



# Morfología de las costras evaporíticas del salar de Pozuelos, Puna Salteña

**Verónica Rocío MARTÍNEZ<sup>1</sup>, Claudia I. GALLI<sup>2</sup> y Ricardo N. ALONSO<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>UNSa-CEGA (INSUGEO-CONICET), Salta.

<sup>2</sup>UNSa-INECOA (CONICET), Salta, Jujuy.

Email: veronica.rocio@gmail.com

**Editores invitados:** Adriana Mehl, Francisco Córdoba y Andrés Bilmes

Recibido: 7 junio, 2019

Aceptado: 17 octubre, 2019

## RESUMEN

Los salares de la Puna Argentina son importantes reservorios de salmueras ricas en elementos alcalinos y alcalinos térreos, entre ellos el litio y potasio. Los estudios relacionados con sus evapofacies y costras superficiales son escasos. Este trabajo presenta las diferentes morfologías de las costras evaporíticas salinas del salar de Pozuelos (Puna Austral, Salta Argentina). Es una depresión salina a ~ 3760 m s.n.m., cuyas coordenadas geográficas aproximadas son 24°40'S y 66°45'O. Se elonga en sentido NE-SO, de unos ~ 13 km de largo y ~ 6 km ancho en promedio, con una superficie de ~ 84 km<sup>2</sup>. En este salar se reconocieron y mapearon seis tipos de costras evaporíticas salinas definidas según su morfología, estructuras y contenido clástico. Cada una de ellas está asociada a los cambios de facies laterales dentro del salar, relacionados con las condiciones y posición respecto al nivel freático, como así también, con los sistemas fluviales efímeros, con las diferentes zonas en que se encuentran en el salar y con la topografía. Se describe la relación existente entre las evapofacies, las costras evaporíticas, los recursos en sales y los elementos químicos de salmueras allí presentes.

**Palabras clave:** *evaporitas, costras salinas, evapofacies, salar.*

## ABSTRACT

*Morphology of evaporitical crusts of Salar de Pozuelos (Puna Salteña, Argentina).*

The saline lakes of Puna Argentina are important reservoirs of brines rich in alkaline and alkaline earth elements, including lithium and potassium. The related studies on their evapofacies and superficial crusts are scarce. This work presents the different morphologies of the evaporitic crusts in salar de Pozuelos (Puna Austral, Salta Argentina). It is a saline depression at ~ 3760 masl, whose approximate geographical coordinates are 24° 40'S and 66° 45'W, elongated on the NE-SW, about ~ 13 km long and ~ 6 km wide, with an area of ~ 84 km<sup>2</sup>. Different types of crusts were identified and mapped in this salar, according to their morphology, structures and clastic content. The evaporitic salt crusts are associated with changes of local side facies within the salar, interrelated to their conditions and position regarding the water table, as well as to the ephemeral streams, to their location in the salar and to the topography. This paper present the relationship between evapofacies, evaporitic crusts and resources in salts and chemical brine elements.

**Key words:** *evaporites, saline crust, evaporitic facies, salar.*

## INTRODUCCIÓN

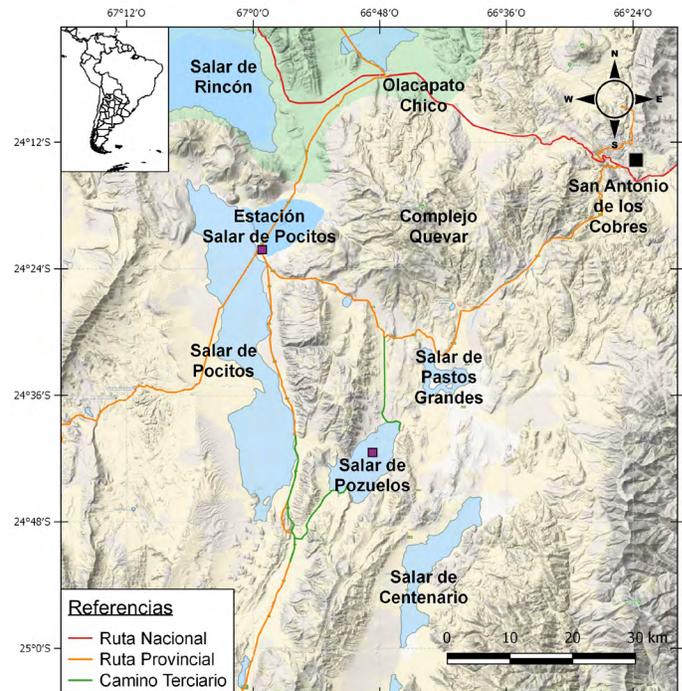
El área de estudio es el salar de Pozuelos (Fig. 1), ubicado en el ámbito morfotectónico de la provincia geológica Puna (Turner 1972) y dentro de ella en la subprovincia geológica Puna Austral (Alonso et al. 1984). La Puna es una unidad caracterizada por ser una altiplanicie sobreelevada por encima de los 3700 m s.n.m., con serranías interiores de rumbo submeridiano y limitada al oeste por la Cordillera Volcánica Central y al este por la Cordillera Oriental. Es una región quebrada internamente en bloques hundidos y elevados; cruzada por volcanes aislados o encadenados que se desprenden como ramales transversales de la cadena volcánica principal. Entre los volcanes y numerosas sierras internas longitudinales se forman grandes depresiones cerradas endorreicas, donde confluyen las aguas que luego se evaporan para dar lugar a los salares (Alonso 2017).

La depresión del salar de Pozuelos, como otras depresiones de la Puna Argentina, está categorizada como una de las cuencas de intra-arco/intra-plateau, asimétrica, generada en un marco volcánico regional, en un clima árido, con drenaje endorreico y paleotermalismo intenso (Alonso et al. 1991, Alonso 1991). El salar de Pozuelos presenta una distribución superficial de  $\text{Li}^+$  de 200 a 800 ppm, siendo el depocentro del salar, el que posee las mayores concentraciones. La salmuera es de dominio clorurada sódica rica en litio, potasio y baja en magnesio (Alonso et al. 2017). Actualmente constituye uno de los proyectos de exploración de salmueras de litio más importantes en el ambiente de la Puna.

