

Carbonatos secundarios en las calcretas del noreste de la península de Yucatán: formas, procesos e implicaciones en la pedogénesis de geosistemas cársticos.

Cabadas-Báez Héctor Víctor¹, Jorge Federico Landa-Arreguín², Sergey Sedov³, Elizabeth Solleiro-Rebolledo³

¹Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. 50110, Toluca, Edo. México, México.

hvcabadasb@uaemex.mx

²Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510, Ciudad de México, México.

yicckko@hotmail.com

³Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510, Ciudad de México, México.

serg_sedov@yahoo.com; solleiro@geologia.unam.mx

Resumen

Las calcretas o caliches de la península de Yucatán son interpretadas por el registro sedimentario, como evidencias de exposición subaérea durante los períodos de emersión de la plataforma carbonatada. Es necesario realizar investigaciones enfocadas en la pedogénesis y otros procesos implicados (disolución y recristalización de carbonatos, así como la participación de los factores bióticos). Se estudiaron calcretas en secuencias carbonatadas litorales del noreste del estado de Quintana Roo, México (en canteras localizadas en el corredor Cancún-Tulum), las cuales se derivan de facies marinas someras y eolianitas. Las evidencias que brinda la micromorfología, como son las huellas de raíces, los relictos de estructura microgranular, e inclusive, la presencia de carbonatos aciculares (típicos de ambiente edáficos y el crecimiento de hongos) se apoyan en los valores de isótopos estables de C y O, particularmente para $\delta^{13}\text{C}$, los cuales son muy negativos para las calcretas (lo que corresponde con carbonatos pedogénicos precipitados en un ambiente de plantas tipo C3) en contraposición a las facies de calcarenitas-eolianitas que presentan valores positivos. La propuesta de que las calcretas son el derivado de procesos de formación de suelo, más que de diagénesis subaérea, necesita una mayor revisión, sobre todo, enmarcándola en el desarrollo de la edafogénesis en paisajes cársticos y en los modelos de cambios ambientales dados durante el Cuaternario tardío en las costas del Mar Caribe.

Abstract

The calcrete or caliche from the Yucatan peninsula is interpreted, from the sedimentary record, as evidence of subaerial exposition during uplifting periods of the carbonate platform. Future research need to focus in pedogenesis and other involved processes (dissolution and recrystallization of carbonates and biotic factors added). Calcretes were studied in quarries located in the Cancun-Tulum corridor in littoral carbonates sequences from the northeast of the Quintana Roo state, Mexico, which are derived from shallow marine and eolianites facies. Evidences provided by micromorphology, root traces, microgranular relict structure and even, acicular carbonate crystals (typical for soil and fungi environment) are supported by stable isotopic signatures of C and O, particularly for $\delta^{13}\text{C}$, which are markedly negative in the calcretes (corresponding to pedogenic carbonates precipitated in a C3 plant environment) opposite to calcarenite-eolianite facies showing positive values. The proposal that the calcretes are the result of soil formation processes, greater than subaerial diagenesis, needs a review in the context of edaphogenesis in karstic landscapes and models of environmental change during the Late Quaternary in the Caribbean sea coasts.

Palabras clave: calcreta, carbonatos secundarios, pedogénesis, micromorfología, península de Yucatán, isótopos estables de C y O.

Introducción

Los carbonatos pedogénicos son los depósitos de carbonatos secundarios precipitados en el suelo (Lal et al., 2000; Verrecchia, 2011). Diversos procesos están involucrados en la formación de dichos carbonatos, siendo dos los que resaltan: 1) la lixiviación de carbonatos primarios (aquellos formados por precipitación directa en ambientes acuosos o por fijación en estructuras biogénicas) a través del perfil de suelo (en los horizontes superiores, los carbonatos primarios son disueltos por el CO_2 enriquecido en agua y desplazados en solución a los horizontes más profundos donde precipitan) y 2) la transformación en ambientes superficiales de minerales primarios donde el ejemplo clásico es el intemperismo de los feldespatos por el enriquecimiento de CO_2 que lleva a la disolución de los iones de calcio y de bicarbonato. El desplazamiento en el equilibrio de las reacciones de las soluciones del suelo (Deutz et al., 2001) genera diversidad en las morfologías de carbonatos, incluyendo cementantes, películas de calcita asociada con poros (rasgos relacionados a desecación del suelo y/o succión de las raíces) e impregnaciones en la matriz por cristales de diversos tamaños (desde esparita hasta micrita).

La presencia de “calizas en forma de lajas” de estructura compacta ha sido reportada a lo largo de diversos afloramientos de la península de Yucatán, subyaciendo directamente a los suelos tipo Rendzina o Leptosoles, de los cuales se asume como su material parental. De manera genérica se ha denominado a dichas “lajas” o “costras” como calcretas o caliches, las cuales son importantes debido a su amplia distribución en ambientes continentales y por registrar información paleoambiental de los regímenes tectónicos, climáticos y sedimentarios donde se han desarrollado (Alonso-Zarza y Wright, 2010). Si bien su origen pedogénico ha sido ampliamente estudiado desde trabajos ya clásicos (Gile et al., 1966; Goudie, 1973; Machette, 1985), en la actualidad se considera que dicha génesis no es restrictiva, debido al vínculo que puede tener

con mantos freáticos someros, e incluso, con ambientes palustres (Wright y Tucker, 1991; Alonso-Zarza y Wright, 2010).

No obstante el amplio conocimiento que se tiene en la actualidad sobre la “ingeniería” de los carbonatos pedogénicos, los equilibrios físicoquímicos propuestos se mantienen fundamentalmente en la teoría y no incorporan del todo las complejidades encontradas en campo. La cinética de los sistemas carbonatados depende de muchos factores: difusión del CO_2 , relación porosidad-agua en presencia de iones específicos (como el Mg o P) e incluso y actividad biótica (biomineralización) (Wright, 1994; Alonzo-Zarza y Jones, 2007).

Independientemente de los procesos mencionados, los factores primarios clave para la acumulación de carbonatos en el suelo son los condicionados por climas áridos, semiáridos o subhúmedos (Monger, 2002). Birkeland (1999) sugiere que los carbonatos en suelo están presentes a partir de una tasa de precipitación anual menor a 500 mm.

En particular, la península de Yucatán representa la porción de una extensa plataforma carbonatada expuesta a los factores de formación del suelo, desde su emersión progresiva a partir del Cretácico. La gran variedad de suelos de la región y sus características físicas, químicas, biológicas y mineralógicas ha sido ampliamente discutida a lo largo del siglo XX e inicios del XXI (Aguilera, 1959; Quiñones, 1975; Isphording, 1978; Duch, 1991; Bautista et al., 2004). Sin embargo, los mecanismos de transformación de carbonatos no son del todo tratados, debido a la opinión persistente de que los procesos de disolución son los dominantes. La abundancia de geoformas cársticas apoya dicha hipótesis.

Quiñones y Allende (1974), consideran a las calcretas de la península de Yucatán como producto de una diagénesis tardía, debido a la transformación de aragonita en calcita. Ward (1985) y Schinle (1991) sugieren que

son el producto de diagénesis subaérea, formadas principalmente desde el Pleistoceno. Schinle (1991) propone, para las calcretas más superficiales, edades entre 35 y 19 ka A.P.

El objetivo de este trabajo es estudiar las neoformaciones de carbonatos en las calcretas mediante micromorfología, mineralogía e isótopos estables de C y O, tratando de esclarecer su génesis. El diferenciar los procesos que se dan en las calcretas, asociados a la pedogénesis, es una parte esencial del conocimiento de la Zona Crítica (National Research Council Committee on Basic Research Opportunities in the Earth Sciences, 2001) en regiones tan dinámicas y sensibles como las cársticas.

