

Abanicos aluviales tributarios en un valle fluvial desarrollado en un contexto árido. Andes de Chile a los 29° S

*Tributary-**junction alluvial fan formation in an arid-zone fluvial valley. Chilean Andes at ~29°S***

Albert Cabré Cano^{1,2}, Germán Aguilar Martorell² y Ferran Colombo Piñol³

¹Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Avenida Angamos 0610, Antofagasta, Chile. albert.cabre@alumnos.ucn.cl

²Advanced Mining Technology Center, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Avenida Tupper 2007, Santiago, Chile. german.aguilar@amtc.cl

³Departament de Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. colombo@ub.edu

ABSTRACT

Small alluvial fans (radius of hundreds of meters and high gradients) exert a fundamental role on the stratigraphic and geomorphic evolution of narrow valleys situated in mountainous regions. We study the sedimentology of three alluvial fans characteristic of El Huasco river valley in the Andes to determine their conditions of formation. We identify changing formation conditions ranging from episodic (in transport-limited catchments and great flood events) to continuous (in weathering-limited catchments). Finally, we present the first interpretations where precipitation recurrence and system connectivity are the main control factors that finally determine the formation of the alluvial fans in those geomorphological settings.

Key-words: *alluvial fans, Andes, debris-flows*

RESUMEN

Los abanicos aluviales de pequeño tamaño (centenares de metros de radio y alto gradiente) ejercen un control muy importante en la evolución estratigráfica y geomorfológica de los valles estrechos situados en regiones montañosas. Estudiamos la sedimentología de tres abanicos aluviales característicos en el valle del río Huasco situado en los Andes para determinar las condiciones de formación. Identificamos condiciones cambiantes de episódicas (asociadas a cuencas limitadas por el transporte mediante eventos mayores) a continuas (asociadas a cuencas donde el factor limitante es la meteorización). Las primeras interpretaciones indican que la recurrencia de las lluvias y la conectividad del sistema son los factores de control principales que determinan la formación de abanicos aluviales.

Palabras clave: *abanicos aluviales, Andes, flujos de detritos*

Geogaceta, 66 (2019), 35-38
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 1 de febrero de 2019
Revisión: 25 de abril de 2019
Aceptación: 24 de mayo de 2019

Introducción

Caracterizar la sedimentología registrada en los abanicos, bajo condiciones climáticas cambiantes durante el Holoceno en los Andes (áridas a semi-áridas), es especialmente interesante en un contexto de incremento de eventos hidrometeorológicos extremos. Estos eventos mayores con carácter episódico son capaces de aportar grandes volúmenes de sedimento a los abanicos. Por otro lado, los procesos de transporte asociados a eventos menores con mayor recurrencia suelen presentar flujos diluidos, por lo que depositan volúmenes menores en los abanicos a la vez que eliminan material profundizando y/o ensanchando la red de drenaje del abanico.

El registro sedimentario en los abanicos aluviales tributarios, en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, puede com-

plementar las interpretaciones paleo-climáticas disponibles realizadas en otros medios sedimentarios. Esto permite identificar cambios de las condiciones de transporte durante el Holoceno asociadas a las transiciones climáticas o a repeticiones cíclicas de precipitaciones.

Contexto geográfico

Los abanicos aluviales tributarios presentados en este trabajo se encuentran en la cuenca del río Huasco. Esta cuenca tiene dos ríos principales con cursos de agua permanentes (el río El Tránsito y el río El Carmen, Fig. 1Aa). La cuenca del río Huasco drena la vertiente occidental de la cordillera de los Andes desde alturas >5000 m s.n.m hasta el océano Pacífico. La altura promedio para este segmento de los valles varía entre

los 1000 y los 1200 m y presentan una anchura promedio de menos de 300 m.

Marco geomorfológico/ geológico

Las cuencas de drenaje asociadas a estos abanicos presentan diferencias de altura entre los exutorios y las cabeceras que superan en muchos casos los 1500 m de desnivel. El tamaño de las cuencas varía entre < 5 km² y >150 km² (Fig. 1B). Su sustrato litológico está formado por secuencias volcano-sedimentarias (andesitas y areniscas/lutitas), rocas metamórficas (gneises y esquistos) y rocas intrusivas (monzogranitos y granodioritas). Los abanicos y las terrazas fluviales asociadas en el río El Tránsito fueron datadas con ¹⁴C con edades entre los 9 ka BP y los 4 ka BP en Cabré *et al.* (2017).

