



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Catálogo de estructuras
sedimentarias primarias:
estructuras de deformación y
estructuras orgánicas**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Antonio González Velázquez

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

M.C. Noé Santillán Piña



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado CATALOGO DE ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS PRIMARIAS: ESTRUCTURAS DE DEFORMACION Y ESTRUCTURAS ORGANICAS, que presenté para obtener el título de INGENIERO GEÓLOGO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ANTONIO GONZALEZ VELAZQUEZ
Número de cuenta: 420053150

Índice

Resumen	4
1. Generalidades.....	6
Introducción	6
Objetivos	7
2. Estructuras sedimentarias primarias: Definición y Clasificación	8
3. Clasificación y descripción de las estructuras sedimentarias primarias de deformación y estructuras orgánicas	10
Estructuras de deformación	10
Estructuras orgánicas	15
4. Descripción de las estructuras sedimentarias primarias	17
4.1 Estructuras de deformación	17
Estructuras de carga (load structure)	17
Estructuras almohadilladas	20
Estructuras flamiformes (flame structure)	23
Laminación convoluta	26
Estructuras de inyección.....	29
Volcanes de arena y lodo.....	29
Estructuras de plato	34
Diques clásticos (filones clásticos)	37
Estructuras de deslizamiento (slumps)	40
Brechas intraformacionales.....	43
Cantos de arcillas armados	46
4.2 Organismos constructores de sedimento (condiciones de formación)	48
Estructuras de construcción	48
Estromatolitos	49
Carpetas de algas.....	53
Cuerpos arrecifales.....	56
Estructuras por actividad orgánica (bioturbación).....	59
Icnofósiles e Icnófacies (Características).....	59

Icnitas (huellas o pisadas)	67
Pistas y Galerías.....	69
Madrigueras (burrows).....	71
5. Conclusiones	73
6. Bibliografía	74

Resumen

En este estudio se presenta un catálogo de estructuras sedimentarias primarias diseñado como una herramienta didáctica para estudiantes y profesionales en sedimentología. El catálogo se centra en dos categorías fundamentales: las estructuras de deformación, formadas por procesos físicos como diferencias de densidad, carga sedimentaria, procesos gravitacionales y escape de fluidos; y las estructuras orgánicas, asociadas con la actividad de organismos constructores y rastros de organismos (icnofósiles).

El objetivo principal es facilitar la identificación, análisis e interpretación de estas estructuras en el contexto de los ambientes sedimentarios y sus procesos paleobiológicos. Para lograrlo, el catálogo integra: a) descripciones detalladas basadas en literatura especializada, b) imágenes y diagramas representativos que ilustran los mecanismos de formación y c) análisis de los ambientes sedimentarios asociados.

Este material sintetiza el conocimiento de diversos autores, ofreciendo una perspectiva amplia y confiable sobre las estructuras sedimentarias. Además, fomenta la conexión entre los conceptos teóricos y la evidencia geológica observable, fortaleciendo las habilidades de observación e interpretación en el trabajo de campo.

Abstract

This study presents a catalog of primary sedimentary structures designed as a didactic tool for students and professionals in sedimentology. The catalog focuses on two fundamental categories: deformation structures, formed by physical processes such as density differences, sediment loading, gravitational processes, and fluid escape; and organic structures, associated with the activity of builder organisms and traces of organisms (ichnofossils).

The primary objective is to facilitate the identification, analysis, and interpretation of these structures within the context of sedimentary environments and their taphonomic processes. To achieve this, the catalog integrates: a) detailed descriptions based on specialized literature, b) representative images and diagrams illustrating formation mechanisms and c) analyses of associated sedimentary environments.

This material synthesizes knowledge from various authors, offering a broad and reliable perspective on sedimentary structures. Additionally, it encourages the connection between theoretical concepts and observable geological evidence, enhancing observation and interpretation skills in fieldwork.