Materiales y métodos

Características del sitio de estudio

La península de Yucatán es una plataforma carbonatada que se mantuvo bajo el nivel del mar durante el Cretácico y parte del Terciario temprano. Está formada por una gruesa secuencia sedimentaria que sobreyace a un basamento cristalino del Paleozoico. Sus geoformas definen una plataforma relativamente plana, con altitudes que varían entre 25 y 35 m con la presencia de numerosas y variadas depresiones cársticas (Lugo-Hubp et al., 1992). Durante el Cuaternario, la plataforma comenzó a emerger. En consecuencia, los sedimentos costeros se restringieron a sus regiones periféricas, delineando la actual configuración de la península. En la región este, en el estado de Quintana Roo, Lauderdale et al. (1979) definieron en los carbonatos del Pleistoceno tres unidades estratigráficas, basándose en la presencia de calcretas. Cada unidad consta de diversas facies marginales de plataforma acumuladas durante las variaciones del nivel del mar asociadas a periodos glaciales e interglaciales. Ward (1985) sugiere edades que oscilan entre 800 y 200 ka A.P. basándose en edades registradas en corales. La unidad más reciente corresponde al Pleistoceno

superior y se trata de una caliza tipo grainstone pobremente consolidada, con un espesor de 3-10 m, que representa una secuencia progradacional de zona de rompiente inferior (lower shoreface) a depósitos de playa. Las estructuras sedimentarias típicas (en orden estratigráfico) son: (a) laminación cruzada de bajo ángulo con evidencias de depósitos retrabajados de tormenta, dominada por calizas tipo grainstone ricas en restos de Halimeda y moluscos; (b) una unidad intermedia con laminación cruzada de ángulo alto (multidireccional) compuesta primordialmente de grainstone y rudstone oolíticos con restos de Halimeda y moluscos; (c) una unidad superior de laminación paralela compuesta por calizas tipo grainstone con ooides bien clasificados, cubierta por una gruesa capa de calcreta a la cual sobreyace un suelo tipo Leptosol Rendzico. En particular, la unidad superior está cortada por diferentes elementos cársticos (rasgos de karren, principalmente) de diferente tamaño y configuración, frecuentemente rellenos con pedosedimentos (Cabadas-Báez et al., 2010; Solleiro-Rebolledo et al., 2015).

El clima es cálido a subhúmedo, con una temperatura media anual de 26°C y precipitación anual de 1234 mm. La temperatura y precipitación más altas son durante la temporada de julio-agosto, con una mínima de 28°C y una precipitación de 572 mm (García, 1988). La mayor parte del año, el balance de agua muestra que la evaporación es mayor (1500-1800 mm) que la precipitación, por lo que la captación de agua es muy limitada, lo que genera un déficit de agua de varios meses al año (Cabadas-Báez et al., 2010). No obstante, grandes cantidades de agua puede estar presentes en la superficie de junio a octubre (principalmente de agosto a septiembre) cuando los huracanes y las tormentas tropicales golpean las costas (Atallah y Bosart, 2003; Jáuregui, 2003).

Estratigrafía local y muestreo

Dos secciones localizadas en canteras a lo largo del corredor Cancún-Tulum, fueron descritas y muestreadas a detalle: Cantera Delta (N 20° 24' 32.9"; W 87° 19' 46.1") y Cantera 4 (N 20° 44' 27.1"; W 86° 59' 56.2") (Figura 1). Se seleccionaron dichas canteras debido a su fácil acceso y a lo completo de los cortes mostrando la secuencia estratigráfica de eolianitas y calcretas. Fue realizada la descripción de cada

unidad estratigráfica correlacionando con los detalles brindados por Ward (1985). Tanto los sedimentos endurecidos como los deleznales y sus transiciones fueron muestreados para análisis geoquímicos y secciones delgadas inalteradas. Los caliches fueron seccionados en cortes transversales y longitudinales a fin de observar detalles meso y micromorfológicos. En la descripción de los caliches se siguieron las propuestas de Klappa (1983) y Wright et al. (1995).

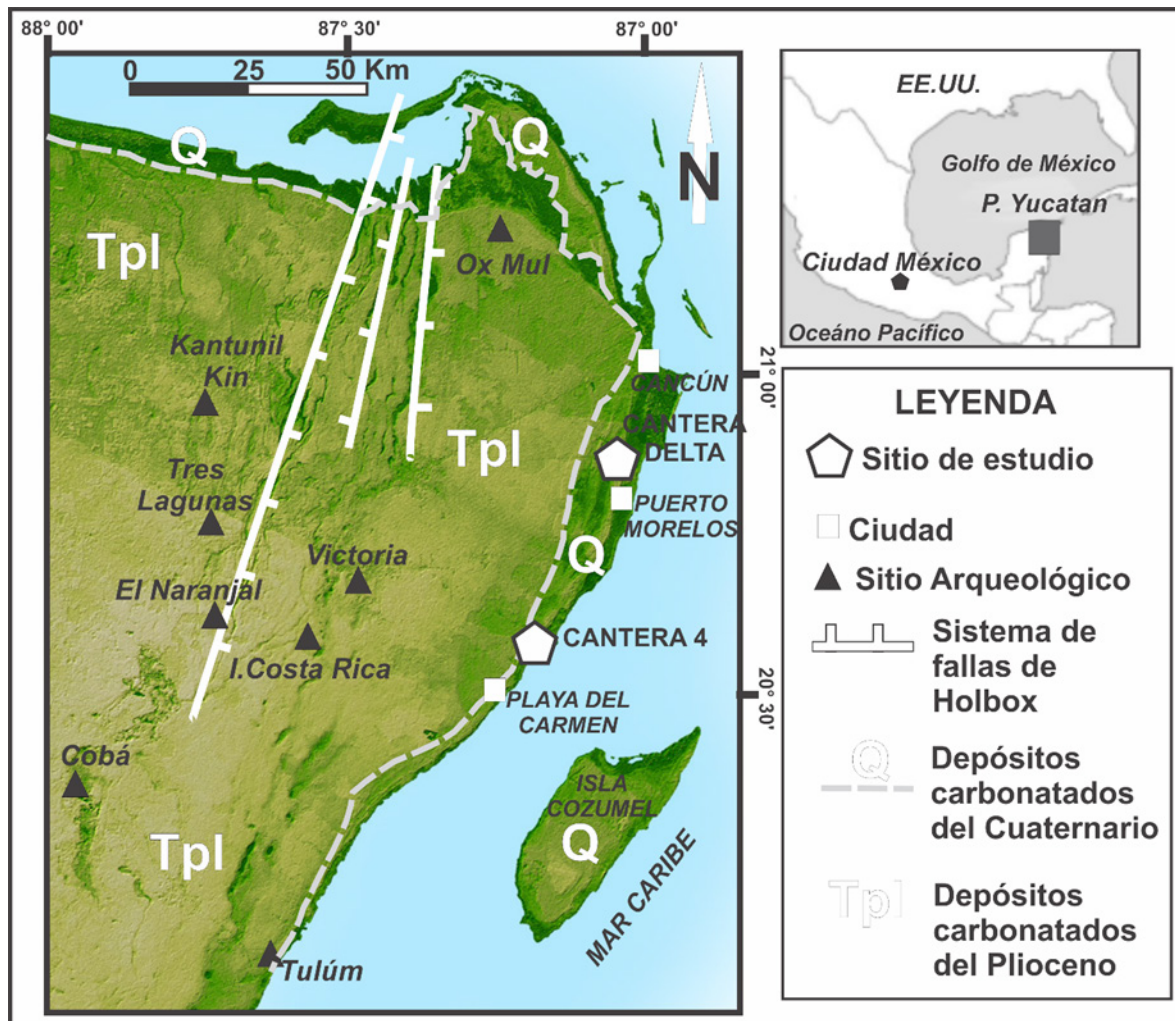


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio y del contexto geológico regional.

