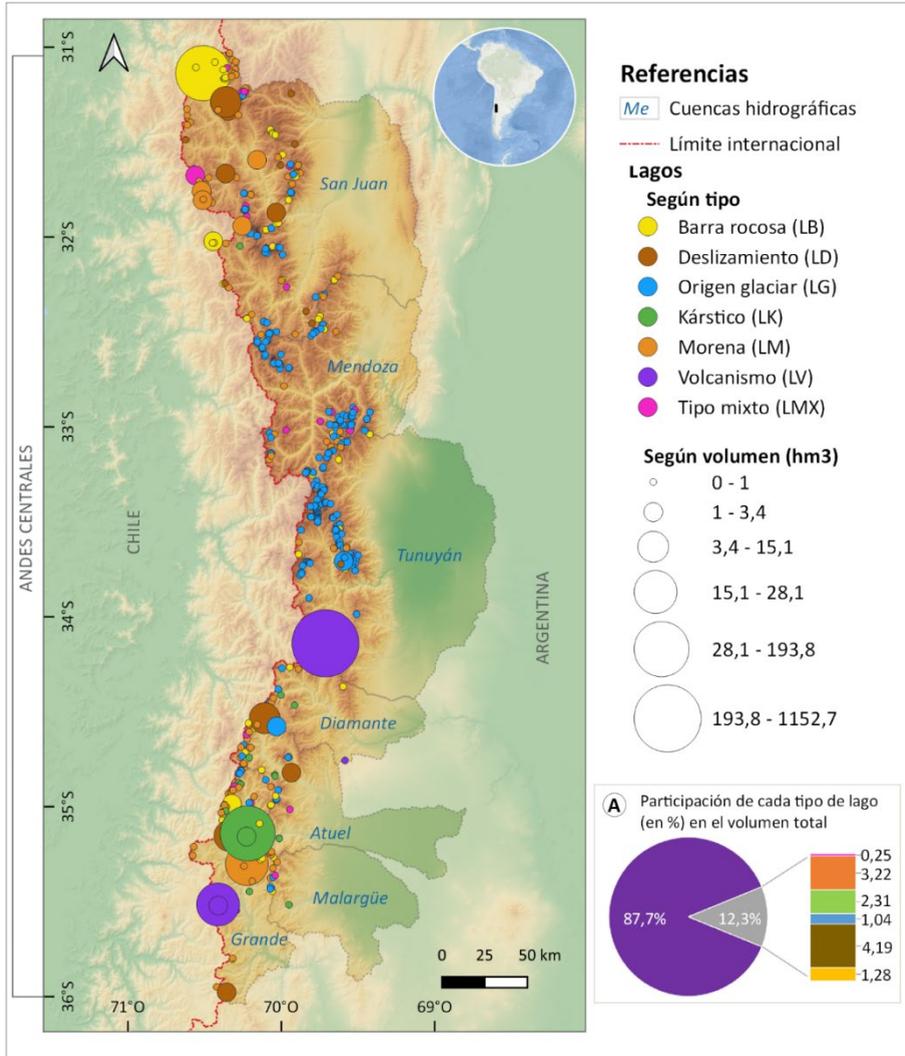


Figura 3. Distribución de las lagunas identificadas en los Andes Centrales de Argentina según tipo y volumen.

Relaciones inversas se encuentran cuando se analiza el número de lagos existentes en cada cuenca con respecto a los volúmenes represados. Así, las cuencas de los ríos que presentan la mayor cantidad de lagos no represan los mayores volúmenes de agua en sus lagunas (**Figura 5**). Los lagos de las cuencas de los ríos San Juan, Tunuyán y Mendoza albergan 47,94 hm³ (3,56 %); 9,61 hm³ (0,71 %) y 5,81 (0,43 %) hm³, respectivamente, implicando pequeños porcentajes dentro del volumen total. En cambio, en forma contrastante, las cuencas de los ríos Grande (N = 98) y Atuel (N = 45) poseen volúmenes más significativos estimados en 106,11 hm³ (7,89%) y 20,34 hm³ (1,51%) respectivamente y ganan relevancia al presentar mayores volúmenes de agua con un menor número de lagos. Por último, destaca nuevamente la importancia de la laguna del Diamante en la cuenca homónima. Sin embargo, este análisis referido al volumen de lago por cuenca debe tomarse con precaución, ya que las superficies de las cuencas son muy variables, en un rango que va de 15.545,6 km² (cuenca del río San Juan) a 4.940,6 km² (cuenca del río Grande).

Si se analiza la distribución relativa de cada tipo de lago por cuencas (**Figura 5**), se observa que los mismos resultan principalmente de origen glaciar (LG) en las cuencas de los ríos Tunuyán (N = 146; 88 %) y Mendoza (N = 106; 79,1 %); mientras en las cuencas de los ríos Atuel y Grande predominan los lagos represados por morenas (LM) con 17 (37,8 %) y 47 (48 %) ejemplares, respectivamente. Un caso distinto es la cuenca del río San Juan donde el número de lagos represados por glaciares (N = 57; 32,6 %) o morenas (N = 59; 33,7 %) es similar y los lagos represados por deslizamientos (LD) representan el 6,28 % del total de la cuenca. En tanto, en la cuenca del río Diamante y al sur de lo 34º S, los cuerpos de agua parecen estar más forzados por la geología ya que se asocian a los niveles jurásicos evaporíticos de la cuenca Neuquina y los complejos volcánicos, dando lugar a la aparición de lagos kársticos (LK) y volcánicos (LV) respectivamente. Por último, los lagos represados por una barra rocosa (LB) asociados a erosión glaciar son más numerosos en las cuencas de los ríos San Juan (N = 37; 21,1%) y Grande (N = 18; 18,3%).

