



## EVOLUCION DE LA ARIDEZ EN EL DESIERTO DE ATACAMA DURANTE EL CUATERNARIO: NUEVAS PERSPECTIVAS

Luc ORTLIEB (\*\*)

### LA ARIDEZ ACTUAL DEL DESIERTO DE ATACAMA

La hiper-aridez del Desierto de Atacama se debe a la extrema escasez de humedad proveniente del océano Pacífico y al bloqueo de las masas de aire húmedo del dominio atlántico. Clásicamente, se atribuye esta situación a la conjunción de una serie de factores orográficos, atmosféricos y oceanográficos. La Cordillera de los Andes, con su altura superior a los 4,000 m (cumbres a más de 6,000 m), constituye una eficiente barrera contra los aportes de humedad provenientes del este. La subsidencia atmosférica ligada al sistema del anticiclón del Pacífico sudoriental refuerza este bloqueo de aire amazónico, y al mismo tiempo favorece el fenómeno de inversión térmica que afecta la franja litoral. La inversión térmica, directamente inducida por los efectos combinados de la Corriente de Humboldt y de los alisios (baja temperatura del mar y afloramiento costero), explica que la poca humedad del aire originada en el Pacífico se concentre en nieblina costera (camanchaca) y no logre penetrar tierra adentro. Las características orográficas del Norte Grande, y en particular el escarpe costero de más de 1,000 m de altura que limita la Cordillera de la Costa, completan un dispositivo que hacen de la Pampa del Tamarugal, y del Desierto de Atacama en general, una de

las zonas más áridas del globo.

### ESTUDIOS PALEOCLIMATOLÓGICOS EN EL NORTE GRANDE: DIFICULTAD E INTERÉS

En la literatura sobre el Norte Grande de Chile abundan las referencias a la permanencia, o por lo menos la predominancia, de las condiciones de aridez durante el Cenozoico superior, y en el Cuaternario en particular. El concepto de un "viejo" Desierto de Atacama ha tenido fundamentos de diferente índole: geomorfológico, geológico, geoquímico e hidrológico (1,2,3,4). Hasta los últimos años, sin embargo, se han realizado pocos estudios propiamente paleoclimatológicos. Esto se debe a dificultades específicas, como el carácter abiótico del Desierto de Atacama, que prácticamente impide los estudios paleontológicos y palinológicos, y el tipo de registro sedimentario que se limita a depósitos detríticos y a una serie de formaciones evaporíticas (costras, nitratos, salares, etc.).

De hecho, el concepto de una aridez permanente a escala de los últimos  $10^5$ - $10^6$  años resulta esencialmente de una ausencia de evidencias de fases húmedas. Futuras investigaciones deberían generar datos más precisos.

Desde un punto de vista climatológico, es importante determinar hasta qué punto fue permanente (o no) la aridez de este desierto durante los últimos millones de años, y sobre todo en el transcurso de las alternancias climáticas que han marcado el Pliocuaternalio. Es relevante apreciar el rango de variabilidad de la aridez de esta región entre los "modos" de circulación atmosférica que caracterizan los

(\*\*) ORSTOM-Chile y Facultad de Recursos del Mar, Universidad de Antofagasta, Casilla 170, Antofagasta, Chile

periodos glaciales e interglaciales. Los episodios, aún de corta duración, durante los cuales se modificaron, o se interrumpieron, las condiciones de aridez, son particularmente interesantes para una mejor comprensión del sistema dinámico océano-atmósfera. Este tipo de investigación se justifica tanto a escala histórica (por ejemplo: relación entre lluvias excepcionales y sistema ENSO), como a escala del Cuaternario superior (por ejemplo, relación entre fases lacustres del altiplano y precipitaciones en la Depresión central) o del Pleistoceno (régimen más húmedo del Pleistoceno inferior).

#### **LA PERENNIDAD (?) DE LA ARIDEZ DURANTE EL CENOZOICO SUPERIOR**

En las últimas décadas se ha considerado que las condiciones de aridez (y/o de semi-aridez) se instalaron en el norte de Chile al final del Eoceno y han permanecido desde entonces (1, 2, 3). La ausencia de importantes incisiones fluviales, la erosión reducida de rocas miocenas, la escasez de sedimentos lacustres y la preservación de ciertos yacimientos supragenéticos cupríferos han llevado a interpretar que, en el transcurso de los últimos 10 Ma, las fases pluviales fueron de intensidad y duración limitadas, inclusive en la parte meridional del desierto de Atacama (4, 5, 6). La idea actualmente predominante es que desde antes del Plioceno, los Andes han jugado su papel de barrera hidrológica, mientras que un ancestro de la Corriente de Humboldt enfriaba suficientemente las aguas costeras para inducir un fenómeno de inversión térmica. Esta interpretación, correcta a escala del Cenozoico, se revela inadecuada cuando se considera con algún detalle ciertas secuencias estratigráficas o el registro paleontológico de algunas formaciones costeras.