1. Generalidades

Introducción

El estudio de las estructuras sedimentarias primarias coadyuva a la comprensión del proceso sedimentario reciente, así como a la interpretación paleoambiental de secuencias sedimentarias antiguas. Las estructuras creadas durante la sedimentación, o las que se originan inmediatamente a su depósito, registran las interacciones del sedimento, los organismos y el ambiente deposicional, actuando como un agente natural para su preservación en la historia geológica.

Este catálogo se centra en dos categorías de estructuras sedimentarias esenciales: a) estructuras de deformación: originadas a partir de procesos físicos que presentan los sedimentos, ya sea por diferencia de densidad, carga de sedimentos, procesos gravitacionales y escape de fluidos y b) estructuras orgánicas: asociadas al desarrollo de organismos constructores, y como evidencia de la actividad de icnofósiles durante su interacción con el sedimento (organismos traza).

Junto con el conocimiento textural de los sedimentos, que aporta información sobre el ambiente y los mecanismos de transporte, es posible llevar a cabo el análisis paleoambiental y la interpretación de las secuencias sedimentarias, así como de los procesos paleobiológicos que se desarrollan en las estructuras sedimentarias a lo largo del tiempo. Por ello, resulta fundamental contar con material de referencia sintetizado sobre las estructuras sedimentarias primarias, de deformación y orgánicas.

Este catálogo está concebido como una herramienta de apoyo para los estudiantes interesados en la temática, al facilitar el análisis e identificación de las estructuras mediante información precisa y confiable. Reúne el conocimiento de diversos autores especializados en sedimentología y estratigrafía, integrando y contrastando diferentes perspectivas en el análisis y descripción de las estructuras sedimentarias primarias.

Objetivos

Objetivo general:

- Elaborar un catálogo de estructuras sedimentarias primarias, de deformación y orgánicas que funcione como material didáctico de apoyo en la docencia de las asignaturas de Sedimentología y Petrología Sedimentaria, así como en el trabajo geológico de campo. Además, que sirva como guía para la identificación de ambientes sedimentarios en campo.

Objetivos específicos:

- Exponer, con base en diversas fuentes, los principales procesos que intervienen en la formación de las estructuras sedimentarias primarias, de deformación y orgánicas, junto con las inferencias e interpretaciones de campo que éstas pueden aportar.
- Representar y explicar esquemáticamente cómo se forman las estructuras sedimentarias de deformación y orgánicas, identificando los ambientes sedimentarios más comunes donde suelen formarse.

2. Estructuras sedimentarias primarias: Definición y Clasificación

Las estructuras sedimentarias son una variedad de arreglos o geometrías presentes en las rocas sedimentarias que pueden revelar detalles específicos sobre la energía del medio, la dirección y el sentido del flujo, así como la evidencia de la presencia de organismos, ya sea por su crecimiento o actividad orgánica.

De acuerdo con Collinson y Mountney (2019), las estructuras sedimentarias “se generan a partir de materiales de diversas composiciones y son visiblemente producto de procesos físicos, químicos y biológicos”. Las estructuras formadas por procesos físicos involucran corrientes de aire o agua, el hundimiento por carga sobreyacente (el efecto de la gravedad sobre los sedimentos) y la deformación de estos. Por otro lado, las estructuras resultantes de procesos biológicos son originadas por el crecimiento o actividad de organismos que perforan o se desplaza sobre los sedimentos. Finalmente, las estructuras formadas por procesos químicos son las que se originan durante el enterramiento y la diagénesis.

Boggs (2009) establece que las estructuras sedimentarias se clasifican de acuerdo con su función de origen, morfología y descripción. Según su función de origen, estas estructuras se subdividen en dos categorías: estructuras primarias (singenéticas) y estructuras secundarias.

De acuerdo con Boggs (2009), las estructuras secundarias “son formadas por precipitación de sustancias y minerales en los poros de las rocas sedimentarias consolidadas, semiconsolidadas o por procesos de sustitución química”.

En cuanto a las estructuras sedimentarias primarias, su formación puede deberse a la combinación de varios procesos, lo que hace poco probable que un solo proceso genere la estructura. Este trabajo se enfoca en aquellas estructuras generadas por la deformación de sedimentos por materia blanda (sedimento no consolidado), así como aquellas estructuras generadas por actividad orgánica.