La Cantera Delta es la sección más completa y donde puede observarse la secuencia estratigráfica en su mayor parte (Figura 2a). En este lugar, la base de la secuencia está compuesta por un segundo nivel de calcreta (calcreta inferior, Figuras 2b y 2c), el cual asumimos que corresponde a la parte superior de la unidad descrita como del Pleistoceno Medio por parte de Ward (1985). Sobreyaciendo a la calcreta se encuentra una secuencia de calcarenitas, mostrando algunas facies asociadas a etapas transgresivas durante el Pleistoceno tardío (Ward, 1985). La secuencia de calcarenitas incluye facies lagunares y de corales (no laminadas y con grandes cantidades de

bioclastos, así como conglomerados compuestos por litoclastos de calcreta, restos de corales y de conchas de organismos. Sobreyaciendo a las calcarenitas, se observa una facies de sedimentos más finos con estratificación cruzada a los cuales Ward (1985) denominó eolianitas. La parte superior de la secuencia termina con la presencia de una calcreta que subyace directamente a los Leptosoles Rendzicos. La calcreta está afectada por fracturamiento y procesos de carstificación que generan “bolsas rellenas con pedosedimentos” que cortan hasta la secuencia de eolianitas (Cabadas-Báez et al., 2010).

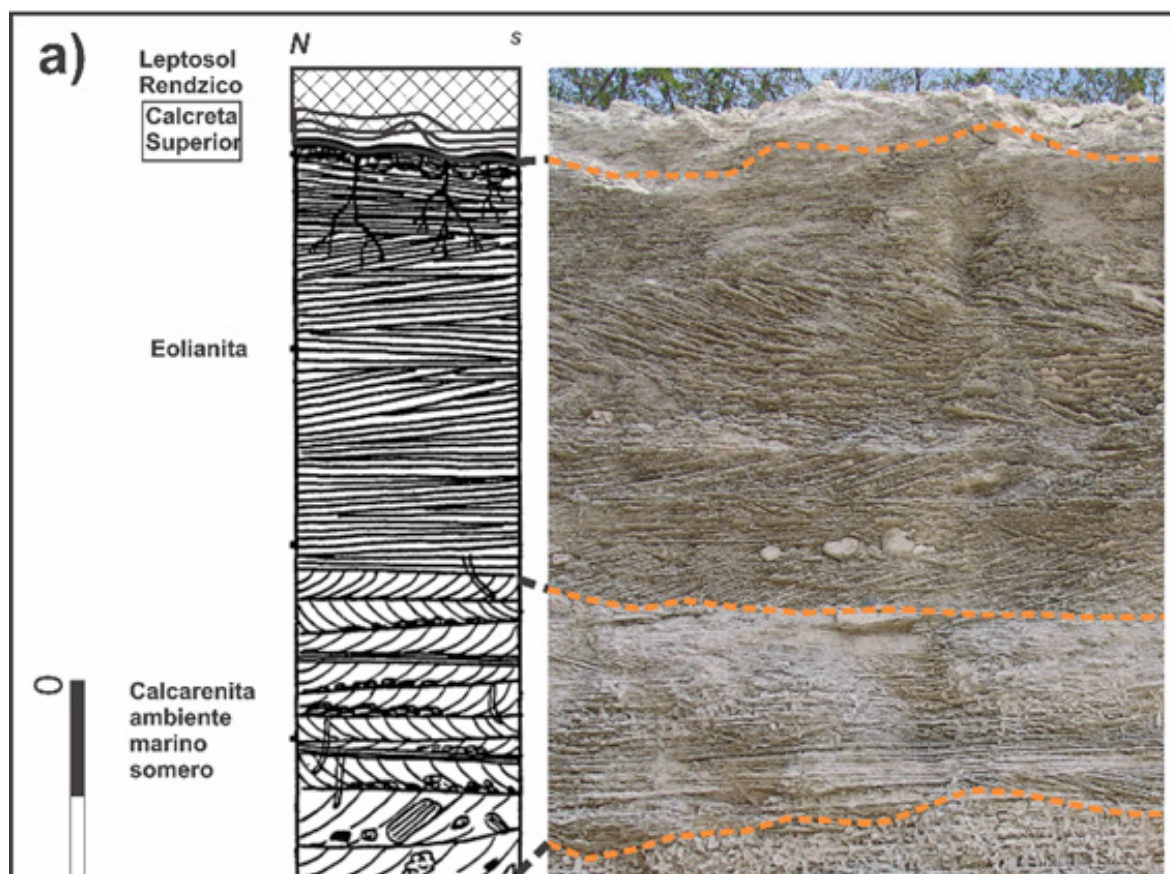


Figura 2. Sitio Cantera Delta.

- a) Columna estratigráfica con la ubicación de los horizontes de calcreta o caliche (modificada de Ward, 1985).
- b) Morfología general de la Calcreta inferior.
- c) Detalle de trazas de raíces en corte interno de la Calcreta inferior.

La sección de la Cantera 4 contempla la calcarenita con facies lagunares y parte de la eolianita sobreyacente, la cual está cubierta por el nivel de calcreta más superficial, la cual se subdivide en dos zonas, debido a las diferencias morfológicas (Figura 3a y 3b). La calcreta, en lo general, se encuentra parcialmente fragmentada y las “bolsas de disolución” cortan zonas más profundas de la secuencia y están rellenas con pedosedimentos. Se muestreó la calcreta de la base de la “bolsa” (denominada “zona de recristalización”) en contacto con la eolianita, donde se reconoció un área donde los carbonatos cambian a un color pardo oscuro y su estructura se percibe masiva y firme, en contraste con la eolianita que es más deleznable y con estructuras de laminación cruzada de bajo ángulo. Se tomaron muestras de la eolianita para realizar comparaciones.

Análisis de laboratorio

Las secciones delgadas fueron preparadas de las calcretas previamente seleccionadas para describir sus características. Por ejemplo, laminaciones impregnadas con resina (MC-40) y pulidas hasta un espesor de 30 μ . Las descripciones petrográficas fueron realizadas siguiendo la terminología de Wright y Alonso-Zarza (1990).

La mineralogía fue determinada por difracción de rayos X en muestras totales en polvo. Se usó un difractómetro Shimadzu XRD-6000 equipado con tubo de Cu y monocromador de grafito.

Para las determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ se utilizaron métodos de combustión de rutina (Sofer, 1980; Mook y Longsmas, 1987), así como un espectrómetro de masas de triple colector

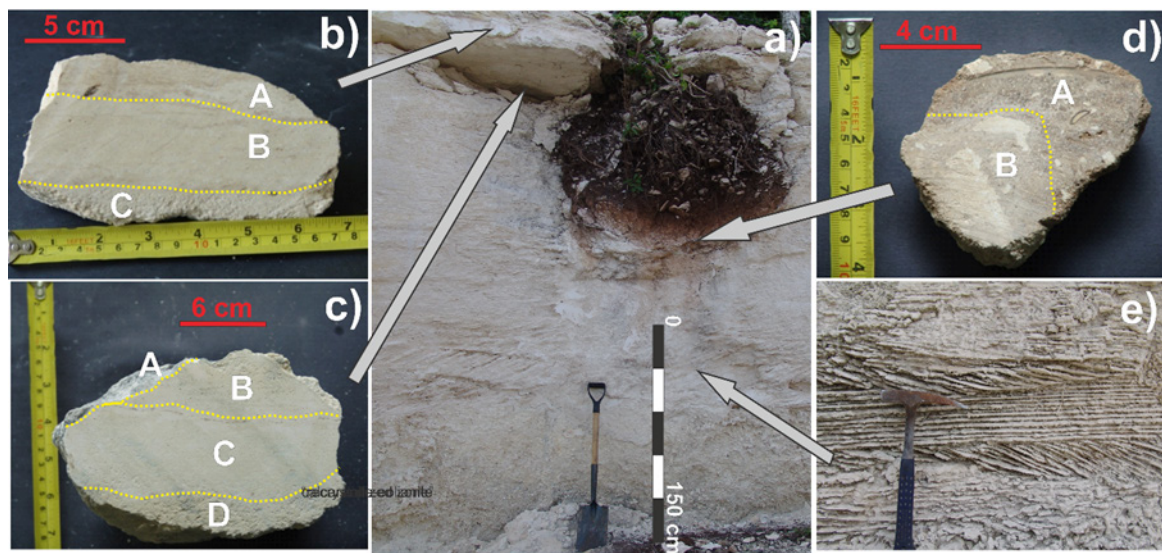


Figura 3. Sitio Cantera 4.