Entre los argumentos habitualmente citados a favor de una casi-permanencia de las condiciones de aridez en la

región, algunos índices ameritan estudios más detallados y/o complementarios, mientras que ciertas interpretaciones deben ser re-analizadas. Revisemos algunas de las evidencias más comúnmente citadas, e intentamos delinear algunas pistas de investigación prometedoras en las perspectivas arriba mencionadas.

#### **EL REGISTRO ESTRATIGRAFICO EN LA DEPRESION CENTRAL**

Desde el Mioceno la aridez de la región se refleja en la sedimentación del relleno de Pampa del Tamarugal, más específicamente en las formaciones Calama (Mioceno inf.-medio), El Loa (Mioceno sup.), El Batea (Plioceno), Quillagua y Chiuchiu (Plioceno sup.-Pleistoceno inf.)<sup>(4, 7, 8)</sup>. Estos sedimentos indican escurrimientos característicos de ambientes desérticos. De manera general, se observa un gradiente granulométrico decreciente desde la vertiente occidental de la Cordillera hacia el oeste de la Depresión central.

Un examen más detallado de este registro sedimentario muestra que la extrema aridez fue interrumpida en varias instancias, en particular durante el Plioceno-Pleistoceno inferior. En el sur de Pampa del Tamarugal, sedimentos lacustres, interestratificados en secuencias aluviales de las formaciones El Loa, El Batea, Quillagua y Chiuchiu atestiguan que se acumularon cantidades de agua relativamente importantes en ciertos momentos. Sin embargo, es de notar que, como se sugirió en el caso de la F. Chiuchiu<sup>(7)</sup>, la formación de estos lagos puede reflejar un aporte de aguas provenientes de la zona cordillerana, y no implica necesariamente excesos de lluvias en el área misma.

#### **EL LAGO SOLEDAD**

A diferencia de las capas de sedimentos lacustres intercaladas en las formaciones arriba mencionadas, la existencia de un "Lago Soledad" ha sido inferida a partir de la presencia de

restos de líneas de costa lacustres en el flanco del Cerro Soledad. Del punto de vista paleoclimatológico, sería relevante re-examinar la geometría del "Lago Soledad" y precisar su edad. Según Brügger <sup>(1)</sup> y Hollingworth <sup>(9)</sup>, un gran lago alimentado por la fusión de las nieves andinas, cubría en el Pleistoceno inferior (?) las áreas actualmente ocupadas por los salares Grande y Llamara, alcanzando una profundidad máxima de 200 m. Ulteriormente, dudas fueron expresadas en cuanto a la identificación de las líneas de costa de un tal "lago": éstas podrían ser remanentes (¿deplazados por fallas?), ya sea de la F. El Loa <sup>(10)</sup> o de la F. Quillagua <sup>(8)</sup>. En todo caso, y aunque los depósitos asociados a las terrazas lacustres del Cerro Soledad sean efectivamente de algún lago pleistoceno, es imprescindible reapreciar la actividad neotectónica del área antes de deducir, de la posición actual de estos afloramientos aislados, que se formó un lago de 200 m de profundidad. Además del "Lago Soledad", merecerían ser estudiados los restos de otros dos lagos pleistocenos señalados más al sur en la Depresión central: los lagos Philippi y Taltal <sup>(11)</sup>.

#### LOS DEPOSITOS EVAPORITICOS

Las abundantes acumulaciones y formaciones evaporíticas, también han sugerido una gran aridez. Los suelos salinos, costras yesíferas ("panqueque") y otros depósitos evaporíticos superficiales comunes en extensas áreas del Norte Grande comprueban una aridez relativamente reciente (Cuaternario superior). Pero la ocurrencia de los famosos yacimientos de nitratos (y en particular de algunas especies minerales tan solubles que no se observan en otras áreas del mundo) constituye un indicador más firme de aridez prolongada. Según este criterio, no hubiera ocurrido ninguna fase pluvial de importancia (en intensidad o duración) en los últimos

cientos de miles de años (¿Pleistoceno medio y superior?).

En cambio, los salares de Pampa del Tamarugal, que actualmente son inactivos, indican que en algunos momentos del Pleistoceno (inferior y/o medio) existía, además de una fuerte evaporación, un mínimo de aportes de agua, por lluvia o por flujo subterráneo. Tomando en cuenta la carencia de lluvias inferida de la preservación de los nitratos, se presume que una recarga de la capa freática en el piedemonte, a raíz de lluvias cordilleranas/altiplánicas fue el mecanismo esencial. La desactivación posterior de los salares resulta de una intensificación reciente de la aridez.