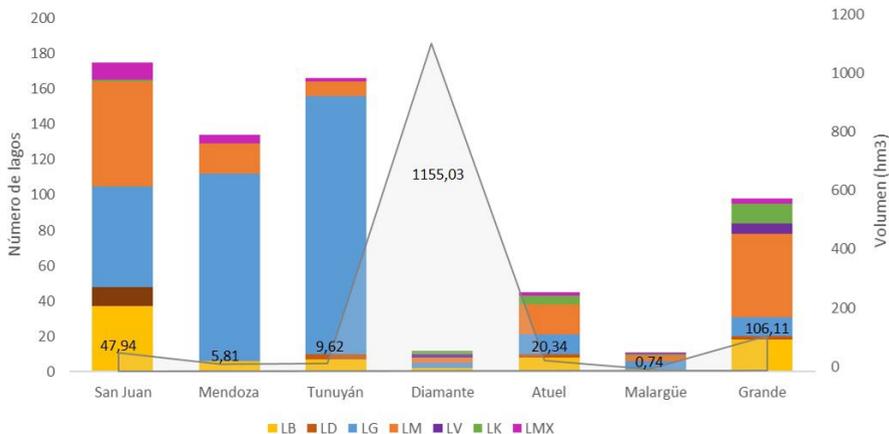


Figura 4. Distribución relativa de los lagos por tipo y cuenca. La línea gris indica el volumen de agua acumulado por cuenca.

Distribución de los lagos según tipo de represamiento

El volumen de agua retenido por tipo de lago no depende de la frecuencia de cuerpos de agua observada para cada tipo (**Figura 6**). Así, si bien, los lagos de origen glaciar (LG) son los más importantes en cantidad, no son los que retienen los mayores volúmenes de agua. Esto se debe principalmente a que en esta categoría se han incluido los lagos asociados a las facies de termokarst que se caracterizan por tener pequeñas dimensiones. En contraste, una pequeña cantidad de lagos volcánicos (LV) representa el mayor volumen de agua retenido, debido fundamentalmente a la envergadura de la Laguna del Diamante. Por otra parte, se observa que los lagos represados por deslizamientos (LD), en el sexto lugar en el ranking según número de lagos, retienen un volumen de agua más importante que cada una de las categorías de lagos que reportan mayor frecuencia: lagos represados por morenas (LM), lagos represados por una barra rocosa (LB), lagos mixtos (LMX) y lagos kársticos (LK). Dejando de lado los lagos volcánicos, los lagos represados por deslizamientos representan una tercera parte del volumen total.

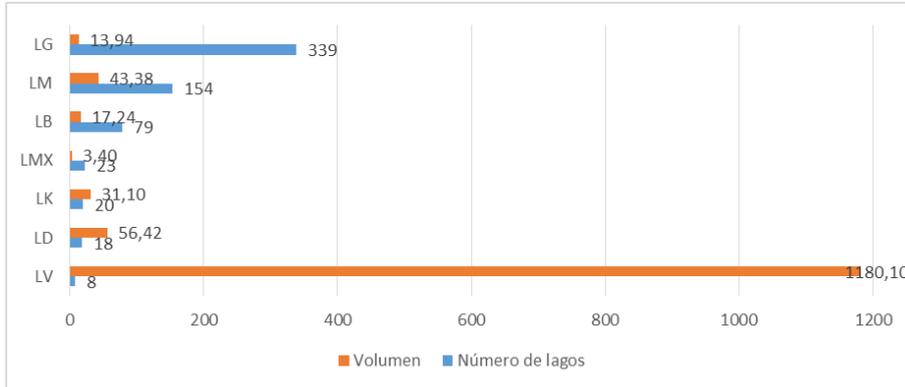


Figura 5. Número de lagos y volumen (hm³) agrupado por tipo de represamiento para los Andes Centrales Argentina (31° - 36° S). Año 2020.

La distribución de los volúmenes por tipo de lago es muy heterogénea y se observa en general una asimetría positiva (**Figura 7**), siendo más marcada en los lagos represados por morenas (LM), kársticos (LK) y volcánicos (LV) ya que el volumen promedio (línea punteada paralela a la caja) es mayor que la mediana. En el caso de los lagos LV, se observa el valor atípico correspondiente a la Laguna del Diamante, afectando fuertemente el volumen promedio de este tipo de lagos. Algo similar sucede con los lagos LK, donde el volumen promedio de 1,55 hm³, es muy superior al volumen contenido por el 50% central de la población (entre 0,014 y 0,060 hm³). El 50% central de la población de lagos represados por deslizamientos (LD) presenta volúmenes entre 0,15 y 2,68 hm³, con una dispersión importante de las observaciones indicadas por las dimensiones de la caja, que se observan también para los lagos tipo LMX y más marcadamente para los lagos LV.