- a) Vista general de la sección, mostrando la “bolsa” rellena de pedosedimentos y calcreta.
- b) Morfología Cantera superficial (0-9 cm profundidad)
- c) Morfología Cantera superficial (9-22 cm de profundidad)
- d) Zona de “recristalización”, en el contacto entre la región inferior de la “bolsa cársica” y la eolianita.
- e) Detalle de laminación cruzada en eolianita (140-210 cm de profundidad).

(Finnigan MAT250). Cada lote de muestras fue acompañado por materiales de referencia: 8540 PEF-1 (polietileno), 8539 NBS-22 (aceite) y 8242 Sucrose ANU (sucrosa) del NIST. La incertidumbre del método analítico es de $0.1^0/_{00}$

Resultados e interpretaciones preliminares

Morfología

La calcreta en la base de la sección Cantera Delta tiene un espesor de 40-50 cm, al menos en la región que aflora (no fue posible registrar el material subyacente debido a lo compacto y endurecido del material). El contacto con la calcarenita sobreyacente es abrupto. En cortes verticales al espesor de la capa de calcreta, en su parte interna (Figuras 2b y 2c), es posible diferenciar laminaciones continuas de color pardo oscuro, concentradas en la parte superior en sus primeros dos centímetros. Dichas laminaciones fueron designadas en orden creciente de profundidad como A, B y C; el resto del cuerpo de la calcreta es masivo y con un color pardo claro, subdividido en dos regiones más, D y E. Los límites de las laminaciones superiores son claros y con un contacto abrupto entre sí. No obstante, la tendencia en la laminación intermedia (B) es formar lentes con un límite ondulado y discontinuo que incluyen bioclastos muy fragmentados. Las regiones más profundas de la calcreta presentan moteados y pseudolaminaciones discontinuas en colores pardos pálidos, mientras que la matriz, que incluye fragmentos de conchas es de color blanco-amarillento. En algunas secciones verticales adicionales son distinguibles trazas de raíces vermiformes (Figura 2c).

En el sitio Cantera 4 (Figura 3), el espesor total de la calcreta superficial es de 45 cm, subdividido en dos horizontes, basados en la diferencia de color y dureza del material. El primero, ubicado en la parte superior, es de color pardo oscuro con pseudolaminaciones discontinuas con límites inferiores planos (Figura 3b, en la región A); en la parte media, el material es mucho más compacto

y su matriz es de color blanco-amarillento, similar a la calcarenita subyacente (Figura 3b, región B). El segundo horizonte presenta una estructura poco consolidada y desarrollo de rasgos cársticos incipientes (Figura 3b, región C).

El material ubicado en la “zona de recristalización”, en la base de la “bolsa de disolución”, está moderadamente endurecido, con una coloración no homogénea (Figura 3d). Presentan impregnaciones superficiales del material arcilloso que rellena a las fracturas, junto con materia orgánica pedogénica, además de fragmentos de la calcreta superficial y de la calcarenita subyacente.

Micromorfología

En general, las calcretas presentan granos esqueléticos que se encuentran total o parcialmente micritizados. Dichos granos están compuestos principalmente de foraminíferos y peloides. En particular, en las secciones observadas en el sitio Cantera 4 son distinguibles las laminaciones micríticas pardo oscuras discontinuas. Para autores como Alonso-Zarza y Jones (2007) dichas laminaciones pueden indicar episodios o zonas de colonización de raíces, aunque no de manera permanente (Figura 4a). Particularmente interesante es la región A de la calcreta inferior del sitio Cantera Delta, donde aún son observables relictos de una estructura granular (Figura 4b), descrita por Wright (1994) como una microfábrica alveolar.

La presencia de ooides es constante en todas las muestras. No obstante, las eolianitas exhiben la mayor proporción. El cementante carbonatado entre los ooides en algunos casos, presente como películas sobre bioclastos de foraminíferos y equinodermos (Figura 4d) muestra tres morfologías dominantes (micrítica, ecuanite y esparita), lo cual puede asociarse a la presencia de carbonato de Mg (Ward, 1985) (Figura 4c). Las eolianitas presentan calcita microcristalina en ooides con microesparita intersticial (Figura 4c).

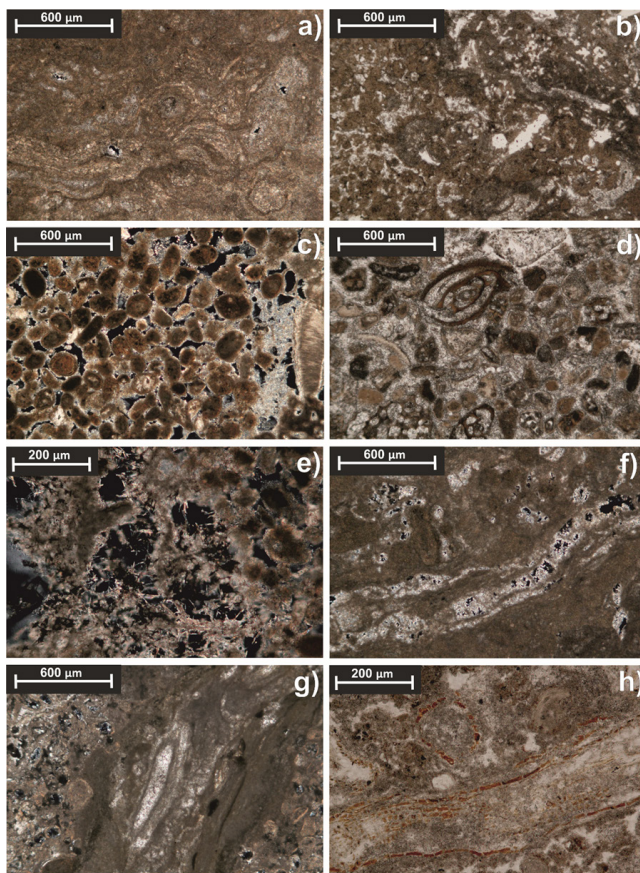


Figura 4. Micromorfología

a) Sitio Cantera 4, calcreta superior (profundidad: 0-2.3 cm), región A. Laminaciones pardo-oscurs micríticas, con una aparente estructura discontinua, asociada a la actividad biológica. Observación con nicoles cruzados (XPL).

b) Sitio Cantera Delta, calcreta inferior (profundidad: 270-270.4 cm), región A. Relictos de aparente estructura microgranular como evidencia del desarrollo de un horizonte de suelo orgánico. Observación con luz polarizada plana (PPL).

c) Sitio Cantera 4, Eolianita (profundidad 140 cm). Presencia de ooides micríticos con microesparita intersticial; parte de la microesparita recubre en forma de "películas" a los granos oolíticos. En la zona derecha de la fotomicrografía es posible observar un bioclasto con "puentes" de esparita. XPL.

d) Sitio Cantera 4, Calcreta superficial, regiones C-D (15-22 cm de profundidad). Vista general de los componentes del segundo nivel superficial de calcreta: presencia de ooides y estructuras de foraminíferos. PPL.

e) Sitio Cantera Delta, Calcreta inferior, regiones A-B (profundidad: 270-271.8 cm). Carbonatos aciculares relleno de zonas porosas. XPL.

f) Sitio Cantera 4, segundo nivel de calcreta superficial, región A (profundidad: 9-12 cm). Raíces calcificadas (estructuras laminares al centro de la fotomicrografía) con rellenos de esparita, el resto de la matriz es micrítica. XPL.

