

# MODELADO DEL RELIEVE EN AFLORAMIENTOS DE LA FORMACIÓN EL PASO, ENTRE CAFAYATE Y LOROHUASI, SALTA, ARGENTINA

*Data de aceite: 01/11/2023*

### **María del Carmen Visich**

Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-5107-9199>

### **Josefina Ramírez Visich**

Alpha Lithium S.A., Argentina  
<https://orcid.org/0000-0002-0244-7725>

**RESUMEN:** La zona de estudio corresponde a los relieves de lomadas constituidos por series alternantes de limolitas y areniscas finas, de la Formación El Paso (Pleistoceno), ubicados al sudoeste de la provincia de Salta, Argentina, entre la localidad de Cafayate y el paraje Lorohuasi. Los estudios geomorfológicos realizados permitieron determinar que la continuidad del primitivo depósito lacustre fue afectada por ciclos de humectación-deseccación resultantes de las precipitaciones estacionales, propias del clima seco-árido que caracteriza a la zona desde el Holoceno al presente y, a la intensa amplitud térmica diaria, entre 12°C y 36°C. Las precipitaciones estacionales favorecen el desarrollo de una intensa erosión e incisión pluvial, en los depósitos lacustres, generando típicos surcos de erosión conocidos como piping.

Los surcos de escurrimiento se originan cuando el agua erosiona y elimina el material que se encuentra en la parte superior del depósito. Estos sedimentos son transportados hacia los laterales y la parte baja formando pequeños abanicos. El material retransportado hacia los laterales forma sobre el depósito original una nueva cobertura de material pelítico. Las pelitas del depósito original se diferencian de las del depósito secundario, porque las primeras presentan laminación, mientras que las segundas tienen una estructura maciza.

**PALABRAS CLAVE:** Sedimentos lacustres, Hidroclástismo, Surcos de erosión.

### **RELIEF MODELING IN OUTCROPS OF THE EL PASO FORMATION, BETWEEN CAFAYATE AND LOROHUASI, SALTA, ARGENTINA**

**ABSTRACT:** The study area corresponds to the reliefs of hills assembled by alternating series of siltstones and fine sandstones, of the El Paso Formation (Pleistocene), located to the southwest of the province of Salta, Argentina, between the town of Cafayate and the Lorohuasi area. The geomorphological study carried out made it possible to determine that the continuity of the primitive lacustrine deposit was affected

by cycles of humidification-desiccation resulting from seasonal rainfall, typical of the dry-arid climate that characterizes the area from the Holocene to the present and, to the intense daily thermal amplitude, between 12°C and 36°C. Seasonal rainfall favors the development of intense erosion and pluvial incision, in the lacustrine deposits, typical erosion grooves known as piping will result. Runoff grooves are created when water erodes and removes material on top of the reservoir. These sediments are transported to the small sides and the bottom forming fans. The material retransported to the sides forms a new cover of pelitic material over the original deposit. The pellets from the original deposit differ from those from the secondary deposit, because the former present lamination, while the latter have a solid structure.

**KEYWORDS:** Lacustrine sediments, Hydroclasticism, Erosion furrows.

## MODELAGEM DE RELEVO EM AFLORAMENTOS DA FORMAÇÃO EL PASO, ENTRE CAFAYATE E LOROHUASI, SALTA, ARGENTINA

**RESUMO:** A área de estudo corresponde aos relevos de colinas constituídos por séries alternadas de siltitos e arenitos finos, da Formação El Paso (Pleistoceno), localizados ao sudoeste da província de Salta, Argentina, entre a cidade de Cafayate e a área de Lorohuasi. Os estudos geomorfológicos realizados permitiram constatar que a continuidade do depósito lacustre primitivo foi afectada pelos ciclos de humificação-dessecação resultantes das precipitações sazonais, típicas do clima árido-seco que caracteriza a zona desde o Holocénico até ao presente, e pela intensa amplitude térmica diariamente, entre 12°C e 36°C. As chuvas sazonais favorecem o desenvolvimento de intensa erosão e incisão pluvial nos depósitos lacustres, gerando sulcos de erosão típicos conhecidos como piping. Ranhuras de escoamento são criadas quando a água sofre erosão e remove material do topo do reservatório. Esses sedimentos são transportados para as laterais e para a parte inferior, formando pequenos leques. O material retransportado para as laterais forma uma nova cobertura de material pelítico sobre o depósito original. As pelotas do depósito original diferem daquelas do depósito secundário, pois as primeiras apresentam laminação, enquanto as últimas possuem estrutura sólida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sedimentos lacustres, Hidroclasticismo, Sulcos de erosão.

