

TÉCNICAS DE LIQUENOMETRÍA BASADAS EN *RHIZOCARPON* SUBGÉNERO *RHIZOCARPON* PARA DATAR DEPÓSITOS GLACIARES EN LOS ANDES PATAGÓNICOS

Irene A. Garibotti y Ricardo Villalba¹

Resumen

La liquenometría es una técnica de datación que estima la edad de exposición de una superficie a partir del diámetro de los líquenes que crecen en ella. El objetivo de este estudio es calibrar la curva de crecimiento de *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* en los Andes Patagónicos, y aplicarla para reconstruir las fluctuaciones glaciares durante los últimos siglos. Para ello se investigaron seis glaciares, tres en el norte y tres en el sur de los Andes Patagónicos, en los cuales se realizaron mediciones del diámetro de ejemplares del subgénero *Rhizocarpon* en sitios de edad conocida (sitios control) y sitios de edad desconocida. La edad de los sitios control se determinó fehacientemente a partir de información histórica. Los datos liquenométricos relevados en estos sitios control fueron utilizados para calibrar la curva de crecimiento. La relación entre el tamaño de los líquenes y la edad de la superficie (curva de crecimiento) es lineal, indicando que los líquenes del subgénero *Rhizocarpon* tienen una tasa de crecimiento constante a lo largo del tiempo. Esta curva se extiende por 270 años.

Aplicación de la curva a los datos liquenométricos relevados en las morenas de edad desconocida permitió establecer la cronología de la secuencia de morenas de los seis glaciares bajo estudio. Los datos liquenométricos fueron contrastados con datos dendrocronológicos, mostrando una gran concordancia entre los métodos. Los resultados obtenidos muestran dos períodos principales de formación de morenas. El primer período se extiende desde la mitad del siglo XVII hasta finales del siglo XIX, y está caracterizado por morenas muy prominentes. El segundo período se extiende desde mediados del siglo XIX hasta finales del siglo XX, y esta caracterizado por la formación de un gran número de morenas pequeñas.

Introducción

La liquenometría es una técnica de datación que se basa en estimar la edad mínima de exposición de una superficie a partir del tamaño de los líquenes que crecen

¹ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (CRICyT-CONICET), C.C. 330, 5500 Mendoza, Argentina. Teléfono: 0261-5244234, Fax: 0261-5244201, ireneg@lab.cricyt.edu.ar

en ella (Beschel, 1961; Innes, 1985). Los líquenes crecen en forma concéntrica, por lo que conociendo la tasa de crecimiento anual, es posible estimar su edad a partir de su diámetro. Generalmente los líquenes utilizados son los pertenecientes al grupo *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon*, que son colonizadores tempranos de superficies expuestas en ambientes montañosos, y se caracterizan por ser de crecimiento lento, siendo por lo tanto útiles para datar superficies de gran edad. Aunque se han reportado líquenes del subgénero *Rhizocarpon* de hasta 6000 años, la técnica se considera especialmente adecuada para datar superficies expuestas durante los últimos siglos (aprox. 500 años).

La liquenometría ha sido exitosamente aplicada para datar depósitos glaciares en ambientes alpinos y polares (e.g. Benedict, 1985; Solomina y Calkin, 2003; Matthews, 2005). Sin embargo, aún no ha sido aplicada en forma consistente en los Andes Patagónicos. Rabassa et al. (1984) realizaron mediciones del tamaño de líquenes en depósitos glaciares, con fines de datación relativa. Winchester y Harrison (2000) aplicaron esta técnica, pero basándose en una especie de líquenes de crecimiento rápido, potencialmente útil para datar superficies expuestas durante las últimas décadas. Este estudio constituye el primer avance para conocer el patrón de crecimiento de *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* en los Andes Patagónicos, y para desarrollar las herramientas necesarias para aplicar técnicas liquenométricas en esta región Andina.

