

Biom mineralizaciones de sílice amorfo (silicofitolitos). Características generales y su rol en estudios edafoarqueológicos

Margarita Osterrieth*

Bárbara Balesta** y Nora Zagorodny**

* Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas
Universidad Nacional de Mar del Plata. CC 722 Correo Central 7600 Mar del Plata.

** Laboratorio de Análisis Cerámico. Facultad de Ciencias Naturales y Museo.
Universidad Nacional de La Plata. Calle 64 N° 3 (1900). La Plata. Argentina.

INTRODUCCIÓN

Se presentan los conceptos generales y el marco conceptual sobre biom mineralizaciones, en particular sobre las biom mineralizaciones de sílice amorfo, incluidas en los denominados fitolitos (fitos: planta, litos: piedra), más específicamente silicofitolitos. Los fitolitos son cuerpos mineralizados encontrados en plantas que persisten en el registro fósil y constituyen microfósiles o “subfósiles”. En el presente trabajo se analiza su rol como indicador de la relación planta-suelo-ambiente y uso del recurso en estudios geoecológicos, pedológicos y arqueológicos. Finalmente, se exponen los resultados de las primeras observaciones exploratorias realizadas en este tema sobre el recinto 36 del Cerro Colorado de La Ciénaga de Abajo y morteros hallados en las zonas bajas aledañas al sitio.

MARCO CONCEPTUAL Y CARACTERIZACIÓN DE LAS BIOMINERALIZACIONES

Las biom mineralizaciones son minerales o sustancias amorfas generadas por el funcionamiento metabólico de los organismos vivos (Weiner y Dove 2003; Osterrieth 2004) y están

presentes en los cinco Reinos, en todos los niveles de la biosfera (Lowestam 1981).

Existen antecedentes bibliográficos sobre el tema desde hace más de dos siglos, pero son muy escasos si se comparan con otras disciplinas, excepto en algunos aspectos puntuales como, por ejemplo, las biomineralizaciones en plantas superiores. A partir de 1970 se ha incrementado el estudio de las biomineralizaciones y, si bien numerosos investigadores de prestigio internacional se han interesado en el tema, éste es deficitario respecto de otros, a pesar de que su estudio aporta conocimiento a muchas disciplinas, tales como botánica, paleobotánica, etnobotánica, pedología, geología, etc. Jahren (1996) sostiene que el estudio de las biomineralizaciones se ubica justamente en la interfase entre la geología y la biología, dos campos que han estado históricamente muy separados (Osterrieth 2009).

El listado de las biomineralizaciones es muy amplio: en él se incluyen los esqueletos, dientes, huevos, caparazones, valvas, cistolitos, algas, estructuras de plantas, cálculos renales y biliares, entre otros.

Origen y procesos

Las biomineralizaciones se pueden definir como la precipitación de minerales producto de la actividad celular y funcionamiento metabólico de los organismos vivos (Weiner y Dove 2003), a lo cual se deben agregar los componentes amorfos, ya que muchas biomineralizaciones no desarrollan estructuras cristalinas (Osterrieth 2004). Los estudios detallados de los procesos de biomineralización realizados en los últimos 40 años han permitido evidenciar que los mismos constituyen un proceso central y determinante para la vida y su evolución y que en el planeta tierra han condicionado la evolución de la litosfera, hidrosfera y biosfera detectándose desde inicios del Precámbrico (Kirschvink y Hagadorn 2000).

Tanto los organismos unicelulares como los multicelulares biomineralizan con diferente composición mineraloquímica y variadas estructuras, que pueden ser cristalinas simples, complejas,

ornamentadas y también simplemente masivas, hasta amorfas.

Las biomineralizaciones han sido descritas en todos los *phyla*: el 50% son sintetizadas por animales, 14% por protistas, 16% por representantes de los monera, 12% por plantas vasculares y 8% por hongos. Si bien en la transición del Precámbrico al período Cámbrico aparecieron esqueletos duros calcáreos, fue rápida y dramáticamente (en el transcurso de tan sólo 40 a 50 millones de años) que algunas formas de esqueletos biomineralizados, caparzones y una amplia variedad de estructuras aparecieron en todos los *phyla* (Kirschvink y Hagadorn 2000).

Los procesos básicos por los cuales se generan las biomineralizaciones desde el punto de vista físico-químico y mineralógico son:

1) sobresaturación de fluidos (Kps), lo cual está condicionado esencialmente por la velocidad de suministro de iones, los procesos de difusión y la presencia de inhibidores, entre otros;

2) nucleación de cristales o compuestos amorfos, donde los núcleos críticos en general están constituidos por un número muy variable de iones, entre 10 y 1000. Superado el tamaño crítico y vencidas las barreras energéticas, los cristales o compuestos comienzan a crecer;

3) crecimiento de los cristales o compuestos amorfos.

Los procesos de biomineralización involucran moléculas orgánicas e inorgánicas, conformando estructuras complejas conjuntas, del mismo modo que las interacciones cinéticas y termodinámicas involucradas. Experimentaciones *in vitro* indican que se encuentran involucradas macromoléculas ácidas, proteínas ricas en ácido aspártico y glutámico, polisacáridos como carboxilatos y sulfatos, entre otros (Osterrieth 2004, 2009).

Tipos y sitios de depositación de las biomineralizaciones

Dentro de las biomineralizaciones más comunes se hallan los carbonatos, fundamentalmente calcita y aragonita, secundados por la sílice opalina o amorfa. Siguen en importancia los óxidos de hierro, mientras que los oxalatos tienen representatividad en cuatro de los cinco Reinos (Lowenstam 1981).

Las biomineralizaciones calcáreas (CaCO_3), organizadas estructuralmente como calcita, aragonita o vaterita, son utilizadas por algas y moluscos como exoesqueleto, mientras que los trilobites lo utilizaron como lentes. Para las plantas, el lugar de biomineralización es la vacuola (organela fundamental en el mantenimiento de la turgencia celular) de células especializadas denominadas idioblastos (Franceschi y Nakata 2005). En hongos, la mayoría de las hifas constan de cristales de oxalato de calcio mayoritariamente hidratados ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), que se originaron dentro de las paredes celulares (Árnott 1982). Muchas plantas biomineralizan ácido oxálico y muchas monocotiledóneas, sílice amorfo hidratado; estas biomineralizaciones suelen ser un disuasivo efectivo para los herbívoros, condicionando la palatabilidad de las especies forrajeras (Osterrieth 2004).

Las biomineralizaciones en procariotas, representadas por una gran variedad de bacterias, bioacumulan iones siendo dominantes el hierro y manganeso. Por ejemplo, la biomineralización de la ferrihidrita ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9n\text{H}_2\text{O}$) y magnetita (Fe_2O_3) por parte de la bacteria *Aquaspirillum magnetotacticum* es un proceso donde el hierro entra en la célula formando un quelato. El movimiento de los cuerpos de la magnetita biomineralizada o “magnetosomas” sirve para orientar a estas bacterias en el campo geomagnético (Blakemore 1975).

Estrechamente asociados a las biomineralizaciones de microorganismos se presentan películas, revestimientos o membranas orgánicas: los “biofilms”, que pueden ser remanentes de tejidos vegetales, o bien, como han sido considerados más recientemente, coberturas protectoras típicas de los procesos de biomineralización (Addadi *et al.* 2006). A nivel internacional se está trabajando intensamente sobre el impacto de estos biofilms en los procesos de degradación de los biominerales y/o del sustrato con calcretas, óxidos; recientemente se ha profundizado su estudio en relación con los procesos de corrosión de aceros, aleaciones metálicas y procesos de agregación (Coleman 1993; Jones 1995; Perry 1999; Osterrieth 2009).

En los eucariotas, los procesos de biomineralización se observaron mucho más extensivamente, y se ha determinado que en

ellos están disponibles una amplia variedad de compartimentos para facilitar la mineralización. Con la creación de las membranas lipídicas, los eucariotas fueron capaces de definir químicamente, en el interior de la célula, compartimentos separados. A través de estas membranas, el organismo tuvo posibilidad de bombear los iones seleccionados, bioacumularlos y generar los biominerales. Los productos finales de un proceso de biomineralización esencialmente idéntico pueden diferir de un individuo a otro; es por lo tanto destacable el amplio rango de especificidad celular de este proceso. En algunos organismos, un mineral es depositado en cierto tejido, y en otra parte, es depositado otro mineral; ejemplo de esto son los moluscos, como el quitón, los cuales depositan carbonato de calcio en sus valvas, mientras que simultáneamente se está depositando magnetita en los dientes de la rádula (Runham *et al.* 1969). En general y para todos los procesos, los depósitos de las biomineralizaciones son intra-inter, peri o extracelulares.

Como se mencionó previamente, las biomineralizaciones comúnmente distribuidas en el planeta son compuestos que contienen calcio, hierro y sílice. Los polimorfismos de carbonato de calcio son los que poseen la distribución más amplia; la sílice amorfa hidratada, los fosfatos, sulfuros y óxidos de hierro son los que continúan en abundancia. Minerales como halita u otras sales muy solubles de potasio aparecen en unos pocos grupos de plantas; sulfatos y óxidos de manganeso están muy restringidos. En las biomineralizaciones amorfas hidratadas, los organismos no necesitan disponer de energía para deshidratar los componentes atómicos, y ésta podría ser otra ventaja para precipitar sustancias amorfas. A pesar de ello, el 75% del total de las biomineralizaciones poseen estructura cristalina, lo que representa otra evidencia de lo esencial del proceso, a pesar del alto costo que implica generar estructuras cristalinas atómicamente ordenadas (Osterrieth 2009).

Las biomineralizaciones se pueden presentar como: amorfas, paracristalinas o cristalinas. La complejidad estructural de los biominerales va desde cristales individuales a agregados compuestos. Las partes duras de los esqueletos biomineralizados son ejemplos de morfologías de agregados. Las unidades agregadas

son usualmente puestas en un orden y los ejes cristalográficos pueden ser parcial o totalmente alineados. Estas estructuras ordenadas generalmente se diferencian en un número de unidades microarquitecturales, cada una de las cuales es envuelta por una película, revestimiento o membrana orgánica.