El objetivo del trabajo es reconocer, describir y elaborar un mapa en detalle de las actuales costras evaporíticas que afloran en el salar de Pozuelos, a manera de definir los dominios evaporíticos superficiales. Para ello se analizaron las diferentes morfologías, definidas según su tamaño, aspecto, estructuras, color y contenido clástico. Se completa la información con la estimación del nivel freático, realizando calicatas en áreas con diferentes morfologías de costras evaporíticas. Conjuntamente se comparan los tipos de costras salinas con las definidas por Igarzábal (1996), basadas en fotografías aéreas tomadas en el año 1970.

### Clima

La Puna se caracteriza por ser una región con una temperatura media anual de 8 °C. Con inviernos crudos donde la temperatura puede bajar hasta -30 °C, y fuertes amplitudes térmicas diarias que alcanzan hasta 50 °C entre el día y la noche. También se presentan vientos secos e intensos, alta heliofanía y radiación solar intensa por la ausencia de nubes



**Figura 1.** Mapa de los salares de la Puna Argentina, con vías de acceso. Imagen de Google Terrain.

y la altura sobre el nivel del mar, con escasas precipitaciones en el verano y nevadas intensas durante el invierno (aunque esto se modifica en los años Niño/Niña), que con otros parámetros la convierten en una región inhóspita de clima riguroso (Alonso 2006, Strecker et al. 2007, Alonso 2017). El aspecto más destacado y limitante para la caracterización climática de la Puna es la falta de datos continuos de precipitaciones, temperaturas, vientos, humedad y evapotranspiración. Además, no se cuenta con registros de precipitaciones sólidas (granizo y nevadas).

Las características climáticas en el salar de Pozuelos, presentan alta sequedad del ambiente, intensa heliofanía, fuertes amplitudes térmicas diarias y bajo régimen de precipitaciones pluviales (Igarzábal 1996). El clima de la región se clasifica como árido andino puneño, caracterizado por un clima seco y frío (Paoli 2002).

Los antecedentes de precipitaciones registradas, corresponden a la estación meteorológica Salar de Pocitos, la cual se encuentra a una distancia de 40 km del área de estudio. El periodo registrado es de 1950 a 1990. Según los datos, las precipitaciones se caracterizan por una alta variabilidad y marcada estacionalidad. Las lluvias se concentran entre los meses de octubre a marzo, periodo durante el cual se registra el 100 % de la precipitación promedio anual. La precipitación media mensual máxima alcanza los 19 mm (enero) con mínimas de 0 mm. De acuerdo a los registros históricos para un

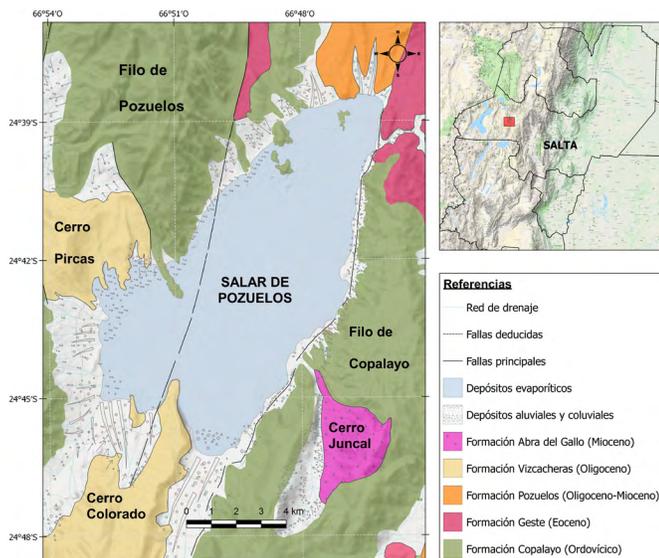
período de 40 años (1950 a 1990), el mes más lluvioso fue enero, que registró una media mensual de más de 100 mm, en los años 1975 y 1979. Mientras que en los años 1951, 1952, 1956, 1966 y 1970 no se produjeron precipitaciones (Bianchi y Yáñez 1992). Se cuenta con datos meteorológicos correspondientes al periodo enero a abril del 2011 (Alonso y Rojas 2011), los cuales se resumen en el Cuadro 1 y que fueron obtenidos en el propio salar de Pozuelos.

**Cuadro 1.** Datos meteorológicos del salar de Pozuelos (Alonso y Rojas 2011).

Precipitación	Velocidad Viento	Dirección Viento	Temperatura	Presión Atmosférica
0-21 mm	14-181 km/h	W-NW y W-SW	-18 a 32°C	486,6 mb

## MARCO GEOLÓGICO

El salar de Pozuelos (Fig. 2) está limitado por dos bloques montañosos de edad ordovícica: filo de Pozuelos (oeste) y filo de Copalayo (este). En el borde norte del salar se presentan depósitos paleógenos como la Formación Geste (Eoceno superior), que yacen en discordancia angular sobre la Formación Copalayo (Ordovícico). En el suroeste se registran sedimentitas clásticas rojas de la Formación Vizcacheras (Oligoceno). En el extremo noreste del salar de Pozuelos, se encuentran las paleofuentes termales de San Mateo (Flores 2014), son plataformas travertínicas pleistocenas (<100 ka) que yacen sobre el plano de falla del filo de Copalayo (Alonso com. pers.). Los depósitos holocenos



**Figura 2.** Mapa geológico del salar de Pozuelos (Modificado de Igarzábal 1996, Blasco et al. 1996, Alonso et al. 2017).

comprenden depósitos aluviales, coluviales, derrubios asociados y una planicie evaporítica (costras salinas). En profundidad se definieron dos secuencias depositacionales, de base a techo: un relleno inmaduro (terroso), donde predominan las facies clásticas y un relleno maduro (cristalino) donde las facies evaporíticas son dominantes (Martínez et al. 2018).

