

Estudio geomorfológico y paleoambiental de las avalanchas de escombros de Maca y Lari, Valle de Colca

Gioachino Roberti^{1,2}, Brent Ward², Benjamin van Wyk de Vries¹, Gael Araujo Huaman³, Rigoberto Aguilar Contreras⁴, Nelida Manrique Llerena⁴ y Nicholas J. Roberts²

¹Laboratoire Magmas et Volcans, CNRS, IRD, OPGC - Université Clermont Auvergne, Campus Universitaire des Cézeaux, 6 Avenue Blaise Pascal, TSA 60026 - CS 60026, 63178 Aubiere Cedex, France. groberti@sfu.ca

²Earth Sciences Department - Simon Fraser University, 8888 University Drive, Burnaby, British Columbia V5A 1S6, Canada

³Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Av. Canadá 1470, San Borja - Lima,

⁴Observatorio Vulcanológico del INGEMMET - Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Barrio Magisterial Nro. 2 B-16 Umacollo - Yanahuara Arequipa.

Palabras clave: avalancha de escombros, sedimentos lacustres, análisis paleomagnético, datación por radiocarbono.

Resumen

El Valle del Colca, sur de Perú, es una zona geológicamente activa, afectada por la ocurrencia de deslizamientos. En este estudio nos centramos en la estratigrafía de los sedimentos desplazados por los movimientos de masas de Maca y Lari. El Río Colca va socavando constantemente una secuencia de sedimentos lacustres subyacentes a un depósito de la avalancha de escombros. Esto causa hundimiento y deformación en toda la secuencia, afectando a los pueblos asentados en la parte alta. Se ha realizado un estudio textural, estructural y estratigráfico en campo de la secuencia involucrada en los deslizamientos. La datación por ¹⁴C (radiocarbono) de los sedimentos orgánicos y el análisis paleomagnético de los sedimentos lacustres se aplicaron para restringir la edad y la relación espacial del *diamicton* (material detrítico con partículas de distintos tamaños) de avalancha de escombros involucrado en la deformación.

Nuestros resultados preliminares indican que la avalancha de escombros de Maca es más joven que los depósitos de avalancha de escombros de Lari. El evento en Maca conserva la superficie original, no deformó significativamente los sedimentos lacustres inferiores y repres   el río formando un lago. La avalancha de escombros de Lari no conserva la superficie original y está cubierta por hasta 10 m de sedimentos. Durante el emplazamiento, se rasgaron y deformaron profundamente los sedimentos lacustres subyacentes.

Los sedimentos lacustres por encima y por debajo de ambas avalanchas registran magnetización de polaridad normal. Se hizo la correlación de los sedimentos lacustres debajo de las avalanchas con el subchron de Jaramillo y los sedimentos sobre las avalanchas con el Chron Brunhes. La cronoestratigrafía paleomagnética puede ayudar a limitar mejor los eventos geológicos en el Valle del Colca.

La edad radiocarbono de sedimentos lacustres en la parte superior de la secuencia de Maca, indica una edad de emplazamiento de avalancha de escombros de 0.010-0.008 Ma. El deslizamiento pudo haber ocurrido en un clima húmedo y de desglaciación. Una mejor compresión de la dinámica de emplazamiento de las paleo-avalanchas de escombros ayudará a entender los peligros actuales y futuros en el Valle del Colca.

1 Introducción

Desde el punto de vista geológico, el Valle del Colca es una de las zonas más activas del Perú. Tanto los procesos profundos (tectónicos, volcanismos) como los superficiales (erosión, deslizamientos) están en juego en el valle y causan peligros significativos para las comunidades locales. El Valle del Colca está caracterizado por la presencia de sedimentos lacustres de diferentes edades, causadas por la obstrucción de flujos de lava y grandes avalanchas de escombros volcánicos. Estos han formado más de tres series de terrazas con una interestratificación compleja de sedimentos lacustres, avalanchas de escombros y flujos de lava.

En este estudio nos centramos en los deslizamientos activos que afectan a los poblados de Maca y Lari. Estos pueblos están contruidos sobre terrazas altas, formadas por una secuencia gruesa de sedimentos lacustres subyacentes al depósito de avalancha de escombros. Procesos fluviales, precipitación pluvial y los terremotos erosionan y desestabilizan los sedimentos lacustres, causando deslizamientos y expansión lateral que involucran a toda la secuencia y afectan a los centros poblados. Estos deslizamientos activos están instrumentados y monitoreados por INGEMMET (Araujo et al., 2017; Taipe et al., 2017). Las tasas de deformación, así como las características generales de los deslizamientos han sido descritas por Lacroix et al. (2015) y Zerathe et al. (2016). En este estudio investigamos la estratigrafía de los depósitos

involucrados en la deformación gravitacional. Nuestro objetivo es determinar de mejor manera el rango de edad, el origen y el entorno de emplazamiento de los depósitos de avalanchas de escombros, afectados por deslizamientos activos. Una mejor comprensión de los movimientos en masas en el pasado y su relación con el paleoambiente mejorará la gestión de riesgo frente a la ocurrencia de deslizamientos.