Las biomineralizaciones son útiles, ya que proveen de esqueleto y caparazones a los organismos mientras viven; a su muerte se depositan como sedimentos en todos los ambientes, formando parte del registro fósil. Su abordaje involucra un gran número de ciencias, disciplinas e investigadores, como biólogos, químicos, bioquímicos, físicos, geólogos, arqueólogos, entre otros. Esencialmente involucran estudios interdisciplinarios en la interfase tierra-vida, generando un espacio de trabajo *transdisciplinar*. Esto ayuda a la comprensión de procesos complejos; en las últimas décadas, el avance en el conocimiento de la interacción de componentes orgánicos e inorgánicos se utiliza para la generación de nuevos materiales compuestos -Composites/Biocomposites/Biomateriales- en el campo de las Ciencias de Materiales (Osterrieth 2004, 2009).

Íntimamente asociados a las biomineralizaciones, pero mucho menos considerados aún, son los procesos vinculados a la capacidad de los organismos para disolver o erodar los minerales. La *bioerosión* es efectuada sobre la superficie, en fisuras y por la perforación directa en el interior de los minerales y/o biominerales. Este proceso ha sido generalmente subestimado por los científicos, a pesar de que constituyen procesos de alto impacto en todos los ambientes, siendo especialmente relevantes en los medios acuosos (Warme 1975; Beech y Sunner 2004; Kamal *et al.* 2007). Estos aspectos revisten interés: así lo revela la literatura científica internacional, en los estudios e investigaciones sobre los procesos de corrosión de materiales, tanto naturales como artificiales (restos arqueológicos, paleontológicos, obras de arte, monumentos, aleaciones metálicas, aceros, etc.).

Biomineralizaciones de sílice amorfa

Las biomineralizaciones de sílice amorfa, silicobiolitos, como diatomeas, radiolarios, tecamébidos y poríferos son muy abun-

dantes en ambientes continentales y marinos. Los de origen animal fueron designados más específicamente como silicozoolitos (Bertoldi de Pomar 1973). Aquéllos de origen vegetal, silicofitolitos, son recurrentes, muy abundantes y se presentan en más de la mitad de las especies vegetales de los ambientes continentales. Si bien la composición predominante de los fitolitos es de sílice amorfa hidratada y de oxalatos y carbonatos de calcio, estos últimos, producidos en gran cantidad por numerosos grupos de plantas, no persisten en los suelos porque son rápidamente disueltos, permaneciendo sólo los silicofitolitos. La sílice opalina o amorfa o silicagel ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) se presenta en varios estados de hidratación y es comúnmente utilizada por las plantas para fabricar cuerpos duros llamados fitolitos, los cuales son frecuentemente específicos en su morfología con las especies de plantas; lo más preciso sería denominarlos silicofitolitos para distinguirlos de los calcifitolitos (Bertoldi de Pomar 1975). Los fitolitos han sido utilizados en numerosos estudios de sedimentos y suelos desde Frenguelli (1930) a la actualidad, desde distintas disciplinas (Osterrieth 2008a, 2008b)

Silicofitolitos en suelos, paleosuelos y sedimentos

El rol de la vegetación en la pedogénesis de sedimentos y rocas es un aspecto básico y muy conocido. Su persistencia, como la de todos los elementos orgánicos en los sistemas naturales o antropizados, es efímera y son precisamente las biomineralizaciones vegetales, los fitolitos y en particular los silicofitolitos, los remanentes vegetales que permanecen. Debido a esto se deduce que los silicofitolitos se constituyen en protagonistas relevantes de la interacción ambiente-suelo-flora a lo largo de la historia geológica de una región (Osterrieth 2008a, 2009; Figura 1). Es en este marco que se situarán las modificaciones que afectan estas interacciones por las actividades antrópicas, aspecto íntimamente asociado a la arqueología (Figura 1).

Cabe destacar que una situación recurrente, pero no exclusiva de los estudios fitolíticos, es la proliferación de análisis de distintos microfósiles que se encuentran en suelos y paleosuelos, a

los que erróneamente se los refiere como sustratos, sedimentos, niveles, etc. Esto posiblemente se debe a la creencia de que no nominarlos como suelos o paleosuelos implica no abordar su ya mencionada complejidad en los ambientes actuales o pasados involucrados, a partir de los cuales se realizan las reconstrucciones paleoambientales o paleoclimáticas (Osterrieth 2008a, 2008b, 2008c) (Figura 1).

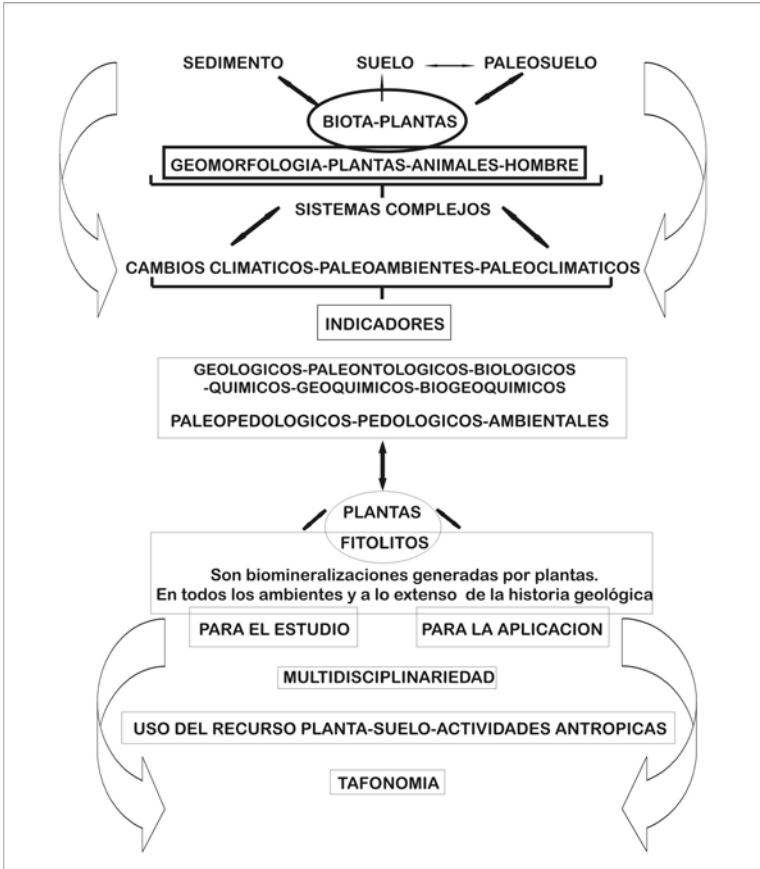


Figura 1. Interacción ambiente-suelo-biota-flora-silicofitolitos (Osterrieth 2008a)

Los trabajos sobre fitolitos en plantas, suelos y paleosuelos son numerosos y se remontan a más de un siglo y medio atrás. Los estudios de silicofitolitos como partículas clásticas en sedimentos y suelos se inician con los clásicos trabajos de mediados del siglo diecinueve, a partir de sedimentos y suelos de distintas partes del mundo y, en particular, de los obtenidos por Darwin durante su viaje por América del Sur (Darwin 1846; Ehrenberg 1854).

Muchos años después, investigadores de Estados Unidos publican numerosos trabajos sobre distintos tipos de suelos, materiales parentales loésicos, paleosuelos y sedimentos representativos de las llanuras norteamericanas (Smithson 1958; Jones y Beavers 1963; Jones *et al.* 1964; Jones y Handreck 1967; Wilding y Dress 1968; Rovner 1971; Fredlund y Tieszen 1994, 1997; entre muchos otros). Son destacables, relevantes y aún vigentes los trabajos de Twiss *et al.* (1969) y Twiss (1992), por la amplitud de sus estudios, la importancia de los índices definidos, así como la amplia zonación climática y la regionalidad de sus interpretaciones. La sistemática definida por Twiss *et al.* (1969) es una de las más utilizadas hasta la actualidad, ya que a pesar de sus limitaciones, aporta definiciones ecológicas precisas tal como la relación de las biomineralizaciones de sílice amorfa con las plantas de rutas metabólicas de 3 y 4 carbonos, que configuran datos muy útiles para los trabajos paleoecológicos y paleoambientales (Osterrieth 2008b, 2009).

En Europa, Asia y Australia existe numerosa bibliografía sobre trabajos de silicofitolitos en suelos, paleosuelos y sedimentos o materiales parentales (Parfenova y Yarilova 1962; Sase y Kato 1976; Golyeva 1997; Hart y Humphreys 1997; Madella 1997; Runge y Runge 1997; Meunier *et al.* 1999, entre otros). A partir de la década de 1970 se suman trabajos pedoarqueológicos, que incluyen estudios fitolíticos en suelos y paleosuelos afectados por la acción antrópica, enriqueciendo las interpretaciones arqueológicas y paleoambientales.

En América, si bien los antecedentes son escasos, pueden destacarse importantes contribuciones de colegas de Colombia (Flores y Parra 1999, 2008), México (García Calderón *et al.* 1993; Vallejo Gómez 2002; Sedov *et al.* 2001; García Calderón y Galicia

Palacios 2008; Vallejo Gómez y Sedov 2008) y Uruguay (Campos *et al.* 1999; Iriarte *et al.* 2001; Del Puerto e Inda 2008).

LAS INVESTIGACIONES SOBRE SECUENCIAS PEDOESTRATIGRÁFICAS EN ARGENTINA

En Argentina, las investigaciones han sido episódicas en sus inicios, aunque con pulsos de amplia productividad que sentaron sólidas bases y fomentaron posteriormente la continuidad de los estudios fitolíticos en suelos (Frenquelli 1930; Teruggi 1957; Bertoldi de Pomar 1975; Andreis 1981), según se comentará más adelante.

A partir de la década de 1990, los estudios de silicofitolitos en suelos, paleosuelos y sedimentos han mantenido una continuidad considerable, pero los investigadores que abordan este tipo de trabajo son escasos; afortunadamente, en la última década el interés desde diversas disciplinas es creciente.