g) Sitio Cantera Delta, calcreta inferior, regiones C-D (profundidad 271.8-275.8 cm). Raíz calcificada; en el centro de la raíz se observa microesparita rodeada de una matriz micrítica y estructuras biológicas de apariencia "fluidal". XPL.

h) Sitio Cantera 4, Zona "recristalizada", región B (profundidad 145-150 cm). Raíces modernas penetrando relictos de la eolianita en contacto con pedosedimentos que rellenan la "bolsa" cárstica. La mayor parte de los carbonatos son micríticos. PPL

Particularmente interesantes son los carbonatos aciculares que rellenan zonas porosas entre los granos esqueléticos. Hábitos fibrosos menores a 10 μm pueden observarse entre los poros de microestructuras alveolares. Para autores como Verrechia y Verrechia (1994), los carbonatos de formas fibrosas pueden tener tanto un origen biogénico como inorgánico. Alonso-Zarza y Jones (2007) han sugerido que los mismos rasgos, observados en las islas Caimán, tienen un origen biogénico, relacionado con la actividad de los hongos. En general, los carbonatos fibrosos se encuentran mejor desarrollados en la calcreta de la Cantera Delta (Figura 4e), así como en los tejidos calcificados de raíces (Figura 4f y 4g).

En particular, los dos horizontes de calcreta correspondientes a los niveles superficiales de la Cantera 4 presentan el dominio de fábricas con peloides de micrita con canales y fisuras rellenos de microesparita. Zonas relictas de los componentes oolíticos de la eolianita fueron

recubiertos por micrita, lo cual genera “puentes” entre granos (Figura 4c).

Con respecto a la región de la Cantera 4, denominada “zona de recristalización” (Figura 4h), la influencia de los componentes de la eolianita es evidente a través de la presencia de bioclastos fragmentados y de ooides, afectados por la agregación de materia orgánica.

Mineralogía

Todas las muestras analizadas están compuestas mayoritariamente por calcita y aragonita; sin embargo, las proporciones varían. Las muestras de calcarenitas-eolianitas son las que se encuentran más enriquecidas en aragonita (Figura 5b), mientras que las calcretas presentan la menor proporción de dicho mineral y, en particular, la “zona de recristalización” (Figura 5d).

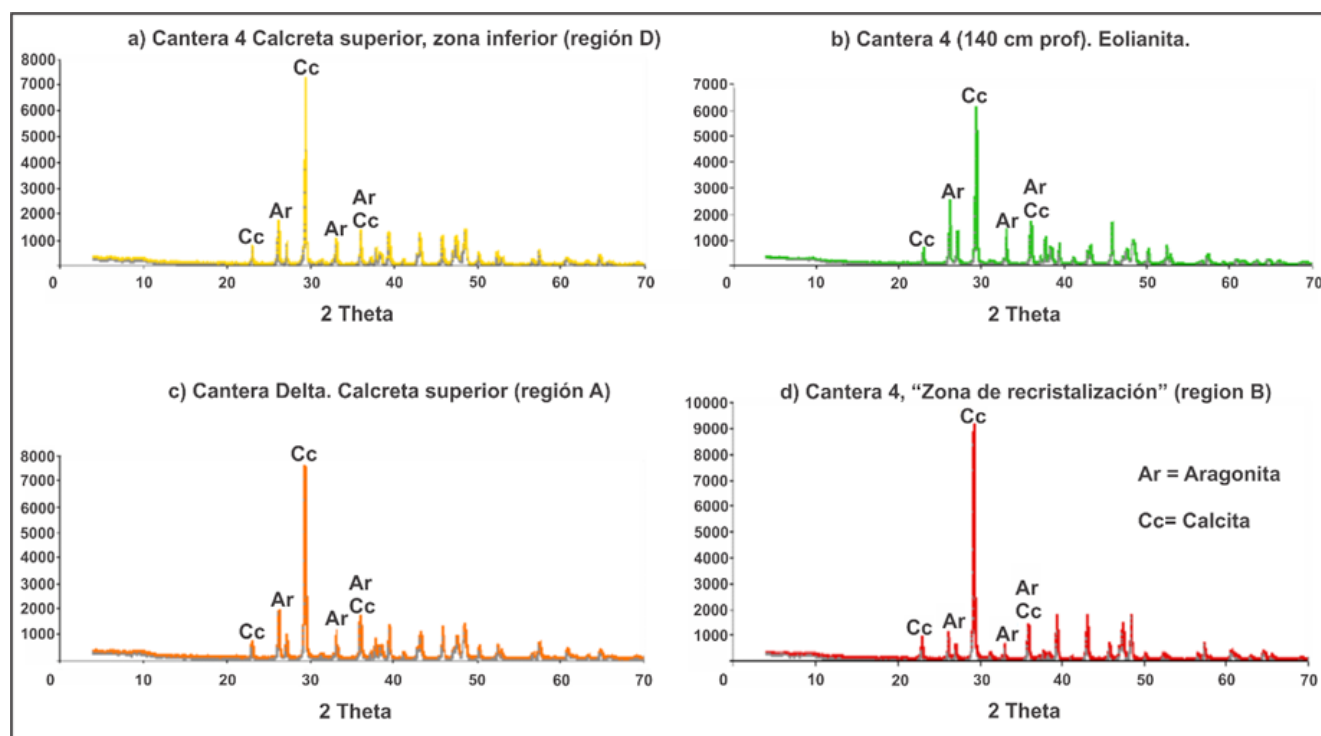


Figura 5. Difractogramas mostrando el dominio de calcita y aragonita en las muestras estudiadas.

Composición de isótopos estables de C y O

Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ tienden a ser homogéneos en todas las muestras analizadas. No obstante, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ están fuertemente diferenciados. En las calcretas son mucho más negativos (hasta -10‰), mientras que en las eolianitas son positivos ($+2\text{‰}$) (Figura 6).

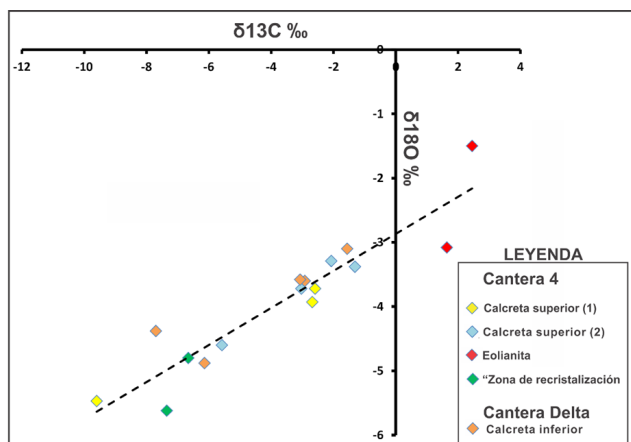


Figura 6. Gráfico $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{18}\text{O}$. Los isótopos estables de C y O han sido ampliamente utilizados en la geoquímica (los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$) para conocer las condiciones de formación de los sedimentos (ya que pueden reflejar aspectos como la temperatura de formación, presencia de fluidos en el sistema, mineralogía, pH de la solución y cinética de las reacciones) (McConnaughey, 2003). Las calcarenitas, compuestas por oolitos, tienden a presentar valores más positivos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ debido a la influencia del agua marina. Por otro lado, la calcreta es producto de disolución y precipitación de carbonatos durante la exposición de la plataforma; en ese periodo, las pequeñas depresiones de la roca son colonizadas por algas y cianobacterias que, mediante la fotosíntesis, imprimen valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ (la evaporación causa que el agua presente en la calcreta se enriquezca en ^{18}O generando valores positivos ocasionales de $\delta^{18}\text{O}$) (Swart, 2015).

Discusión y conclusiones

Carbonatos primarios contra carbonatos pedogénicos

Los carbonatos encontrados en suelos desarrollados sobre materiales calcáreos, presentan dificultades para su identificación, dado que persiste la duda de su origen: pedogénico o herencia de las rocas subyacentes. Los criterios para realizar un buen diagnóstico implican estudios de campo y evidencias de laboratorio (Monger, 2002).