Los objetivos específicos de este estudio fueron: a) Estimar indirectamente la curva de crecimiento del subgénero *Rhizocarpon* en los Andes Patagónicos a partir del análisis del tamaño de los talos presentes en superficies de edad conocida; b) Aplicar esta curva para datar morenas de edad desconocida, y realizar cronologías completas de las secuencias de seis glaciares bajo estudio; c) Comparar las cronologías obtenidas con las obtenidas por medio de técnicas dendrocronológicas, evaluando las limitaciones y ventajas de cada una de estas técnicas. La curva de crecimiento que se presenta ha sido desarrollada para datar depósitos glaciares, pero es potencialmente útil para datar otro tipo de superficies, incluyendo restos arqueológicos.

Métodos

Los estudios fueron realizados en seis glaciares ubicados a lo largo de los Andes Patagónicos (Tabla 1). La mayoría de estos glaciares están confinados dentro de valles, y exhiben un sistema de morenas bien desarrollado (Fig. 1). Cada valle glaciar presenta entre tres y diez morenas de formación posterior al máximo de la Pequeña Edad de Hielo (Rabassa et al., 1984; Villalba et al., 1990; Masiokas et al., aceptado).

Glaciar	Ubicación		Orientación	Número de morenas o superficies estudiadas
Torre	49° 19' S	73° 01' O	Este	8
Piedras Blancas	49° 16' S	72° 58' O	Este	5
Huemul	49° 04' S	72° 54' O	Este	9
Torrecillas	42° 40' S	71° 55' O	Este	9
Ventisquero Negro	41° 12' S	71° 52' O	Este	8
Frias	41° 09' S	71° 51' O	Norte	4

Tabla 1: Ubicación geográfica de los seis glaciares estudiados.

Los estudios de liquenometría se realizaron sobre líquenes pertenecientes a *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon*. La identificación de los mismos fue realizada a campo usando lupas manuales, y además se coleccionaron muestras de algunos ejemplares que fueron identificadas en el laboratorio como pertenecientes a las especies *R. geographicum* y *R. superficiale*. Cada morena fue inspeccionada, midiéndose y registrándose el diámetro mayor del ejemplar de *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* más grande presente en piedras individuales. Al menos 100 talos fueron medidos en cada morena, excepto en las morenas jóvenes en las que el número de especímenes encontrados fue menor. El método liquenométrico elegido se basa en el tamaño del talo más grande encontrado en la superficie cuya edad se quiere estimar. Se asume que el líquen más grande es el primero que ha colonizado la superficie bajo estudio, y por lo tanto es el mejor parámetro para estimar la edad de la misma (Innes, 1985). Una superficie puede ser datada solamente cuando los líquenes que crecen en ella corresponden a una única población. Para determinar la presencia de poblaciones únicas o compuestas se realizaron histogramas de frecuencia de tamaños de los talos en la población (McCarroll, 1994). Además el líquen más grande fue considerado anómalo y eliminado del análisis en aquellos casos en que su diámetro era 10 % mayor que el diámetro del segundo líquen más grande encontrado en la población.

En los glaciares estudiados se identificaron diez sitios cuya edad pudo ser fehacientemente determinada (sitios control). Para ello se utilizaron fotos históricas, relatos de los primeros exploradores en la Patagonia, presencia de cenizas volcánicas de edad conocida, datos dendrocronológicos de restos de árboles que habrían muerto por el avance del glaciar, y mapas de la posición histórica del límite del hielo (Tabla 2). Los datos liquenométricos relevados en estos sitios fueron utilizados para calibrar la curva de crecimiento del subgénero *Rhizocarpon*, que representa la relación numérica entre el tamaño del líquen más grande y la edad de la superficie.