Los trabajos de los últimos tiempos se realizaron esencialmente en secuencias pedosedimentarias y contextos arqueológicos de la llanura pampeana, en el sector comprendido entre los 34° y 39° de latitud sur y entre los 57° y 63° de longitud oeste. Los mismos se realizaron a través de catenas y paleocatenas, en más de 100 perfiles y a lo largo de aproximadamente 500 km de acantilados y afloramientos del sector costero bonaerense (Martínez y Osterrieth 2001; Osterrieth 1998, 2006, 2008a, 2008b, 2008c; Osterrieth *et al.* 2001, 2005, 2006). Los estudios se llevaron a cabo en perfiles modales con técnicas de rutina (Alvarez *et al.* 2008) y variaciones según los requerimientos específicos.

En Argentina, y en particular en la llanura pampeana, los niveles pedoestratigráficos portadores de silicofitolitos son numerosos y se presentan en variados ambientes. En las secuencias pedosedimentarias de loess-paleosuelos del Cuaternario de la Llanura Pampeana argentina, los estudios mineralógicos (Teruggi *et al.* 1973; Teruggi e Imbelloni 1987; Osterrieth *et al.* 1998, entre otros) resultaron poco expeditivos por el origen de estos sedimentos transportados y retransportados por acción eólica-ácua. Esto generó situaciones estancas en la interpretación de

su evolución durante el Cuaternario. No obstante, al considerar la mineralogía de los suelos y sedimentos del Cuaternario tardío de la llanura pampeana, se evidencia que los minerales livianos son preponderantes y, dentro de ellos, los constituidos por sílice amorfa de origen orgánico e inorgánico llegan a porcentajes que superan el 30 %. La vegetación que predomina y predominó en esta región es de tipo gramínea, la cual se ubica entre las mayores productoras de silicofitolitos (Osterrieth, 1998, 2000, 2008a, 2008b).

Como ya se comentara, las primeras menciones a los silicofitolitos en suelos y sedimentos cuaternarios de la región pampeana las realizó Frenguelli (1930), y luego Teruggi (1957) señaló la existencia de una vegetación compuesta principalmente por gramíneas durante la formación del depósito loessicoide que hoy ocupa dicha región. Bertoldi de Pomar (1975) analizó diversos aspectos acerca de los silicofitolitos hallados en sedimentos y suelos continentales de la llanura santafecina, Mesopotamia y sur del país. Tegni (1983a y b) evaluó silicofitolitos en suelos de la pampa ondulada de la provincia de Buenos Aires, para interpretar los procesos de formación de dichos suelos. En La Pampa ha sido relevante el estudio de la evolución de pastizales a partir de estudios fitolíticos en el Caldenal (Gallego *et al.* 2001). En San Luis se han realizado interpretaciones paleoambientales sobre el Cuaternario a partir del cruce de estudios fitolíticos con datos geoquímicos (Strasser *et al.* 2008).

En la zona sudeste de la llanura pampeana fue posible definir los contenidos básicos de silicofitolitos en suelos y su variabilidad a lo largo de los perfiles modales de Argiudoles, Hapludoles, Entisoles, Alfisoles, suelos aluviales, paleosuelos, sedimentos loésicos y loess típicos de los distintos ambientes del sudeste bonaerense y sus variaciones durante el Cenozoico tardío (Osterrieth 2000), definiendo a nivel cuantitativo, en primer término, los niveles enriquecidos en silicofitolitos como evidencias de la presencia de paleosuelos, suelos complejos, etc. (Borrelli y Osterrieth 2002, 2004; Borrelli *et al.* 2008a, 2008b; Fernández Honaine *et al.* 2006, 2009). En secuencias pedostratigráficas continentales que se inician en el Pleistoceno medio a superior, donde se intercalan

sedimentos eólicos, fluviales y fluvioeólicos con paleosuelos, los contenidos de silicofitolitos se constituyeron en evidencias conspicuas de pedogénesis de variada magnitud y complejidad, que otras propiedades analizadas no permitieron detectar.

Además, en base al contenido, la caracterización morfológica y ecológica de los silicofitolitos, ha sido posible definir condiciones paleoambientales húmedas y prolongadas, alternando con pulsos más secos y calurosos. Otros resultados, también basados en la cantidad y tipos de silicofitolitos hallados, indicarían pulsos erosivos posteriores de moderada intensidad, en condiciones climáticas semiáridas, con poca humedad de suelo y marcada estacionalidad. Así también la presencia de fitolitos articulados pueden expresar tanto condiciones de gran estabilidad ambiental como la de enterramientos rápidos, producto de condiciones ambientales de alta dinámica.

Otro aspecto de interés además de la rutina de expresar los contenidos de fitolitos en porcentajes, ha sido poder dimensionar la cantidad de silicofitolitos presentes por gramo de suelo que se hallan en los distintos horizontes de los mencionados suelos pampeanos. En este sentido, en Argiudoles típicos se han definido contenidos que oscilan entre 15 y 28 millones/gr de suelo para los niveles superficiales de los epipedones mólicos, para los endopedones iluviales entre 3,5 y 1,5 millones/gr y en los materiales parentales loésicos hasta 1,6 millones/gr de sedimento. Todos estos datos son relevantes para avanzar en los estudios paleoambientales y tafonómicos de suelos, paleosuelos y niveles pedoarqueológicos, entre otros (Borrelli *et al.* 2009, 2010; Osterrieth *et al.* 2009).

La presencia de silicofitolitos de comunidades de plantas hidrofíticas ha llevado al replanteo de secuencias pedosedimentarias, en principio definidas como típicas de ambientes bien drenados, como indicadoras de antiguos suelos hidromórficos con altos y persistentes niveles de saturación ambiental caracterizados por silicofitolitos de gramíneas y de ciperáceas (González y Osterrieth 1997; Osterrieth 2006, 2008c).

Los sedimentos loésicos característicos de la llanura pampeana y el material parental de la mayoría de los suelos presentes

muestran contenidos de silicofitolitos variables según la granulometría predominante del sedimento, siguiendo el esquema clásico de Pye y Zhou (1989) de distribución de sedimentos eólicos en relación con la vegetación de las áreas distales y proximales (Osterrieth *et al.* 2009). Las morfologías diagnósticas muestran afinidad con el tipo de gramíneas C3 (pooide) y C4 (chloridoide), e indican condiciones climáticas semiáridas a subhúmedas, frescas, con poca humedad de suelo y marcada estacionalidad, presentando influencias locales y regionales claramente distinguibles a través de los tipos de fitolitos detectados (Osterrieth 2008a, 2008b). Para la llanura pampeana, se han podido definir los procesos tafonómicos que afectan el pool de fitolitos presentes en los sedimentos del último pulso eólico periglacial, a nivel local y regional (Osterrieth *et al.* 2009). Estos resultados son de interés, ya que podrían aplicarse también a situaciones de ambientes semiáridos actuales o pasados en otras regiones del país.

A modo de síntesis, podemos expresar que los estudios de biomineralizaciones de hierro, calcio y en particular los de sílice amorfa en diversos ambientes de la llanura pampeana han enriquecido sustancialmente las interpretaciones ambientales y paleoambientales. En algunos casos han permitido redefinir unidades pedoestratigráficas, así como modificar sustancialmente interpretaciones paleoambientales realizadas previamente en las mismas secuencias (Osterrieth 2004, 2006, 2008a, 2008b, 2008c, 2009).

SILICOFITOLITOS EN CONTEXTOS PEDOARQUEOLÓGICOS

Los análisis de silicofitolitos se han desarrollado desde hace más de 40 años en una amplia variedad de países de todos los continentes, en el marco de estudios geoarqueológicos, pedoarqueológicos, etnobotánicos y paleoetnobotánicos (Rovner 1971; Piperno 1988, 2006; Del Puerto *et al.* 2008).

El análisis de silicofitolitos puede ser utilizado en secuencias pedoarqueológicas desde distintas perspectivas, para aportar información paleoambiental sobre los sitios arqueológicos y su entor-

no, evidenciando cambios ambientales locales y/o regionales. Al igual que otros *proxies*, puede contribuir y confirmar resultados obtenidos mediante estudios de polen, semillas, almidones, carbones, microfósiles, etc. -resulta particularmente importante señalar que ciertas condiciones ambientales que destruyen el polen en condiciones oxidantes no afectan a los silicofitolitos. También contribuyen a dilucidar el uso del recurso suelo a través de cultivos de cereales y otras variedades de plantas (Piperno 2006), de aspectos vinculados al consumo, disponibilidad y características de alimentos y fibras para uso textil. Además, su presencia puede detectarse en coprolitos, tártaro dental, cerámica, basureros, etc. En estos aspectos se puede citar una gran cantidad de trabajos (Rovner 1988; Piperno 1988, 2006; Pearsall 1978, 1989; Cummings y Magennis 1997; Iriarte *et al.* 2001; Madella 2008, entre muchísimos otros autores), ya que en las últimas tres décadas se ha incrementado sustancialmente la producción de conocimiento sobre silicofitolitos en arqueología.

Los estudios de fitolitos en secuencias pedoarqueológicas en América del Sur y en Argentina coinciden con su utilización en otras áreas del mundo, siendo más conspicuos a partir de 1980. En sus inicios estos estudios se focalizaron en los cultivos prehispánicos y sus modificaciones postconquista -cereales, cucurbitáceas-, y en la problemática vinculada a la domesticación del maíz, en la cual aún existen disensos muy marcados (Pearsall 1989; Piperno 1988, 2006; Pearsall y Piperno 1990; Piperno y Pearsall, 1993; Rovner 2008). En general, los estudios de fitolitos en arqueología del cono sur involucran intervalos temporales amplios, abarcando los últimos 7000 años.

En el Noroeste argentino se ha arribado a resultados de gran interés a partir del uso de los estudios fitolíticos en paleoetnobotánica, avanzando en el conocimiento del origen y la evolución de los cultivos, estrategias de procesamiento y la identificación de fitolitos en artefactos (Wushmindt y Korstanje 2001; Babot 2003; Korstanje y Babot 2005; Korstanje 2008; Korstanje y Cuenya 2008).