## COSTRAS SALINAS

La cuenca de Pozuelos posee rasgos morfológicos, que son producto de la estructura y la composición litológica de las rocas aflorantes en los bordes del salar, sobre los que actuaron los procesos geológicos superficiales los cuales imprimieron a esta zona los rasgos típicos del ambiente árido. La depresión del salar constituye el nivel de base local y su disposición intermontana es el receptáculo natural de los productos de la erosión y la evaporación, generando una planicie evaporítica con diferentes costras salinas.

Las costras salinas son depósitos superficiales de sales, que constituyen una mezcla de partículas clásticas y especies minerales evaporíticas integradas principalmente por cloruros y sulfatos (Lavado y Reinaudi 1986). El proceso de formación comienza con la precipitación de sales, cuando las aguas superficiales se saturan en los solutos que contienen. Inicialmente, bajo la cubierta de salmuera superficial, se forma un depósito homogéneo de cristales de sal. Tras una mayor evaporación, la salmuera pasa a ser freática. La desecación del sedimento superficial produce grietas poligonales por contracción, a través de las que prosigue la evolución de las salmueras intersticiales por capilaridad (Chong 1984).

Las costras salinas eflorescentes se producen por evaporación capilar y su mineralogía refleja la química de la salmuera subyacente. El espesor de las costras está controlado por la periodicidad con que las aguas alcanzan la saturación y la tasa de acumulación de aporte salino (Smoot y Castens-Seidell 1994). Las costras, cuando se generan a partir de salmueras superficiales y subterráneas, muestran una zonación lateral de facies características (Jones 1965, Hardie 1968, Smoot y Lowenstein 1991).

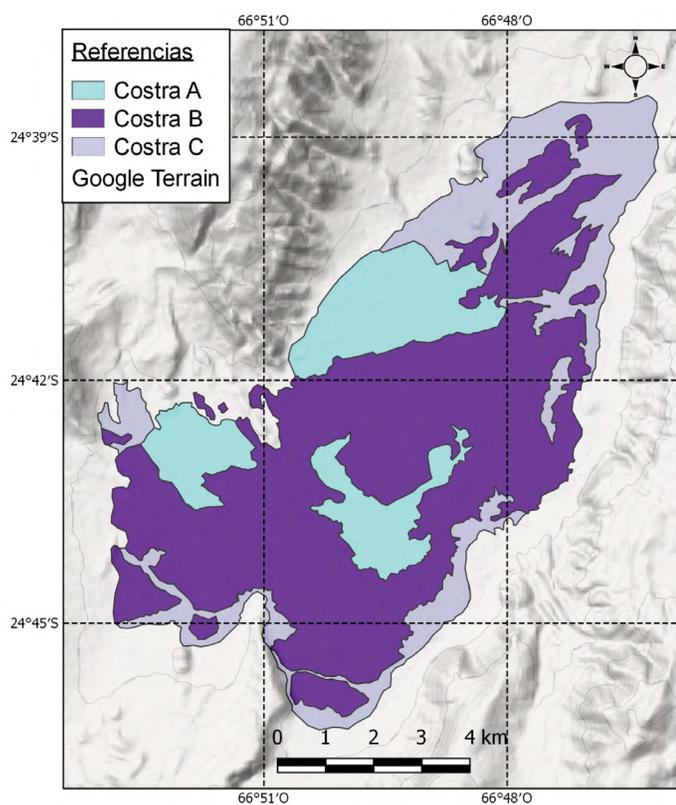
En el salar de Pozuelos, Igarzábal (1996) distinguió dos tipos de costras: las costras salinas duras (lisas y rugosas) y las costras terrosas. La morfología de las costras está relacionada con la posición del nivel freático, que condiciona su aspecto superficial. Las costras lisas, son típicas de zonas en las que el nivel freático está cercano a la superficie, con

anegamientos temporarios de agua superficial. En cambio, las costras rugosas están asociadas a un nivel freático más profundo (Igarzábal 1991, Pueyo 1991).

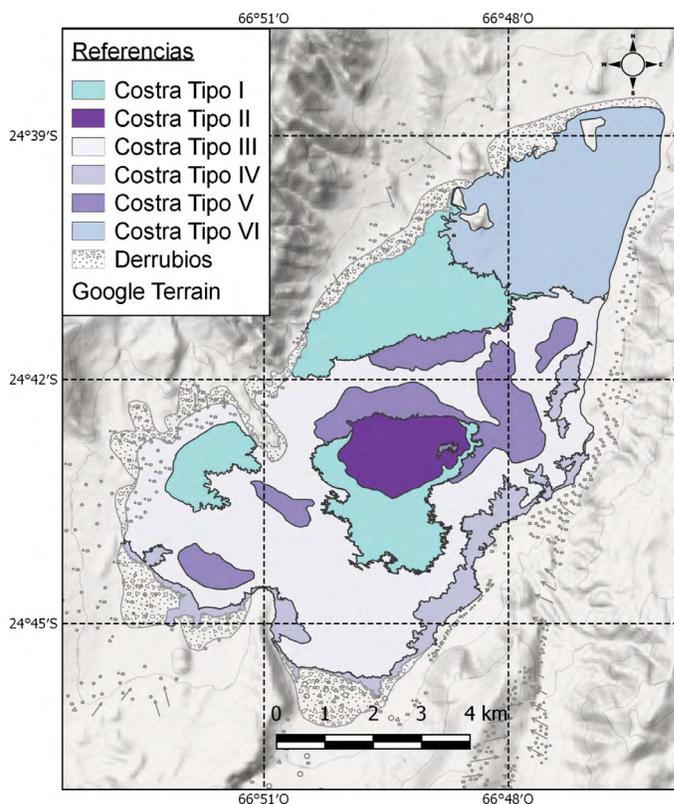
## MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomó como original el fotomapa realizado por Igarzábal (1996), quien fuera uno de los más importantes geomorfológicos argentinos (Fig. 3). Se realizó un análisis de imágenes satelitales y una serie de viajes de campo, para efectuar el reconocimiento, descripción y mapeo en detalle de las costras salinas actuales del salar de Pozuelos. La cartografía fue realizada en software QGIS.