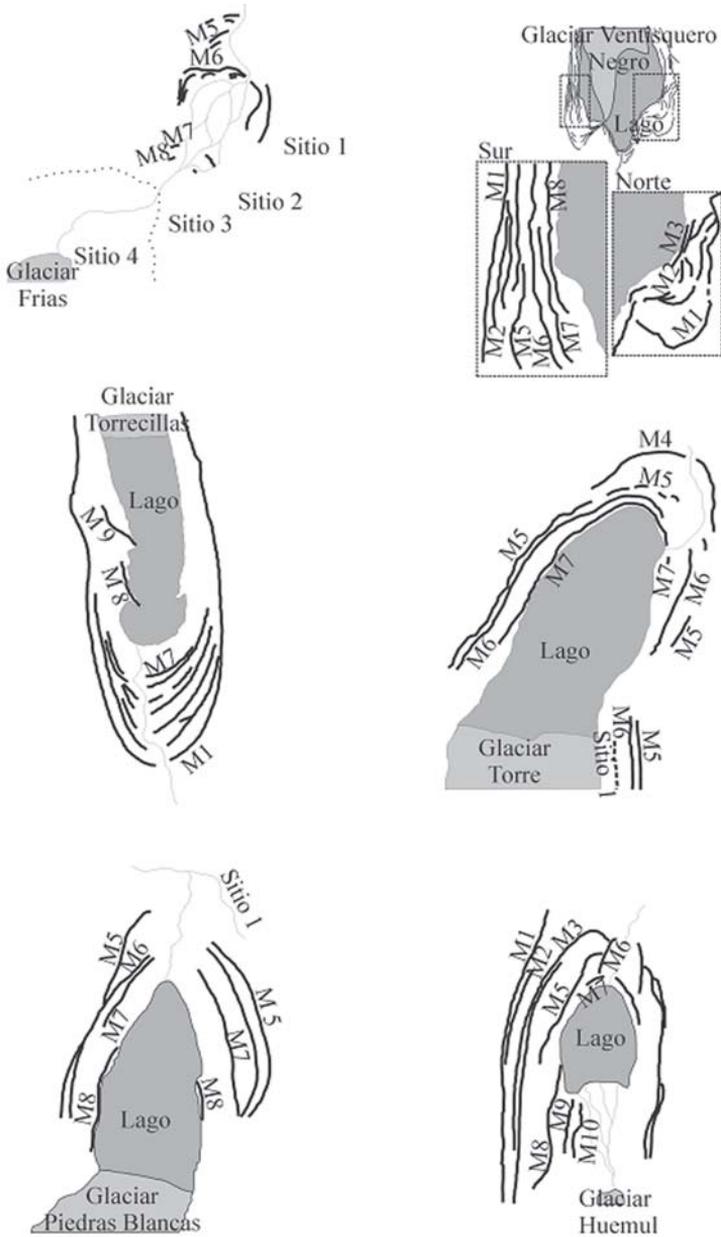


Figura 1: Posición histórica del hielo en los seis glaciares estudiados.

Líquenes grande (cm)	Número de líquenes medidos	Número de líquenes anómalos	Fecha de referencia	Evidencia	Fuente
Glaciar Torre					
Sitio 1	29	1	1938	Foto histórica	Libbouty, 1953
Glaciar Piedras Blancas					
Morena 8	2	0	1931	Foto histórica	De Agostini, 1945
Sitio 1	127	2	1913	Reporte escrito	De Agostini, 1945
Glaciar Huemul					
Morena 4	116	1	1743	Datación de restos de un árbol	Masabkas et al. aceptado
Glaciar Torreñas					
Morena 8	51	3	1937	Foto histórica	Reporte de Parques Nacionales
Glaciar Venisquero Negro					
Morena 1 (norte)	120	0	1848	Datación de restos de un árbol	Lawrence y Lawrence, 1959
Morena 2 (norte)	99	1	1942	Foto histórica	Archivo de fotos IANIGLA
Morena 3 (norte)	3	0	1977	Mapa de la posición del hielo	Fabassa et al., 1978
Morena 4 (sur)	24	2	1893	Cenizas volcánicas	Fabassa et al., 1984
Glaciar Frías					
Sitio 4	3	0	1986	Foto histórica	Archivo de fotos IANIGLA

Tabla 2: Sitios control utilizados para calibrar la curva de crecimiento para *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* en los Andes Patagónicos.

Las morenas de edad desconocida fueron datadas aplicando la curva de crecimiento a los datos del tamaño de líquenes relevados en las mismas. Esto permitió realizar cronologías completas de las secuencias de morenas de los seis glaciares bajo estudio. La precisión de las edades estimadas fue corroborada con edades estimadas utilizando métodos dendrocronológicos (Villalba et al., 1990; Masiokas et al., aceptado).