Los estudios sobre la presencia de fitolitos en la localidad arqueológica Tapera Moreira de la provincia de La Pampa han arrojado resultados respecto de las condiciones paleoambientales

y las ocupaciones humanas, así como del uso de los recursos vegetales en la zona (Berón *et al.* 2008; Musaubach *et al.* 2010).

En Patagonia, se han realizado los primeros estudios fitolíticos en secuencias pedoarqueológicas holocénicas en Cueva Maripe (Miotti *et al.* 2008) y en coprolitos de camélidos del sitio Cerro Casa de Piedra (Borrelli y Osterrieth 2008), ambos en Santa Cruz, contribuyendo a las interpretaciones paleoambientales locales.

Los estudios de silicofitolitos realizados en secuencias pedoestratigráficas de la llanura pampeana desde hace muchos años han constituido una base de datos imprescindible para poder avanzar sobre resultados e interpretaciones vinculados al uso del recurso suelo y vegetales para la zona. Los estudios fitolíticos en secuencias pedoarqueológicas para el área son escasos y se limitan a trabajos relativamente recientes, iniciándose en ambientes de cuevas de la denominada llanura interserrana del Sistema de Tandilia (localidad arqueológica Amalia). Otros estudios fitolíticos realizados en las cuevas Tixi y el Abra permitieron sumar nueva información (Martínez y Osterrieth 2001).

Posteriormente, se pudieron definir momentos transicionales en relación con las ocupaciones humanas en ambientes fluviales, en las márgenes del Río Quequén Grande (Osterrieth *et al.* 2008). Asimismo, se evaluó el procesamiento de una variada gama de recursos (vegetales, animales, minerales) a través del análisis de artefactos de molienda hallados en sitios arqueológicos del área Interserrana de la provincia de Buenos Aires, pertenecientes a la colección del Museo de Ciencias Naturales de Lobería.

Los antecedentes internacionales y nacionales referidos a los estudios, en distintos tipos de artefactos, de rastros de uso, sustancias adheridas y microrrestos de vegetales aún son escasos (Piperno 1988, 2006; Osterrieth y Tassara 2005; Korstanje y Babot 2007; Babot *et al.* 2008; Tassara y Osterrieth 2008; Bonomo *et al.* 2008).

También fueron alentadores los resultados obtenidos en el sitio arqueológico Gascón 1, ubicado en las inmediaciones del Área Ecotonal Húmeda Seca Pampeana, en materiales recuperados de entierros humanos y evidencia asociada perteneciente al ajuar funerario, de momentos posteriores al contacto hispano-indíge-

na (ca. siglo XVIII a XIX). Los máximos contenidos de fitolitos se observaron en muestras provenientes de los sedimentos correspondientes al área abdominal, entre las vértebras lumbares y el sacro que corresponde, y en muestras de carbón extraídas de la parte interior de la base de una vasija. La presencia de fitolitos incluidos en el tártaro dental constituyó un dato relevante y evidencia de consumo de gramíneas por estos grupos humanos (Osterrieth *et al.* 2006; Menéndez *et al.* 2009).

La presencia de biomineralizaciones de sílice amorfa de origen vegetal en el sitio arqueológico Alfar de la costa bonaerense (Bonomo *et al.* 2008) ha contribuido a las interpretaciones de la dinámica costera en momentos del Óptimo Climático y las ocupaciones humanas del sector.

LA IMPORTANCIA DE LOS SILICOFITOLITOS EN LOS PROCESOS TAFONÓMICOS

Considerando el grado notable de desarrollo de los estudios de silicofitolitos, y la variedad de disciplinas que los utilizan, es necesario el abordaje de los aspectos tafonómicos que los involucran *per se*, además de los propios de las áreas del conocimiento participantes. Los estudios basados en procesos tafonómicos y/o tafonomía de los estudios fitolíticos son muy escasos, a pesar de los numerosos trabajos pedológicos, paleopedológicos, paleobotánicos, etnobotánicos, arqueológicos, paleoecológicos, paleoambientales, entre otros, que incluyen a los silicofitolitos, como indicadores esenciales de estos procesos (Albert y Portillo 2005; Osterrieth 2000, 2008b, 2008c; Osterrieth *et al.* 2009).

En este sentido, las biomineralizaciones de sílice amorfa, silicofitolitos, coexisten durante todo el proceso de necrólisis y bioestratinomía con los restos vegetales en todos los niveles de degradación. Una vez producida la necrólisis, se incorporan al suelo sostén de dicha cubierta vegetal, junto con los silicofitolitos provenientes del entorno, por cualquiera de los típicos procesos exógenos. Es sabido que una vez en el suelo, los fitolitos representan un registro fragmentario de los contenidos fitolíticos de las plantas proveedoras, a lo cual debe sumarse la problemática

vinculada a los conceptos de multiplicidad (una misma especie produce distintos tipos de fitolitos) y redundancia (un mismo morfotipo es común a varias especies) inherentes a los fitolitos *per se* (Rovner 1971; Piperno 1988). Por otra parte, es conocida la problemática taxonómica-sistemática en los estudios de fitolitos, pero afortunadamente se está avanzando en pos de una nomenclatura integrada (Madella *et al.* 2005).

Es fundamental, en los trabajos sobre secuencias pedológicas y/o pedoestratigráficas, la individualización de los factores formadores interactuantes, la precisión en los relevamientos pedológicos, topográficos y microtopográficos, la identificación de perfiles modales de suelos, así como una detallada caracterización morfológica de los mismos, con especial referencia a la textura, estructura, grietas y bioturbaciones (raíces, cuevas, hormigas, etc). También es importante evaluar los procesos de migración vertical, subvertical y subsuperficial de los componentes del suelo. Es básico conocer la historia y tipos de uso de los suelos en estudio -laboreos, pasturas naturales o manejadas, bosteo, caída de árboles, etc.-, como también la estacionalidad -inundaciones, sequías, incendios naturales o programados, etc.- (Osterrieth 2008a; Osterrieth *et al.* 2009).

Respecto del estudio de los fitolitos en particular, se considera imprescindible la valoración cuantitativa de los mismos respecto de los componentes mineralógicos totales de las pedosecuencias. También se deben considerar los procesos de alteración/preservación de silicofitolitos en suelos, paleosuelos y sedimentos -como fracturamiento, redondeamiento, degradación, corrosión química-, además de la presencia de fitolitos articulados y los fitolitos incluidos en los agregados del suelo. También es relevante conocer, con la mayor precisión posible, los estados de alteración en relación con la mineraloquímica de las morfologías predominantes y sus contenidos de carbono, nitrógeno, fósforo, calcio, sodio, aluminio, hierro, etc., en todas las fracciones analizadas (Osterrieth 2008c; Osterrieth *et al.* 2009).

Finalmente, es muy importante la metodología de estudio en el abordaje de las biomineralizaciones, desde la toma de muestras de suelos hasta los estudios a nivel submicroscópico, dado que

se utilizan variadas técnicas y se trabaja a un nivel de resolución muy detallado. Se ha visto que las técnicas empleadas para la separación y concentración de silicofitolitos de suelos, paleosuelos y sedimentos pueden modificar sustancialmente no sólo los contenidos sino también los tipos de morfologías halladas (Alvarez *et al.* 2008; Osterrieth *et al.* 2009).

Como síntesis final, podemos expresar que los estudios fitolíticos *agregan* datos a los resultados provistos por otras evidencias y han resultado ser buenos indicadores paleoecológicos, paleoambientales y arqueológicos, que contribuyen a la comprensión de los procesos de formación de sitios arqueológicos y del uso de recursos vegetales por parte de las poblaciones humanas. En esta temática de investigación los aportes aún son limitados, existen más interrogantes por resolver que certezas y los logros pueden considerarse aún insuficientes. Como siempre reiteramos: “queda mucha tarea por realizar en el contexto de estudios inter y multidisciplinarios, por lo cual debemos incentivar a investigadores, becarios y estudiantes para que incorporen los estudios de las biomineralizaciones en general, y de los fitolitos en particular, en sus trabajos como parte de otras rutinas en el estudio de suelos, paleosuelos, sedimentos y contextos arqueológicos (Osterrieth 2008a, 2008b, 2009).

EVALUACIÓN DE SILICOFITOLITOS EN MUESTRAS PROVENIENTES DEL CERRO COLORADO DE LA CIÉNAGA DE ABAJO Y ZONAS BAJAS ALEDAÑAS

Los estudios de silicofitolitos en secuencias sedimentarias, pedológicas y/o pedoarqueológicas en la provincia de Catamarca son muy escasos. Podemos mencionar los realizados en el Valle del Bolsón por Korstanje (2006) y por Korstanje y Cuenya (2005, 2006), quienes analizan aspectos metodológicos para la extracción de silicofitolitos conjuntamente con otros microfósiles, mediante estudios múltiples vinculados a áreas de explotación agrícola, ganadera y actividades domésticas.

También se han desarrollado estudios sobre la presencia de silicofitolitos en *poaceas* (Pigoni y Korstanje 2005), y más re-

cientemente sobre las asociaciones fitolíticas de la vegetación de los ambientes de “vegas” o humedales, su relación con las condiciones paleoambientales y sus efectos sobre las antiguas poblaciones (Pigoni *et al.* 2008). Por otra parte, se han publicado evaluaciones de silicofitolitos y aspectos tafonómicos asociados a vasijas de cerámica y sus contextos en Antofagasta de la Sierra (Babot y Haros 2008).

En este capítulo se comentan los estudios sobre muestras de sedimentos totales del recinto 36 del Cerro Colorado, excavado en 2008. Este recinto forma parte de un conjunto que se encuentra emplazado dentro del denominado Conjunto VIII, en el Sector Central del Cerro (Figura 2), y conforma una asociación con otra estructura a la que se adjudicó el número 35 que hasta el momento ha sido parcialmente excavada.