## 1 | INTRODUCCIÓN

La zona de estudio corresponde a los depósitos lacustres de la Formación El Paso (Pleistoceno) ubicados en el piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes, entre la localidad de Cafayate y el paraje Lorohuasi.

Cafayate se ubica al sudeste de la provincia de Salta, a 1.683 m s.n.m., en las coordenadas geográficas 26° 04' Latitud Sur y 65° 58' Longitud Oeste. Lorohuasi se encuentra a 3 kilómetros al sur de la ciudad de Cafayate. Posee una cota de 1.618 m s. n. m., y se sitúa en las coordenadas geográficas 26° 05' Latitud Sur y 65° 58' Longitud Oeste. Los depósitos lacustres se encuentran entre los siguientes valores de coordenadas: 26° 04' Latitud Sur; 65° 52' Longitud Oeste y 26° 06' Latitud Sur; 65° 52' Longitud Oeste.

Uno de los caminos más rápidos para acceder a la zona de interés, desde la ciudad

de Salta, consiste en dirigirse hacia el oeste por la Avenida Juan Domingo Perón/ Ruta Provincial N°28, luego continuar hacia el sur por la Avenida Circunvalación Oeste hasta tomar la Ruta Provincial N°24 en dirección a la localidad de Cerrillos. Desde Cerrillos se deben recorrer aproximadamente 150 kilómetros hacia el sur por la Ruta Nacional N°68. Antes de llegar al puente del río Santa María se debe girar hacia el sur y tomar el “Camino del Norte”. Este camino, con rumbo norte - sur, es empleado para recorrer los viñedos ubicados en el piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes entre las localidades de Cafayate y Tolombón. Por el “Camino del Norte” se deben recorrer 3 kilómetros hacia el sur hasta llegar a los depósitos lacustres (Fig. 1).

En este trabajo se efectuará un análisis geomorfológico para determinar el comportamiento de estos sedimentos lacustres y, de las demás unidades geomorfológicas identificadas en la zona, frente al accionar de los procesos de meteorización y los agentes geológicos.

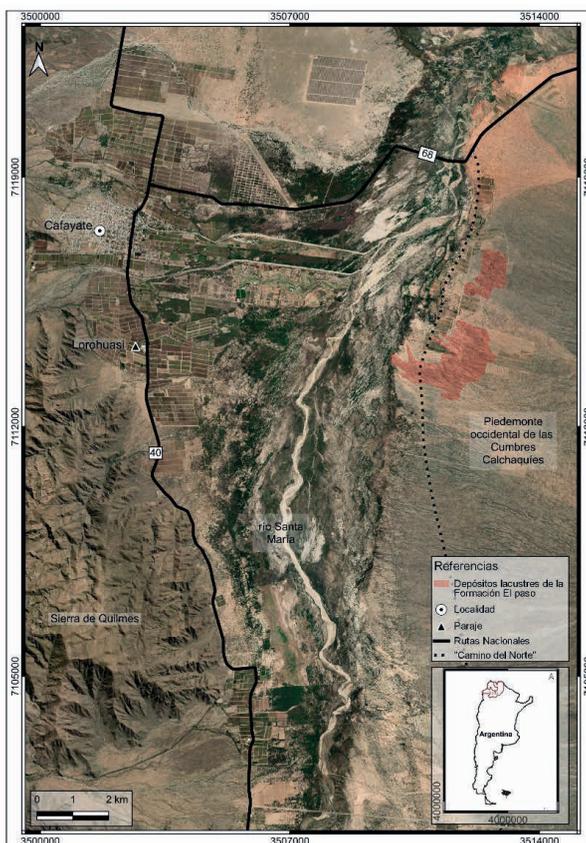


Figura 1. Mapa de ubicación.