#### PALEOCEANOGRAFIA Y PALEOCLIMATOLOGIA DE LA REGION COSTERA

La manifestación más clara de las interacciones océano-atmósfera en la región es el lazo que parece haber existido entre la intensificación del afloramiento costero (y de la productividad) y las condiciones de máxima aridez tierra adentro.

#### LOS DEPOSITOS DE GUANO FOSIL

La preservación de guano fósil en ciertos puntos de la costa del Perú y del norte de Chile ha sido considerada como otro indicador de aridez en los tiempos plio-cuaternarios <sup>(11,12,13,14)</sup>. Se interpretó que los depósitos de guano constituían acumulaciones continuas de deyecciones, tal vez desde el Plioceno (guano rojo), y que, por no haber sido disueltos (no obstante su exposición a la intemperie), comprobaban una carencia de fases lluviosas durante un largo periodo. Tras un re-examen del problema, se concluye que el guano rojo es probablemente más reciente (¿Pleistoceno medio?), que su color implica procesos de lixiviación (por efecto de lluvias), y que se encuentra en grietas y/o cuevas (y no a la intemperie). Pero si la argumentación

inicial no resiste al análisis en términos de evolución climática plio-cuaternaria, no debe descartarse por lo tanto el potencial paleoclimatológico y oceanológico del guano. Este sedimento orgánico refleja, a través de una larga cadena trófica (plancton-peces-aves), ciertas condiciones oceanográficas (importante producción primaria y bajas temperaturas implicando por ende una circulación atmosférica reforzada) compatibles con la aridez de la zona costera.

#### SEDIMENTOS MARINOS RECIENTES

A través del estudio de sedimentos recientes de la margen continental peruana se puso en evidencia periodos de debilitamiento (o reforzamiento) del sistema de afloramiento costero (15,16,17). Fue establecido así que durante la última deglaciación, las aguas costeras eran más cálidas y el sistema de afloramiento menos intenso que ahora. Los periodos post-glaciales (¿y glaciales?) estarían entonces marcados por factores océano-atmosféricos que tienden a disminuir la aridez.

Hasta ahora hubo muy pocas investigaciones paleoceanográficas en la margen continental nor-chilena. Los resultados preliminares de un estudio de núcleos sedimentarios extraídos del fondo de la bahía de Mejillones (19,20) indican que gracias a las condiciones particulares de sedimentación y de preservación (fondo anóxico, poca bioturbación, fuerte productividad, escasez de aportes continentales) se registran cambios de condiciones oceanográficas con una resolución del orden del decenio. El estudio combinado de diversos bio-indicadores (foraminíferos, fitoplancton y restos de peces) es susceptible de determinar anomalías oceanográficas que indujeron/reflejaron anomalías climáticas en los últimos siglos y milenios.

#### PALEOECOLOGIA LITORAL y BIOGEOGRAFIA

El régimen tectónico de la costa del norte de Chile ha provocado la emersión

de depósitos litorales del Cenozoico superior y del Cuaternario en particular (terrazas marinas). En los sedimentos costeros así expuestos se observan faunas de invertebrados que permiten reconstrucciones paleo-ambientales y biogeográficas relativamente precisas. La presencia de especies de moluscos de la provincia panameña en depósitos del Pleistoceno inferior (?) de la península de Mejillones (ver: Ortlieb & Guzmán, mismo vol.) es posiblemente relacionada con las evidencias citadas de ciertas interrupciones de la aridez en Pampa del Tamarugal (F. Chiuchiu). A escala de tiempo más corta, el hallazgo de restos de peces típicos (actualmente) de la costa ecuatoriana, fechados de 9700 BP, en la latitud de Antofagasta (21), confirma que el rango de variaciones de las condiciones oceanográficas costeras es amplio e implica una atenuación de la aridez al final del Pleistoceno.

#### A MANERA DE CONCLUSION

- Por su situación geográfica muy particular, el Desierto de Atacama constituye un caso-tipo para el estudio de las interacciones océano-atmósfera-continente en el contexto de las variaciones climáticas pasadas, a distintas escalas de tiempo. Una mejor apreciación de la variabilidad de la aridez en el tiempo tendría consecuencias importantes para el modelaje de este tipo de interacciones.

- El concepto de la permanencia de las condiciones de aridez debe ser abandonado a favor de un análisis más preciso de las variaciones de las características paleoclimáticas del Desierto de Atacama.

- Durante el Plioceno superior y el Pleistoceno inferior se produjeron interrupciones de la aridez de duración aún desconocida. Gran parte del Pleistoceno medio y el Pleistoceno superior fueron aparentemente casi tan áridos como hoy día. En la transición Pleistoceno superior-Holoceno, se produjeron

alteraciones oceano-climáticas en el sentido de una disminución de la aridez. Luego, en el Holoceno superior se incrementó la aridez.