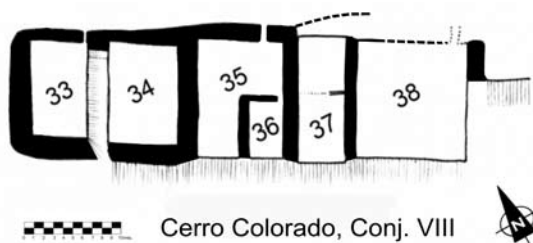


Figura 2. Conjunto VIII. Sector Central del Cerro Colorado

Las paredes de piedra del recinto 36 comprenden: 2,90 m en su pared noreste; 6,40 m en la pared noroeste; 6,45 m en la pared sudeste, mientras que la pared sudoeste mide 3,80 m. Según se comenta en este volumen (ver Balesta y García Mancuso), la habitación fue dividida para su excavación en ocho cuadrículas, presentándose en la denominada cuadrícula B1 dos cistas funerarias que contenían sendas urnas. Las mismas se hallaban dentro de construcciones realizadas por medio de dos hiladas de piedras semicirculares apoyadas contra la pared sudoeste, una a continuación de la otra (Figura 3).

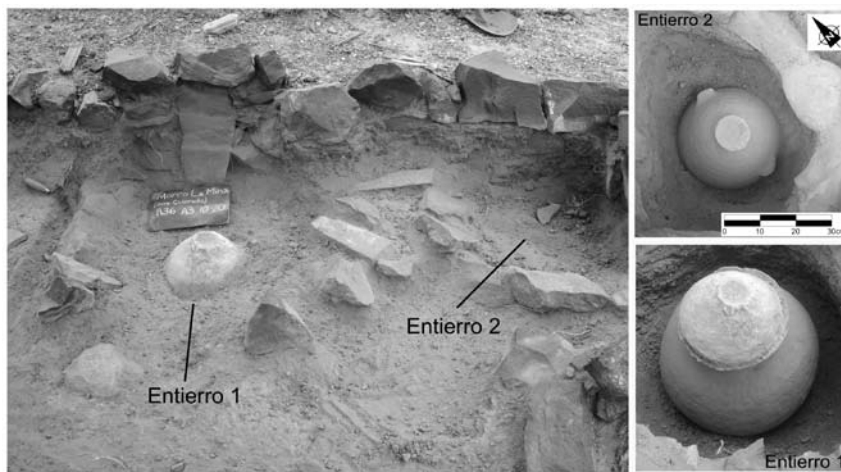


Figura 3. Tumbas del recinto 36

En una de las urnas se halló un esqueleto, mientras que la otra albergaba dos esqueletos, todos determinados como individuos infantiles. Ambas urnas fueron tapadas con pucos y luego cubiertas con tierra; los cuerpos parecen haber sido envueltos en textiles, de los cuales se hallaron algunos pequeños restos alrededor del cráneo de la urna que contenía dos individuos.

Según se reseña en este volumen (Balesta y García Mancuso), durante las excavaciones se observó la presencia de un sedimento de relleno fino, depositado en forma directa sobre el sustrato rocoso del Cerro Colorado, que corresponde al piso de ocupación de las estructuras. No se registraron procesos significativos de perturbación en superficie.

El registro de las excavaciones y el análisis de los procesos post-deposicionales en la habitación 36 indican una secuencia que parece haber comprendido el uso de la misma, la limpieza del piso sobre el cual se dejó una vasija cerámica que debe haber estado completa, el abandono del recinto que fue sellado por un incendio masivo del techo, la posterior limpieza del sector B1 y la construcción en el mismo de las cistas donde se ubicaron los contenedores con los cuerpos. Los restos esqueléticos, al estar ubicados en un contexto cerrado, mantuvieron una buena preservación,

conservando la disposición espacial original de los cuerpos.

A fin de detectar la presencia de silicofitolitos, se analizaron muestras de sedimentos presentes dentro de la urna que contenía dos cuerpos y se realizó el raspado de los dientes correspondientes al esqueleto que había sido enterrado solo. Las muestras de sedimentos se tomaron del interior de las urnas, a distintas profundidades, realizando extracciones aproximadamente cada 10 cm. Por otra parte, se tomaron muestras en la zona periférica exterior a las urnas siguiendo el mismo criterio.

También se analizaron sedimentos provenientes del lavado de morteros hallados en la zona baja cercana al sitio, correspondiente a una antigua terraza al pie del cerro. Los morteros que aquí se analizan provienen de distintas localizaciones, todos en la zona baja aledaña al Cerro Colorado. Dos de ellos se encuentran al norte; se trata de dos ejemplares móviles de aproximadamente 20 x 40 x 30 cm, manufacturados sobre rocas volcánicas de color oscuro. Cada uno de ellos presenta una oquedad de aproximadamente 18 x 18 cm. (Figura 4).



Figura 4. Morteros móviles

Los otros morteros son fijos y se hallan en la terraza del río Hualfín, al sudoeste del Cerro Colorado. Éstos fueron realizados sobre afloramientos de granito de grandes dimensiones y presentan cuatro oquedades cada uno de 10 a 15 cm de diámetro aproximadamente (Figura 5; para una descripción detallada de los morteros ver Flores en este volumen).



Figura 5. Morteros fijos

Metodología

Los estudios de los sedimentos se realizaron mediante técnicas de rutina (Alvarez et al. 2008). Se analizaron 30 gramos de muestras que se sometieron a dispersión con agua destilada, con eliminación de sales solubles y materia orgánica con peróxido de hidrógeno (100 volúmenes), y carbonatos de calcio con HCl al 10%. Luego se realizaron varios centrifugados de 3 minutos a 1000 r.p.m. hasta completar la limpieza de arcillas. Luego de analizar este material, y al comprobar la presencia de sedimentos

de textura arena gruesa y media que dificultaban la observación microscópica, se procedió a realizar un tamizado en húmedo sobre malla de 120 micrones. Se analizó la fracción menor a 120 micrones que concentra la mayoría de los fitolitos aislados y articulados. Se realizaron preparados en aceite de inmersión de la muestra total y se contaron 400 granos bajo microscopio de polarización OLIMPUS BX 51P. Se utilizó la nomenclatura definida por Madella *et al.* (2005) y Bertoldi de Pomar (1971). En esta etapa preliminar se realizó una cuantificación relativa de abundancia de los contenidos totales de silicofitolitos.

Resultados preliminares

Raspado de diente del esqueleto 1, urna 1:

Se observó un único ejemplar correspondiente a un molar; el mismo carecía de tártaro dental, estaba corroído y relleno con sedimento del material hospedante. Sobre el molar se observaron partículas minerales, carbonatos y sales y otros elementos indefinidos, la mayoría de ellos atribuibles a contaminación del sedimento hospedante.

Sedimentos asociados al cráneo del individuo 2 de la urna 2:

Muestra F-38: Sedimento areno-limoso, con gravas, gravillas y psefitas de variada mineralogía, cuarzos, piroxenos, minerales opacos, estaurólitas en cruz, yesos, baritinas (Figura 6.1). Fitolitos escasos (Tabla 1). Las morfologías predominantes son las elongadas de bordes lisos y sinuosos, desde poco a muy intensamente alterados. Algunos rondels bien preservados, muy escasos bilobados y otras morfologías muy degradadas indefinidas (Figuras 6.2 a 6.5). Restos orgánicos indefinidos, algunos muy oscuros, carbones pequeños.

Muestra F-39: Sedimento textural y mineralógicamente similar a F-38, aunque con un poco más de silicofitolitos. Las morfologías son similares; sólo se observaron aquí algunos fitolitos ovalados de bordes lisos y crenados, otros poliédricos y más variedad de rondels (Figura 6.7). Continúan siendo muy abundantes las baritinas y yesos (Figura 6.6).

Muestra F-40: Textura y mineralogía similar a las muestras previamente analizadas. También son similares la cantidad y los tipos de fitolitos hallados, sólo que se observó algún fitolito globular equinado, morfología que suele asignarse a palmas o dicotiledóneas; no obstante, es necesario registrar más hallazgos con estas morfologías para realizar inferencias aceptables. Son comunes en esta muestra los restos orgánicos, carboncitos, bari-
tinas y yesos (Figuras 6.8 a 6.12).

Sedimento del fondo de la urna 2 (F-41):

Muestra F-41: Sedimento texturalmente más fino que los previamente analizados, con arcillas, limos y arenas finas. Fitólitos abundantes. Predominan las morfologías alargadas; algunos fitólitos son articulados (Figura 6.13) y otros fracturados, que se presentan desde frescos a alterados (Figura 6.14). Escasos fitólitos buliformes y agujones. Se registran algunos derivados de células cortas de gramíneas, como los de tipo chloridoides y panicoides de extremos rectos y otros cóncavos (Figura 6.15).

Sedimento próximo a la urna, sobre el ángulo sudoeste de la habitación:

Muestra F-42: Se trata de sedimentos finos, con escasos silico-fitólitos. Sólo se presentan algunos elongados fracturados y corroídos, otros restos indefinidos y muy pocos rondels.

Sedimento de lavado de morteros (LM2, LM4, LM5, LM8):

LM2: Sedimentos finos limo-areno-arcillosos, con presencia de minerales variados, restos de vegetales y restos carbonizados. Los fitólitos son escasos, predominan las morfologías elongadas lisas, crenadas y también alteradas, corroídas y fracturadas (Figura 6.16).

LM4: Sedimentos similares a LM2. Fitólitos comunes, elongados, rondels y bilobados, algunos indefinidos (Figuras 6.17 a 6.19).

LM5: Sedimentos de tamaño un poco más variable, areno-limosos y agregados oscuros negros a marrones. Fitólitos comunes, elongados, rondels, también se observaron algunos chloridoides tipo saddle, un par de fitólitos globulares equinados y articulados

de fitolitos globulares (Figuras 6.20 a 6.26).

LM8: Sedimento similar a los de los otros lavados de morteros. Fitolitos bilobados abundantes, ovalados crenados y rondels (Figuras 6.27 a 6.33).

A continuación se grafican, en la Tabla 1, las muestras y cantidades relativas de silicofitolitos halladas en cada una de ellas.