## 21 GEOLOGÍA

Sobre la base de observaciones de campo, el análisis de imágenes satelitales, la recopilación bibliográfica y los datos obtenidos de la Hoja Geológica 10e-Cafayate (Galván 1981), se determinó que en la zona de estudio afloran las siguientes unidades litoestratigráficas: Granito Cerro Amarillo (Carbonífero), Formación Lumbreira (Paleógeno-Eoceno), Formación El Paso (Pleistoceno) y depósitos cuaternarios (Fig. 2).

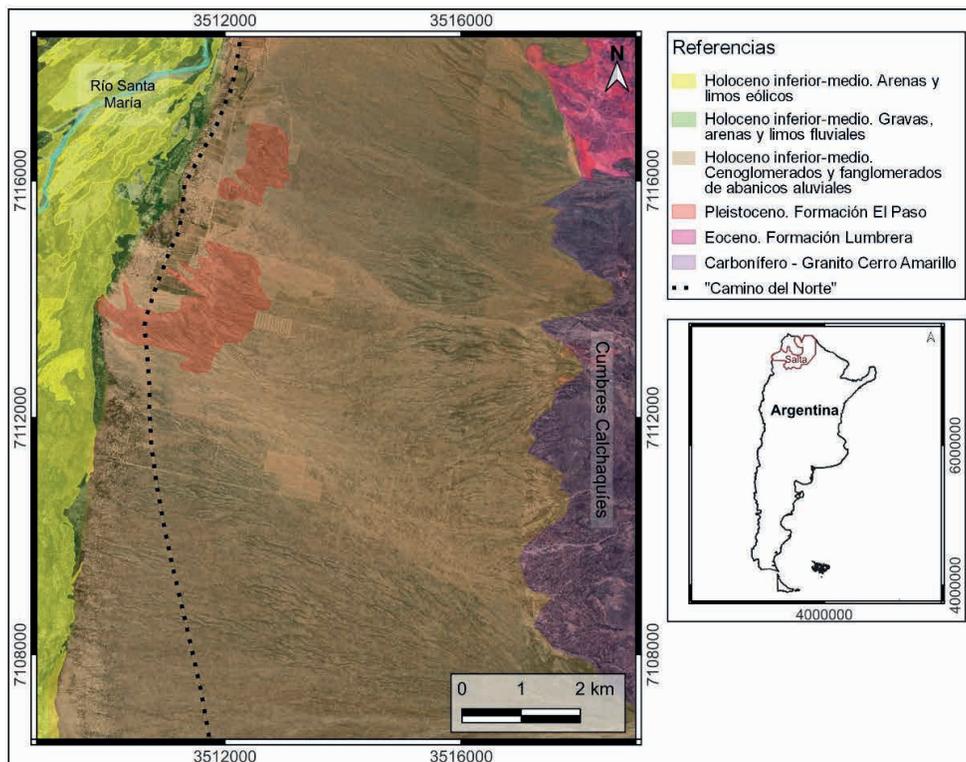


Figura 2. Mapa Geológico del área de estudio.

### Carbonífero - Granito Cerro Amarillo (Rapela 1976)

La roca aflorante corresponde a un granito biotítico-hornbléndico de grano grueso, color rosado claro a rosado violáceo en fractura fresca. La característica distintiva es el color ocre-amarillento que le otorga la pátina de alteración. En la zona de estudio aflora en las laderas occidentales de las Cumbres Calchaquíes (Fig. 2).

### Eoceno. Formación Lumbreira (Moreno 1970)

Es la unidad superior del Subgrupo Santa Bárbara, Grupo Salta (Cretácico-Paleógeno). Está formada por arcilitas y limolitas rojizas, generalmente macizas o con bioturbaciones y desarrollo de paleosuelos. Con intercalaciones de arcilitas verdes y grises,

calizas amarillentas y areniscas finas. Las arcilitas grises suelen contener altos porcentajes de materia orgánica. En el área de trabajo aflora al noreste de las Cumbres Calchaquíes y los depósitos corresponden a limolitas y areniscas finas de color rojo y castaño rojizo.