2 Métodos

Se realizó el análisis de campo y la recolección de muestras sobre Maca y Lari, durante el mes de junio del 2017. Donde describimos la estratigrafía en los cortes de carreteras y planos de escarpa; analizamos la textura, estructura y relaciones espaciales de las unidades de depósito.

Se aplicó la técnica fotogramétrica "Structure from Motion (SfM)" de fotografías tomadas por una cámara digital, para generar modelos tridimensionales de afloramientos, donde se obtuvieron imágenes de estructuras geológicas y sus relaciones espaciales. Recolectamos muestras para datación por radiocarbono en un lecho de turba que cubre el depósito de avalancha de escombros de Maca. El carbón se ha aislado en Paleotec Services, (Ottawa, Canadá) y el radiocarbono fue datado en el Keck Carbon Cycle AMS Lab de la Universidad de California. La fecha del radiocarbono se ha calibrado con el software OxCal (Ramsey and Lee, 2013) y la curva atmosférica SHCal13 (Hogg et al., 2013).

Para el análisis paleomagnético, se recogieron muestras cilíndricas (2,1 cm de diámetro, 1,8 cm de longitud) de lentes de sedimentos subyacentes (compuestos predominantemente de limo o arena fina) horizontalmente estratificadas, superpuestas y/o laterales al diamictón de deslizamiento. La magnetización remanente natural (NRM) de cada una de las 27 muestras se midió utilizando un magnetómetro giratorio AGICO JR-6A en el laboratorio de Paleomagnetic Ambiental, Universidad de Lethbridge. La magnetización remanente se volvió a medir después de la desmagnetización gradual en un campo alterno (típicamente 12 pasos que van de 5 a 200 mT) usando un desmagnetizador de campo alterno ASC Scientific D-2000. Las direcciones características de magnetización remanente (ChRM) se determinaron mediante el análisis de componentes principales (PCA) utilizando Remasost v. 3.0 de AGICO (soporte de análisis de datos paleomagnéticos). Las direcciones medias de remanencia de los grupos de muestra se determinaron a partir de los resultados de PCA de muestras individuales usando el módulo estadístico en Remasost v. 3.0.

3 Resultados

3.1 Maca

El diamictón de avalancha de escombros de Maca se superpone a las terrazas lacustres más bajas. El diamictón se encuentra entre ~3500 m.s.n.m., en la apertura de la Quebrada Japo a unos 3180 m.s.n.m, cerca del actual cauce del Río Colca. El depósito se distribuye en una morfología de abanico crudo y se caracteriza por la topografía de montículos con una diferencia de elevación de hasta 100 m entre crestas de montículos y depresiones entre montículos. El límite oriental del depósito se define por la transición de la topografía del montículo a una superficie plana, cubierta por depósitos de diatomeas cerca del pueblo de Maca. El depósito está delimitado por el flanco de quebrada al oeste. Aproximadamente a 3300 y 3250 m.s.n.m. dos escarpes principales E-W definen el área de deformación actual. A lo largo de estas escarpas, las facies y las estructuras internas de depósito quedan expuestas.

3.1.1 Depósito de avalancha de escombros

El depósito tiene una estratificación cruda con una capa superior grisácea de unidad volcánica porfídica y una capa inferior de coloración amarillo-rojiza de unidad volcánica porfídica alterada. El depósito es usualmente matriz-soportada con clastos angulosos a subangulosos. El tamaño de los clastos varía de unos pocos centímetros a metros, y pueden tener fracturas de rompecabezas (jigsaw). Localmente, los clastos más grandes tienen gradación inversa. Se observan lentes de coloración rojo-amarillo de material monolitológico de grano fino. Dominios del material monolitológico clasto-soportados están presentes cerca de la superficie del depósito, generalmente en la unidad volcánica grisácea. Los bloques grandes (> 2 m) de la litología gris forman vetas en la superficie del depósito, generalmente cerca de las cimas de los hummocks. Otras estructuras presentes en el área de estudio son fallas, pliegues, horst y graben (Figura 1). Las estructuras horst-graben pueden definir los hummocks y las áreas inter-hummock.