Tabla 1

Muestra	Cantidad relativa	Muestra	Cantidad relativa
F-38:	X	LM-2	/
F-39:	X /	LM-4	XXX
F-40:	X /	LM-5	XX
F-41:	XX	LM-8	XXX
F-42:	X		

XXX: abundantes XX: comunes X: escasos /: muy escasos

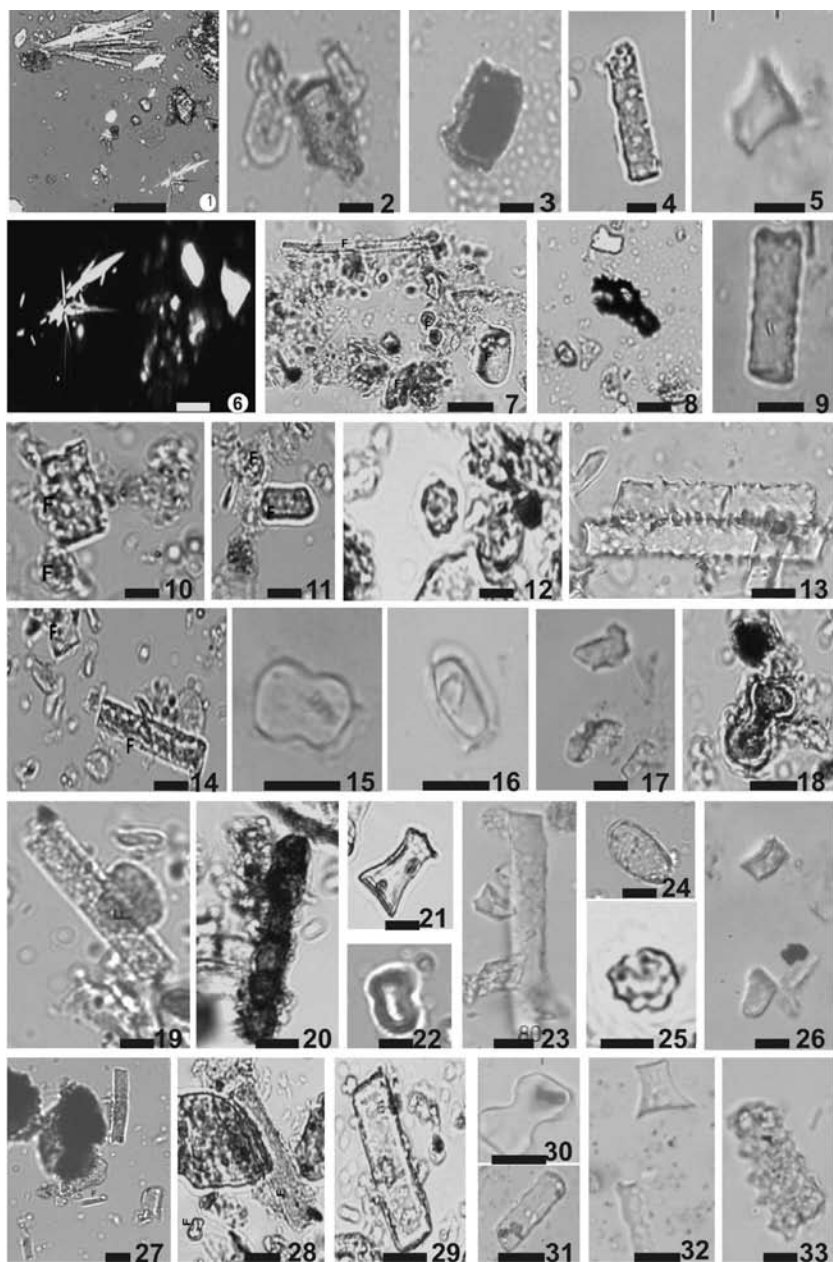


Figura 6: Silicofitolitos en muestras de sedimentos observados con microscopio de polarización. 1) baritina y yeso; 2) elongado fracturado; 3) rectangular alterado; 4) elongado alterado; 5) rondel; 6) yeso; 7) elongado, rondel, buliforme; 8) resto de carbón; 9) elongado; 10) elongado alterado; 11) poliédrico; 12) globular equinado; 13) elongados articulados; 14) elongado alterado; 15) bilobado; 16) ovalado; 17) bilobados; 18) bilobado; 19) elongado; 20) articulado de células esféricas; 21) rondel; 22) bilobado; 23) elongados; 24) ovalado; 25) globular equinado; 26) rondel, indefinido y resto de carbón; 27) elongados; 28) elongado y bilobado; 29) elongado; 30) bilobado; 31) poliédrico crenado; 32) rondel; 33) elongado crenado y alterado. Barras: 20 μm .

CONSIDERACIONES FINALES

En esta primera etapa exploratoria se observaron variables cantidades de silicofitolitos, cuyas morfologías se corresponden mayoritariamente con gramíneas. Se han iniciado los estudios sistemáticos de la presencia de silicofitolitos en las comunidades de plantas más representativas de la zona y sus suelos asociados. Esto constituye un primer paso a fin de generar la base de datos necesaria para avanzar en futuras interpretaciones pedoarqueológicas y arqueológicas.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos se realizaron mediante el aporte económico del proyecto BID-PICT 1700 y UNMDP EXA 15E/413 y de varios proyectos de la UNMDP, entre 1990 y 2001, otorgados a Margarita Osterrieth y al Dr. Phyllip Coulout a quien se expresa un especial agradecimiento.

BIBLIOGRAFÍA

-Addadi, L.; D. Joester; F. Nudelman y S. Weiner
2006. Mollusk shell formation: a source of new concepts for understanding biomineralization processes. Chemistry European Journal 12 (4): 980-987.

- Albert, M. R. y M. Portillo
2005. Estudios de los restos vegetales de diversas muestras procedentes del abrigo de Son Gallard-Son Marroig: el resultado de análisis de fitolitos. *Mayurqa* 30: 141-151.
- Alvarez M. F.; N. Borrelli y M. Osterrieth
2008. Extracción de biominerales silíceos en distintos sedimentos utilizando dos técnicas básicas. *British Archaeological Research BAR*: 31-38
- Andreis, R.
1981. *Identificación e importancia geológica de los paleosuelos*. Livro-texto/2. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Editora da Universidade, Porto Alegre.
- Arnott, H.
1982. Calcium oxalate (weddellite) crystals in forest litter. *Scan. Elect. Microsc.*, 3: 1141- 1149.
- Babot, M. P.
2003. Starch grain damage as an indicator of food processing. En: Hart, D.M. y L.A. Wallis (Eds.). Phytolith and starch research in the Australian-Pacific-Asian regions: the state of the art. *Pandanus Books for the Centre for Archaeological Research and the Department of Archaeological and Natural History*, The Australian National University, Canberra. . 69-81
- Babot, M. P. y M. C. Haros
2008. Interpreting content, context and manufacture from use-residues in ceramic vessels from Southern Argentinean Puna. *International Meeting on Phytolith Research*: 44-45.
- Babot, M. P.; S. Hocsman y G. R. Cattáneo
2008. Microfossils for assessing the use as projectile points or knives of archaeological artifacts from Quebrada Seca 3 Site, Southern Argentinean Puna (ca. 5000-4500 years BP). *7th International Meeting on Phytolith Research*: 60.
- Beech W. y J. Sunner.
2004. Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals. *Biotechnology* 15: 181-186.

- Berón, M.; M. G. Musaubach; M. Osterrieth y G. Erra
2008. Phytoliths and paleoenvironment from the archaeological locality Tapera Moreira (La Pampa Province, Argentina). *7th International Meeting on Phytolith Research*: 61-62.
- Bertoldi de Pomar, H.
1971. Ensayo de clasificación morfológica de los silicofitolitos. *Ameghiniana* 8: 317-327.
1973. Acerca del canaliculo axial en espongiolitos silíceos. *Rev. Asoc. Cien. Nat. Lit.* 4: 167-176.
1975. Los silicofitolitos: Sinopsis de su conocimiento. *Darwiniana* 19(2-4): 173-206.
- Blakemore, R. P.
1975. Magnetotactic bacteria. *Science* 190: 377-379.
- Bonomo, M.; M. Osterrieth y D. C. León
2008. Firts results of the phytolith composition studies of the sedimentary sequence of Alfar Archaeological Site (Eastern Pampas, Argentina). *7th International Meeting on Phytolith Research*: 62-63.
- Borrelli, N. y M. Osterrieth
2002. Ciclo biogeoquímico de la sílice en Argiudoles típicos (Laguna de Los Padres, Buenos Aires). *Actas del XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. CD: 6.
2004. Influencia de la cobertura vegetal en el ciclo biogeoquímico de la sílice de Argiudoles típicos. *Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. CD: 370.
2008. Contenido de silicofitolitos y su posible rol en el ciclo biogeoquímico de la sílice y en la estabilidad estructural de Argiudoles típicos de Laguna de Los Padres, Buenos Aires. En: Zucol, A.; M. Osterrieth y M. Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de sus conocimientos en América del Sur*. 135-146.
- Borrelli N., M. Osterrieth y J. Marcovecchio
2008a. Interrelations of vegetal cover, silicophytolith content and pedogenesis of Typical Argiudolls of the Pampean Plain, Argentina. *Catena* 75(2): 146-153.
- Borrelli, N.; M. Osterrieth y M. Cabello
2008b. Degradación de fitolitos de gramíneas. Experimentación *in vitro*. *British Archaeological Research*: 25-30.