#### Pleistoceno. Formación El Paso (Vilela y García 1978)

Esta unidad está constituida por limolitas y arcilitas pardo claro a pardo amarillento, con estratificación fina a muy fina (Fig. 3), intercaladas con areniscas de grano fino. En la base son frecuentes las intercalaciones lentiformes de areniscas de grano mediano y conglomerados de grano fino. Las pelitas laminadas corresponden a sedimentos lacustres que resultan de endicamientos locales relacionados con procesos de remoción en masa que, en el Pleistoceno, provocaron interrupciones en los depósitos de abanicos aluviales del flanco occidental de las Cumbres Calchaquíes. Las concreciones carbonáticas, rosetas, venas y láminas de yeso fibroso implican condiciones temporales de mayor evaporación en el cuerpo de agua.

En la zona de estudio aflora en el piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes (Fig. 4), formando 7 cordones de relieves de lomadas que varían entre 1,5 a 3 metros de altura y 1,5 a 2 metros de ancho.



Figura 3. Pelitas estratificadas de la Formación El Paso.



Figura 4. Relieves de lomadas de la Formación El Paso.

### Holoceno inferior-medio. Cenoglomerados y fanglomerados de abanicos aluviales

Se denominan cenoglomerados a los materiales depositados por procesos de remoción en masa. Sus principales características son: ausencia de estratificación, clastos angulares a subangulares, sin selección y matriz fina portante. Los fanglomerados corresponden a sedimentos de diversos tamaños, clastos redondeados a subredondeados, depositados en un abanico aluvial, por corrientes de alta fluidez y competencia o capacidad de transporte (Fig. 5).

Los fanglomerados y cenoglomerados afloran en el piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes. Somonte y Collantes (2007) a partir del estudio del barniz de las rocas, afirman que en el periodo Holoceno existieron ocho eventos húmedos datados entre 7.300 AP y 300 AP. Estos eventos permitieron la sedimentación de los cenoglomerados y fanglomerados.



Figura 5. Fanglomerados intercalados con sedimentos más finos.

### Holoceno inferior-medio. Gravas, arenas y limos fluviales

Los depósitos fluviales en la zona corresponden a limos, arenas y gravas que forman parte de las terrazas fluviales, la llanura de inundación y el cauce actual del río Santa María (Fig. 2).

Las terrazas fluviales son discontinuas a lo largo del río Santa María y en algunos sectores presentan una capa de arena rica en materia orgánica datada en  $2.190 \pm 530$  AP por Strecker (1987, citado por Collantes y Busnelli, 2014).

### Holoceno inferior-medio. Arenas y limos eólicos

Desde Cafayate hasta Lorohuasi, se extienden extensos campos dunarios, actuales y pasados, sobre parte de la llanura de inundación y terrazas fluviales del río Santa María (Fig. 6) y, sobre los extremos medios-distales de los abanicos aluviales ubicados en el

pedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes (Fig. 2).

Estas dunas están constituidas por arenas de color gris pardo, con muy pobre selección eólica, granos muy finos a medianos, en su mayoría, subredondeados a subangulosos. La matriz es limosa y de color castaño claro. La mineralogía corresponde a cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, con pequeñas cantidades de biotita, clorita y cristales volcánicos. Además, las arenas contienen una gran variedad de minerales pesados, con augita como principal componente, junto con zircón, turmalina y horblenda (Peña Monné et al., 2016).

De acuerdo al estudio realizado por Peña Monné et al. (2016), durante el último milenio, las fases húmedas y secas alternantes favorecieron la movilización y estabilización de las dunas. Estas fases se establecieron mediante dataciones OSL (dataciones por Luminiscencia Ópticamente Estimulada), restos arqueológicos y datos históricos. Los intervalos secos ocurrieron entre ca. 1.000-1.100 AP, 1.300-1.420 AP, 1.550-1.680 AP, 1.740-1.850 AP y el período cálido actual.



Figura 6. Terraza parcialmente cubierta por depósitos eólicos actuales, margen oeste del río Santa María.

### 3 | GEOMORFOLOGÍA

Una Unidad Geomorfológica es una forma característica del relieve, definida por una génesis particular, además de ser cartografiable en un intervalo de escala establecido (Sayago, 1982). Siguiendo los criterios establecidos por Van Zuidam y Van Zuidam Cancelado (1979), Verstappen y Van Zuidam (1991) y Collantes (2001), en la zona de estudio se reconocieron desde el punto de vista morfogenético: 1) Unidades de Origen Estructural-Denudativo, 2) Unidades de Origen Fluvial-Aluvial, 3) Unidades de Origen Fluvial y, 4) Unidades de Origen Eólico (Fig. 7).