Actualmente el salar de Pozuelos, permanece seco en períodos de abril a septiembre siendo esa la época propicia para el reconocimiento de las costras. Durante los meses de octubre a marzo las precipitaciones inundan el salar y es muy difícil transitar en varios sectores. En dichos periodos las costras se disuelven y renuevan anualmente. No existen cursos fluviales permanentes, aunque sí manantiales principales sobre la margen occidental, que se manifiestan alineados en la falla que levanta el bloque del filo de Pozuelos. Las calicatas



**Figura 3.** Mapa de costras evaporíticas del salar de Pozuelos (Igarzábal 1996). Costra A: Costra de sal dura poligonada. Costra B: Costra de sal dura rugosa (fósil). Costra C: Costra lisa limosas abrigantada y florecida.



**Figura 4.** Mapa de costras evaporíticas del salar de Pozuelos (Salta). Tipo I: Costra salina dura lisa. Tipo II: Costra salina dura de alta rugosidad o fósil. Tipo III: Costra salina dura de baja rugosidad. Tipo IV: Costra salina terrosa. Tipo V: Costra salina abrigantada. Tipo VI: Costra salina terrosa asociada a boratos

se realizaron en los meses de agosto a septiembre del 2018, en las diferentes morfologías de costras.

## RESULTADOS

Las costras salinas poseen características morfológicas y composicionales variables. A continuación, se describen las variedades identificadas en el salar de Pozuelos. Las nomenclaturas que se utilizaron son netamente descriptivas y están relacionadas con las características generales de las costras de salares.

Se distinguieron seis tipos de costras (Fig. 4) y se las comparó con las observadas por Igarzábal (1996).

### Tipo I - Costra salina dura lisa

De composición halítica (NaCl), incolora con textura sacaroide y textura *chevron* y *hopper* subordinada (Fig. 5a). Escaso contenido clástico menor al ~ 0.5%. Con una estructura poligonada bastante visible ya que no tiene rugosidades y divide la superficie cristalina en un inmenso mosaico. Los polígonos poseen diámetros de 0.6 a 1.5 m con sus centros más o me-

nos lisos y con bordes de poca apertura con crecimiento de halita laminada. Se desarrollan en el sector central rodeando la parte sur de la costra salina de alta rugosidad. Este tipo de costra también aflora al oeste del salar, donde hay vestigios de anegamientos temporarios de agua superficial, pasando en forma neta a costras terrosas y costras salinas duras de baja rugosidad. El área de costra tipo I es de 20.50 km<sup>2</sup> y su nivel freático promedio es de ~ 0.28 m.

La costra tipo I, definida por Igarzábal (1996) como una “costra salina lisa poligonada”, adquiere su desarrollo en las zonas inundables o zonas con el nivel freático cercano a la superficie. Actualmente ocupa una superficie de similares dimensiones con respecto al fotomapa original realizado a partir de fotografías aéreas. En otros salares de la Puna se la definió como “costra de superficie plana” o “costra salina actual activa”, originada por inundaciones estacionales con una concentración salina ligeramente inferior a la salmuera, que interactúa con la costra durante el resto del año (Vinante 2003, Vinante y Alonso 2006, Heit 2007, Hoyos 2012).

## **Tipo II: Costra salina dura de alta rugosidad “fósil”**

Está compuesta principalmente de halita cristalina de color blanco grisáceo a castaño claro, exhibe textura sacaroides y fibrosa (Fig. 5b). Con una moderada proporción de material clástico (~ 30 %), compuesta por limo arcilloso y arena muy fina. Su característica principal es su alta rugosidad con cúspides o crestas de alta dureza, agudas, astillosas y filosas, que alcanzan los 0.30 m de altura, con un aspecto de tipo escoriáceo. Esta costra genera una superficie convexa en el depocentro del salar, es decir que el centro del salar suele ser topográficamente más alto que los márgenes (~ 0.5 m). En el depocentro la capilaridad a partir de la salmuera freática no alcanza la superficie y por consiguiente no hay renovación de sales ni eflorescencias salinas y su aspecto se debe a la acumulación del polvo eólico. El área de costra tipo II es de 3.60 km<sup>2</sup> y su nivel freático promedio es de ~ 0.90 m.

La costra tipo II, definida por Igarzábal (1996) como una “costra salina rugosa fósil” e interpretada como costras que permanentemente están secas o infrecuentemente inundadas. Por esa razón las denominó “fósiles”, porque son poco activas o totalmente inactivas desde el punto de vista de la evaporación capilar y de la formación de nuevas eflorescencias. Actualmente ocupa una superficie notablemente menor a las dimensiones del fotomapa de Igarzábal (1996).

En otros salares de la Puna han sido definidos como “ásperos salinos antiguos”, “costras duras” y “costra escabrosa con escasos detritos”, interpretadas como una costra, con

elevada cristalinidad y que no presenta crecimiento de nuevas sales por ascenso capilar. Esta se inicia con la evolución de una costra de superficie plana (Catalano 1964, Stoertz y Ericksen 1974, Heit 2007).

## **Tipo III: Costra salina dura de baja rugosidad**

Está compuesta principalmente de halita cristalina blanquecina. Con abundante material clástico (~ 45 %) compuesto por arcilla, limo y escasa arena fina (Fig. 5c). Se encuentra alrededor del depocentro. Su característica principal es que presenta formas abovedadas, con superficies delgadas (< 0.3 cm), que se rompe fácilmente. Presenta baja rugosidad en comparación con la costra salina dura de alta rugosidad. El área de costra tipo III es de 25 km<sup>2</sup> y su nivel freático promedio es de ~ 0.53 m.

La costra tipo III, no ha sido identificada por Igarzábal (1996), quien la mapeó como una costra fósil. Sin embargo, en las observaciones tanto de imágenes como en el campo, pudieron distinguirse sus diferentes morfologías.

En el salar de Rincón, Heit (2007) la define como una “costra escasamente rugosa con abundantes detritos”, originada como consecuencia de las corrientes de barro y avenidas de agua. Las continuas crecidas tapizan a la costra con una capa milimétrica de material detrítico que suaviza el microrelieve y le confiere a la costra un aspecto menos rugoso. La humedad que retiene la arcilla no permite que la costra complete su ciclo evolutivo.