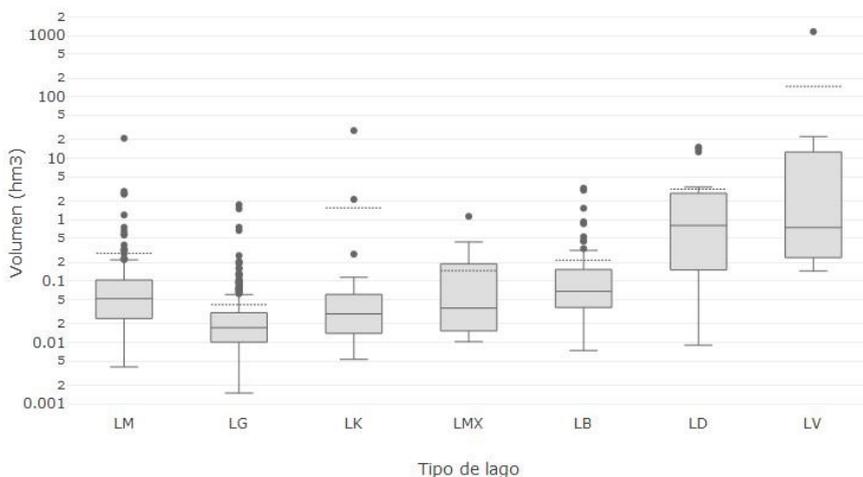


Figura 6. Diagrama de cajas y bigotes que muestra la variabilidad en la distribución de los volúmenes según tipo de lago. La línea punteada corresponde al promedio, los puntos a los valores extremos. Nótese que el eje de las ordenadas está en escala logarítmica.

Distribución altitudinal de los lagos

Respecto a la distribución altitudinal, 50% de los lagos se encuentra por encima/debajo de los 3.951 m snm, en un rango altitudinal de 2.004 m snm a 5.711 m snm. La mayor cantidad de lagos (N=249; 38,85%) se ubican en el rango de alturas de 4.000 a 4.500 m snm, seguidos en segundo lugar de importancia con una frecuencia de 142 (22,15%) para el rango altitudinal de 3.500 a 4.000 m snm (**Figura 8**). Por último, la altura promedio de los lagos es 3.978 m snm. Este análisis revela claramente la distribución de las lagunas en las zonas más altas de la cordillera en el dominio glaciar y periglacial de los Andes y destaca la importancia que tienen los lagos en los ecosistemas de altura donde el agua se encuentra en estado sólido durante los meses invernales y parte del otoño, pero en estado líquido durante el verano.

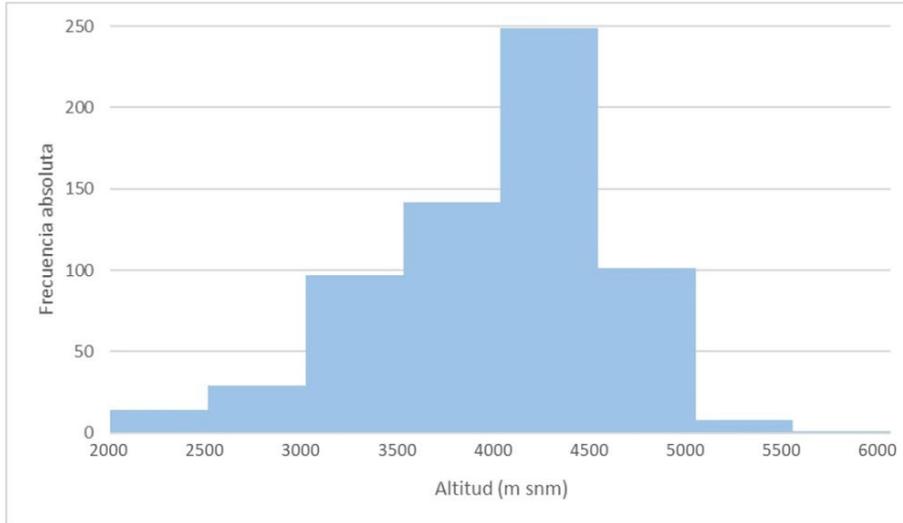


Figura 7. Histograma con la distribución de frecuencias de lagos según fajas altitudinales de 500 m entre los 2000 - 6000 m snm.

Relación lagos naturales vs. embalses artificiales

Poniendo en perspectiva el recurso hídrico asociado a lagos frente al agua contenida en embalses artificiales (**Figura 9a**), se observa que los primeros almacenan un volumen de agua equivalente al 41% del volumen contenido en los diez embalses artificiales más importantes de la región. Si se discrimina por cuencas (**Figura 9b**), se observa que el volumen contenido por lagos es importante para las cuencas de los ríos Grande y Malargüe ya que no poseen ningún embalse. Destaca claramente la cuenca del río Diamante que almacena en sus tres represas la mitad del volumen contenido en la Laguna del Diamante (LV). Para las demás cuencas, los lagos retienen pequeños volúmenes en relación a la cantidad de agua contenida en sus embalses.



Figura 8. a. Volumen de agua contenido en embalses artificiales vs. lagos para los Andes Centrales de Argentina. b. Ídem, pero discriminando por cuenca. Fuente: Organismo Regulador de Seguridad de Presas (ORSEP); Empresa Provincial Sociedad del Estado (EPSE) San Juan y este trabajo.