De acuerdo a los rasgos observados en campo, tanto las calcretas masivas como las laminares son las dominantes en las secciones estudiadas. Según Alonso-Zarza y Wright (2010), las calcretas laminares pueden encontrarse en la parte superficial de los perfiles de calcreta, pero subyaciendo al suelo e interestratificadas en depósitos sedimentarios, como es el caso de las calcarenitas. La formación de estas calcretas ha sido ampliamente tratada (Verrecchia et al., 1995; Wright et al., 1996; Freytet et al., 1997; Alonso-Zarza, 1999), y se ha llegado al consenso de que deben ser interpretadas como rootcretas, rizocretas (Jones, 1992) o calcretas rizogénicas (Wright et al., 1995). Es ampliamente aceptado que el sistema de raíces, tanto vertical como horizontal, es determinantes en su formación. No obstante, cuando las calcretas se encuentran en la parte superior de las secuencias, otros organismos pueden estar operando, tales como las cianobacterias, bacterias, hongos y líquenes (Alonso-Zarza y Wright, 2010). Las estructuras generadas han llevado a identificaciones erróneas, relacionándolas con estromatolitos e incluso, con sedimentos laminados de origen lacustre (Servicio Geológico Mexicano, 2006a; 2006b).

Las evidencias petrográficas son muy claras: el dominio de rasgos asociados a huellas de raíces y hongos (calcita acicular) en la calcreta contra el dominio de bioclastos, peloides y ooides en la eolianita. Los relictos de una estructura

microgranular en la calcreta, particularmente observable en las muestras profundas de la Cantera Delta, son un punto a resaltar como evidencia de una antigua cubierta edáfica. Para Alonso-Zarza y Jones (2007), las laminaciones de micrita en la calcreta (Figura 2b, y 2c) también pueden estar asociadas a episodios en los que la actividad de las raíces fue posible; incluso, su morfología irregular y la generación de microdiscontinuidades puede atribuirse a fases de disolución (Wright, 1989). Las características típicas de la fábrica-beta descrita por Wright (1994) no son del todo claras en las calcretas laminadas. No obstante, la actividad biogénica puede quedar evidenciada por los carbonatos aciculares o fibrosos. Para el mismo autor, la preservación de carbonatos fibrosos indica una pedogénesis incipiente y/o formada bajo condiciones áridas a semiáridas.

Cuando las calcretas laminares se encuentran en la parte superior de un perfil o subyaciendo al suelo, su formación puede ser controlada por un manto freático somero o por películas finas de agua estancada en la superficie del suelo (Alonso-Zarza y Wright, 2010). Es muy común que las calcretas contengan esferulitas y rasgos relacionados con la calcificación de las algas y/o cianobacterias (Verrechia et al., 1995). Tanto los procesos bioquímicos, como los fisicoquímicos pueden contribuir a la litificación de la lámina, por ejemplo a través de la precipitación de micrita debido al incremento en la concentración de carbonato en el agua estancada o por capilaridad, aunque también se da la formación de estructuras no pedogénicas como la calcita esparítica gruesa en el cementante (Alonso-Zarza y Wright, 2010).

Los datos de los contenidos isotópicos son lo más significativo de nuestras interpretaciones. Existen diferencias claras entre las calcretas y las calcarenitas. Las calcarenitas presentan valores de $\delta^{13}\text{C}$ positivos, cercanos a $+2\text{‰}$, lo cual refleja claramente la influencia del agua marina con la formación de carbonatos primarios. En contraste, todos los horizontes de calcreta y sus

laminaciones presentan valores negativos (Figura 6), similares a la firmas obtenidas por Choquette (1976), Sanborn (1991) y Socki et al. (2004) en diferentes localidades a lo largo de la costa de la península, lo cual se asocia a la influencia de un ambiente terrestre. En dichas localidades, los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se van haciendo más negativos, conforme se asciende estratigráficamente en las secciones, hasta llegar a los valores más bajos en las calcretas superficiales. Los valores de las laminaciones pardo oscuras en la calcreta inferior de la Cantera Delta son de entre -9.6‰ y -6.14‰ , lo que puede reflejar la contribución del CO_2 en el suelo y su interacción con la zona vadosa (Choquette, 1976).

El término calcreta y sus sinónimos, “caliche” y “cornstone” (Allen, 1960; Goudie, 1973), no son incluidos en las clasificaciones de suelo, ni en la designación de horizontes diagnóstico. No obstante, el IUSS Working Group (2015) considera a algunos tipos de calcreta como criterios de identificación en campo de horizontes petrocálcicos. Para autores como Wright y Tucker (1991) las calcretas pueden conformar un “subperfil” dentro del perfil de suelo; suelos como los Aridisoles, Vertisoles, Mollisoles y Alfisoles típicamente pueden contener calcretas. Si la interpretación de los caliches como producto de pedogénesis es correcta, esto implicaría realizar una revisión sobre la relación que guardan con los Leptosoles Rendzicos, Phaeozems e incluso Luvisoles de la península de Yucatán.

Las calcretas como registros paleopedológicos de cambios ambientales

La génesis de calcretas en el registro geológico-pedológico ha sido ampliamente discutida (Blank y Tynes, 1965; Aristarain, 1971; Goudie, 1973, 1996; Klappa, 1979, 1983; Wang et al. 1994; Tandon et al., 1998); varios modelos han sido propuestos para explicarla: (1) son consecuencia de la exposición de una superficie a condiciones subaéreas (Blumel, 1982; Esteban y Klappa,

1983); (2) se trata del producto de condiciones climáticas semiáridas-áridas (Goudie, 1983; Alonzo-Zarza, 2003); (3) representan periodos de desarrollo de superficies geomórficas estables (Machette, 1985); y/o (4) áreas no activas en sistemas aluviales (Wright y Alonzo-Zarza, 1990). No obstante, las calcretas no se encuentran restringidas a los climas áridos o semiáridos. Pueden hallarse en ambientes húmedos y semihúmedos donde los carbonatos pedogénicos persisten en el suelo.

Los análisis isotópicos en las calcretas laminares sugieren diferentes procesos en la formación de las láminas, los cuales pueden ser el resultado de diferencias en las condiciones climáticas. Según los trabajos de Alonzo-Zarza y Wright (2010) las calcretas masivas micríticas presentan los valores de carbono y oxígeno más pesado lo cual indica condiciones de mayor aridez. Las calcretas laminares con estructuras alveolares-septales presentan carbono más ligero, el cual se interpreta como indicador de una densa cubierta vegetal en un clima menos árido.

Por su parte, los modelos de secuencias de eolianitas-paleosuelos de Bermuda y las Bahamas (Stearns, 1974), así como del sur de Australia (Warren, 1983), pueden brindar un marco conceptual para entender la formación de calcretas en el noreste de la península de Yucatán. Dichos modelos plantean que la formación de eolianitas se dio durante o inmediatamente después del ascenso del nivel en el interglacial. Posteriormente, al estabilizarse la plataforma, ya emergida, se inicia la pedogénesis. Este modelo es reforzado por las observaciones de Ward (1985) y Heraud (1996), quienes describen tres diferentes niveles de calcretas, encontrados en canteras a lo largo del corredor Cancún-Tulum y en la costa de Campeche, las cuales se pueden asociar a tres ciclos interglaciales, aunque para ellos es necesario contar con fechamientos instrumentales.

La mecánica compleja de la calcretas sobre materiales carbonatados

Las calcretas de la costa este de la península de Yucatán pueden ser el resultado de la “agradación” continua de la pedogénesis, en la cual, la relación entre la tasa de sedimentación y el desarrollo de la calcreta genera resultados en diferentes etapas (Leeder, 1975; Wright y Marriott, 1996). Estudios de calcretas de diversos periodos geológicos (Watts, 1978) han revelado las interacciones existentes entre pedogénesis, sedimentación episódica y erosión. Dicha dinámica queda impresa a escala de horizontes-perfiles (decímetros a metros) e incluso, en escala más pequeña, como en las láminas individuales (milímetros a centímetros) (Alonzo-Zarza y Silva, 2002).