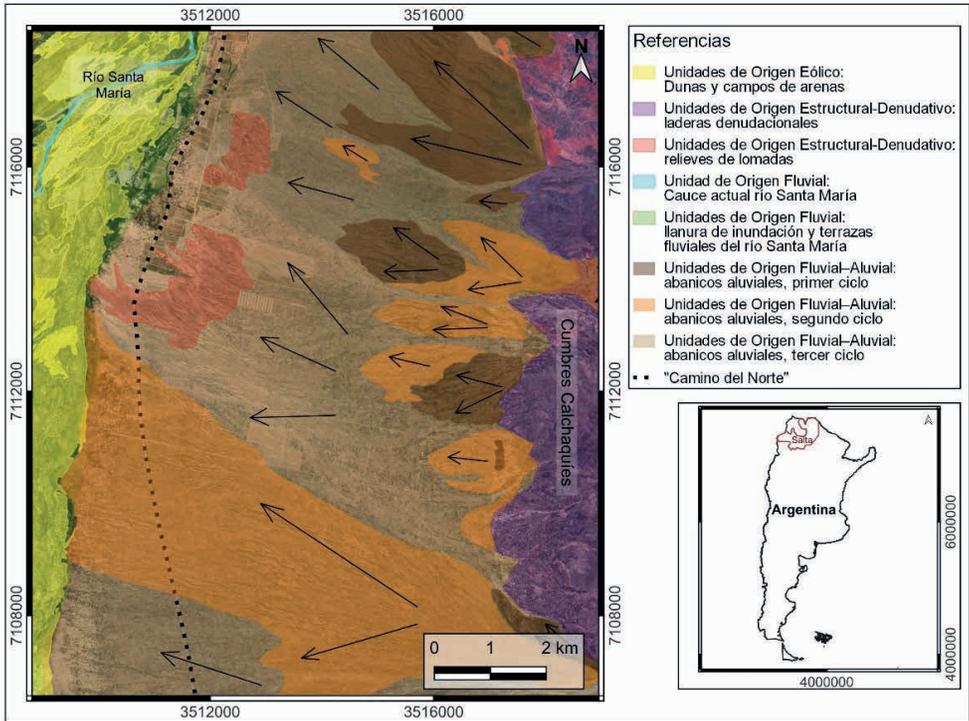


Figura 7. Mapa Geomorfológico.

### Unidades de Origen Estructural-Denudativo

Se agrupan en esta clase las formas desarrolladas bajo la influencia de factores geológicos endógenos (litología y estructuras) y de procesos exógenos (erosión, meteorización, remoción en masa, entre otros). En el área de estudio, corresponden a esta categoría, las laderas occidentales de las Cumbres Calchaquíes y los relieves de lomadas de la Formación El Paso.

Las laderas constituyen una importante Unidad Geomorfológica desde el punto de vista espacial, caracterizadas en general por un relieve abrupto, con pendientes mayores a los 20°, con desarrollo de valles profundos y empinados, escarpas estructurales y cicatrices de deslizamientos actuales y fósiles. Están afectadas por: 1) alta densidad del drenaje, 2) meteorización física y, 3) procesos de remoción en masa actuales y pasados, que en la zona adquieren magnitud debido a la pendiente, las precipitaciones pluviales torrenciales y la escasa vegetación.

Los principales procesos de meteorización física que actúan sobre las laderas están determinados por las variaciones térmicas propias del clima árido de la zona y, corresponden al termoclastismo y crioclastismo.

Las laderas están expuestas a la insolación diaria, llegando a alcanzar una temperatura media de 30°C, esto combinado con el enfriamiento nocturno, hace que la

variación de temperatura diaria varíe entre 6° y 30°C, por lo que las rocas experimentan dilatación y contracción, favoreciendo el termoclastismo. El crioclastismo actúa, en la cima de los relieves positivos, durante la estación invernal. Se desarrolla a partir del congelamiento y descongelamiento del agua en las diaclasas y fracturas de las rocas. Como consecuencia de ambos procesos se origina una importante cantidad de material detrítico.