DISCUSIÓN

En la región de los Andes Centrales de Argentina, los lagos de montaña han sido tradicionalmente desestimados e ignorados. Ello se evidencia por ejemplo en que solo tres decenas de cuerpos de agua han sido identificados previamente en los mapas oficiales del IGN y/o en la falta de un inventario del recurso lacustre, a excepción del inventario de lagos glaciares desarrollado por Wilson et al., (2018). El presente trabajo busca remediar esta situación y aporta nuevos conocimientos acerca de la distribución espacial de los mismos en la vertiente oriental de los Andes entre los 31° y los 36°S.

Los resultados aquí presentados proveen el primer inventario general de lagos según su represamiento para la región enfatizando la importancia de conocer todos los cuerpos de agua existentes cuando se busca evaluar el recurso lacustre. El inventario de lagos clasificados en función del represamiento pone en evidencia la singularidad del ambiente de montaña en la región caracterizada por un extenso sistema de glaciares, una importante actividad tectónica y características geológicas únicas que condicionaron la génesis de los lagos existentes.

A nivel mundial, se observa un predominio de inventarios de lagos de origen estrictamente glaciar centrados principalmente en conocer su evolución espacio-temporal en el contexto del retroceso de los glaciares asociado al cambio climático (Gardelle et al., 2011; ICIMOD, 2011; Emmer y Vilímek, 2014; Iribarren Anacona

et al., 2015; Harrison et al., 2018; Shugar et al., 2020). Estos estudios ponen en evidencia la relación existente entre lagos glaciares y dinámica glaciar, incluyendo en algunos casos el análisis de los peligros naturales asociados a la criósfera y los posibles riesgos que implican para las sociedades. Sin embargo, en la región de los Andes Centrales se carecía de un inventario general de lagos que reconociera la importancia de otros tipos de represamientos no vinculados a glaciares, tales como los lagos volcánicos, de origen kárstico o represados por deslizamientos, que sí son contemplados en nuestro estudio.

El análisis de siete variables claves en los lagos estudiados (número; tipo de lago represado; área, volumen; distribución altitudinal, latitudinal y por cuencas) permitió caracterizar la distribución espacial de estos y estimar el recurso hídrico asociado a los mismos en función del tipo de lago y de su ubicación por cuenca. Reportamos en nuestro estudio un total de 641 lagos, que representan una superficie de 24,8 km² y un volumen estimado en 1.345,6 hm³. Este tipo de inventario no había sido realizado para la región con anterioridad, a excepción del único antecedente presentado recientemente por Wilson et al. (2018) que reporta un inventario de lagos de origen exclusivamente glaciar para la región de los Andes Centrales de Argentina y Chile. En dicho inventario los autores identificaron en base a imágenes satelitales Landsat del año 2016, un total de 313 lagos para ambas vertientes de los Andes, los cuales son agrupados en tres clases principales (lagos represados por morenas, por hielo glaciar o por una barra rocosa). Dichos lagos computaban un área total de 6,5 km² y un volumen equivalente a 73 hm³. Observando estos datos en relación con los reportados en nuestro estudio para las mismas categorías de lagos (LM, LG y LB) y solo en la vertiente oriental de los Andes, hemos identificado 572 cuerpos de agua que computan un área de 60,24 km² y un volumen 74,6 hm³. Si consideramos todos los lagos relevados en nuestro estudio, vemos que hemos hallado casi el doble, una superficie lacustre cuatro veces mayor y un volumen 18 veces superior; ampliando notablemente el conocimiento del recurso en la región.

Respecto al cálculo de los volúmenes, el modelo empírico propuesto Cook y Quincey (2015) es válido solo para lagos de origen glaciar cuyas áreas oscilen entre 28.000 y 19,5 x 10⁶ m², razón por la cual los volúmenes aquí calculados para otros tipos de

lagos (LD, LV, LK, LB y LMX) así como para aquellos cuerpos lacustres que se encuentran por fuera de los límites del modelo, son meramente descriptivos y deben ser tomados con sumo recaudo. Además, Cook y Quincey (2015) advierten que el uso del modelo empírico propuesto puede ser inadecuado para los casos de lagos supraglaciares, lagos represados por morenas y lagos originados por la obstrucción de un valle por el avance de un glaciar en surgencia. Sin embargo, dada la extensión del área de estudio (ca. 30.000 km²), el gran número de lagos inventariados y puesto que no existen estudios batimétricos en la región, se realizó el cálculo empírico a los fines de aproximar un volumen y poder comparar la importancia relativa de cada tipo de lago. Teniendo esto en consideración, es necesario destacar que del total de lagos inventariados solo un 3% (n = 19) cumple con los requisitos exigidos por el modelo para que los resultados sean válidos. Este subgrupo de lagos posee un volumen estimado en 116,21 hm³, de los cuales 0,36 hm³ corresponden a los de origen glaciar (LG) y 115,85 hm³ a los represados por morenas. De esto se desprende que 97 % de los lagos inventariados no cumple con los requisitos del modelo empírico empleado por lo que se recomienda a fines de establecer volúmenes más certeros, realizar estudios de detalle de batimetría. Esto debería hacerse en al menos uno o dos lagos de cada tipo a los fines de establecer una base de datos batimétricos que refleje las particularidades de los lagos existentes en la región.