El grado de desarrollo (morfología y espesor de la calcreta) dependerá del tiempo que el sistema reticular se mantuvo en el suelo en las regiones superficiales (Alonzo-Zarza y Wright, 2010). En ciertos periodos de la historia ambiental de la costa de Quintana Roo, la tasa de erosión ha excedido a la de sedimentación, por lo que la parte superior del perfil de calcreta pudo ser removido (Cabadas-Báez et al., 2010) y los diferentes horizontes laminares o masivos quedaron expuestos directamente a la atmósfera, reiniciando nuevos procesos de disolución-evaporación-precipitación de carbonatos, obliterando los rasgos de formación de etapas anteriores.

Para Alonzo-Zarza y Wright (2010) la dinámica de los perfiles de calcretas sobre sustratos carbonatados es una materia compleja que aún necesita mayor investigación. Algunos trabajos como los de Davies (1991) y Sattler et al. (2005) registraron las diferencias microtopográficas que pueden encontrarse lateralmente. Para autores como Budd et al. (2002) los rasgos de desarrollo de las calcretas no necesariamente se encuentran asociados con la duración de la exposición subaérea. Estas últimas investigaciones sugieren un modelo de desarrollo de calcretas en forma

de una progresión lineal, más que los procesos de iluviación propuestos por Gile et al. (1966) y Machette (1985), los cuales podrían no aplicarse del todo a las condiciones de una plataforma carbonatada como la de Yucatán (Alonso-Zarza y Wright (2010).

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el proyecto IN105215 “Reconstrucción ambiental de los geosistemas costeros de México durante el Cuaternario basado en evidencias paleopedológicas”(Elizabeth Solleiro). Un agradecimiento especial para el personal del Instituto de Geología de la UNAM que contribuyó con análisis y trabajo de campo: Teresa Pi (Laboratorio de Difracción de Rayos X), Jaime Díaz (Taller de Secciones Delgadas), Jorge René Alcalá (Laboratorio de Física de Suelos), Pedro Morales y Edith Cienfuegos (Laboratorio de isótopos estables), así como a los revisores anónimos.

Referencias

- Aguilera, N., 1959, Suelos. En: E. Beltrán, editor, Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento II (2), Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, México, p. 177-212.
- Allen, J.R.L., 1960, Cornstone, Geological Magazine, v. 97, p. 43-48.
- Alonso-Zarza, A.M., 1999, Initial stages of laminar calcrete formation by roots: examples from the Neogene of central Spain. *Sedimentary Geology*, v. 126, 177-191.
- Alonso-Zarza, A.M., 2003, Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record, *Earth-Science Reviews*, v. 60, p. 261-298.
- Alonso-Zarza, A. M., Jones, B., 2007, Root calcrete formation on Quaternary karstic surfaces of Grand Cayman, *Geologica Acta*, v. 5, p. 77-88.
- Alonso-Zarza, A.M., Silva, P.G., 2002, Quaternary laminar calcretes with bee nests: evidences of small scale climatic fluctuations, Eastern Canary islands, Spain, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 178, p. 119-135.
- Alonso-Zarza, A.M., Wright, V.P., 2010, Calcretes. En: A.M. Alonso-Zarza and L.H. Tanner, editores, *Carbonates in continental settings*, Elsevier, *Developments in Sedimentology*, v. 62, p. 177-224.
- Aristarain, L.F., 1971, Characteristics and genesis of caliche deposits, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 32, 117-141.
- Atallah, E. H., Bosart, L.F., 2003, The extratropical transition and precipitation distribution of Hurricane Floyd, 1999, *Monthly Weather Review*, v. 131, p. 1063–1081.
- Bautista, Z. F., Estrada, M. H., Jiménez, O. J., González, I. J. A., 2004, Relación entre relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán, *Terra Latinoamericana*, v. 22, p. 243-254.
- Birkeland, P.W., 1999, *Soils and geomorphology*, Oxford University Press, Oxford, 430 pp.
- Blank, H.R., Tynes, E.W., 1965, Formation of caliche in situ, *Geological Society of America Bulletin*, v. 76, p. 1387–1392.
- Blumel, W.D., 1982, Calcrete in Namibia and SE-Spain. Relations to substratum, soil formation and geomorphic factors, *Catena Supplement*, v. 1, p. 67-82.

- Budd, D.A., Pack, S.M., Fogel, M.L., 2002, The destruction of paleoclimatic isotopic signals in Pleistocene carbonate soil nodules of Western Australia, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 188, p. 249-273.
- Cabadas-Báez, H. V., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Pi-Puig, T., Gama-Castro, J., 2010, Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatán: A record of Late Quaternary soil development, geomorphic processes and landscape stability, *Geomorphology* v. 122, p. 323-337.
- Choquette, P.W., 1976, Recent calcareous crusts (caliche) on Isla Mujeres, Quintana Roo, Mexico: insights from isotopic composition, En: A. E. Weidie, W. C. Ward, editores, *Carbonate rock and hydrogeology of the Yucatan Peninsula, Mexico*, New Orleans Geological Society, p. 139-158.
- Davies, J.R., 1991, Karstification and pedogenesis on a late Dinantian carbonate platform, Anglesey, North Wales, *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, v. 48, p. 297-321.
- Deutz, P., Montañez, I. P., Monger, H. C., Morrison, J., 2001, Morphology and isotope heterogeneity of Late Quaternary pedogenic carbonates: implications for paleosol carbonates as paleoenvironmental proxies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 166, p. 293-317.
- Duch, G. J., 1991, *Fisiografía del Estado de Yucatán*, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, 229 pp.
- Esteban, M., Klappa, C. F., 1983, Subaerial exposure environment, En: P. Scholle (editor), *Carbonate depositional environments*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 33, Tulsa, p. 2-54.
- Freytet, P., Plaziat, J.C., Verrecchia, E.P., 1997, A classification of rhizogenic (root-formed) calcretes, with examples from the Upper Jurassic-Lower Cretaceous of Spain and Upper Cretaceous of southern France-discussion, *Sedimentary Geology*, v. 110, 299-303.
- García, E., 1988, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, 3ª ed. Instituto de Geografía UNAM, México, 219 pp.
- Gile, L.H., Peterson, F.F., Grossman, R.B., 1966, Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils, *Soil Science* v. 101, p. 347-360.
- Goudie, A., 1973, *Duricrusts in Tropical and Subtropical Landscapes*, Clarendon, Oxford, 174 pp.
- Goudie, A., 1983. Calcrete. En: A. Goudie, K. Pye, editores, *Chemical sediments and geomorphology*, Academic Press, London, p. 93-131.
- Goudie, A., 1996, Organic agency in calcrete development, *Journal of Arid Environments*, v. 32, p. 103-112.
- Heraud, P. M. A., 1996, *LeKarst du Yucatan: Pays des Mayas*, Presses Universitaires de Bordeaux, Collection Scieteren, Bordeaux, France, 282 pp.
- Isphording, W. C., 1978, Mineralogical and physical properties of Gulf limestone soils, *Transaction-Gulf Coast Association of Geological Societies*, XXVIII, p. 201-214.
- IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, *World Soil Resources Reports No. 106*, FAO, Rome, 192 pp.