## **Tipo IV: Costra salina terrosa**

Se caracteriza por la presencia de una costra superficial compacta, lisa o ligeramente rugosa. Está compuesta principalmente por material clástico (~ 80 %), tal como arenas finas, limos y arcillas de colores rojizos y en forma secundaria, por facies químicas como leves eflorescencias salinas (Fig. 5d). Se observa además un incipiente desarrollo de polígonos. El área de costra tipo IV es de 8.12 km<sup>2</sup> y su nivel freático promedio es de ~ 0.32 m.

La costra tipo IV, no fue definida por Igarzábal (1996). Este tipo de costras han sido definidas como “costras suaves o suelos salinos” que generalmente tienen aguas subterráneas superficiales de contenido salino comparativamente bajo y están sujetas a inundaciones frecuentes o lavado por lluvias. Las costras son de tipo efímeras (Stoertz y Ericksen 1974).

## **Tipo V: Costra salina brillantada**

Se caracteriza por presentar una elevada eflorescencia salina, posee cristales de halita y yeso. La halita es predominante, posee textura sacaroides y el yeso se presenta en

cristales prismáticos o laminares (Fig. 5e). Se caracteriza por su color blanco brillante. En menor proporción limos y arcillas de colores pardos rojizos (~ 5 %). Este tipo de costra aflora en el sector sur y sureste del salar. El área de costra tipo V es de 2.60 km<sup>2</sup> y su nivel freático promedio es de ~ 0.20 m.

La costra tipo V, fue definida por Igarzábal (1996) como una “costra salina lisa limosa abrigada y florecida”. En el salar de Rincón han sido descritas como “cloruros en costra delgada y coloriforme con eflorescencias” e interpretadas como las costras más dinámicas, ya que varían continuamente en espesor, microrelieve y color (Heit 2007). Estos cambios se deben principalmente a las fluctuaciones del nivel freático y a las variaciones de concentración en la salmuera. Su color blanco responde a la ausencia de impurezas en la sal por su reciente tiempo de formación y la falta de aporte eólico.

### Tipo VI: Costra salina terrosa asociada a boratos

Está compuesta por arenas finas, limos y arcillas de colores pardos rojizos (~ 60 %), acompañadas por mantos de ulexita en superficie (Fig. 3f). En ella se observan vestigios de los antiguos laboreos mineros, dado que se ha llevado a cabo la explotación de boratos en ese sector (Alonso 1986). Estas costras fueron mapeadas por Igarzábal (1996) como “costra fósil y costra lisa limosa abrigada”. Sin embargo en las observaciones tanto de imágenes como en el campo, pudieron distinguirse sus diferencias y se destaca su asociación con ulexita ( $\text{NaCa}[\text{B}_5\text{O}_6(\text{OH})_6] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). El área de la costra VI es de 11.05 km<sup>2</sup> y su nivel freático promedio es de ~ 0.20 m.

**Zonación mineralogía:** Los salares muestran diferentes zonaciones minerales que constituyen dominios evaporíticos, los cuales pueden distribuirse en el salar de manera superficial, en profundidad y/o lateralmente, dependiendo de la evolución geoquímica de la salmuera en la cuenca. La precipitación de los minerales está afectada por factores complejos que dependen del clima, la composición de las aguas superficiales o subterráneas y la litología circundante. Ellos establecen la calidad, cantidad, tipo y zonación de las evaporitas en los salares (Hardie y Eusgter 1970, Kendall 1992, Alonso 2006). De esta manera se observa una zonación de las evaporitas superficiales del salar Pozuelos (Fig. 6), formada por una evaporitas boratífera compuesta por la costra Tipo IV (Alonso 1986), una evaporitas yesífera formada principalmente por la costra Tipo V, y una evaporitas halítica compuesta por las costras Tipo I, II, III y IV.

La evaporitas boratífera correspondiente a la costra Tipo IV, está vinculada a depósitos de las paleofuentes termales San Mateo, que se encuentran en el borde nororiental del sa-

lar. Esta área conforma el aporte de soluciones mineralizadas arrojadas por fuentes termales vinculada a la fractura del borde oriental del salar y asociados a la actividad volcánica desarrollada en la región desde el Mioceno (Alonso y Viramonte 1985, Alonso 1986, Flores 2014).

La evaporitas yesífera, esencialmente compuesta por la costra Tipo V, se encuentra en los márgenes centro y sur del salar. Si bien este tipo de costra posee halita y yeso, se la designó yesífera siguiendo el modelo de zonación típico para facies evaporíticas continentales (Kendall 1992). Esta evaporitas se asocia a etapas periódicas de desecación e inundación en condiciones áridas. Ello debido a que hay una disolución de los cloruros por medio del agua que ingresa al salar desde los márgenes y que tiene un menor grado de salinidad para la formación de yeso. El crecimiento yesífero se produce en la interfase sedimento-agua y se caracteriza por una sutil disposición paralela al substrato. En estas áreas del salar el nivel de la salmuera varía considerablemente durante el ciclo anual (Bevacqua 1992, Ortí Cabo 2010).

La evaporitas halítica formada por las costras Tipo I, II, III y IV, ocupa casi la totalidad del salar. De esta manera, el núcleo del salar está integrado casi exclusivamente por halita, que representa las sales de mayor solubilidad. Se concentran en las depresiones más profundas de la cuenca con espesores que van desde los 80 a 100 m (Alonso et al. 2017).

## DISCUSIÓN

La génesis de las costras salinas está directamente relacionada con sus características hidrogeológicas, especialmente las fluctuaciones del nivel freático (Vila 1976, Igarzábal 1991, Pueyo 1991). Se sabe que las costras se renuevan en forma anual, ya que se disuelven rápidamente en agua de inundación y/o en contacto con agua de lluvia, siguiendo el ciclo clásico de salinas efímeras (Lowenstein y Hardie 1985, Smoot y Castens-Seidell 1994). La mayoría de los estudios morfológicos en entornos evaporíticos en sistemas hidrológicos activos se deben a cambios estacionales. La superficie de los salares son dinámicas y cambian en varios años a décadas, en respuesta a precipitaciones, ciclos de humedad y la dinámica del viento (Lowenstein y Hardie 1985, Artieda et al. 2015).