Si bien hemos comparado los volúmenes almacenados en los lagos con relación a los embalses, este análisis es válido solo a los fines descriptivos y a fin de ilustrar la cantidad de agua retenida en los lagos con relación a los embalses. Sin embargo, cabe destacar que las posibilidades reales de aprovechamiento del agua contenida en las lagunas es muy limitada dada la dispersión y la ubicación remota de las mismas, mientras que los embalses han sido diseñados con el fin específico de almacenar el recurso en épocas de mayor escurrimiento a fin de redistribuirlo en épocas de escasez. No obstante, los cuerpos lacustres serían esenciales como reguladores naturales del recurso hídrico, así como para el sostenimiento de los ecosistemas andinos de altura.

Las regiones montañosas enfrentarán numerosas y variadas mutaciones asociadas al CCG, entre las que destaca la retracción de los glaciares y un aumento del número de lagos y sus volúmenes (Clague et al., 2012; Iribarren Anacona et al., 2015),

elevación de isoterma de 0°C y consecuente degradación del permafrost (Drewes et al., 2018) y mayor susceptibilidad de deslizamientos capaces de represar ríos (Haeberli et al., 2016), por lo que más investigación es requerida a fin de comprender mejor la evolución pasada y futura de los ambientes de montaña. En el área de estudio, una gran cantidad de lagos supraglaciares vinculados a glaciares con facies de termokarst (LST), concuerda o podría entenderse en el contexto del calentamiento global mientras que los lagos volcánicos (LV), kársticos (LK) y represados por deslizamientos (LD) se asocian puramente a la geología y tectónica de la región. No obstante, la ocurrencia de lagos tipo LD estaría asociada también al efecto de la deglaciación andina que favorece los colapsos de laderas (Moreiras et al., 2020).

Por otro lado, la (in)estabilidad de estos lagos está asociada no solo al contexto geomorfológico del cuerpo de agua, sino también de manera intrínseca al tipo de represamiento. En este sentido, Costa y Schuster (1988) sostienen que, de todos los tipos de lagos existentes, aquellos represados por deslizamientos, por hielo glaciar o por morenas son considerados los más peligrosos en cuanto a su potencial colapso total o parcial. En los Andes Centrales, la ocurrencia de crecidas abruptas asociadas al colapso de lagos glaciares (King, 1934; Helbling, 1935; Bruce et al., 1987; Correas-Gonzalez et al., 2020) y de lagos represados por deslizamientos (D'odorico et al., 2009; Kozlowski y Folguera, 2009; Perucca y Esper Angillieri, 2009; Penna et al., 2013) así como el extenso registro de procesos de remoción en masa (Espizúa y Bengochea, 2002; Moreiras, 2006; Jeanneret et al., 2018; Moreiras et al., 2021) pone de manifiesto la importancia de este tipo de procesos para la región. Teniendo esto en cuenta, el inventario de lagos según represamiento aquí presentado constituye un insumo clave para el desarrollo de futuras investigaciones orientadas a la identificación de lagos potencialmente peligrosos.

Finalmente, destacamos la importancia que representan los lagos para los ecosistemas de altura como para los sistemas de recarga a los ríos andinos que abastecen a los oasis productivos de la región cuyana. El conocimiento detallado y actualizado al año 2020 del recurso lacustre constituye un valioso aporte para sustentar las decisiones que se tomen a nivel gubernamental en lo que respecta a la gestión del recurso hídrico. Por ello, sería conveniente evaluar la posibilidad de

implementar nuevos y más eficientes mecanismos para almacenar el agua alterando en el menor grado posible el equilibrio de los ecosistemas y/o la continuidad ecológica de los ríos. Este hecho cobra vital importancia en la región de los Andes Centrales que se ha visto afectada por un marcado retroceso glaciar y una sequía extrema durante los últimos 10 años (Masiokas et al., 2009; Garreaud et al., 2017; Garreaud et al., 2019, Masiokas et al., 2020) poniendo en jaque el desarrollo de los oasis productivos en crecimiento que requieren necesariamente del aprovisionamiento del recurso hídrico para la producción agropecuaria, la generación de energía y el abastecimiento de la población. En vistas de ello, la preservación de los ambientes de montaña que albergan el recurso hídrico asociado a lagos surge como una necesidad primaria.

CONCLUSIONES

El inventario releva un total de 641 lagos, incluyendo numerosos cuerpos de agua que no habían sido incluidos en estudios previos o que estaban subrepresentados en los mapas oficiales, y contribuye al conocimiento del estado del recurso hídrico lacustre en los Andes Centrales de Argentina (31° – 36° S) para el año 2020. Los lagos cubren una superficie de 24,78 km² y se estimó un volumen total de 1.345,6 hm³, lo cual equivale aproximadamente al 42% del volumen almacenado en los embalses artificiales de la región. Este recurso hídrico preservado en la alta montaña no está exclusivamente asociado a lagos de origen glaciar. En primer lugar, es notorio que el lago volcánico de la Laguna del Diamante concentre el 85,7% del volumen total estimado. Por otra parte, si bien los lagos de origen glaciar (LG) representan el 52,9% (N = 339) del total de lagos inventariados, estos aportan el 1,03% (13,9 hm³) del volumen ya que una novena parte de los mismos corresponde a pequeños lagos supraglaciares asociados a facie de termokarst sobre glaciares cubiertos en proceso de degradación. En cambio, los lagos represados por deslizamientos (LD) constituyen 2,8% (N=18) de la población total de lagos y aportan un 4,2% (56,4 hm³) del volumen total, constituyendo el segundo tipo de lago en importancia en cuanto al volumen almacenado. Nuestros resultados constituyen el primer inventario global de lagos para la región de los Andes Centrales y destacan la importancia de los mismos tanto para los ecosistemas de altura como para el sistema de recarga de los ríos andinos. Este recurso hídrico cobra vital importancia en los ambientes de montaña por lo que