Para Pettijohn y Potter (1964), una estructura sedimentaria primaria es aquellas que “se ha originado en el momento de la sedimentación o muy poco tiempo antes o después de la consolidación del sedimento”.

Muchos de los autores concuerdan en que no existe una clasificación que sea estandarizada y que sea adecuada para todas las estructuras sedimentarias. Sin embargo, concuerdan en que las estructuras primarias son los resultados principales que se manifiestan en las rocas sedimentarias y pueden ocurrir en casi cualquier litología. Además, estas

estructuras están relacionadas con la estratificación, su continuidad y uniformidad, ordenamiento, marcas en planos y todas aquellas estructuras que se originan por la deformación de los sedimentos, así como por la actividad realizada por organismos.

3. Clasificación y descripción de las estructuras sedimentarias primarias de deformación y estructuras orgánicas

Si bien, de manera general, podemos afirmar que las estructuras sedimentarias primarias reflejan los procesos sedimentarios, bien sea de transporte o condiciones de depósito, cada uno de los grupos genéticos descritos en este trabajo proporciona información valiosa respecto a la roca sedimentaria que le contiene.

En el caso de las estructuras de deformación, su presencia nos puede permitir inferir condiciones hidrodinámicas del medio sedimentario, la orientación de la paleopendiente sobre la que se encontraba los materiales deformados y la presencia de los fluidos que tienden a escapar o movilizarse dentro de una secuencia, favoreciendo la licuefacción y/o fluidificación de los sedimentos no consolidados.

No obstante, la interpretación genética de estas estructuras ha sido objeto de debate. Históricamente se agruparon bajo el término "sismitas", al considerarse evidencia directa de actividad sísmica. Sin embargo, este enfoque ha sido cuestionado. Shanmugam (2016) advierte que el uso del término es sedimentológicamente inadecuado, ya que presupone un origen sísmico exclusivo que rara vez puede demostrarse en sedimentos blandos. Por ello, la interpretación debe centrarse en los procesos físicos involucrados.

Por su parte, la presencia de estructuras orgánicas dentro de una unidad de roca nos será de utilidad para inferir ciertas condiciones paleoambientales del depósito, como la salinidad, tasa de sedimentación, temperatura y nivel de energía del medio.

Estructuras de deformación

Las estructuras de deformación son estructuras características de ambientes sedimentarios no tectónicos y ambientes sedimentarios no consolidados o parcialmente consolidados que se forman debido a la deformación física de los sedimentos antes de que se litifiquen. Allen (1982) dice que "la mayoría, y posiblemente toda, la deformación de los sedimentos blandos está asociada en el tiempo con las primeras etapas de consolidación del sedimento, cuando el depósito es más débil y el fluido de los poros se expulsa más rápidamente".

Durante la etapa de génesis, estas estructuras se crean a menudo debido a: a) diferencia de densidad, b) carga de sedimentos, c) procesos gravitacionales y d) escape de fluidos, asociado a la fluidificación o licuefacción de los materiales, durante la compactación.

a) Diferencia de densidad

El depósito de un sedimento de mayor densidad, como la arena, sobre partículas de menor densidad, como las arcillas o limos, genera presión e inestabilidad en los sedimentos, favoreciendo la movilidad de la unidad inferior menos densa, hacia zonas de menor presión, ubicadas hacia la parte superior, generando la estructura sedimentaria correspondiente (Figura 1).