Resultados

En la Tabla 2 se presentan los resultados liquenométricos de *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* en los diez sitios control. Para establecer la curva de crecimiento se graficaron los datos de diámetro del líquen más grande versus la edad del sitio control, y se realizó un análisis de regresión lineal (Fig. 2). La regresión es significativa ($p < 0.005$), y se cumplen todos los asuntos en los que está basado el análisis de mínimos cuadrados (distribución normal de la población, varianza constante de la variable dependiente, e independencia de los valores residuales). El coeficiente de regresión es $R = 0.8269$, y la fórmula de la regresión lineal es:

$$y = 0.6826 + 0.0225x$$

(1)

siendo y el diámetro del líquen más grande (cm) y x la edad de la superficie (años). De acuerdo con esta relación, el crecimiento de *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* es constante a lo largo del tiempo, con un incremento en su diámetro de 0.0225 centímetros por año. La regresión ajustada se extiende por 270 años.

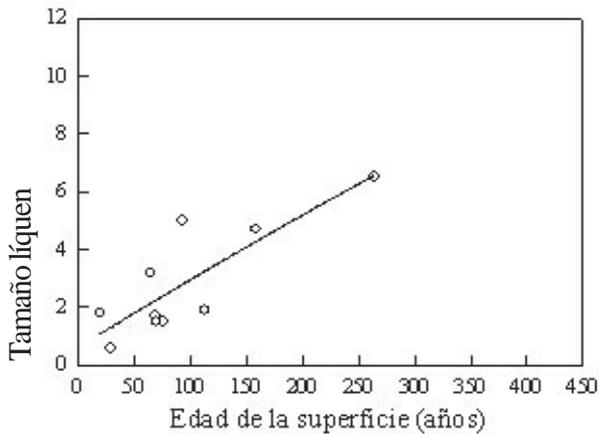


Figura 2: Curva de crecimiento de *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* para los Andes Patagónicos.

Los datos liquenométricos relevados en las secuencias de morenas de los seis glaciares bajo estudio se detallan en la Tabla 3. La curva de crecimiento fue utilizada para estimar la edad de exposición de las morenas de edad desconocida. Esto se realizó aplicando la curva a los datos de diámetro del líquen más grande encontrado en ellas. En la mayoría de los casos las edades de las morenas fueron estimadas en el orden cronológico esperado, es decir las más externas son las más viejas (Tabla 3), indicando consistencia en los resultados liquenométricos. Solo dos morenas fueron estimadas como más jóvenes que la siguiente en la secuencia (Morena 2 del Glaciar Huelmo y Sitio 2 del Glaciar Frías), indicando que su edad fue incorrectamente estimada a partir de los líquenes.

Las cronologías de las secuencias de morenas fueron comparadas con las obtenidas por otros investigadores utilizando métodos dendrocronológicos (Tabla 3). Los resultados muestran gran concordancia, siendo las edades estimadas a partir de los líquenes en promedio cinco años más viejas que las edades estimadas a partir de los anillos de árboles. Sin embargo, la desviación alrededor de este valor medio es de 48 años, indicando cierta disparidad entre los métodos para algunas de las fechas estimadas.

Las morenas de los seis glaciares estudiados pueden separarse en dos grupos según su edad y morfología (Fig. 3). Entre mediados del siglo XVII y principios del siglo XIX el número de morenas formadas es bajo (una o dos morenas en cada glaciar), pero las morenas son muy prominentes. En cambio, un número mayor de morenas se