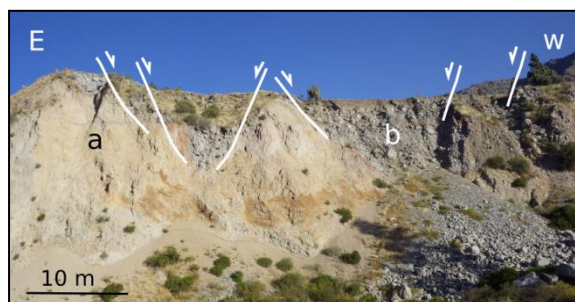


Fig. 1- Vista panorámica de la avalancha de escombros de Maca. a) volcánicos alterados amarillos-rojos b) volcánicos grises. Las fallas definen la estructura horst-graben

3.1.1 Sedimentos lacustres, muestras paleomagnéticas y de radiocarbono

Muestras paleomagnéticas y sedimentos lacustres debajo del depósito de avalancha de escombros

Las muestras MA 1 - MA 3 se recolectaron 40 m por debajo del depósito de avalancha de escombros, cerca del actual Río Colca (-71,7751; -15,6359; 3170 m.s.n.m.) en una capa laminada de arcilla limosa de color marrón oscuro pluri-decimétrica. El lecho aflora en la base de una escarpa de 10 a 15 m de altura alternando capas horizontales de limo y arena. Clastos *rip-up* (fragmentos o bloques arrastrados por una corriente de flujo) del material limoso están presentes en las capas de arena. La secuencia no se ve perturbada, pero los signos de deformación son notorios en la parte más alta de la pendiente. Estas capas podrían haber sido desplazadas en masa por la deformación actual.

Las muestras MA 4 - MA 7 fueron recogidas aproximadamente a un metro por debajo del contacto con el diamictón de avalancha de escombros (-71,7753; -15,6368; 3210 m.s.n.m.). Las muestras están espaciadas verticalmente en una capa de arcilla limosa de color marrón oscuro de 50 cm de grosor. El contacto está marcado por un plano de cizallamiento materializado por una brecha fina cementada de 2 cm de espesor (clastos <1 cm), con espejos de falla a lo largo de la superficie de corte. Las direcciones paleomagnéticas limpias de las muestras MA 1- MA 3 y MA 4- MA 7 registran magnetización de polaridad normal. Los ángulos promedio de declinación e inclinación para MA 1-2-3 son 314.6 ° y -31.0 °, respectivamente; los ángulos promedio de declinación e inclinación para MA 4 - MA 7 son 359.4 ° y -58.0 °, respectivamente.

Muestras paleomagnéticas y sedimentos lacustres por encima del depósito de avalancha de escombros

Las muestras MA 8 - MA 18 han sido recolectadas a lo largo de la carretera de trocha, a 200 m de Quebrada Huancane (-71.752; -15.6423;

3270 m.s.n.m.) y a un kilómetro de distancia de la avalancha de Maca. La elevación y la posición indican que los sedimentos muestreados están estratigráficamente encima del depósito de avalancha. La exposición analizada tiene 3-4 m de altura. Los inferiores a 1.5 m de la sección están en arena, grava y lentes de diamictón. Los lentes pueden clasificarse de forma moderada a ordenada, los clastos son redondeados a sub redondeados y pueden mostrar imbricación y gradación, con tamaños hasta de 40 cm. Los 30-40 cm superiores de esta capa basal están en arena limosa. Las muestras MA 13 - MA 15 fueron recolectadas en esta capa. Los próximos 60-80 cm están en capas de diatomita. Las muestras MA 16 - MA 18 se recolectaron en la base y MA 11- MA 12 en la parte superior de la diatomita. Las muestras MA 8 - MA 10 se han recogido en un material limoso y poroso de color marrón de 10-15 cm de espesor, sobre la diatomita. Los 50-80 cm por encima de la sección se encuentran en un depósito matriz-soportado marrón y clastos redondeados de un centímetro. Esta capa podría haber sido modificada por la actividad agrícola. Las direcciones paleomagnéticas limpias de las muestras MA 8 - MA 18 registran magnetización de polaridad normal. Los ángulos promedio de declinación e inclinación son 349.5 ° y -31.2°, respectivamente.

Muestras de radiocarbono y sedimentos lacustres superiores

A lo largo de la discontinuidad mayor inferior E-O, aproximadamente a 3270 m.s.n.m. (-71.7747; -15.6403) están expuestos el diamictón de avalancha de escombros y los sedimentos superpuestos (Fig. 2). Sobre el diamictón de avalancha de escombros hay una capa de diatomita fina y laminada de color blanco de hasta 30 cm de espesor. La capa se cierra lateralmente. En la parte superior de la diatomita o directamente en contacto con el diamictón de avalancha, hay una capa de 10-15 cm de espesor de capa orgánica oscura laminada y fina, de la cual se tomaron muestras para el análisis de radiocarbono. La capa orgánica pasa a una capa porosa de 80 cm de espesor de limo gris. Una capa de un metro de grosor marrón poroso con pocos clastos de un centímetro de tamaño cierra la secuencia. La edad de ^{14}C de la capa orgánica es 6380 ± 35 años BP. La edad calibrada correspondiente es 7333-7169 (88.3%) cal BP.



Fig. 2- Depósito de diatomita sobre la avalancha de Maca. Nota: Sedimentos interrumpidos por la deformación actual a) diamicton de avalancha de escombros, b) diatomita, c) capa orgánica datada.