Por otro lado, en el piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes, se reconocieron relieves de lomadas correspondientes a afloramientos de los depósitos lacustres de la Formación El Paso. Estos relieves son el resultado de la intensa erosión e incisión fluvial, que afectó la continuidad del primitivo depósito lacustre, del cual se pueden ver afloramientos remanentes, entre los abanicos aluviales.

En los depósitos lacustres el escurrimiento concentrado genera piping (Fig. 9). Estas morfologías son exclusivas de las regiones secas. Los surcos de escurrimiento se originan cuando el agua erosiona y elimina el material que se encuentra en la parte superior del depósito. Este material es transportado hacia los laterales. De esta manera se forma sobre el depósito original una nueva cobertera de material péltico. Las pelitas del depósito original se diferencian de las del depósito secundario, porque las primeras presentan laminación, mientras que las segundas tienen una estructura maciza.



Figura 9. Piping en depósitos de la Formación El Paso.

#### Unidades de Origen Fluvial–Aluvial

De acuerdo a Verstappen (1983), en este grupo se incluyen todas aquellas formas en cuya génesis intervienen la dinámica fluvial y los procesos de remoción en masa.

En el área de trabajo estas Unidades se encuentran en el piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes y están representadas por abanicos aluviales (Fig. 7).

Desde el punto de vista de su desarrollo morfogenético, se identificaron tres ciclos principales de aluvionamiento, dos que constituyen la porción inactiva y uno correspondiente al área activa (Fig. 7). El primer ciclo, ubicado en el extremo septentrional, es el más antiguo, corresponde a remanentes de la depositación que habría dado nacimiento a los

abanicos, presenta como rasgo sobresaliente la presencia de paleocauces que recorren toda su superficie. El segundo ciclo está caracterizado morfológicamente por abanicos más bien restringidos, afectados intensamente por la erosión hídrica (formación de surcos y cárcavas), desarrollados sobre parte de la superficie correspondiente a los abanicos del primer ciclo. El tercer ciclo está constituido por los abanicos actualmente activos, dichos abanicos se caracterizan por ser de gran extensión, unirse unos con otros en sus extremos distales y ser, de los tres ciclos mencionados, los menos afectados por los procesos de erosión hídrica y los más afectados por la actividad eólica.

#### Unidades de Origen Fluvial

Se consideran Unidades de Origen Fluvial aquellas geoformas en cuya génesis la dinámica fluvial es dominante. En el área de estudio esta clase está representada por el valle fluvial del río Santa María: cauce actual- llanura de inundación y terrazas fluviales.

En la zona de estudio el río Santa María constituye el nivel de base local. El cauce actual presenta un diseño de tipo fluvial entrelazado. Este diseño se origina debido a que el curso fluvial no puede transportar toda la carga que recibe y en consecuencia la abandona en su lecho, formando barras e islas. Estas barras van dividiendo la corriente en cauces secundarios y en el verano, en períodos de crecidas, pueden quedar sumergidas por el agua. El exceso de carga que recibe el río Santa María proviene: 1) de ríos tributarios, los cuales durante el verano se ven afectados por crecidas al ocasionarse lluvias torrenciales y 2) de los procesos de remoción en masa, principalmente flujos densos, el material detrítico transportado por los procesos gravitacionales proviene, fundamentalmente, del accionar de la meteorización física sobre las rocas de las laderas de las Cumbres Calchaquíes.

#### Unidades de Origen Eólico

En el área de estudio el clima árido favorece el accionar del viento como un agente geomorfológico que erosiona, transporta y deposita. Se reconocieron, en base a las observaciones realizadas en el campo, el análisis de imágenes satelitales y la recopilación bibliográfica: dunas linguoides-barjanoides, nebkas y dunas longitudinales-lineales.

Las dunas linguoides-barjanoides son dunas complejas, con una forma intermedia entre barjanes aislados (dunas individuales con formas de media luna, con sus extremos apuntando en la dirección del viento) y dunas transversales (dunas compuestas, constituidas por cordones fundamentalmente perpendiculares separados por depresiones orientados con ángulos rectos respecto al viento que posee dirección e intensidad constantes).

Las nebkas son dunas simples, obstaculizadas por la vegetación. No superan el metro de altura y se forman a la sombra de un obstáculo, como una mata vegetal o una roca.