	Liqüen más grande (cm)	Número de líquenes medidos	Número de líquenes anómalos	Edad estimada por liqüenometría	Edad estimada por dendrocronología
Glaciar Torre					
Morena 4	9.1	100	0	1633	1594
Morena 5	7.0	464	1	1726	1727
Morena 6	3.5	292	3	1882	1866
Morena 7	Sin especimenes de <i>R. subgenus Rhizocarpon</i>				
Glaciar Piedras Blancas					
Morena 5	9.0	104	0	1637	1610
Morena 6	4.7	102	0	1828	1815
Morena 7	2.3	104	0	1935	s/dato
Morena 8	1.5	2	0	1931*	1931*
Glaciar Huemul					
Morena 1	13.5	126	0	1437	s/dato
Morena 2	8.8	120	0	1646	s/dato
Morena 3	11.4	120	2	1531	s/dato
Morena 4	6.5	116	1	1743*	1743*
Morena 5	6.1	123	0	1766	s/dato
Morena 7	4.5	101	0	1837	s/dato
Morena 8	4.1	100	1	1855	1900
Morena 9	2.1	66	1	1944	1936
Morena 10	0.9	29	1	1997	1964
Glaciar Torrecillas					
Morena 1	Suelo cubriendo los depósitos glaciares				
Morena 2	8.8	108	0	1646	s/dato
Morena 3	7.8	156	1	1691	s/dato
Morena 4	4.4	186	0	1842	s/dato
Morena 5	4.1	161	2	1855	s/dato
Morena 6	3.9	163	0	1864	s/dato
Morena 7	2.9	154	0	1908	s/dato
Morena 8	1.5	51	3	1937*	1937*
Morena 9	Sin especimenes de <i>R. subgenus Rhizocarpon</i>				
Glaciar Ventisquero Negro					
Morena 1 (sur)	Musgos cubriendo las rocas				
Morena 2 (sur)	4.7	26	0	1827	1855
Morena 3 (sur)	3.7	36	0	1872	1882
Morena 4 (sur)	1.9	24	2	1893*	1893*
Morena 5 (sur)	1.6	16	0	1965	1928
Morena 6 (sur)	0.9	7	0	1996	1943
Morena 7 (sur)	Sin especimenes de <i>R. subgenus Rhizocarpon</i>				
Morena 8 (sur)	Sin especimenes de <i>R. subgenus Rhizocarpon</i>				
Glaciar Frias					
Sitio 1	4.7	49	0	1827	1882
Sitio 2	5.6	179	0	1787	1913
Sitio 3	2.5	10	0	1925	1944
Sitio 4	1.8	3	0	1986*	s/dato

formaron durante el período comprendido entre mediados del siglo XIX y finales del siglo XX (hasta cinco morenas en cada glaciar), pero éstas son de tamaño menor.

Tabla 3: Datos liqüenométricos en los seis glaciares estudiados y cronologías de las secuencias de morenas estimadas a partir de datos de líquenes y anillos de árboles.

*Edad de referencia del sitio control (ver Tabla 1). Los datos dendrocronológicos corresponden a Villalba et al (1990) y Masiokas et al (aceptado e inédito).

Estos resultados preliminares muestran dos episodios principales de formación de morenas, y sugieren distintas magnitudes en los cambios climáticos que habrían regulado las fluctuaciones de los glaciares en estos dos períodos de tiempo. determinando las diferencias observadas en el patrón de formación de

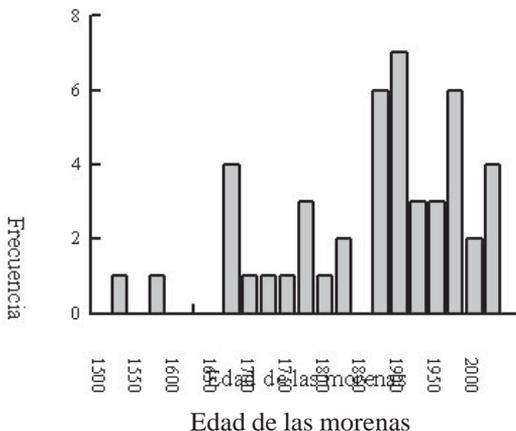


Figura 3: Distribución de frecuencia de la edad de las morenas en los seis glaciares estudiados.

Discusión

Este estudio presenta la primera curva de crecimiento de *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* para los Andes Patagónicos. La precisión de las dataciones liquenométricas depende fuertemente de la precisión con que se establece la curva de crecimiento del líquen (Innes, 1985). Nosotros basamos la curva en diez sitios control cuya edad fue acotada a partir de información histórica fehaciente, lo que le confiere confiabilidad a la curva de crecimiento, permitiendo sugerir que su aplicación permitirá predecir edades con precisión. Aunque el objetivo específico de este estudio es utilizar la curva de crecimiento del subgénero *Rhizocarpon* para datar depósitos glaciares, esta curva es también aplicable para datar otro tipo de superficies en ambientes Andino Patagónicos, tal como restos arqueológicos.