Contexto paleoclimático y clima actual

Los depósitos lacustres cercanos registran varias fases húmedas durante el Holoceno interrumpidas por periodos más áridos (Tiner *et al.*, 2018). Las fases húmedas comprenden periodos entre los 10,8-9,5 ka BP, 5,5-4,1 ka BP y 2,2-0,5 ka BP. El clima en la actualidad es árido en este sector al sur del desierto de Atacama. Durante el Cuaternario tardío ha estado controlado por el anticiclón SE del Pacífico, la corriente de Humboldt, el anticiclón boliviano centrado en el este de la cordillera y el patrón de circulación de vientos del Oeste (*westerlies*) situado a latitudes medias (Tiner *et al.*, 2018). Las fuentes de humedad están asociadas a los monzones durante los veranos y a la influencia de las *westerlies* durante los inviernos (Tiner *et al.*, 2018). Salas *et al.* (2016) han destacado la influencia de los eventos de precipitación históricos asociados a las fases El Niño para el sector de estudio como detonante de los flujos de detritos responsables de depositar grandes volúmenes de sedimentos en los abanicos.

Resultados y discusión

Abanico I: La sección expuesta por la disección causada por el río principal permite observar la continuidad lateral y geometría convexa del techo de algunas de las capas. La base presenta un nivel de clastos angulosos con tamaño canto y bloque con diámetro de eje intermedio máximo (b^{\max}) de 40 cm con fábrica clasto-soportada. A techo de este nivel se encuentran clastos tamaño guijarro que se organizan en discontinuidades de orden menor con potencias centimétricas. Los 30 cm que le sobreyacen, presentan pasadas centimétricas de gránulos con arenas gruesas. A techo se identifica una capa continua lateralmente, con base no erosiva de 50 cm de potencia matriz soportada con clastos tamaño bloque hasta 30 cm (b^{\max}). Los bloques se disponen mayoritariamente a techo de esta capa. Flotan en una matriz donde dominan en proporciones variables arenas y limos (50%) y clastos tamaño grava del 20 al 30%. A techo, los 60 cm iniciales corresponden a discontinuidades de orden menor bien definidas con laminación centimétrica de guijarros alternando con niveles de cantos con fábrica abierta. A partir de los 330 cm se observan pasadas donde dominan los clastos