El salar de Pozuelos posee una precipitación estacional en los meses de octubre a marzo, inundándose en los sectores marginales del salar. Sin embargo, la zona más inundada es el sector sur, dado que presenta una ligera pendiente de 0.7 % en sentido NE-SO. En los meses siguientes de abril



**Figura 5.** Tipos de costras: a) Tipo I: Costra salina dura lisa; b) Tipo II: Costra salina dura de alta rugosidad o fósil; c) Tipo III: Costra salina dura de baja rugosidad; d) Tipo IV: Costra salina terrosa; e) Tipo V: Costra salina abrillantada; f) Tipo VI: Costra salina terrosa asociada a boratos.

a septiembre ocurre la precipitación de las costras salinas y toda la superficie del salar permanece seca. En el salar de Pozuelos se pudo observar que el nivel freático varía 0.20 a 0.90 metros, al menos en la época del año que se midió (agosto-septiembre). La altura del nivel freático está sujeta al mes y horario en que se realizó la medida. En el salar de Pozuelos, a partir el análisis de la morfología de las costras, se pudo observar su gran variedad y distribución que se resu-

men en el Cuadro 2. Las costras cambian de una a otra con contactos netos claros, incluso se observan en las imágenes satelitales. Se destaca el hecho de que las costras son muy dinámicas a lo largo del año y están sujetas a los periodos estivales propios del clima de la Puna.

En el salar de Pozuelos la costra fósil corresponde a la costra tipo II, lo que permite que el depocentro del salar se encuentre elevado topográficamente. Esta área no presenta

**Cuadro 2.** Datos del nivel freático, área de las costras y altura promedio del salar de Pozuelos y su comparación con las áreas definidas por Igarzábal (1996).

Costra	Nombre	NF (m)	Área en este trabajo (km <sup>2</sup> )	Área aprox. en Igarzábal (1996) (km <sup>2</sup> )	Elevación (msnm)
Tipo I	Costra salina dura lisa	~0.28	20.50	14.94	~3762
Tipo II	Costra salina dura de alta rugosidad	~0.90	3.60	53.25	~3763
Tipo III	Costra salina dura de baja rugosidad	~0.53	25.00		~3761
Tipo VI	Costra salina terrosa	~0.32	8.12		~3762
Tipo V	Costra salina abrigantada	~0.20	2.60	21.37	~3762
Tipo VI	Costra salina terrosa asociada a boratos	~0.20	11.05		~3764
			70.87	89.56	

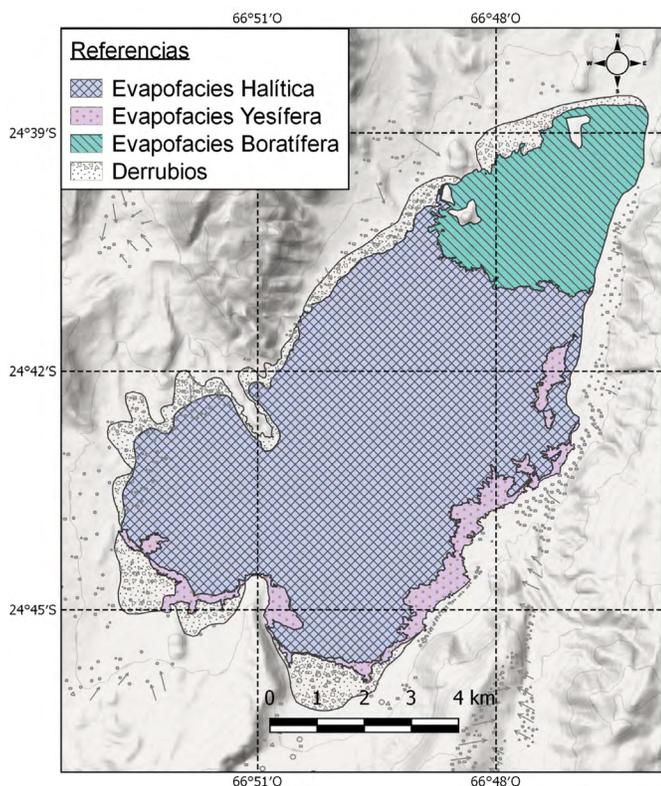
indicios de disolución y renovación de sales, formando un volumen notable. Posiblemente esto se deba al hecho que en esta área, el agua pueda alcanzar rápidamente la saturación con el cloruro de sodio y, por lo tanto, no puede disolver completamente la costra de halita. Se ha indicado que en este tipo de costras, el nivel freático está más alejado de la superficie, y como consecuencia la evaporación capilar no alcanza la superficie, lo que genera costras poco activas. Las costras de

halita se constituyen debajo del agua estacionaria, en cambio las costras eflorescentes se forman en entornos subaeriales (Vila 1976, Igarzábal 1991, Pueyo 1991, Lokier 2012).

La estación Salar de Pocitos (Cuadro 3) proporcionó los datos pluviométricos más cercanos al salar de Pozuelos, en ellos se indican dos fechas (1975 y 1979) en donde las precipitaciones superaron los 100 mm (Bianchi y Yáñez 1992).

Estos registros se asocian al cambio de la costra II: Costra salina dura de alta rugosidad “fósil”, cuyas dimensiones se redujeron a más de un 90 % de la superficie respecto a la costra fósil definida por Igarzábal (1996). Su reducción y cambio de morfología se debe a que el salar se inundó casi completamente en esas fechas, disolviendo gran parte de la costra II. Actualmente en esa área se encuentran las costras III y IV, que notoriamente son más recientes y poseen mayor humedad que la costra fósil.