El modelo de crecimiento de *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* es aún muy discutido en la literatura, habiéndose propuesto modelos lineales, curvilíneos o

compuestos (véase revisión en Bradwell y Armstrong, 2007). La curva de crecimiento calibrada muestra que el crecimiento del subgénero *Rhizocarpon* es lineal con la edad en la región Andino Patagónica (Fig. 2). Este resultado es consistente con el de otras partes del mundo, que han encontrado que la fase inicial de crecimiento de *Rhizocarpon* puede ser correctamente modelada por una regresión lineal (Bradwell, 2001; O'Neal y Schoenenberger, 2003; Pech et al., 2003). Sin embargo, en general se considera que la tasa de crecimiento disminuye con la edad, y que la fase inicial de crecimiento rápido es seguida por una fase de crecimiento más lento (Innes, 1985). Por lo tanto, la curva de crecimiento aquí presentada correspondería a la fase inicial de crecimiento, y no debe ser extrapolada para datar superficies más antiguas que 270 años.

Este estudio demuestra que la liquenometría puede ser aplicada con éxito para datar depósitos glaciares en los Andes Patagónicos. El método provee edades que son comparables a las obtenidas independientemente por medio de dataciones realizadas usando anillos de árboles (Tabla 3), lo que le confiere confiabilidad a las cronologías de las secuencias de morenas obtenidas. Un análisis exhaustivo de las razones asociadas a las diferencias en las edades obtenidas a partir de los líquenes y de los árboles esta fuera de la extensión de este trabajo y se discute en Garibotti et al. (en preparación). Entre las limitaciones detectadas en la aplicación de técnicas liquenométricas en los glaciares estudiados pueden mencionarse: a) inestabilidad de la superficie bajo estudio, limitando el crecimiento de los líquenes; b) cobertura de las rocas por musgos, encubriendo la presencia de líquenes de mayor tamaño; c) diferencias en las condiciones ecológicas entre los sitios estudiados, determinando variabilidad en la tasa de crecimiento de los líquenes. Así mismo, los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de técnicas liquenométricas es muy relevante para reconstruir las fluctuaciones glaciares históricas, ya que permite obtener información de la edad de superficies en situaciones en las que la dendrocronología presenta limitaciones. Por ejemplo los líquenes permitieron: a) datar morenas jóvenes, aún no colonizadas por árboles (e.g. Morena 7 del Glaciar Torre); b) datar sitios afectados por fuego, en los cuales el registro de los árboles es pobre (e.g. varias morenas del Glaciar Huemul), c) cuestionar algunas edades derivadas de los árboles, que difieren considerablemente de la obtenida a partir de los líquenes (e.g. Morena 6 del Glaciar Torre). Es por lo tanto evidente que el uso de ambas técnicas en conjunto confiere confiabilidad a las cronologías de las secuencias de morenas obtenidas, ya que los resultados pueden ser contrastados y complementados.

Conclusiones

Información histórica fehaciente fue utilizada para calibrar una curva de crecimiento para *Rhizocarpon* subgénero *Rhizocarpon* en los Andes Patagónicos. Esta curva indica que el patrón de crecimiento del subgénero *Rhizocarpon* es lineal durante su fase inicial. Se propone que esta curva puede ser utilizada con fines

liquenométricos para datar superficies de hasta 270 años. La aplicación de métodos de liquenometría muestra ser relevante para contribuir a comprender las fluctuaciones glaciares durante los últimos siglos en los Andes Patagónicos. Además de su aplicación para datar depósitos glaciares u otras geofomas, la curva de crecimiento puede ser de interés para arqueólogos que trabajen en esta región Andina.

Los resultados presentados son el primer avance para generar las herramientas necesarias para aplicar técnicas liquenométricas en los Andes Patagónicos. Más estudios son necesarios para extender la aplicación de la curva a edades mayores, y para aumentar su precisión considerando las variaciones ecológicas que pueden afectar las tasas de crecimiento de los líquenes.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Agencia de Promoción Científica (PICTR02-186 y PICT32003), y por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático (IAI, CNR II #2047, Grant GEO-0452325).