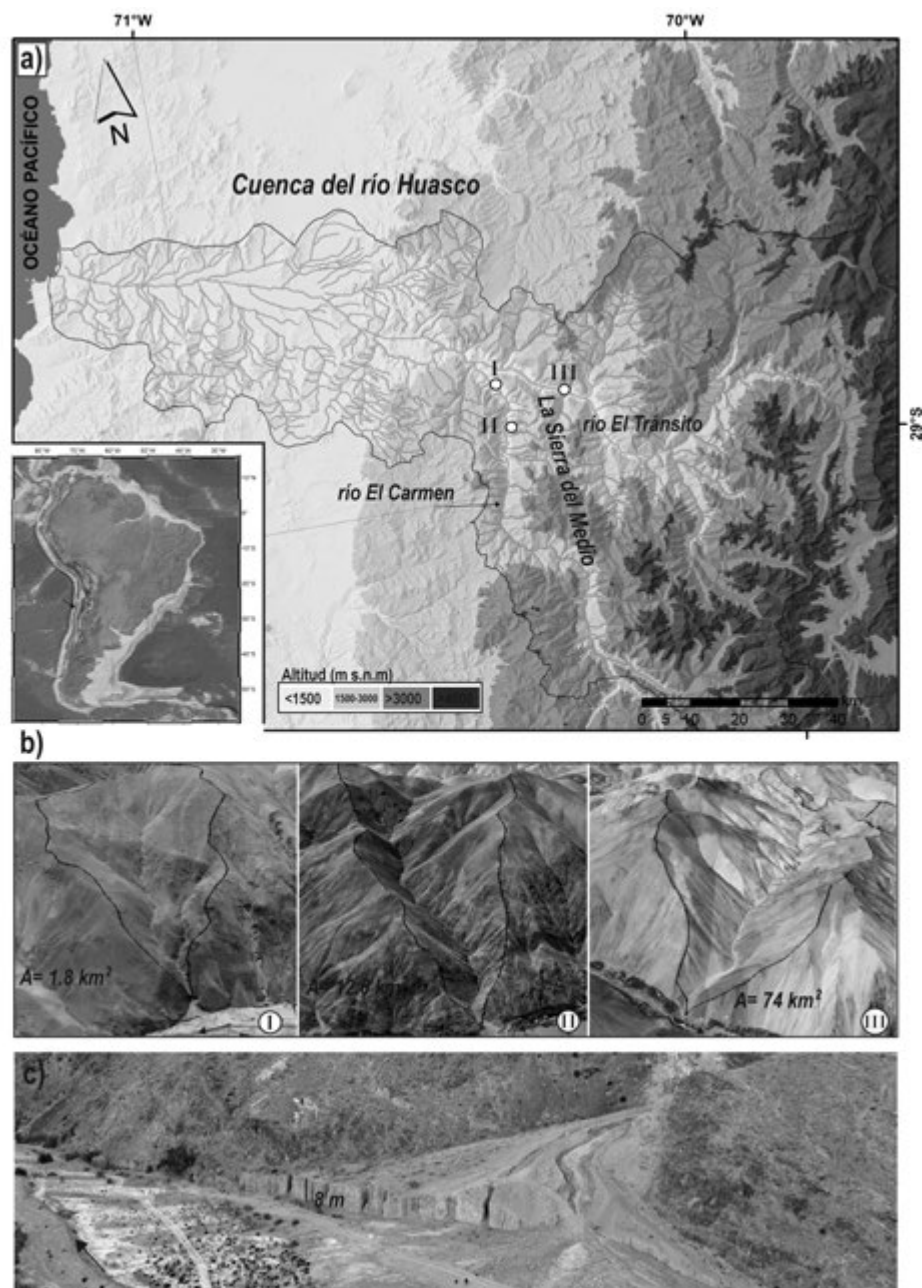


Fig. 1. A) Situación de los abanicos estudiados en el Valle del río Huasco, norte de Chile. B) Imágenes de Google Earth de las cuencas asociadas a los abanicos presentados en este trabajo. C) Ejemplo de abanico tributario (abanico I). Ver figura en color en la web.

Fig. 1. A) Fans location in Huasco river valley, northern Chile. B) Google Earth images of the catchments associated with the studied alluvial fans. C) Example of tributary-junction alluvial fan (abanico I). See color figure in the web.

tamaño bloque. Sobreyace un nivel continuo lateralmente con base no erosiva de 50 cm de potencia. Presenta una fábrica matriz soportada con clastos tamaño bloque con (b^{\max}) de 20 cm. En la matriz, dominan en proporciones variables del 20 al 30% clastos tamaño grava, arena y limos (50%). A techo, con base erosiva, yacen pasadas donde dominan los clastos tamaño canto y guijarro. Estas presentan discontinuidades de orden menor centimétricas alternando

con niveles de cantos con fábrica abierta hasta los 550 cm. Sobreyaciendo con base no erosiva se presenta una capa de 50 cm de potencia, matriz-soportada con clastos tamaño bloque hasta 20 cm (b^{\max}). En la matriz dominan arenas y limos (50%) y en proporciones variables del 20 al 30% clastos tamaño grava. Los últimos 30 cm corresponden a pasadas centimétricas donde dominan los clastos tamaño canto, guijarro y gránulo.