3.2 Lari

En Lari la morfología no es indicativa de la extensión de la avalancha de escombros. El pueblo está ubicado en una terraza plana a 3350 m.s.n.m. Algunos grandes depósitos de avalanchas de escombros hummocks (~ 120 m) se elevan hasta 15 m por encima del entorno constituido por sedimentos de abanico. Una gran escarpa de dirección E-O define el límite de la terraza y la zona de deslizamiento activa. Además de la estratigrafía del afloramiento a lo largo de la escarpa.

3.2.1 Diamicton de avalancha de escombros

El diamicton de avalancha de escombros tiene un espesor de hasta 25 m. Sobre yace a los sedimentos lacustres y está cubierto por sedimentos de abanico (Fig. 3). El depósito es un diamicton masivo, matriz-soportado, con clastos de hasta un metro de diámetro. Los clastos son angulosos a subangulosos y litológicamente está representada por unidades volcánicas porfíricas grises o rojas-amarillas alteradas. Estos pueden formar dominios monolitológicos con clastos angulares de hasta varios metros de tamaño en una matriz arenosa. Lentes de arenas rojas y amarillas de tamaño métrico bien clasificadas, están presentes a lo largo de los planos de corte. Además de lentes de clastos soportados, bien redondeados y sorteados. Localmente, el diamicton y las capas bien clasificadas forman una estratificación cruda. En el depósito están presentes grandes clastos incrustados de limo y arenas.

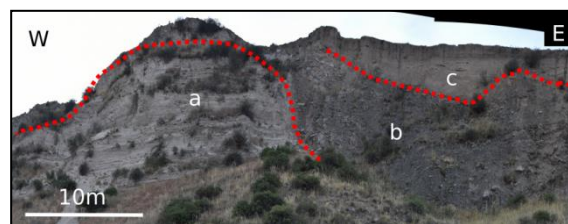


Fig3. Vista panorámica de la escarpa de Lari. a) sedimentos lacustres inferiores, b) diamicton de avalancha de escombros c) sedimentos de abanico.

Las zonas de falla y corte están marcadas por la mezcla litológica. El contacto inferior entre deslizamiento y los sedimentos lacustres, es irregular, y forma depresiones y picos con hasta 20 m de diferencia. Los contactos entre la depresión y los picos están muy inclinados (70-90 ° comúnmente buzando al E u O, dependiendo de la geometría de arrastre) y marcado por una intensa deformación. En los puntos más altos y más bajos los contactos son menos empinados (10-40°), buzando al N o S. Los sedimentos lacustres aumentan su deformación hacia los planos de contacto: están inclinados, fallados y paralelizados al contacto donde se mezclan con material de avalancha de escombros y forma una brecha de falla. Las fallas indican una dirección de transporte hacia el sur.

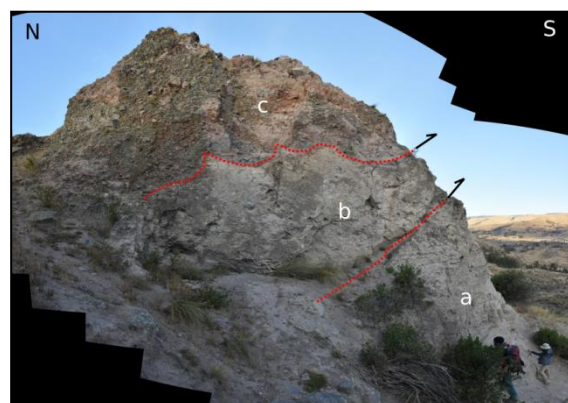


Fig.4- Sedimentos lacustres empujados por la avalancha de escombros. Los sedimentos lacustres (a) están altamente deformados en una brecha de falla (b) por la avalancha de escombros (c). Las flechas negras indican la dirección del transporte al S.

3.2.2 Sedimentos lacustres y muestras paleomagnéticas

Debajo del depósito de avalancha de escombros.

La exposición es de aproximadamente 4.5 m de altura, a lo largo de un corte de carretera que desciende en el borde occidental de la escarpa principal (-71.7758; -15.6289; 3280 m.s.n.m.). La sección está constituida por una secuencia creciente de limo laminado y arena de estratificación cruzada. Las muestras LA 7 - LA 10 se recogieron a unos dos

metros por debajo del contacto con el diamicton de la avalancha de escombros.

Las direcciones paleomagnéticas limpias de las muestras LA 7 - LA 10, registran magnetización de polaridad normal. Los ángulos promedio de declinación e inclinación son 2.8° y -28.7° , respectivamente.

Encima del depósito de avalancha de escombros

Los sedimentos que cubren la avalancha de escombros afloran a lo largo de la escarpa principal. La sección muestreada tiene un espesor de hasta 10 m, con sedimentos de limo, arena y grava no disturbados (-71.7712 ; -15.6265 ; 3340 m.s.n.m.). Una capa de color marrón oscuro está a unos dos metros de la parte superior. El último metro de la sección son de una capa de arena limosa de color marrón claro con pocos clastos dispersos, de un centímetro de tamaño. Esta capa es modificada por la actividad agrícola actual.