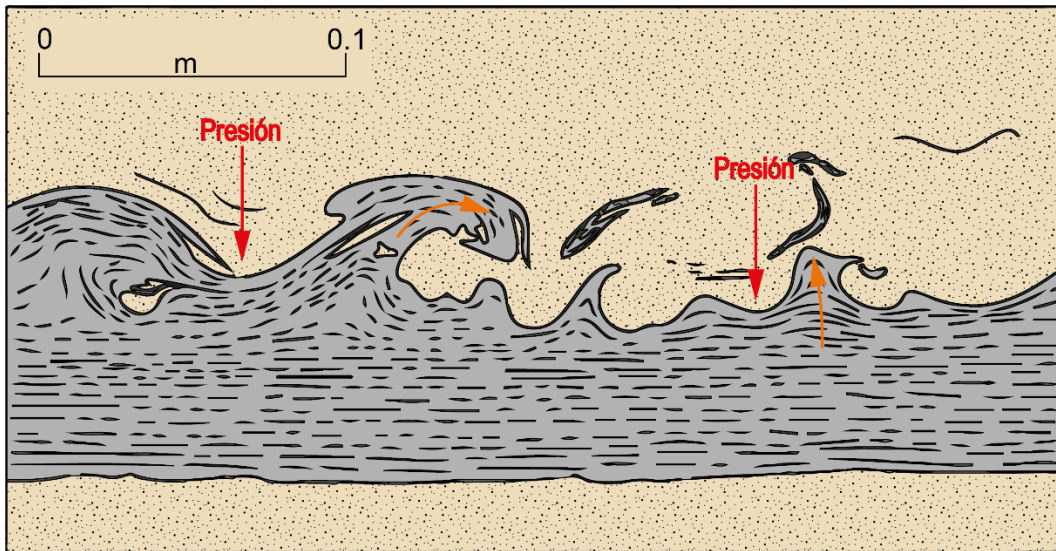


Figura 1. Estructura de flamas resultantes de la carga de sedimentos de un lecho de arena volcanogenética sobre una unidad de arcilla no litificada (adaptada de Collinson y Mountney, 2019).

b) Carga de sedimentos

La carga de sedimentos es producto de la sedimentación rápida de una gran cantidad de sedimentos sobre una capa subyacente. Dicha acción genera una presión sobre los sustratos inferiores, provocando inestabilidad y el desarrollo de la estructura sedimentaria correspondiente.

Este proceso puede presentarse si se deposita un sedimento arenoso (más denso), sobre uno limo-arcilla de menor densidad, en donde la arena tenderá a encajarse sobre la unidad inferior, debido a la presión ejercida, mientras que el menos denso tendrá a absorber la presión, deformándose (Figura 2).

Shanmugam (2016) destaca que, con base en evidencia empírica global, la carga de sedimentos constituye el mecanismo más común para la formación de estructuras de deformación de sedimento blando, superando en frecuencia a los sismos como agente desencadenante. Esta observación es crucial para evitar interpretaciones que asumen actividad sísmica sin demostrarla.