Abanico II: Se ha estudiado una sección de gravas angulosas heterométricas en el sector del ápice. La base presenta un nivel de gravas angulosas clasto-soportado, masivo, de ~100 cm de potencia, con clastos tamaño canto y bloque (fábrica abierta), que a techo pasa mediante cicatriz erosiva a niveles estratificados incipientemente, de potencia centimétrica con discontinuidades de orden menor (*couplets*) formados por guijarros y gránulos. Mediante contacto marcadamente erosivo sobryace una alternancia de niveles centimétricos de 150 cm de potencia con clastos tamaño guijarro-canto, clasto-soportados con una matriz donde dominan las arenas gruesas y gránulos. A techo disminuye el tamaño de grano y dominan arenas gruesas con arenas finas a muy finas. Le sobryace un nivel masivo de 70 cm de potencia, con base no erosiva, matriz-soportado y con bloques de hasta 40 cm (b^{max}) flotando en una matriz que representa el 80% del volumen. En esta capa se identifican algunos clastos de madera de *Schinus molle* subactuales (plantaciones < 100 años). La matriz está formada por guijarros, gránulos, arenas finas, limos y arcillas subordinadas. A techo sobryace en discordancia erosiva una alternancia de niveles centimétricos de 50 cm formada por clastos tamaño canto, bloque, arenas gruesas y gránulos con niveles clasto-soportados de cantos con ausencia de matriz intercalados. Le sobryace por contacto no erosivo un nivel masivo de 30 cm de potencia con clastos tamaño bloque flotando en una matriz de gravas y arenas gruesas. A techo le sigue un nivel de clastos con tamaños guijarro, cantos y arenas gruesas a gránulos.

Abanico III: Se ha estudiado una sección en el sector del ápice del abanico de gravas con bloques de tamaño métrico intercalados. La base de la columna presenta clastos tamaño grava y bloque subredondeados (granitoides) y bloques con geometría elongada (gneises). Es un nivel masivo con fábrica abierta hasta los 35 cm. A techo se organiza en capas centimétricas, algunas de ellas con fábrica abierta con presencia de arenas finas y limos como matriz <10%. La continuidad lateral de estos niveles la comprometen capas de arenas gruesas y gránulos con pasadas de clastos tamaño grava laminados ya que se presenta con encajamientos de hasta 1 m. A techo domina una capa que presenta una importante continuidad lateral, con laminación centimétrica de orden menor constituida por gránulos y arenas gruesas

clasto-soportada con una matriz de arena fina (<5%). Sobryaciendo con base no erosiva encontramos un depósito de 100 cm de potencia, matriz-soportado con clastos de hasta 55 cm (b^{max}) mayormente graníticos. Predominan los clastos tamaño bloque que flotan en una matriz formada en un 20-30% por guijarros de hasta 5 cm, gránulos, arenas gruesas, finas y limos. Esta capa varía entre 50 cm y 100 cm debido a que los niveles suprayacentes están fuertemente encajados en algunos puntos. De los 205 cm hasta 230 cm se presenta un nivel de clastos tamaño grava con laminación centimétrica que a techo presenta una fábrica abierta de cantos. Por encima aparece una alternancia de niveles arenosos con geometrías canaliformes con clastos tamaño grava clasto soportados. De los 330 a los 430 cm se presenta un nivel masivo con clastos tamaño bloque dispersos de hasta 40 cm (b^{max}). Como matriz dominan los clastos tamaño canto (7-8 cm) en una matriz inferior al 10% con tramos clasto-soportados y otros soportados por la matriz. A este nivel se superpone un nivel masivo de 130 cm de potencia con presencia de mono-

litos que superan los 100 cm (b^{max}). La matriz es heterométrica con presencia de cantos, guijarros, gránulos y arena gruesa. De los 530 a los 780 cm se presentan pasadas de gránulos con pasadas de clastos tamaño guijarro angulosos. Sobryaciendo en contacto no erosivo, se encuentra un nivel de 100 cm de potencia con presencia de monolitos que alcanzan los 200 cm (b^{max}). La matriz está constituida por bloques, cantos, guijarros y arenas gruesas.

Discusión de los resultados

La sedimentología caracterizada en los abanicos permite identificar tres condiciones de transporte preferentes: i) flujos de detritos cohesivos, ii) flujos hiper-concentrados o transicionales y iii) flujos diluidos. Las condiciones necesarias para generar uno u otro tipo de flujo están controladas por la relación de agua vs. sedimento (Wells y Harvey, 1987). Esta relación depende de los factores externos (cantidad e intensidad de precipitación) y de los factores internos propios de las