recomendamos fuertemente su protección a fin de preservar su función ecosistémica.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte de la tesis doctoral de M. Correas-Gonzalez quien cuenta con una beca doctoral de CONICET. El financiamiento para la investigación proviene del PIP 11220150100191CO cuyo investigador responsable es S. Moreiras. Las autoras queremos agradecer expresamente a Santiago Villar por acompañarnos a caballo en la campaña de 2020 y al Consorcio Las Leñas por permitir el acceso a las lagunas de Valle Hermoso. Extendemos nuestro agradecimiento al Ing. Rodolfo Iturraspe y a un revisor anónimo por las valiosas contribuciones que permitieron mejorar nuestro trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Aggarwal, S., Rai, S. C., Thakur, P. K. & Emmer, A. (2017). Inventory and recently increasing GLOF susceptibility of glacial lakes in Sikkim, Eastern Himalaya. *Geomorphology*, 295 (Supplement C), 39-54. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.014>

Bajracharya, S. R., Mool, P. K. & Shrestha, B. R. (2007). Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacial lakes: Case studies on GLOF and associated hazards in Nepal and Bhutan. International Centre for Integrated Mountain Development: Kathmandu.

Banco Interamericano de Desarrollo - BID. (2010). *Estudio binacional para la optimización del paso de frontera sistema Cristo Redentor*, [Resumen Ejecutivo]. Banco Interamericano de Desarrollo (p.29 Recuperado de: <https://www.mininterior.gov.ar/planificacion/pdf/Resumen-Ejecutivo-Cristo-Redentor.pdf>

Bruce, R. H., Cabrera, G. A., Leiva, J. C., Lenzano, L. E. (1987). The 1985 surge and ice dam of Glaciar Grande del Nevado del Plomo, Argentina. *Journal of Glaciology*, 33, 131–132. doi: <https://doi.org/10.1017/S0022143000005475>.

Buckel, J., Otto, J. C., Prasicek, G. & Keuschnig, M. (2018). Glacial lakes in Austria—Distribution and formation since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 164, 39-51. doi: 10.1016/j.gloplacha.2018.03.003

Carrivick, J. L. & Tweed, F. S. (2013). Proglacial lakes: Character, behaviour and geological importance. *Quaternary Science Reviews*, 78, 34-52.

Catalan, J., Camarero, L., Felip, M., Pla, S., Ventura, M., Buchaca, T., Bartumeus, F., de Mendoza, G., Miró, A., Casamayor, E. O., Medina-Sánchez, J. M., Bacardit, M., Altuna, M., Bartrons, M. & Diaz de Quijano, D. (2006). The mountain lakes of the Pyrenees. *Limnetica*, 25 (1-2), 33.

Clague, J., Huggel, C., Korup, O. & McGuire, B. (2012). Climate change and hazardous processes in high mountains. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 69(3), 328-338. doi: <https://doi.org/10.5167/uzh-77920>

Cook, S. J. & Quincey, D. J. (2015). Estimating the volume of Alpine glacial lakes. *Earth Surface Dynamics*, 3(4), 559-575. doi: <https://doi.org/10.5194/esurf-3-559-2015>

Cook, S. J., Kougkoulos, I., Edwards, L. A., Dortch, J. & Hoffmann, D. (2016). Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. *The Cryosphere*, 10(5), 2399-2413. doi: <https://doi.org/10.5194/tc-10-2399-2016>

Correas-Gonzalez, M., Moreiras, S. M., Jomelli, V., & Arnaud-Fassetta, G. (2020). Ice-dammed lake outburst flood risk in the Plomo basin, Central Andes (33° S): Perspectives from historical events. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(1), 223-249. <https://doi.org/10.18172/cig.4219>

Costa, J. E. & Schuster, R. L. (1988). The formation and failure of natural dams. *Geological society of America bulletin*, 100(7), 1054-1068. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2)

D'odorico, P. E., Pérez, D. J., Sequeira, N., & Fauqué, L. (2009). El represamiento y aluvión del río Santa Cruz, Andes Principales (31° 40'S), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(4): 713-724.

Drewes, J., Moreiras, S. & Korup, O. (2018). Permafrost activity and atmospheric warming in the Argentinian Andes. *Geomorphology*, 323, 13-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.005>

Emmer, A. & Vilímek, V. (2014). New method for assessing the susceptibility of glacial lakes to outburst floods in the Cordillera Blanca, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3461-3479.

Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J. & Cochachin, A. (2014). Glacier retreat, lakes development and associated natural hazards in Cordillera Blanca, Peru. En W. Shan, Y. Guo, F. Wang, H. Marui, & A. Strom (Eds.), *Landslides in cold regions in the context of climate change* (pp. 231-252). Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_17

Emmer, A., Merkl, S. & Mergili, M. (2015). Spatiotemporal patterns of high-mountain lakes and related hazards in western Austria. *Geomorphology*, 246, 602-616. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.032>

Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilímek, V. & Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *Catena*, 147, 269-279.