Las muestras LA 1 - LA 3 provienen de una secuencia limosa laminada con capas centimétricas, aproximadamente a un metro por encima del contacto con la avalancha de escombros. Las muestras LA 4 - LA 6 son de una capa de arena limosa a unos dos metros por encima del contacto. Las direcciones paleomagnéticas limpias de las muestras LA 1 - LA 6 registran magnetización de polaridad normal. Los ángulos promedio de declinación e inclinación son 2.9° y -3.3° , respectivamente.

4 Discusión

4.1 Avalancha de escombros de Maca y Lari

Los depósitos de avalancha de escombros de Maca y Lari tienen características de textura similares, pero geomorfología distinta. La avalancha de escombros de Maca conserva la topografía hummocky (en montículos) original, lo que permite mapear su extensión. Se emplazó en una terraza de sedimentos lacustres a aproximadamente 3200 m.s.n.m., a lo largo de una superficie de contacto discreta. Los sedimentos lacustres subyacentes no están significativamente deformados. La diatomita aflora encima y lateralmente al depósito de deslizamiento. La topografía preservada con hummocks y la elevación de la superficie del emplazamiento sugieren una edad relativamente joven del depósito. El depósito de diatomita sugiere la presencia de un lago después del emplazamiento del deslizamiento. El hecho de que los sedimentos lacustres inferiores no se deformen podría indicar que estaban relativamente secos en el momento del emplazamiento. En este caso, el depósito de diatomita podría haberse formado en un lago con represamiento causado por derrumbes.

El diamicton de avalancha de escombros de Lari no conserva la morfología superficial original. Está cubierto por hasta 10 m de sedimentos con pocos hummocks visibles. El contacto con los sedimentos lacustres sublinguales es muy irregular a unos 3300 m.s.n.m. Los sedimentos lacustres están muy deformados. Grandes clastos rip-up fueron incorporados. La deformación alta, fallamiento y clastos incrustados, pueden indicar que estos sedimentos no estaban consolidados o estaban húmedos en el momento del emplazamiento del deslizamiento. Teniendo en cuenta la elevación de la superficie del emplazamiento a ~ 3300 m.s.n.m. y la morfología de la superficie del depósito, no conservado. Creemos que el deslizamiento de Lari es significativamente más antiguo que el deslizamiento de Maca.

El Valle del Colca se llenó con sedimentos lacustres hasta los 3500 m.s.n.m, superficie de terraza actual más alta. Kukulak et al. (2016) describen estos sedimentos lacustres y los asocian a una fase de represamiento del valle y la formación del paleo-lago Pinchollo-Coporaque. El origen y la duración de formación del lago no están bien definidas. Gomez et al. (2004) consideran que el lago fue formado por el represamiento del valle, por el colapso del flanco y los flujos de lava asociados al flanco norte del volcán Hualca Hualca. Chávez (2004) establece el inicio de la sedimentación en ~ 1.1 Ma y Kukulak et al. (2016) concluye que el lago existía hasta 0.61 ± 0.01 Ma, basado en edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ del flujo de lava que cubre depósitos lacustres Thouret et al. (2007).

Los deslizamientos de Maca y Lari se emplazaron en terrazas a ~ 3200 m.s.n.m. y ~ 3300 m.s.n.m., respectivamente. El paleo-lago Pinchollo-Coporaque llenó el valle hasta la terraza más alta a ~ 3500 m.s.n.m. Una primera fase de erosión fluvial formó la terraza a ~ 3300 m.s.n.m., donde se emplazó la avalancha de escombros de Lari. La erosión continuó formando la superficie de ~ 3200 m.s.n.m., donde se emplazó el deslizamiento de Maca. La superficie de deposición de Maca es más baja y más joven que la superficie de Lari, ya que se produjo mayor erosión antes de su emplazamiento. Los deslizamientos están en contacto directo con los sedimentos del lago; no encontramos signos de deposición fluvial (superficies erosionadas y capas de grava), entre el diamicton de deslizamiento y los sedimentos lacustres subyacentes. Estas relaciones estratigráficas sugieren otro posible escenario. Las terrazas sobre las que se emplazan los deslizamientos de Maca y Lari podrían ser superficies sedimentarias y no erosionadas. En este caso, se han producido al menos otros dos eventos de formación de lagos en el Valle del Colca tras el embalse y el drenaje del paleo-lago Pinchollo-Coporaque. Durante el primer represamiento, el

valle se llenó a ~3300 m.s.n.m. Posteriormente, el río cortó el depósito y el valle fue represado por segunda vez, se llenó a ~3200 m.s.n.m, y luego se erosionó hasta el nivel actual. Las terrazas son superficies deposicionales progresivamente más jóvenes. El deslizamiento de Lari ocurrió cuando el lago existía a ~ 3300 m.s.n.m., como lo indica la deformación significativa de los sedimentos lacustres. El deslizamiento de Maca ocurrió después de que el lago subsiguiente a ~3200 m.s.n.m. había drenado, ya que los sedimentos del lago no muestran signos de deformación significativa durante el emplazamiento del deslizamiento.