- Borrelli, N., M. Osterrieth y J. Marcovecchio
2009. Calcium biominerals in typical Argiudolls from the Pampean Plain, Argentina: An approach to the understanding of their role within the calcium biogeochemical cycle. *Quaternary International* 193: 61-69.
- Borrelli, N., M. F. Alvarez, M. Osterrieth y J. Marcovecchio
2010. Silica content in soil solution and its relation with phytolith weathering and silica biogeochemical cycle in Typical Argiudolls of the Pampean Plain, Argentina - A preliminary study. *Journal of Soil and Sediments* 10: 983-994. DOI 10.1007/s11368-010-0205-7.
- Campos, S., L. Del Puerto y H. Inda
1999. Análisis de silicofitolitos de la matriz sedimentaria del sitio CG14EO1, Rocha (R.O.U). *Actas del Primer Encuentro Argentino de Investigaciones Fitolíticas*: 10.
- Coleman M.
1993. Microbial processes: Controls on the shape and composition of carbonate concretions. *Marine Geology*. 113: 127-140.
- Cummings, L. S. y A. Magennis
1997. A phytolith and starch record of food and grit in Mayan Human tooth tartar. En: Pinilla, A.; Juan-Tresserras, J. y M. J. Machado (Eds.). *Estado actual de los estudios de fitolitos en suelos y plantas*. Monografía 4, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 211-218.
- Darwin, C.
1846. An account of the fine dust which often falls on vessels in the Atlantic Ocean. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*. 2: 26-30.
- Del Puerto L. y H. Inda
2008. Estrategias de subsistencia y dinámica ambiental: Análisis de silicofitolitos en sitios arqueológicos de la Cuenca de Laguna de Castillos, Rocha, República Oriental del Uruguay. En: Zucol, A.; M. Osterrieth y M. Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de sus conocimientos en América del Sur*. 221-237.
- Del Puerto L.; H. Inda y M. A. Korstanje
2008. Análisis fitolíticos en Arqueología. En: Zucol, A.; M. Osterrieth y M. Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de sus conocimientos en América del Sur*. 215-220.

- Ehrenberg, C. G.
1854. *Mikrogeologie*, Vol 2: 374. Leopold Voss, Leipzig.
- Fernández Honaine, M.; A. F. Zucol y M. Osterrieth
2006. Phytolith Assemblages and Systematic Associations in Grassland Species of the South-Eastern Pampean Plains, Argentina. *Annals of Botany* 98: 1155-1165.
2009. Phytolith analysis of Cyperaceae from the Pampean Region, Argentina. *Aust. J. Bot.* 57: 512-523.
- Flores M. T. y Parra S. L.
1999. Fitolitos en paleosuelos Andicos altoandinos, San Félix, Departamento de Caldas. *Revista de Silicofósiles Altoandinos*: 42-56. Ed. Colciencias, Universidad de Antioquia.
2008. Espectros de fitolitos en tres suelos de la Planicie de Puente Largo, Páramo de Frontino, Departamento de Antioquia Colombia. En: Zucol, Osterrieth y Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de sus conocimientos en América del Sur*: 111-127.
- Franceschi, V. y P. Nakata
2005. Calcium Oxalate in Plants: Formation and Function. *Annu. Rev. Plant Biol.* 56: 41-71. doi: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144106
- Fredlund, G.G. y L. T. Tieszen
1994. Modern phytolith assemblages from the North American Great Plains. *Journal of Biogeography*: 21(3):321-335.
1997. Calibrating grass phytolith assemblages in climatic terms: application to late Pleistocene assemblages from Kansas and Nebraska. *Palaeo* 136: 199-211.
- Frenguelli, J.
1930. Partículas de sílice organizada en el loess y en los limos pampeanos. Células silíceas de Gramíneas. *Anales de la Sociedad Científica de Santa Fe* II: 65-112.
- Gallego, L.; R. A. Distel y R. Camina
2001. Reconstrucción histórica de los pastizales naturales del Caldenal (Argentina). *Actas del Segundo Encuentro de Investigaciones Fitolíticas del Cono Sur*: 14-15.

- García-Calderón, N.; A. Pinilla y S. Galicia
1993. Aportación de los análisis fitolitológicos al estudio de un Andosol en el Nevado de Toluca o Xinantécatl, México D.F. Resultados preliminares. *El estudio del suelo y de su degradación en relación con la desertificación*. Proceedings, Tomo III: 1499-1506. Salamanca, España.
- García-Calderón, N. E y S. Galicia Palacios
2008. Investigaciones de Fitolitos en suelos de México. En: Zucol, Osterrieth y Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de sus conocimientos en América del Sur*. 85-89.
- Golyeva, A.A.
1997. Content and distribution of phytoliths in the main types of soils in eastern Europe. *Estado actual de los estudios de fitolitos en suelos y plantas*. Pinilla, J. Juan-Tresserras y M. J. Machado (eds) .Monografías 4: 5-13. Centro de Ciencias Medioambientales Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- González, G. y M. Osterrieth
1997. Silicobiolitos en Suelos Paleosuelos y sus materiales parentales. Buenos Aires. Argentina. *The state-of-the-art-phytoliths in soils and plants*. Pinilla, Tresserras y Machado (eds.). C.S.I.C. (I). 83-92.
- Hart, D.M. y G. S. Humphreys
1997. The mobility of phytoliths in the soils: pedological considerations. *Estado actual de los estudios de fitolitos en suelos y plantas*. Pinilla, J. Juan-Tresserras y M. J. Machado (eds). Monografías 4:5-13. Centro de Ciencias Medioambientales, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Iriarte, J., I. Holst, J. López y L. Cabrera
2001. Subtropical Wetland Adaptations in Uruguay during the Mid-Holocene: An Archaeological Perspective. *Enduring records. The environmental and cultural heritage of wetlands*. Purdy, B. (ed.):61-70. Oxbow Books
- Jahren, A.
1996. How and why do phytoliths form? Biomineralization. *The Phytolitharien. Bulletin of the Society of Phytolith Research* (9): 2- 10.

- Jones B.
1995. Processes associated with microbial biofilms in the Twilight zone of caves: example from the Cayman Islands. *Journal of Sedimentary research*. Vol. A 65. No 3: 552-560.
- Jones, R. L. y A. H. Beavers
1963. Some mineralogical and chemical properties of plant opal. *Soil Science*. 96: 375- 379.
- Jones, L.H.P, A. A. Milne y S. M. Wadham
1964. Studies of silica in the oat plant. II. Distribution of silica in the plant. *Plant and Soil*,. 18:358-371
- Jones, L. H. P. y K. A. Handreck
1967. Silica in soils, plants and animals. *Advances in Agronomy*. 19:107-149.
- Kamal, K.; E. Keppens, A. Pr at y P. Claeys
2007. Experimental observations on fungal diagenesis of carbonate substrates. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 112, g01007, doi:10.1029/2006jg000203.
- Kirschvink J.L. y J.W. Hagadorn
2000. A Grand Unified theory of Biomineralization. *The Biomineralisation of Nano- and Micro-Structures*. B auerlein, E. ed., Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany: 139-150.
- Korstanje, A.
2006. Designing a protocol for the simultaneous recovery of multiple microfossils. En: Torrence, R. y H. Barton (Eds.). *Ancient Starch Research*. Left Coast Press. 162-162.
2008. Global policies, periphery and phytoliths studies: archaeology of the discipline from a southern perspective. 7th *International Meeting on Phytolith Research*: 57.
- Korstanje, A. y M. P. Babot
2005. Andean Crop Sphere: vegetal microfossil characterization. En: Madella, M.; D. Zurro y M. Jones (Eds.). *Places, people and plant: using phytoliths in Archaeology and Palaeocology*. Oxbow Arch. Series.
2007. A Microfossil Characterization from South Andean Economic Plants. En: Madella, M. y D. Zurro (Eds.). *Plants, people and places: recent studies in phytolithic analysis*, Proceeding of the 4th International Meeting on Phytolith Research. Oxbow Books. 2007. 41-72.

- Korstanje, A. y P. Cuenya
 2005. Arqueología de la Agricultura: suelos y microfósiles en campos de cultivo del Valle del Bolsón, Catamarca, Argentina. *3er Encuentro de Investigaciones Fitolíticas del Cono Sur*.
- 2006 Ancient agriculture and domestic activities in northwestern Argentina: a contextual approach studying phytoliths and other microfossil in soils. *6th International Meeting on Phytolith Research*.
2008. Ten years after, how far have we come in our knowledge of ancient agricultural systems and domestic activities through microfossil and soils studies?. *7th International Meeting on Phytolith Research*: 66-67.
- Lowenstam, R.
 1981. Minerals formed by organisms. *Science* 211: 1126- 1131
- Madella, M.
 1997. Phytoliths from a Central Asia loess-paleosol sequence and modern soils: their taphonomical and palaeoecological implications. *Estado actual de los estudios de fitolitos en suelos y plantas*. A. Pinilla, J. Juan-Tresserras y M.J. Machado (eds). Monografías 4: 5-13. Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC Madrid.
2008. The “stones from plants”: a review of phytolith studies and classification in Europe, Asia and North America. En: Zucol, A; M. Osterrieth y M. Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de su conocimientos en América del Sur*. 23-39.
- Madella, M, A. Alexandre y T. Ball
 2005. Internacional Code for Phytolith Nomenclature. *4th International Meeting on Phytolith Research*: 8
- Martínez, G. A. y M. Osterrieth
 2001. Estratigrafía, Procesos formadores y Paleoambientes. *Cueva Tixi: Cazadores y Recolectores de las Sierras de Tandilia Oriental. 1 Geología, Paleontología y Zooarqueología*. Mazzanti y Quintana Eds.: 19-34.
- Menéndez, M.; M. Osterrieth y F. Oliva
 2009. A first phytolith approximation to diet study in the archaeological site Gascón 1, Pampean Region, República Argentina, *Quaternary International* 204 (1-2): 84-94.