Bibliografía

- BENEDICT J.B. (1985). Arapaho Pass: Glacial geology and archeology at the crest of the Colorado Front Range. *Research Report No. 3, Center for Mountain Archaeology, University of Colorado*, Ward, Colorado.
- BESCHEL R.E. (1961). Dating rock surfaces by lichen growth and its application to glaciology and physiography (lichenometry). En: RAASCH G.O. (Ed.), *Geology of the Arctic*. University of Toronto Press, Toronto, pp. 1044-1062.
- BRADWELL T. (2001). A new lichenometric dating curve for Southeast Iceland. *Geografiska Annaler* **83**, A, 91-101.
- BRADWELL T. Y ARMSTRONG R.A. (2007). Growth rates of *Rhizocarpon geographicum* lichens: a review with new data from Iceland. *Journal of Quaternary Science* **22**, 4, 311-320.
- DE AGOSTINI A.M. (1945). *Andes Patagónicas*. Guillermo Kraft Ltda., Buenos Aires, 437 pp.
- INNES J.L. (1985). Lichenometry. *Progress in Physical Geography* **9**, 2, 187-254.
- LAWRENCE D.B. Y LAWRENCE E.G. (1959). Recent glacier variations in southern South America. *Research Report No. 1, American Geographical Society*, New York.
- LLIBOUTRY L. (1953). More about advancing and retreating glaciers in Patagonia. *Journal of Glaciology* **2**, 14, 255-261.
- MASIOKAS M., LUCKMAN B.H., VILLALBA R., DELGADO S., SKVARCA P. Y RIPALTA A. (2007). Little Ice Age fluctuations of small glaciers in the Monte Fitz Roy and Lago del Desierto areas, south Patagonian Andes, Argentina. Aceptado.
- MATTHEWS J.A. (2005). «Little Ice Age» glacier variations in Jotunheimen, southern Norway: a study in regionally controlled lichenometric dating of recessional moraines with implications for climate and lichen growth rates. *The Holocene* **15**, 1, 1-19.
- MCCARROLL D. (1994). A new approach to lichenometry: dating single-age and diachronous surfaces. *The Holocene* **4**, 4, 383-396.
- O'NEAL M.A. Y SCHOENENBERGER K.R. (2003). A *Rhizocarpon geographicum* growth curve for the Cascade Range of Washington and northern Oregon, USA. *Quaternary Research* **60**, 233-241.
- PECH P., JOMELLI V., BAUMGART-KOTARBA M., BRAVARD J.P., CHARDON M., JACOB N., KEDZIA S., KOTARBA A., RACZKOWSKA Z. Y TSAO C. (2003). A lichenometric growth curve in the French Alps: Ailefroide and Veneon valleys: Massif des Ecrins. *Geodinamica Acta* **16**, 187-193.
- RABASSA J., RUBULIS S. Y SUAREZ J. (1978). Los glaciares del Monte Tronador, Parque Nacional Nahuel Huapi, Río Negro, Argentina. *Anales de Parques Nacionales* **14**, 259-295.

RABASSA J., BRANDANIA A.A., BONINSEGNA J.A. Y COBOS D. (1984). Cronología de la «Pequeña Edad del Hielo» en los glaciares Río Manso y Castaño Overo, Cerro Tronador, Provincia de Río Negro. *Libro de Resúmenes del Noveno Congreso Geológico Argentino*, S.C. de Bariloche, Argentina, pp. 624-639.

SOLOMINA O. Y CALKIN P.E. (2003). Lichenometry as applied to moraines in Alaska, U.S.A., and Kamchatka, Russia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **35**, 2, 129-143.

VILLALBAR., LEIVAJ.C., RUBULIS S., SUAREZ J. Y LENZANO L. (1990). Climate, tree-ring, and glacial fluctuations in the Río Frías Valley, Río Negro, Argentina. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **22**, 3, 215-232.

WINCHESTER V. Y HARRISON S. (2000). Dendrochronology and lichenometry: colonization, growth rates and dating of geomorphological events on the east side of the North Patagonian Icefield, Chile. *Geomorphology* **34**, 181-194.