4.2 Análisis paleomagnético y de radiocarbono (^{14}C)

Análisis paleomagnético

Las mediciones de remanencia paleomagnética indican que el material muestreado en todos los sitios está magnéticamente estable. Toda la muestra analizada registra inclinaciones negativas y declinación hacia el norte, típica de los campos magnetizados normales en el Hemisferio Sur (Fig. 5a). Las direcciones de remanencia son similares a las esperadas en muestreo de latitudes (GAD: Fig. 5b), lo que sugiere que los sedimentos registran fielmente los campos magnéticos pasados de la Tierra. La variabilidad entre sitios puede representar la influencia de la variación secular, pero también puede ser el resultado de la limpieza incompleta de algunas muestras en 200 mT. Las orientaciones hacia el oeste de las muestras MA-1 a MA-3 (Fig. 5b) también pueden ser el resultado de la deformación posterior a la deposición debido a la erosión y socavación del río actual.

Los sedimentos lacustres debajo de Maca y Lari están normalmente magnetizados. Sin embargo, su correlación más probable con los períodos normalmente magnetizados de la Escala de Tiempo de Polaridad Geomagnética (Gradstein et al., 2012) depende del número de eventos de relleno de lagos. En la hipótesis de un solo evento de lago (Pinchollo-Coporaque), estimamos un espesor máximo de secuencia de 350-400 m, obtenidos de afloramientos de basamento fuera del área de interés y el nivel más alto de la terraza a ~ 3500 m.s.n.m. Las muestras de Maca y Lari son de 300 m y 200 m, respectivamente, por debajo de la parte superior de la secuencia, lo que indica una posición estratigráfica relativa de media a baja. La duración del paleo-lago se considera sería de 1.1-0.61 Ma. La sedimentación comenzó durante el Chron de polaridad inversa Matuyama (2.581-0.781 Ma), cubriendo la polaridad normal corta de Jaramillo subchron (1.072-0.9088 Ma Gradstein et al., 2012) y terminó durante la polaridad normal del Chron Brunhes (0.781-presente).

Al vincular esta cronoestratigrafía con la litoestratigrafía, esperamos una polaridad inversa en la base de la secuencia, un intervalo normal, una polaridad inversa y una normal en la parte superior. Nuestras muestras están normalmente polarizadas y en posiciones estratigráficas medias bajas. En el escenario de un solo lago, registraron el subchron de polaridad normal de Jaramillo y no fueron remagnetizados suficientemente para impartir una sobreimpresión invertida durante el período de polaridad normal de 0,2 Ma al final del Chron Matuyama.

En la hipótesis de múltiples lagos, la terraza más alta a ~3500 m.s.n.m., está relacionada con el lago Pinchollo-Coporaque y podría ser a polaridad invertida. Las superficies deposicionales de Maca y Lari a ~3200 y ~3300 m.s.n.m., son terrazas anidadas más jóvenes y de edad < 0,61 Ma. De este modo registrarían la polaridad normal del Chron Brunhes (<0.781 Ma: Gradstein et al., 2012).

Kukulak et al. (2016) documentan un solo lago en esta parte del valle y nosotros no llevamos a cabo un trabajo de campo lo suficientemente extenso como para confirmar el escenario de lagos múltiples. Por lo tanto, proponemos la hipótesis nula de que las muestras normalmente polarizadas, debajo de la avalancha de escombros de Maca y Lari registran el subcrón de Jaramillo. Las hipótesis alternativas, que estas muestras registran a Brunhes Chron, son posibles.

Se necesita una magnetoestratigrafía detallada para determinar mejor la edad de los sedimentos lacustres y el número de eventos de represamiento en el Valle del Colca. El análisis paleomagnético también podría ayudar a confirmar y posiblemente refinar la edad absoluta de los flujos de lava datados con técnicas radiométricas.

Los sedimentos que cubren tanto el diamictón de Maca como el de Lari registran magnetización de polaridad normal. Interpretamos que estos sedimentos se han depositado durante el período de polaridad normal actual. Estos sedimentos no están relacionados con el paleo-lago Pinchollo-Coporaque. El depósito de diatomita en Maca está relacionado con una fase de represamiento fluvial posterior al deslizamiento y los sedimentos de abanico en Lari probablemente provengan de la Quebrada Chunta Huayjo, cerca del pueblo de Lari.