Tomando en cuenta el mapa de isoconcentraciones de litio (Alonso et al. 2017), se observa que la distribución de Li<sup>+</sup> es elevada en la costra tipo II “fósil”. El hecho de que la costra fósil coincida con el depocentro y a su vez coincida con la mayor concentración de litio, se asocia a que esta costra es la más antigua de las descritas, lo que indicaría un tiempo de permanencia de la salmuera mayor que las demás costras y por ende un mayor tiempo de concentración de Li<sup>+</sup>. Sin embargo su vinculación no está totalmente definida y no puede ser tomada aún como parámetro estándar.



**Figura 6.** Mapa de zonación de evapofacies dominantes del salar de Pozuelos. Evapofacies boratífera, yesífera y halítica.

## CONCLUSIONES

En el salar de Pozuelos se distinguieron seis diferentes costras evaporíticas. Se tomó en cuenta sus características

**Cuadro 3.** Datos de precipitaciones de la Estación "Salar de Pocitos", Provincia de Salta (Bianchi y Yáñez 1992).

Localidad: Salar de Pocitos												
Longitud: 67° 00' 0"    Latitud: 24° 23' S    Altitud: 3600 msnm												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1970	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1971	30	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1972	64	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1973	3	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1974	40	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1975	109	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
1976	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1977	26	18	22	0	0	0	0	0	0	43	0	0
1978	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1979	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1980	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0

morfológicas, que muestran contactos netos entre ellas. Las costras que se ubican más cerca de los márgenes externos del salar presentan aportes de sedimentos aluviales y de derrubios. Estas costras tienen aportes clásticos debido a los cursos efímeros en épocas estivales. En cambio las costras más cercanas al depocentro del salar presentan aportes superficiales (lluvias) y subterráneos. La costra "fósil" del depocentro, adquirió sus especiales características debido a que no es afectada por el escurrimiento superficial.

La costra salina dura de alta rugosidad "fósil" (tipo II), redujo sus dimensiones a más de un 90% de la superficie respecto al fotomapa de Igarzábal (1996). Se asume que su reducción y cambio de morfología se debe a que el salar se inundó casi completamente en algún momento entre el año 1970 y la actualidad, disolviendo gran parte de la costra fósil. Evidencia de este acontecimiento lo encontramos en la comparación de los mapas de Igarzábal (1996) y el presentado en este trabajo. Se asocia este hecho a las precipitaciones excepcionales registradas en los años 1975 y 1979, que superaron los 100 mm en el mes de enero. La costra tipo II coincide con el depocentro del salar, siendo la evapofacies halítica la que resguarda la salmuera con alto contenido en Li<sup>+</sup>.

Cada una de las costras evaporíticas está asociada a los cambios de facies laterales dentro del salar de Pozuelos. Está relacionado con la variación del nivel freático, las inundaciones en épocas estivales, los sistemas fluviales efímeros, su posición en el salar (aluviones de borde, costa o playa u depocentro) y la topografía.

La zonación de las evapofacies en el salar Pozuelos, está integrada por una evapofacies halítica compuesta mayormente por las costras Tipo I, II, III y IV, que conforman el núcleo de halita en el centro del salar. En las zonas marginales hacia el este y sur se distingue por una evapofacies yesífera, conformada por la costra Tipo V. Hacia el norte se encuentra la evapofacies boratífera, compuesta por la costra Tipo IV y asociada a las paleofuentes termales extintas de San Mateo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Cátedra de Mineralogía I-II (UNSa) y CEGA-INSUGEO-CONICET. Así también a Lithea Argentina Inc., LSC Lithium Corporation y Litica Resources S.A., por el apoyo logístico para la realización de este trabajo y especialmente al Dr. Rodrigo Castañeda. Se agradece la colaboración a la Dra. Teresita del Valle Ruiz, Geól. Eliana Chanampa, CPA David González y CPA Omar Domínguez. Se agradece especialmente a los revisores Dr. Juan José Pueyo y Dr. Octavio Artieda, y a los editores Dra. Adriana Mehl, Dr. Francisco Córdoba y Dr. Andrés Bilmes, por los comentarios y sugerencias que contribuyeron a mejorar el manuscrito. En el presente trabajo se contó con el apoyo económico de los proyectos ANPCyT PICT-V-2014-3654, ANPCyT PICT 2017-1010, CIUNSa N° 2304 y CIUNSa N° 2287.

## REFERENCIAS

Alonso, R.N. 1986. Ocurrencia, posición estratigráfica y génesis de los depósitos de boratos de la Puna Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédita), 196 p., Salta.