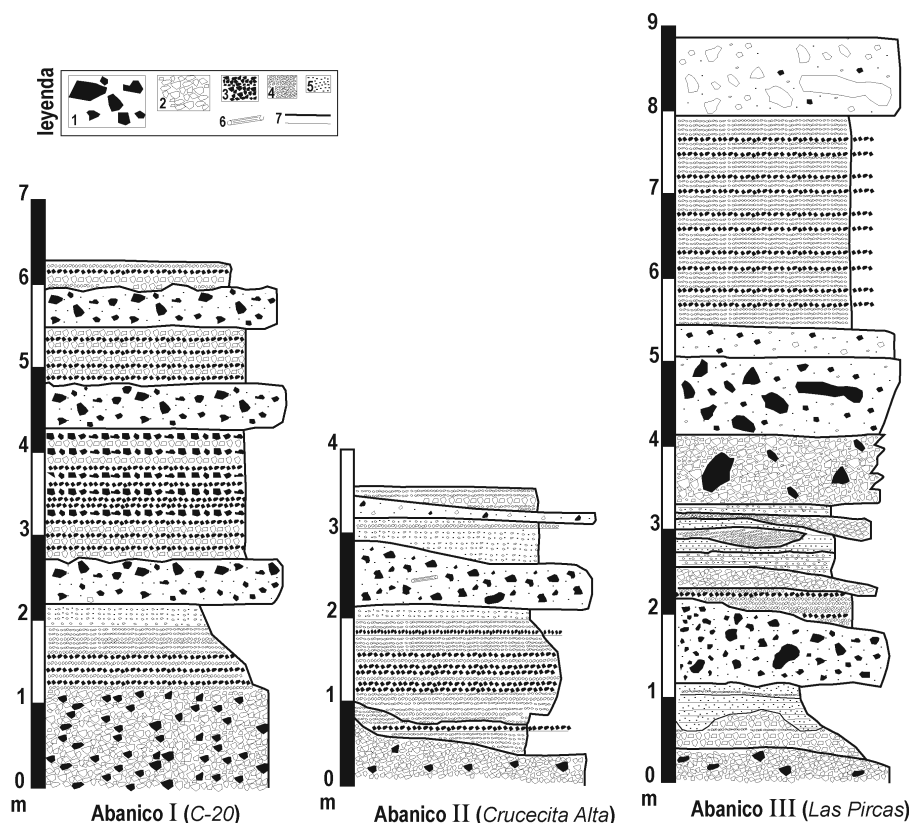


Fig. 2. Columnas de los abanicos estudiados. Entre paréntesis, los nombres locales que reciben. En la leyenda (1) ≥bloques; (2) ≥cantos; (3) ≥guijarros; (4) ≥gránulos-arena gruesa; (5) ≤arena gruesa; (6) fragmentos de madera; (7) discontinuidades internas.

Fig. 2. Stratigraphic sections of the studied alluvial fans. Their local denominations are in brackets. Legend (1) ≥blocks; (2) ≥cobble; (3) ≥pebble; (4) ≥granules-coarse sand; (5) ≤coarse sand; (6) wood fragments; (7) internal discontinuities.

cuencas de drenaje asociadas a los abanicos (disponibilidad de sedimentos).

Para reconstruir las condiciones hidráulicas de transporte, se interpreta la reología del flujo mediante el análisis sedimentológico de las diferentes capas registradas en las secciones estudiadas de los abanicos aluviales (Fig. 2). Es importante caracterizar las discontinuidades internas, las cuales pueden indicar cambios continuos o repentinos en las condiciones de transporte en el abanico, indicando dos modos de sedimentación: continua y episódica. Se enfatizan aquellos depósitos que permiten entender procesos de transporte episódico para estas cuencas áridas.

La sedimentología preservada, con ligeras diferencias entre los abanicos estudiados, está dominada por flujos hiper-concentrados hasta *sheet-floods*. Estos niveles incluyen clastos angulares con granulometrías variables de gravas que presentan fábricas clasto-soportadas (con presencia de matriz o no) y espesores centimétricos con un cierto grado de imbricación. Corresponden a flujos tractivos no confinados depositados en el abanico con relación a pulsos sedimentarios más diluidos. La dilución puede deberse a una menor disponibilidad de sedimentos en la cuenca o a un mayor volumen de agua en las tormentas. El registro continuo de los abanicos, con discontinuidades de orden menor, permite proponer una tasa de activación (precipitaciones) constante. Por lo tanto, en estas cuencas el transporte de sedimento estaría limitado por la meteorización (disponibilidad de sedimento).