Emmer, A., Harrison, S., Mergili, M., Allen, S., Frey, H. & Huggel, C. (2020). 70 years of lake evolution and glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for the future. *Geomorphology*, 365, 107-178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107178>

Empresa Provincial Sociedad del Estado - EPSE. Recuperado de: www.epsesanjuan.com.ar. Último acceso: 26 /07/2021

Espizúa, L. E., & Bengochea, J. D. (1990). Surge of Grande del Nevado Glacier (Mendoza, Argentina) in 1984: Its Evolution through Satellite Images. *Geografiska Annaler*, 72A (3-4), 255-259. <https://doi.org/10.2307/521153>.

Espizua, L. E., & Bengochea, J. D. (2002). Landslide Hazard and Risk Zonation Mapping in the Río Grande Basin, Central Andes of Mendoza, Argentina. *Mountain Research and Development*, 22(2), 177-185. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2002\)022\[0177:LHARZM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2002)022[0177:LHARZM]2.0.CO;2)

- Gardelle, J., Arnaud, Y. & Berthier, E. (2011). Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. *Global and Planetary Change*, 75(1), 47-55. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.10.003>
- Garreaud, R.D.; Alvarez-Garretón, C.; Barichivich, J.; Boisier, J.P.; Christie, D.; Galleguillos, M.; Le-Quesne, C.; McPhee, J.; Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6307-6327, doi: <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>.
- Garreaud, R.D.; Boisier, J.P.; Rondanelli, R.; Montecinos, A.; Sepúlveda, H.H.; Veloso-Aguila, D. (2019). The central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.* 40, 421-439, doi: <https://doi.org/10.1002/joc.6219>.
- Haerberli, W., Buetler, M., Huggel, C., Friedli, T. L., Schaub, Y. & Schleiss, A. J. (2016). New lakes in deglaciating high-mountain regions—opportunities and risks. *Climatic change*, 139(2), 201-214.
- Haerberli, W., Clague, J. J., Huggel, C. & Kääh, A. (2008). Hazards from lakes in high-mountain glacier and permafrost regions: Climate change effects and process interactions. *Avances de la Geomorfología en España, 2010*, 439-446.
- Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C., Reynolds, J., Shugar, D. H., Betts, R. A., Emmer, A., Glasser, N., Haritashya, U. K. & Klimeš, J. (2018). Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, 12, 1195-1209. doi: <https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>
- Helbling, R. (1935). The origin of the Río Plomo ice-dam. *The Geographical Journal*, 85(1), 41-49.
- Huggel, C., Kääh, A., Haerberli, W., Teysseire, P. & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 316-330. doi: <https://doi.org/10.1139/t01-099>
- Huggel, C., Clague, J. J. & Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(1), 77-91
- IANIGLA-Inventario Nacional de Glaciares. (2018). *Resumen ejecutivo de los resultados del Inventario Nacional de Glaciares* (p. 27). IANIGLA-CONICET, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Recuperado de: http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/?page_id=2571
- International Center for Integrated Mountain Development - ICIMOD. (2011). *Glacial lakes and glacial lake outburst floods in Nepal*. ICIMOD. pp. 109.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos - INDEC (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010*. Argentina. Recuperado de: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135>
- Iribarren Anaconda, P., Mackintosh, A. & Norton, K. P. (2015). Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: Lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 2-21. doi: <https://doi.org/10.1002/esp.3524>
- Jeanneret, P., & Moreiras, S. M. (2018). Inventario de procesos de remoción en masa en la cuenca baja del Río Blanco (31°S), Andes Centrales Argentinos. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 35(3), 215-227. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.787>

- King, W. D. V. O. (1934). The Mendoza River Flood of 10-11 January 1934-Argentina. *The Geographical Journal*, 84(4), 321-326. <https://doi.org/10.2307/1786696>.
- Korup, O. & Tweed, F. (2007). Ice, moraine, and landslide dams in mountainous terrain. *Quaternary Science Reviews*, 26(25-28), 3406-3422. doi: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.10.012>
- Kozłowski, E. N., & Folguera, A. (2009). Primer registro histórico de una avalancha de rocas en los Andes argentinos: Región de la laguna Baya en los Andes mendocinos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(1), 233-235.
- Lauro, C., Vich, A. I. J. & Moreiras, S. M. (2019). Streamflow variability and its relationship with climate indices in western rivers of Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 64(5), 607-619. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1594820>
- Lehner, B., Verdin, K. & Jarvis, A. (2008). *Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales* - HydroSHEDS. Recuperado de: <https://www.hydrosheds.org/>
- Lliboutry, L. (1998). Glaciers of South America. Glaciers of Chile and Argentina. En *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: Vol. U.S. Geological Survey Professional Paper 1386*. USGS. <https://pubs.usgs.gov/pp/p1386i/chile-arg/intro.html>
- Masiokas, M. H., Rivera, A., Espizua, L. E., Villalba, R., Delgado, S., & Aravena, J. C. (2009). Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3), 242-268.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Montaña, E., Betman, E., Christie, D., Le Quesne, C. y Mauget, S. (2013). Recent and historic Andean snowpack and streamflow variations and vulnerability to water shortages in central-western Argentina. En R. Pielke, *Climate Vulnerability*, Vol. 5, 213-227. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00522-0>
- Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera Ibáñez, A., Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussailant, I., & MacDonell, S. (2020). A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>
- Mergili, M., Müller, J. P. & Schneider, J. F. (2013). Spatio-temporal development of high-mountain lakes in the headwaters of the Amu Darya River (Central Asia). *Global and Planetary Change*, 107, 13-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.04.001>
- Moreiras, S. M. (2006). Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina: Associated risk and future scenario. *Quaternary International*, 158(1), 110-121.
- Moreiras S.M., Lauro C. & Mastrantonio L. (2012). Stability analysis and morphometric characterization of palaeo-lakes of the Benjamin Matienzo Basin- Las Cuevas River, Argentina. *Natural Hazards*, 62 (2): 593-611. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0095-7>
- Moreiras, S. M. & Páez, M. S. (2015). Historical damage and earthquake environmental effects related to shallow intraplate seismicity of central western Argentina. *Geological Society, London, Special Publications*, 399(1), 369-382. doi: <https://doi.org/10.1144/SP399.6>