- Jáuregui, E., 2003, Climatology and land falling hurricanes and tropical storms in Mexico. *Atmósfera*, v. 16, p. 193–204.
- Jones, B., 1992, Construction of spar calcite crystals around spores, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 62, 1054-1057.
- Klappa, C.F., 1979, Calcified filaments in Quaternary calcretes: organo–mineral interactions in the subaerial vadose environment, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 49, p. 955–968.
- Klappa, C.F., 1983, A process– response model for the formation of pedogenic calcretes, En: R. C.L. Wilson, editor, *Residual Deposits: Surface Related Weathering Processes and Materials*, Blackwell, Oxford, p. 211-220.
- Lal, R., Kimble, J. M., Eswaran, H., Stewart, B. A., 2000, *Global climate change and pedogenic carbonates*, CRC Press, Boca Raton, 320 pp.
- Lauderdale, R. W., Ward, W. C. Weidie, A. E., 1979, Carrillo Puerto Formation of northeastern Quintana Roo, Mexico, *Gulf Coast Association of geological Societies Transactions*, v. 29, p. 275-280.
- Leeder, M.R., 1975, Pedogenic carbonates and floodplain sediment accretion rates: a quaintitative model for alluvial arid-zone lithofacies, *Geological Magazine*, v. 112, p. 257-270.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J. F., Espinaza-Perena, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán, *Revista del Instituto de Geología de la UNAM*, v. 10, No.2, p. 143-150.
- McConnaughey, T.A., 2003, Sub-equilibrium ^{18}O and ^{13}C levels in biological carbonate and kinetic models, *Coral Reefs*, v. 22, p. 316-327.
- Machette, M.N., 1985, Calcic soils of the southwestern United States, En: D.L. Weide, M. L. Faber, editores, *Soils and Quaternary Geology of the Southwestern United States*, Geological Society of America, Special Paper, v. 203, p. 1-21.
- Monger, H.C., 2002, Pedogenic carbonates: links between biotic and abiotic CaCO_3 . Symposium No. 20, Paper No. 897. *Proceedings of the 17th World Congress in Soil Science*, August 2002, Thailand.
- Mook, W.G., Longsmas, J., 1987, Measurement of the N_2O corrections for $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of atmospheric CO_2 by removal of N_2O , *Tellus*, v. 39B, p. 96-99.
- National Research Council Committee on Basic Research Opportunities in the Earth Sciences, 2001. *Basic Research Opportunities in the Earth Sciences*. National Academies Press, Washington, D.C., 168 pp.
- Quiñones, H., 1975, Soil study área 4 Intrazonal soils of northern Yucatán Peninsula. En: L. de Pablo, editor, *Guidebook FT-4*, International Clay Conference, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, p. 70-93.
- Quiñones, H., Allende, R., 1974, Formation of the lithified carapace of calcareous nature which covers most of the Yucatan peninsula and its relation to the soils of the region, *Tropical Agronomy*, v. 51, p. 94–107.
- Sanborn, R.K., 1991, Petrography and Geochemistry of Calcrete Profile from the Northwestern Coast of the Yucatan Peninsula, Chuburna, Yucatan, Mexico. Master of Science Thesis. Department of Geology, Northern Illinois University, Illinois, 209 pp.

- Sattler, U., Immenhauser, A., Hillgartner, H. Esteban, M., 2005, Characterisation, lateral variability and lateral extent of discontinuity surfaces on a carbonate platform (Barremian to Lower Aptian, Oman), *Sedimentology*, v. 52, p. 339-361.
- Schinle, I., 1991, *Kaldynamik in den bodengesellschaften der halbinsel Yucatan (Mexiko)*. Doctoral thesis. Stuttgart University, Germany.
- Servicio Geológico Mexicano, 2006a. Carta Geológico-Minera Cancún F16-8 escala 1:250 000, Secretaría de Economía. Pachuca, México.
- Servicio Geológico Mexicano, 2006b. Carta Geológico-Minera Cozumel F16-11 escala 1:250 000, Secretaria de Economía. Pachuca, México.
- Socki, R.A., Gibson, E.K., Perry, E.C., Galindo, C., Golden, D. C., Ming, D. W., McKay, G.A., 2004, Stable isotope composition of carbonates formed in low-temperature terrestrial environments as Martian analogs. *Proceedings of Lunar and Planetary Science XXXV*.
- Sofer, Z., 1980, Preparation of carbon dioxide for stable carbon isotope analysis of petroleum fractions, *Analytical Chemistry*, v. 52, p. 1389-1391.
- Solleiro-Rebolledo, E., Terhorst, B., Cabadas-Báez, H. Sedov, S., Damm, B., Sponholz, B., Wiesbeck, C., 2015, Influence of Mayan land use on soils and pedosediments in karstic depressions in Yucatan, Mexico, En: B. Lucke, R. Baumler, M. Schmidt, editores, *Soils and sediments as archives of Environmental Change. Geoarchaeology and Landscape Change in the Subtropics and Tropics*, Fränkische Geographische Gesellschaft, Erlangen, p. 233-266.
- Stearns, H. T., 1974, Submerged shorelines in the Hawaiian Islands and a revision of some of the eustatic emerged shorelines, *Geological Society of America Bulletin*, v. 85, p. 795-804.
- Swart, P., 2015, The geochemistry of carbonate diagenesis: the past, present and future, *Sedimentology*, v. 62, p. 1233-1304.
- Tandon, S.K., Andrews, J.E., Sood, A., Mittal, S., 1998, Shrinkage and sediment supply control on multiple calcrete profile development: a case study from the Maastrichtian of central India, *Sedimentary Geology*, v. 119, p. 25-45.
- Verrecchia, E.P., Verrecchia, K.E., 1994, Needle-fiber calcite: a critical review and proposed classification, *Journal of Sedimentary Research*, v. 63, p. 1000-1006.
- Verrecchia, E.P., Freytet, P., Verrecchia, K.E. Dumont, J.L., 1995, Spherulites in calcrete laminar crusts: biogenic CaCO_3 precipitation as a major contributor to crust formation, *Journal of Sedimentary Research* v. A65, 690-700.
- Wang, Y., Nahon, D., Merino, E., 1994, Dynamic model of the genesis of calcretes replacing silicate rocks in semi-arid regions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, p. 5131-5145.
- Ward, W. C., 1985, Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula, En: W. C. Ward, A. E. Weidie and W. Back, editores, *Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of Northeastern Yucatan*, New Orleans Geological Society, p. 23-91.

- Warren, J.K., 1983, Pedogenic calcrete in Quaternary calcareous dunes in coastal Southern Australia, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 53, p. 787-796.
- Watts, N.L., 1978, Displacive calcite: Evidence from recent and ancient calcretes, *Geology*, v. 6, p. 699-703.
- Wright, V.P., 1989, Terrestrial stromatolites: a review, *Sedimentary Geology*, v. 65, p. 1-13.
- Wright, V. P., 1994, Paleosols in shallow marine carbonate sequences, *Earth-Science Reviews*, v. 35, p. 367-395.
- Wright, V.P., Alonso-Zarza, A.M., 1990, Pedostratigraphic models for alluvial fan deposits: a tool for interpreting ancient sequences, *Journal of the Geological Society of London*, v. 147, p. 8-10.
- Wright, V.P., Marriott, S.B., 1996, A quantitative approach to soil occurrence in alluvial deposits and its applications to the Old Red Sandstone of Britain, *Journal of the Geological Society London*, v. 153, p. 907-913.
- Wright, V.P., Tucker, M.E., 1991, Calcretes: an introduction. En: V.P. Wright, M.E. Tucker, editores, *Calcretes*, IAS Reprint Series, Vol.2. Blackwell Scientific Publication, Oxford, p. 1-22.
- Wright, V.P., Beck, V.H., Sanz-Montero, M.E., 1996, Spherulites in calcrete laminar crusts: biogenic CaCO_3 precipitation as a major contributor to crust formation. Discussion, *Journal of Sedimentary Research*, v. 66, p. 1040-1041.
- Wright, V.P., Platt, N.H., Marriott, S.B., Beck, V.H., 1995, A classification of rhizogenic (root-formed) calcretes, with examples from the Upper Jurassic-Lower Carboniferous of Spain and Upper Cretaceous of southern France. *Sedimentary Geology*, v. 100, p. 143-158.

Manuscrito recibido: 25 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 17 enero de 2017

Manuscrito aceptado: 20 enero de 2017