- Meunier, J. D, F. Colin y C. Alarcón
1999. Biogenic silica storage in soils. *Geology* 27: 835–838.
- Miotti, L.; M. Osterrieth; L. Marchionni; R. Blanco y J. Rabassa
2008. First contributions of phytolith studies to the paleoenvironmental reconstruction of the Maripe Cave Site, Santa Cruz. 7th *International Meeting on Phytolith Research*: 68-69.
- Musaubach, G.; G. Erra Y M. Osterrieth
2010. Estudios arqueobotánicos en la localidad Tapera Moreira (departamento de Lihué Calel, provincia de La Pampa). *Análisis fitolíticos en artefactos de molienda*. VCARPA, La Pampa: 15pp.
- Osterrieth, M.
1998. Phytoliths in Late Quaternary paleosoils of the Pampean Plains, Buenos Aires Argentina: Paleoenvironmental implications. *II International Meeting of Phytolith Research*. Vol I: 33.
2000. Silicofitolitos una herramienta para la comprensión de procesos pedológicos del Cuaternario. *XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo* CDR: 4
2004. Biominerales y Biomineralizaciones. *Cristalografía de Suelos*. Sociedad Mexicana de Cristalografía: 206-218. México
2006. Silicofitolitos en suelos, paleosuelos y sedimentos. *Actas del III Congreso Argentino de Geomorfología y Cuaternario*. T(I): 351-366.
2008a. Silicofitolitos en suelos, paleosuelos y materiales parentales. En: *Fitolitos. Estado actual de su conocimientos en América del Sur*. Zucol, A; M. Osterrieth y M. Brea (Eds.). 75-85.
2008b. Silicofitolitos en sedimentos loésicos de la llanura inter y periserrana de Tandilia, Buenos Aires, Argentina. *Fitolitos. Estado actual de su conocimientos en América del Sur* Zucol, A; M. Osterrieth y M. Brea (Eds.). 204-215.
2008c. Silicobiolitos/silicofitolitos: su rol en la matriz de suelos y paleosuelos de ambientes costeros de Buenos Aires, Argentina. En: Zucol, A; M. Osterrieth y M. Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de su conocimientos en América del Sur*. 119-126.
2009. Biomineralizaciones en suelos y paleosuelos, su rol en la reconstrucción paleoambiental y ocupaciones humanas, en ambientes de llanura. En: Sedoy S. (Ed.). Volumen especial de la *Revista de la Sociedad Mexicana de Geología*. 40pp. En prensa.

- Osterrieth, M y G. Tassara
2005. Silicofitolitos en artefactos de molienda, de sitios arqueológicos del área interserrana, Buenos Aires. *III Encuentro de Investigaciones Fitolíticas del Cono Sur*. Actas: 13-15.
- Osterrieth, M; Borrelli N.; Dal Bo, M.; Goncalvez, A.; Herrera L.; Mascioli S.; Rossi V.; Sierra P., Villamil M.; Oyarbide F.; Tomas M.; Bernava V.; y R. Mondini.
1998. Hongos formadores de biominerales en diferentes horizontes orgánicos de suelos de Mar del Plata y Mar Chiquita. *V Jornadas Geológicas Bonaerenses*. Vol 1:185-191
- Osterrieth, M.; Oyarbide, F. y N. Borrelli
2001. Mineralogical characterization of secondary calcium carbonate accumulations in loessic sediments of the argentine pampean plains. Int. Work. Meet. On Micropedology. Gantes.
- Osterrieth, M; G. Martínez; M. Gutierrez y F. Alvarez
2005. Biomorfos de sílice en secuencias pedoarqueológicas del sitio Paso Otero 5, Buenos Aires. *III Encuentro de Investigaciones Fitolíticas del Cono Sur*. Actas: 44-45.
- Osterrieth M., F. Oliva y L. Menéndez
2006. Phytolith Study of an Archaeological site: Gascón 1, Provincia de Buenos Aires, República Argentina. *6th. International Meeting of Phytoliths Reserch*. (1): 12-13.
- Osterrieth, M; G. Martínez; M. Gutiérrez y F. Alvarez
2008. Biomorfos de sílice en secuencias pedoarqueológicas del sitio Paso Otero 5, Buenos Aires. *British Archaeological Research*: 77-90.
- Osterrieth M. L., Madella, M; D. Zurro y M. F. Alvarez
2009. Taphonomical Aspects of Silica Phytoliths in the Loess Sediments of the Argentinean Pampas. *Quaternary International* 193: 70-79.
- Parfenova, E. y E. A. Yarilova
1962. *Mineralogical investigations in Soil Science*. IPST. Jerusalem.
- Pearsall, D.
1978. Phytolith analysis of archaeological soils: evidence for maize cultivation in formative Ecuador. *Science* 199: 177-178.
1989. *Paleoethnobotany: A handbook of procedures*. Academic Press, San Diego.

- Pearsall, D. y D. Piperno
1990. Antiquity of maize cultivation in Ecuador: Summary and reevaluation of the evidence. *American Antiquity* 55(2): 324-337.
- Perry, C.
1999. Biofilm-related calcification, sediment trapping and constructive micrite envelopes: a criterion for the recognition of ancient grass-bed environments? *Sedimentology* 46: 33-45
- Pigoni, M. A. y M. A. Korstanje
2005. Caracterización de silicofitolitos en Poáceas de valles de altura en el NOA. 3er. *Encuentro de Investigaciones Fitolíticas del Cono Sur*: 51.
- Pigoni, M. A.; M. Maloberti y J. C. Zapatiel
2008. Phytolithic associations of the “Vegas” vegetation in the Bolsón Valley (Catamarca, Argentina). 7th *International Meeting on Phytolith Research*: 12-13.
- Piperno, D. R. y D. M. Pearsall.
1993. Phytoliths in the reproductive structures of maize and teosinte: Implications for the study of maize evolution. *Journal of Archaeological Science* 20: 337-362.
- Piperno, D. R.
1988. *Phytolith analysis: An archaeological and geological perspective*. Academic Press, San Diego, CA.
2006. *Phytoliths. A Comprehensive Guide for Archaeologist and Paleoecologist*. Altamira Press.
- Pye, K. y L. P. Zhou
1989. Late Pleistocene and Holocene aeolian dust deposition in north China and the northwest Pacific Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 73: 11-23.
- Rovner, I.
1971. Potential of opal phytoliths for use in paleoecological reconstruction. *Quaternary Research*, 1: 345-359.
1988. Macro-and micro-ecological reconstruction using plant opal phytolith data from archaeological sediments. *Geoarchaeology* 3: 155-163.
2008. Aplicaciones de los análisis fitolíticos en investigaciones arqueológicas. En: Zucol, A; M. -Osterrieth y M. Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de su conocimientos en América del Sur*. 13-22.

- Runge, F. y J. Runge
1997. Opal phytoliths in East African plants and soils. *Estado actual de los estudios de fitolitos en suelos y plantas*. A. Pinilla, J. Juan-Tresserras M.J. Machado (eds). *Monografías* 4: 5-13. *Centro de Ciencias Medioambientales*. CSIC. Madrid.
- Runham, N.W., P.R. Thronton, D.A. Sham y R. C. Wayte
1969. The mineralization and hardness of the radular teeth of the limpet *Patella vulgata*. *Zeitschrift Zellforschung Mikrosk. Anat.* 99: 608-626.
- Sase, T. y Y. Kato
1976. The study of opal phytolith in the humus horizons of buried volcanic ash soils in Hokkaido. *Research Bulletin of Obihiro University* 8:465-483.
- Smithson, F.
1958. Grass opal in british soils. *Journal of Soil Science*. 9: 148- 154.
- Sedov, S., E. Solleiro-Rebolledo, E. Gamma Castro, J. E. Vallejo-Gomez y A. Gonzalez Vázquez
2001. Buried paleosols of Nevado de Toluca: an alternative record of Late Quaternary environmental change in Central Mexico. *Journal of Quaternary Science* 16(4): 375-389.
- Strasser, E.; B. Strasser; R. Torra y E. Perino
2008. Investigaciones geobioquímicas y fitolíticas aplicadas a la correlación estratigráfica del Pleistoceno tardío-Holoceno en la Provincia de San Luis, Argentina. En: Zucol, A; M. -Osterrieth y M. Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de su conocimientos en América del Sur*. 189-196.
- Tassara, G. y M. Osterrieth
2008. Silicofitolitos en artefactos de molienda, de sitios arqueológicos del área interserrana, Buenos Aires. *BAR British Archaeological Research*: 163-172
- Tecchi, R.
1983a. Contenido de silicofitolitos en suelos del sector sudoriental de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 1: 75- 82.
1983b. Distribución de silicofitolitos en dos perfiles de suelo de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 1(2): 93-96.

- Teruggi, M.
1957. The nature and origin of Argentine loess. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(3):322-332.
- Teruggi, M. y P. Imbelloni
1987. Paleosuelos loessicos superpuestos en el Pleistoceno superior-Holoceno de la región de La Plata, Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 5(2): 175- 188.
- Teruggi, M. E.; M: Spalletti y L. H. Dalla salda
1973. Paleosuelos en la Sierra de Bachicha, partido de Balcarce, provincia de Buenos Aires. *Revista del Museo de La Plata* 8(67): 227- 256
- Twiss, P.C.
1992. Predicted world distribution of C₃ and C₄ grass phytoliths. *Phytolith Systematics, Emerging Issue.s* G. Rapp, Jr. and S.C. Mulholland (eds.), Plenum Press, New York.
- Twiss, P.C., E. Suess y R. M. Smith
1969. Morphological classification of grass phytoliths, *Soil Science Society of America Proceedings* 33:109-115
- Vallejo Gómez E.
2002. Morfología e intemperismo de fitolitos en suelos modernos y paleosuelos de la parte central del Eje Neovolcánico. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Vallejo Gómez, E., y S. Sedov
2008. Morfología e Intemperismo de fitolitos en suelos modernos y paleosuelos de la parte central del eje neovolcánico. En: Zucol, Osterrieth y Brea (Eds.). *Fitolitos. Estado actual de su conocimientos en América del Sur*. 89-111.
- Warme, J.
1975. *Boring as trace fossils and the process of marine bierosion*. R.Y Fray Ed. Springer Verlag. New York.
- Weiner, S. y P.M. Dove
2003. An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. En: Dove, P. M.; DeYoreo, J.J. y Weiner, S. (Eds.). *Biomineralization. Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 54: 1-29.

-Wilding, L. y L.R. Dress

1968. Biogenic opal in soils as an index of vegetative history in the Prairie Peninsula. En: Bergstrom, R. E. (Ed.). *The Quaternary of Illinois*. Special Publications of the University of Illinois College of Agriculture, 14: 96-103.

-Wurschmidt, A. y RA; M. A. Korstanje

2001. Maize and Kitchens. First evidences of phytoliths in archaeological sites of Northwestern Argentina. En: Meunier, J.y F. Colin (Eds.). *Phytoliths. Applications In Earth Science And Human History*. A. A. Balkema Publishers. 143-148.