Moreiras, S. M., Jeanneret, P., Junquera, S., Correas-Gonzalez, M., & Moragues, S. (2020). Colapsos de morenas posiblemente asociados a la deglaciación pleistocena en los Andes Centrales de Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 77(1), 13.

Organismo Regulador de Seguridad de Presas - ORSEP. www.argentina.gob.ar/orsep/registro-de-presas-fiscalizadas/regional-cuyo-centro. Último acceso: 26 /07/2021

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Penna, I. M., Derron, M.-H., Volpi, M., & Jaboyedoff, M. (2013). Analysis of past and future dam formation and failure in the Santa Cruz River (San Juan province, Argentina). *Geomorphology*, 186: 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.011>

Perucca, L. P., & Esper Angillieri, M. Y. (2009). Evolution of a debris-rock slide causing a natural dam: The flash flood of Río Santa Cruz, Province of San Juan—November 12, 2005. *Natural Hazards*, 50(2): 305-320. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9341-4>

Prieto, M. del R. (1986). The glacier dam on the Rio Plomo: A cyclic phenomenon? *Zeitschrift fur Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 22(1), 73-78.

Ramos, V. A. (1999). Rasgos estructurales del territorio argentino. *Geología Argentina*, 29(24), 15-75.

Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U. K., Kargel, J. S., Watson, C. S., Kennedy, M. C., Bevington, A. R., Betts, R. A., Harrison, S. & Strattman, K. (2020). Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4>

Tapia Baldis, C. C. & Trombotto, D. T. (2015). Cinturones altitudinales criogénicos en la cuenca del río Bramadero, San Juan, Argentina. *Acta geológica lilloana*. 27(2): 146-158.

Trombotto, D. (2003). Mapping of permafrost and the periglacial environments, Cordón del Plata, Argentina. En: *8th International Conference on Permafrost*. 161-162., 21-25 Julio de 2003. Zürich, Switzerland

Trombotto Liaudat, D., Lenzano, M. G., & Castro, M. (2012). Inventory and Monitoring of Rock Glaciers and Cryogenic Processes in the Central Andes of Mendoza, Argentina: Birth and Extinction of a Periglacial Lake. En K. M. Hinkel (Ed.), *Proceedings on the Tenth International Conference on Permafrost*: Vol. I, 419-424.

Viale, M. & Nuñez, M. (2011). Climatology of Winter Orographic Precipitation over the Subtropical Central Andes and Associated Synoptic and Regional Characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12. doi: <https://doi.org/10.1175/2010JHM1284.1>

Wilson, R., Glasser, N. F., Reynolds, J. M., Harrison, S., Iribarren Anaconda, P., Schaefer, M. & Shannon, S. (2018). Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change*, 162, 275-291. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.004>

Zamorano, M. (2008). El nuevo Cuyo. En J. A. Roccatagliata (Ed.), *Argentina. Una visión actual y prospectiva desde la dimensión territorial*. (1.ª ed., pp. 542-588). Emecé. Buenos Aires.

LAS AUTORAS

Mariana Correas Gonzalez es Geógrafa por de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Cuyo y es Magister en Dinámica natural y riesgos por la Universidad de Paris Diderot (Paris VII). Actualmente es becaria doctoral de CONICET e integra el grupo de Geomorfología y Cuaternario del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Su tema de investigación es “Represamientos naturales y peligrosidad de crecida abrupta en los Andes Centrales de Argentina (31-36°S)” bajo la dirección de la Dra. Stella Moreiras y el Dr. Jan Klimes del Instituto de Estructura y Mecánica de Rocas de la Academia de Ciencias de República Checa. Resultados parciales de su investigación han sido publicados en revistas científicas internacionales, así como en congresos.

Stella Maris Moreiras es Licenciada en Ciencias Geológicas y Doctora en Ciencias Geológicas por la Universidad Nacional de San Juan. Profesora Adjunta de la cátedra de Edafología de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Cuyo. Investigadora Independiente de CONICET y líder del grupo de Geomorfología y Cuaternario del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) integrado por geólogos, geógrafos, geofísicos, ingenieros civiles, ingenieros en recursos naturales, antropólogos, arqueólogos y profesionales de otros campos. Posee amplia experiencia en Cuaternario, Deslizamientos y Geomorfología. Sus investigaciones comprenden los campos de la estratigrafía cuaternaria, paleosismología, neotectónica, peligros naturales, aluviones catastróficos por rompimiento de diques naturales glaciares o represados por deslizamientos y cambios ambientales recientes. Posee numerosas publicaciones en revistas científicas de primer nivel, internacionales y nacionales. Directora y Co-directora de Tesis doctorales y de grado.