- Alonso, R.N. 1991. Evaporitas Neógenas de los Andes Centrales. En: Pueyo, J. J. (ed.) Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos. Universidad de Barcelona, Estudios Generales, Publicación 2: 267-332, Barcelona.
- Alonso, R.N. 2006. Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina. INSUGEO, Serie Correlación Geológica 21: 155-170.
- Alonso, R.N. 2017. Los salares de la Puna argentina y su recurso minero. En: Muruaga, C.M. y Grosse, P. (eds.), Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del 20° Congreso Geológico Argentino, 1018-1038, San Miguel de Tucumán.
- Alonso, R.N. y Rojas, W.R. 2011. Technical Report, Pozuelos Project, Salta Province, prepared for Ekeko S.A. (inédita), 65 p. Salta.
- Alonso, R.N. y Viramonte, J.G. 1985. Provincia boratífera centroandina. 4° Congreso Geológico Chileno, Actas 2(3): 45-63, Antofagasta.
- Alonso, R.N., Chanampa, E. y Martínez, V.R. 2017. Litio en el salar de Pozuelos (Salta). 20° Congreso Geológico Argentino, Actas S2: 1-8, San Miguel de Tucumán.
- Alonso, R.N., Gutiérrez, R.V. y Viramonte, J.G. 1984. Puna Austral - Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna Argentina. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 43-63, San Carlos de Bariloche.
- Alonso, R.N., Jordan, T.E., Tabbutt, K. y Vandervoort, D. 1991. Giant Evaporite Belts of the Neogene Central Andes. *Geology* 19: 401-404.
- Artieda, O., Davila, A., Wierzchos, J., Buhler, P., Rodríguez-Ochoa, R., Pueyo, J. y Ascaso, C. 2015. Surface evolution of salt-encrusted playas under extreme and continued dryness. *Earth Surf. Process and Landforms* 40: 1939-1950.
- Bevacqua, P. 1992. Geomorfología del salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Tesis Profesional. Universidad Católica del Norte, (inédita), 284 p., Antofagasta.
- Bianchi, A. y Yáñez, R. 1992. Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Cerrillos, Salta.
- Blasco, G., Zappettinni, E. y Hong, F. 1996. Hoja Geológica 2566-I San Antonio de los Cobres. Provincias de Salta y Jujuy. Subsecretaría de Minería de la Nación. Dirección Nacional del Servicio Geológico. 126 p., Buenos Aires.
- Catalano, L.R. 1964. Boro-Berilio-Litio (una nueva fuente natural de energía). Secretaría de Industria y Minería. Estudios de Geología y Minería Económica. Serie Argentina N° 3. Buenos Aires.
- Chong, G. 1984. Die Salare in Nordchiles-Geologie, Struktur und Geochemie. *Geotektonische Forschungen* 67: 1-146.
- Flores, R. 2014. Estudio geológico de las paleofuentes termales de San Mateo (Salar de Pozuelos), Puna salteña. Tesis Profesional, Universidad Nacional de Salta (inédita), 77 p., Salta.
- Hardie, L.A. 1968. The origin of the recent non-marine evaporite deposit of Saline Valley, Inyo County, California. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 32: 1279-1301.
- Hardie, L.A. y Eugster, H.P. 1970. The evolution of closed-basin brines. Mineralogical Society of America, Special Paper 3: 273-290, New York.
- Heit, J.F. 2007. Estudio de la zonación de las evaporaciones en el salar del Rincón, departamento Los Andes, Salta. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta (inédita), 113 p., Salta.
- Hoyos, A.R. 2012. Estudio geológico y potencial de las salmueras de litio del sector noroccidental del salar de Hombre Muerto (Minas Rodrigo II y Eugenia). Salta. Tesis Profesional, Universidad Nacional de Salta (inédita), 154 p., Salta.
- Igarzábal, A.P. 1991. Evaporitas cuaternarias de la Puna Argentina. En: Pueyo, J.J. (ed.), Génesis de formaciones evaporíticas. Modelos andinos e ibéricos. Universidad de Barcelona, Estudios Generales, Publicación 2: 333-374, Barcelona.
- Igarzábal, A.P. 1996. Los salares de la Puna Argentina (provincias de Jujuy, Salta y Catamarca). Instituto de Beneficios de Minerales. Universidad Nacional de Salta (inédito), 120 p., Salta.
- Jones, B.F. 1965. The hidrology and mineralogy of Deep Springs Lake, Inyo County, California. U.S. Geological Survey Professional Paper 502-A, 56 p., California.
- Kendall, A.C. 1992. Evaporites. En: Walker R.G. y James N.P. (eds.), Facies Models, Response to sea level changes. Geological Association of Canada 19: 375-409, Ottawa.
- Lavado, R.S. y Reinaudi, N.B. 1986. Wind-blown dust salty areas. A source of fluoride in plants. *Fluoride* 19: 14-18.
- Lokier SW. 2012. Development and evolution of subaerial halite crust morphologies in a coastal sabkha setting. *Journal of Arid Environments* 79: 32-47.
- Lowenstein, T.K. y Hardie, L.A. 1985. Criteria for the recognition of salt-pan evaporates. *Sedimentology* 5: 627-644.
- Martínez, V.R., Alonso, R.N. y Galli, C.I. 2018. Historia evolutiva paleoambiental del depocentro del Salar de Pozuelos (Puna Austral). INSUGEO, Serie Correlación Geológica 34(2): 42-55.
- Ortí Cabo, F. 2010. Evaporitas: introducción a la sedimentología evaporítica. En: Archie, A. (ed.), Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Publicación 14, 675-771, Madrid.
- Paoli, H.P. 2002. Recursos Hídricos de la Puna, Valles y Bolsones Áridos del Noroeste Argentino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria (EEA), 224 p., Salta.
- Pueyo, J.J. 1991. Génesis de formaciones evaporíticas: modelos andinos e ibéricos. Universidad de Barcelona, Publicación 2: 267-332, Barcelona.
- Smoot, J.P. y Castens-Seidell, B. 1994. Sedimentary features produced by efflorescent salt crusts, Saline Valley and Death Valley. En: Renau, R.W. y Last, W.M. (eds.), Sedimentology and Geochemistry of modern and ancient saline lakes. SEPM SP 50, 73-90, Tulsa.
- Smoot, J.P. y Lowenstein, T.K. 1991. Depositional environments of

- non-marine evaporites. En: Melvin, J. (ed.), *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources. Developments in Sedimentology* 50: 189-347.
- Strecker, M.R., Alonso, R.N., Bookhagen, B., Carrapa, B., Hilley, G.E. Sobel, E.R. y Trauth, M.H. 2007. Tectonics and climate of the southern central Andes, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35: 747-787.
- Stoertz G.E. y Ericksen, G.E. 1974. *Geology of Salars in northern Chile*. US Geological Survey, Professional Paper, 811, 65 p., Washington.
- Turner, J.C.M. 1972. Puna. Cordillera Oriental. En: Leanza, A.F. (ed.), *Geología Regional Argentina*. Academia Nacional de Ciencias, 91-142, Córdoba.
- Vinante, D. 2003. *Estudio Geológico de la cuenca boratífera oriental del salar Hombre Muerto, Puna Argentina*. Tesis profesional, Universidad Nacional de Salta (inédita), 69 p., Salta.
- Vinante, D. y Alonso, R.N. 2006. Evapofacies del salar Hombre Muerto, Puna Argentina: distribución y génesis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61(2): 286-329.
- Vila, T. 1976. Hidrogeología y distribución zonal de las costras salinas en el Salar de Bellavista-Pintados, Norte Grande de Chile. 1° Congreso Geológico de Chile, Torno 2: 33-52, Chile.