Las bases erosivas de algunas capas indican cambios en la turbulencia del flujo. Estos cambios se traducen en una mayor capacidad erosiva de los flujos al alcanzar al abanico. Por otro lado, es posible identificar al menos dos flujos de detritos cohesivos en cada abanico (*debris-flows*). Estos presentan un carácter masivo y una pobre selección con presencia de limos, arenas, cantos, gravas y bloques de hasta 200 cm (b^{max}). El carácter matriz-soportado requiere flujos cohesivos viscosos, que en algunos niveles presentan los clastos de mayor tamaño a techo. Estas

capas suelen encontrarse en la zona apical de los abanicos. Estos estarían asociados a eventos episódicos mayores con baja frecuencia temporal. La mayor disponibilidad de sedimentos en la cuenca, tras largos periodos entre tormentas, favorecería que en eventos individuales de precipitación se entregaran mayores volúmenes a los abanicos. El número de eventos de descarga acuosa episódicos registrados varía entre los abanicos estudiados. Esto se puede atribuir a la diferencia de volúmenes de sedimento almacenados en las cuencas junto con la capacidad de ser transportados hasta los exutorios, lo que puede explicar por qué los abanicos asociados a cuencas mayores no necesariamente presentan mayor número de eventos episódicos. Así, en cuencas $<10 \text{ km}^2$ es más probable que se presenten flujos cohesivos ya que se preserva la relación de agua y sedimento evitando la dilución. Además, el tamaño de la cuenca también influye en la capacidad de almacenar sedimento. Por lo que disminuye la conectividad longitudinal de la cuenca con el valle principal. Por el contrario, las cuencas de menor tamaño permiten que los volúmenes de sedimentos lleguen de forma más eficiente al abanico.

Limitaciones de este estudio

Los factores que condicionan la preservación de los abanicos aluviales tributarios en valles estrechos son controlados por la evolución de la llanura aluvial. Las distintas avulsiones de los canales pueden comprometer la preservación de los abanicos. Por otro lado, la erosión del canal principal del abanico imposibilita la preservación completa del registro sedimentario de los abanicos.

La reconstrucción temporal, aun sin disponer de edades en las columnas estratigráficas estudiadas, se enmarca entre los 9 ka BP y los 3 ka BP basándonos en otros abanicos presentados por Cabré *et al.* (2017) en el área de estudio. Por lo tanto, en el Holoceno temprano se sitúa el inicio de la formación/preservación de los abanicos aluviales en la transición Pleistoceno-Holoceno post Último Máximo Glacial. El

encajamiento del valle a los 3 ka BP permite situar el final. El encajamiento permite la progradación de los abanicos con lo que los sedimentos procedentes de la cuenca tributaria forman nuevos lóbulos al pie del anti-guio abanico. Esta configuración hace que el registro de los últimos 3 ka BP se vea comprometido al agrandar directamente en la llanura aluvial actual.

Conclusiones

El número de capas interpretadas como resultado de eventos aleatorios de alta descarga acuosa registrados, así como el tamaño máximo de grano, varía según el abanico. El hecho de que se presenten estas diferencias responde a la heterogeneidad en la distribución espacial de las tormentas. Se puede considerar que no todos los procesos de cambio de tiempo atmosférico afectan a la zona de estudio por igual ya que se identifica una repetición cíclica y periódica de cambios atmosféricos en el registro sedimentario. Por lo tanto, la respuesta hidrológica registrada en cuencas que son relativamente pequeñas ($<100 \text{ km}^2$) en esta región de los Andes y en abanicos cercanos entre sí, excluye la necesidad de atribuir la activación de las cuencas a una influencia de un cambio climático regional.

Agradecimientos

A CONICYT+PAI (T7817110003). Agradecemos a Pere Busquets, revisor anónimo y a Manuel Díaz las aportaciones.

Referencias

- Cabré, A., Aguilar, G. y Riquelme, R. (2017). *Quaternary International* 438, Part A, 20-32.
- Salas, I., Herrera, C., Luque, J.A., Delgado, J., Urrutia, J. y Jordán, T. (2016). *Science of the Total Environment* 571, 178-194.
- Tiner, R.J., Negrini, R.M., Antinao, J.L., McDonald, E. y Maldonado, A. (2018). *Journal of Quaternary Science* 33(2), 150-165.
- Wells, S.G. y Harvey, A.M. (1987). *Geological Society of American Bulletin* 98, 182-198.