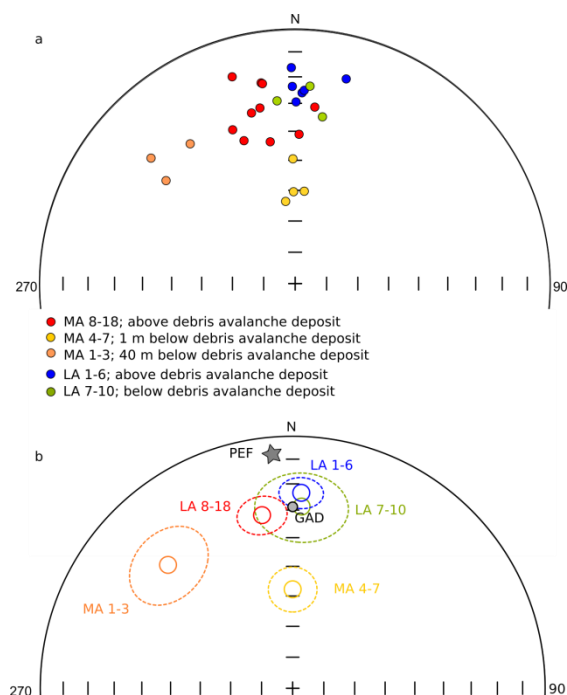


Fig. 5a) Diagrama de área igual (Lambert) de direcciones de remanencia paleomagnéticas limpias, para todas las muestras. Las inclinaciones son negativas, lo que indica que las muestras están normalmente magnetizadas. MA 1-MA 3 no están todos alineados con la dirección N-S. Esta podría ser la influencia relacionada de la variación secular, la limpieza incompleta por 200mT o el movimiento gravitacional de la sección. b) Media de direcciones limpias por sitio de muestra. El círculo completo indica la media, el círculo discontinuo indica la incertidumbre a 95, GAD (360°/-28.8°), dipolo axial geocéntrico normalmente magnetizado; PEF (354.9° / -7.4°), el campo magnético actual de la Tierra.

Análisis de radiocarbono

Los sedimentos lacustres en la parte superior del diamictón del deslizamiento de Maca data de 6380±35 años BP o 7333-7169 (88.3%) cal BP. Esta fecha confirma la polaridad normal de los sedimentos en relación con el Chron Brunhes y da una edad mínima de la avalancha de escombros de Maca. Teniendo en cuenta la correlación espacial entre los sedimentos datados y el diamictón de deslizamiento creemos que el deslizamiento causó el represamiento del río y la formación del lago. No conocemos la tasa de sedimentación de la diatomita, pero suponemos que podría tomar hasta algunos siglos poder formar una capa de 30 cm. El deslizamiento de Maca puede estar en el rango de edad de 0.010-0.008 Ma.

La persistencia del lago y la presencia de agua estancada pueden indicar un período climático húmedo. Steffen et al. (2010) documentan tres períodos más húmedos con sedimentación mejorada en el Valle del Colca y en 0.110-0.100, 0.060-0.040 y 0.012-0.008 Ma. Alcalá et al. (2017) documenta la desglaciación del Altiplano a ~ 0.012 Ma. El último

período húmedo 0.012-0.008 Ma y la desglaciación pueden haber tenido un rol en la iniciación del deslizamiento. La avalancha de escombros de Maca se inició en el borde del altiplano. El agua de deshielo glaciar podría haber incrementado la inestabilidad y contribuido al fallamiento. Los terremotos, la erosión y los cambios en la presión del agua subterránea podrían haber desencadenado el colapso.

5 Conclusiones

A partir del análisis textural y estructural en campo, la datación por ¹⁴C y el análisis paleomagnético de las avalanchas de escombros y de los sedimentos lacustres de Maca y Lari, concluimos que:

- Los depósitos de avalanchas de escombros de Maca y Lari tienen diferentes edades y probablemente diferentes ambientes deposicionales. El deslizamiento de Maca conserva su topografía original. No deformó significativamente los sedimentos lacustres subyacentes durante el emplazamiento; esto puede indicar que el deslizamiento de Maca se depositó sobre una superficie seca (es decir, después del drenaje del lago). El deslizamiento de Lari es más antiguo, su expresión superficial ha sido cubierta por la sedimentación de los abanicos y ha barrido y deformado profundamente los sedimentos subyacentes lacustres durante el emplazamiento. El alto grado de deformación de los sedimentos subyacentes puede indicar la presencia de agua durante el emplazamiento, por lo tanto, antes del drenaje del lago.
- Los sedimentos lacustres debajo y encima de ambas avalanchas de escombros son buenos marcadores del campo paleomagnético terrestre, lo que indica que estos materiales son adecuados para una futura magnetoestratigrafía. Todas las muestras que recogimos recogen la magnetización de polaridad normal. Proponemos que los sedimentos del lago debajo de las avalanchas de escombros registran el subcrón de Jaramillo y los que están por encima de las avalanchas de escombros registran el Chron Brunhes. Sin embargo, si se considera más de un evento de llenado de valle, podría haber ocurrido la formación de terrazas anidadas de depósito más jóvenes y el registro de polaridad normal podría registrar el Chron Brunhes. Trabajo de campo adicional y muestreo paleomagnético detallado a lo largo de toda la secuencia lacustre son necesarios para confirmar el número de lagos, la estratigrafía paleomagnética, las edades ⁴⁰Ar / ³⁹Ar sobre los flujos volcánicos permitirían limitar mejor la edad del paleo-lago Pinchollo-Coporaque.
- La avalancha de escombros de Maca se emplazó antes de 7333-7169 (88.3%) cal BP y formó un lago

donde se acumuló la diatomita. La avalancha de Maca puede haber estado condicionada por un clima húmedo y la desglaciación del Altiplano alrededor de 0.012-0.008 Ma.