Convenios ORSTOM-Univ. de Chile, y ORSTOM-Univ. de Antofagasta (UR 1C & 1E, Dept. TOA) .

#### Referencias citadas:

- (1) BRÜGGEN J., 1950. *Fundamentos de la geología de Chile*. Inst. Geogr. Militar, Santiago, Chile. 374 p.
- (2) GALLI-OLIVIER C., 1967. Pediplain in northern Chile and Andean uplift. *Science*, 158: 653-655.
- (3) MORTIMER C.E. & SARIC N.R., 1975. Cenozoic studies in northernmost Chile. *Geol. Rundschau*, 64: 395-420.
- (4) MORTIMER C.E., 1980. Drainage evolution in the Atacama Desert of northernmost Chile. *Rev. Geol. Chile*, 11: 3-28.
- (5) MORTIMER C.E., FARRAR E. & SARIC N., 1974. K-Ar ages from tertiary lavas of the northernmost Chilean Andes. *Geol. Rundsch.*, 6: 484-490.
- (6) ALPERS C.N. & BRIMHALL G.H., 1988. Middle Miocene climatic change in the Atacama desert, northern Chile: Evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 100: 1640-1656.
- (7) NARANJO J.A. & PASKOFF R., 1981. Estratigrafía de los depósitos cenozoicos de la región Chiuchiu - Calama, desierto de Atacama. *Rev. Geol. Chile*, 13-14: 79-85.
- (8) NARANJO J.A. & PASKOFF R., 1982. Estratigrafía de las unidades sedimentarias cenozoicas de la Cuenca del río Loa en la Pampa del Tamarugal, región de Antofagasta, Chile. *Rev. Geol. Chile*, 15: 49-57.
- (9) HOLLINGWORTH S.E., 1964. Dating the uplift of the Andes of northern Chile. *Nature*, 211: 17-20.
- (10) RIEU M., 1975. Les formations sédimentaires de la Pampa de Tamarugal et le río Loa (Norte Grande du Chili). *Cah. ORSTOM, sér. géol.*, 7 (2): 145-164.
- (11) CRAIG A.K., 1982. Ambiente costero del norte de Chile. Proc. Symp. Arqueología del área centro sur Andina, revisión de su desarrollo cultural (Arica, 1981), Depto. Antropol., Univ. del Norte, Arica, p. 4-20.
- (12) BRÜGGEN J., 1939. Guano-Lager in Chile. *Natur und Volk*, Frankfurt, 69 (5): 234-249.
- (13) BIESE W., 1950. Estudios geomorfológicos de los yacimientos de guano situados entre Arica y Antofagasta. Sociedad Chilena de Fertilizantes, Santiago. 110 p.
- (14) SCHWEIGGER E.H., 1964. *El litoral peruano*. Univ. Nac. Federico Villareal, Lima, 2nda ed., 414 p.
- (15) DEVRIES T.J. & SCHRADER H., 1981. Variation of upwelling/oceanic conditions during the latest Pleistocene through Holocene off the Central Peruvian coast; a diatom record. *Mar. Micropaleontol.*, 6 (2): 157-167.
- (16) WEFER G., DUNBAR R.B. & SUESS E., 1983. Stable isotopes of foraminifers off Peru recording high fertility and changes in upwelling history. In: Coastal upwelling, its sediment record, Part B: Sedimentary records of ancient coastal upwelling, J.Thiede & E.Suess (eds.), Plenum Press, New York, p.295-307.
- (17) REIMERS C.E. & SUESS E., 1983. Spatial and temporal patterns of organic matter accumulation on the Peru continental margin. In: Coastal upwelling, its sediment record; Part B: Sedimentary records of ancient coastal upwelling, J. Thiede & E. Suess (eds.), Plenum Press, New York, p. 311-345.
- (18) ORTLIEB L., FOLLEGATI R., ESCRIBANO R., KONG I., RODRIGUEZ L., ZUÑIGA O. & VALDES J. 1993. Proyecto "PALEOBAME" (Paleoceanografía en Bahía Mejillones del Sur, Norte de Chile): Resultados preliminares y perspectivas. Intern. workshop on the Quaternary of Chile (Santiago, 1993), abstr.vol., p.71.
- (19) FOLLEGATI R., ORTLIEB L., ESCRIBANO R., KONG I., MARTIN L., MOURGUIART Ph., RODRIGUEZ L., VALDES J. & ZUÑIGA O., 1994.- Primeros estudios sobre la paleoceanografía reciente de Bahía Mejillones del Sur (Región de Antofagasta): El proyecto "PALEOBAME". XIV Jorn. Ciencias del Mar (Puerto Montt), Abstr. Vol., p.147.
- (20) LLAGOSTERA A., 1979. 9700 years of maritime subsistence on the Pacific: an analysis by means of bioindicators in the north of Chile. *Amer. Antiquity*, 44 (2): 309-323.