Las dunas longitudinales o lineales son dunas complejas, representadas por crestas rectilíneas, paralelas, con un espaciado regular y una sección transversal más simétrica

que las dunas transversales. Se forman y se desplazan paralelas a la dirección del viento predominante a la que se superponen vientos oblicuos que arrojan arena lateralmente. Requieren de un limitado abastecimiento de arena y de un terreno duro y rocoso.

## 4 | CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta el clima árido del tipo BWk - según la clasificación de Köppen-Geiger (1918 y 1936) en Kottek et al. (2006) - y el análisis geomorfológico efectuado, en la zona de estudio, el principal agente geomorfológico es el agua y está relacionado con las precipitaciones medias anuales; para la zona se estima un valor medio de 204 mm/ anuales, de acuerdo a los datos proporcionados por la Bodega La Rosa, para el período 2000-2010. Además, las precipitaciones se caracterizan por su torrencialidad, lo que da lugar a una intensa erosión hídrica pluvial y fluvial. El otro agente es el viento.

El accionar de la erosión hídrica se manifiesta en el desarrollo de surcos y cárcavas sobre los abanicos aluviales del piedemonte occidental de las Cumbres Calchaquíes y en el desarrollo de piping en los depósitos lacustres de la Formación El Paso.

El viento actúa erosionando los arbustos de la zona, viñedos, algarrobos, entre otros, dejando expuestas sus raíces y, transportando y depositando arena, desarrollando extensos campos dunarios.

## REFERENCIAS

Collantes, M. M. y Busnelli, J. 2014. Geomorfología de la Provincia de Tucumán. En: Geología de Tucumán. Moyano, S., Puchulu, M. E., Fernández, D., Vides, M. E., Nieva, S., Aceñolaza, G. (Eds.). Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán: 228-239. San Miguel de Tucumán.

Galván, A.F. 1981. Descripción Geológica de la Hoja 10 e, Cafayate. Provincias de Tucumán, Salta y Catamarca. Carta Geológico-Económica de la República Argentina. Escala 1:200.000. Boletín 177, 49 p. Buenos Aires, Servicio Geológico Nacional.

Kottek, M. J. Grieser, C. Beck, B. and Rubel, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, pp. 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

Moreno J. 1970. Estratigrafía y paleogeografía del Cretácico superior en la cuenca del noroeste argentino con especial mención de los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 25: 9-44, Buenos Aires.

Peña Monné, J. L., Sancho Marcén, C., Sampietro Vattuone, M. M., Rivelli, F., Rhodes, E. J., Osácar Soriano, M. C., Rubio Fernández, V., García Giménez, R. 2016. Geomorfología y cambios ambientales en la depresión de Cafayate (Provincia de Salta, noroeste argentino). Geoarqueología de los Valles Calchaquíes, Ocupaciones Humanas y Reconstrucciones Paleoambientales del Holoceno. Primer Curso Internacional de Geoarqueología de Campo del Noroeste Argentino. ISBN 978-987-42-0568-1. Tucumán.

Rapela, C. 1976. El basamento metamórfico de la región de Cafayate, provincia de Salta- Aspectos petrológicos y geoquímicos: Revista de la Asociación Geológica Argentina, 31: 203-222. Buenos Aires.

Sayago, J. M. 1982. Las unidades geomorfológicas como base para la evaluación integrada del paisaje natural. *Acta Geológica Lilloana*, XVI-1: 169-180.

Somonte, C. y Collantes, M.M. 2007. Barniz de las rocas y espacios persistentes: su abordaje desde los procesos de reclamación artefactual lítica en Amaicha del Valle (Tucumán). *Mundo de Antes* N° 5 :119-137, Instituto de Arqueología y Museo, Universidad Nacional de Tucumán (UNT).

Van Zuidman, R. A. y Van Zuidman Cancelado, F. I. 1979. Terrain analysis and classification using aerial photographs. A geomorphological approach. ITC, *Textbook of Photo-Interpretation VII-6*, Enschede, Países Bajos.

Verstappen, H. y Van Zuidam, R.A. 1991. The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards. ITC Publication, 10.

Vilela, C. y García, J. 1978. Descripción geológica de la hoja 9e, Amblayo, Salta: Servicio Geológico Nacional. *Boletín* 150: 1-64. Buenos Aires.