La reconstrucción de eventos geológicos y su sincronización en el Valle del Colca es un desafío importante. Los sedimentos del lago registran los movimientos de masa, las tasas de sedimentación, la actividad volcánica y sísmica, así como las variaciones climáticas. Comprender los eventos geológicos del pasado y sus interconexiones pueden ayudar a manejar los desafíos actuales en términos de cambio climático, desglaciación, y riesgo.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la subvención del IRD a Roberti y la subvención Chair a Ward. Este proyecto forma parte de la colaboración de INGEMMET-LMV-SFU y del proyecto "the End of an Arc: The Remarkable Life and Death of a Volcanic Arc", una asociación entre Francia y Canadá. Se agradece a Patricio Valderrama Murillo por el apoyo en la coordinación, a Alice Telka por la datación por radiocarbono, a Jossep Huanca Cárdenas por el apoyo en campo y a Derek Cronmiller por las discusiones constructivas.

Referencias

- Alcalá, J., Palacios, D., Vázquez, L., 2017. A Preliminary Investigation of the Timing of the Local Last Glacial Maximum and Deglaciation on Hualca Hualca Volcano - Patapampa Altiplano (Arid Central Andes, Peru). *Quaternary International* 449 (August): 149–60. doi:10.1016/j.quaint.2017.07.036.
- Araujo, G., Valderrama, P., Taïpe, E., Miranda, R., 2017. Estudio Geológico Y Monitoreo Geodesico En El Deslizamiento de Lari, Arequipa. Ingemmet, Informe Técnico N° A6740
- Chavez, L.E., 2004. Contribucion al conocimiento de la geodinamica de Lari. Tesis de Ingeniero IngenieroGeologo. UNSA Arequipa (inedito)
- Gomez, A.J.C., Macias, J.L., Siebe, C., Ocola, A.L., 2004. Debris Avalanche Deposit of Hualca Hualca Volcano and the Formation of a Volcanic Dam in the Colca Valley, Arequipa e Peru. IAVCEI, General Assembly, 14-16 November 2004, Pucon, Chile
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M., Ogg, G. 2012. *The Geologic Time Scale 2012*. Amsterdam, Elsevier, 1176 pp.
- Hogg, A., Hua, Q., Blackwell, P., Niu, M., Buck, C., Guilderson, T., et al. (2013). SHCal13 Southern Hemisphere Calibration, 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1889–1903. doi:10.2458/azu_js_rc.55.16783
- Kukulak, J., Paulo, A., Kalicki, T., 2016. Lithology of Lacustrine Deposits in the Colca Valley. *Journal of South American Earth Sciences* 69: 152–70. doi:10.1016/j.jsames.2016.03.008.
- Lacroix, P., Berthier, E., Taïpe, E., 2015. Earthquake-Driven Acceleration of Slow-Moving Landslides in the Colca Valley, Peru, Detected from Pleiades Images. *Remote Sensing of Environment*, 165, 148–158. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.010R>
- Steffen, D., Schlunegger, F., Preusser, F., 2010. Late Pleistocene Fans and Terraces in the Majes Valley, Southern Peru, and Their Relation to Climatic Variations. *International Journal of Earth Sciences* 99 (8): 1975–89. doi:10.1007/s00531-009-0489-2.
- Ramsey, C., Lee, S. (2013). Recent and Planned Developments of the Program OxCal. *Radiocarbon*, 55(2), 720-730. doi:10.1017/S0033822200057878
- Taïpe, E., Araujo G., Miranda, R., Valderrama, P., 2017. Monitoreo Geodesico Y Estudio Geodinamico Del Deslizamiento de Maca. Ingemmet, Informe Técnico N° A6741
- Thouret, J.-C., Wörner, G., Gunnell, Y., Singer, B., Zhang, X., Souriot, T., 2007. Geochronologic and Stratigraphic Constraints on Canyon Incision and Miocene Uplift of the Central Andes in Peru. *Earth and Planetary Science Letters* 263 (3–4): 151–66. doi:10.1016/j.epsl.2007.07.023.
- Zerathe, S., Lacroix, P., Jongmans, D., Marino, J., Taïpe, E., Wathelet, M., Pari, W., et al. 2016. Morphology, Structure and Kinematics of a Rainfall Controlled Slow-Moving Andean Landslide, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms* 41 (11): 1477–93. doi:10.1002/esp.3913.