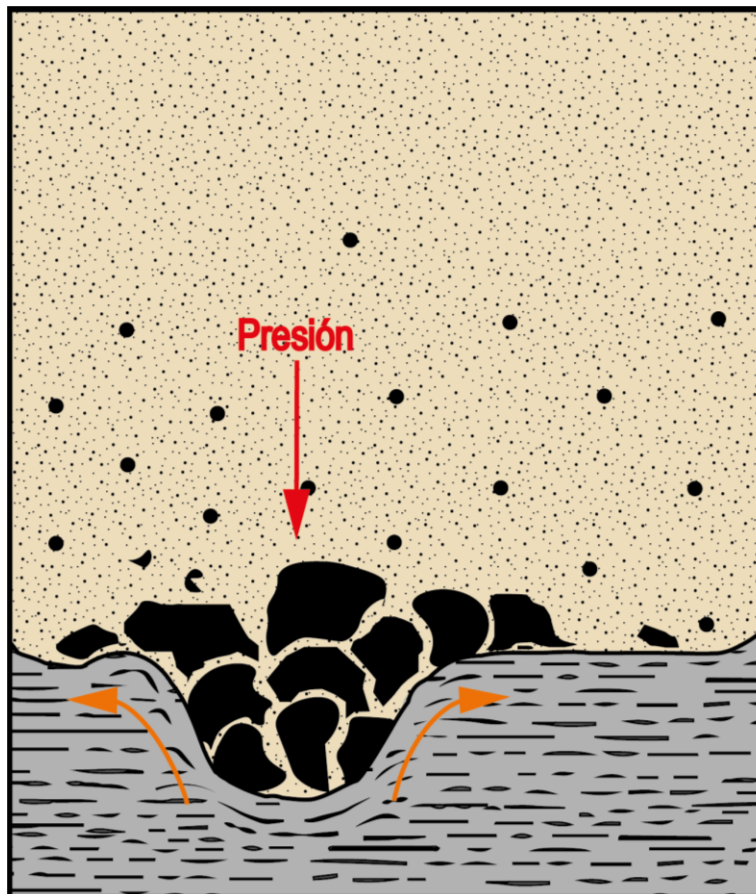


Figura 2. Estructura de carga resultante de la sedimentación rápida de una gran cantidad de sedimentos sobre una capa subyacente.

c) Procesos gravitacionales

Los procesos gravitacionales involucran el movimiento del sedimento por causa de la fuerza de gravedad. Cuando la componente de gravedad excede o es mayor a la componente de resistencia a la fricción del sedimento puede provocar un flujo de deslizamiento propiciando la formación de estructuras como los slumps (Figura 3).

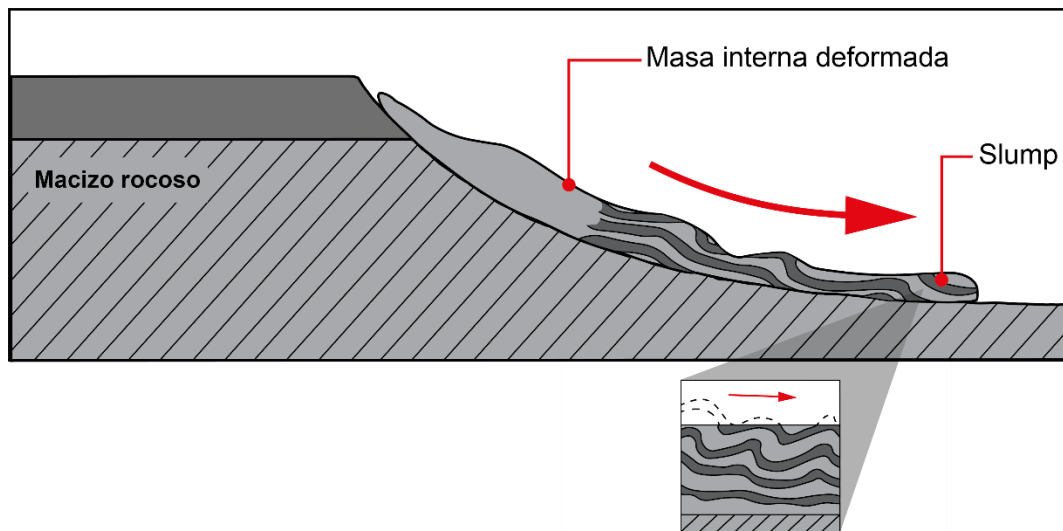


Figura 3. Estructura resultante de los procesos gravitacionales con el flujo de un slump en una pendiente (tomada y adaptada de Nichols, 2009).

d) Escape de fluidos

El escape de fluidos en la formación de las estructuras sedimentarias se encuentra ligada a la fluidización y licuefacción del sedimento.

La fluidificación se presenta cuando un fluido vertical actúa sobre un agregado granular, ejerciendo la suficiente presión sobre éste, ocasionando que los granos queden suspendidos momentáneamente contra la fuerza de gravedad. Mientras que la licuefacción ocurre cuando un sedimento poco consolidado presenta un colapso en la estructura granular por la pérdida de resistencia al corte y un aumento repentino a la presión debida a la presión del fluido (Lowe, 1975).

En la figura 4A se representa de manera esquemática una matriz de granos heterogéneos junto con partículas de agua. La matriz de granos al no estar saturada en agua mantendrá un equilibrio y la cohesión entre granos será estable. Por otro lado, en la figura 4B la matriz de granos se

encuentra saturada por agua, por lo cual la matriz ha perdido el equilibrio, colapsando por causa de la licuefacción y los granos empiezan a fluidificarse por la presión de poro.

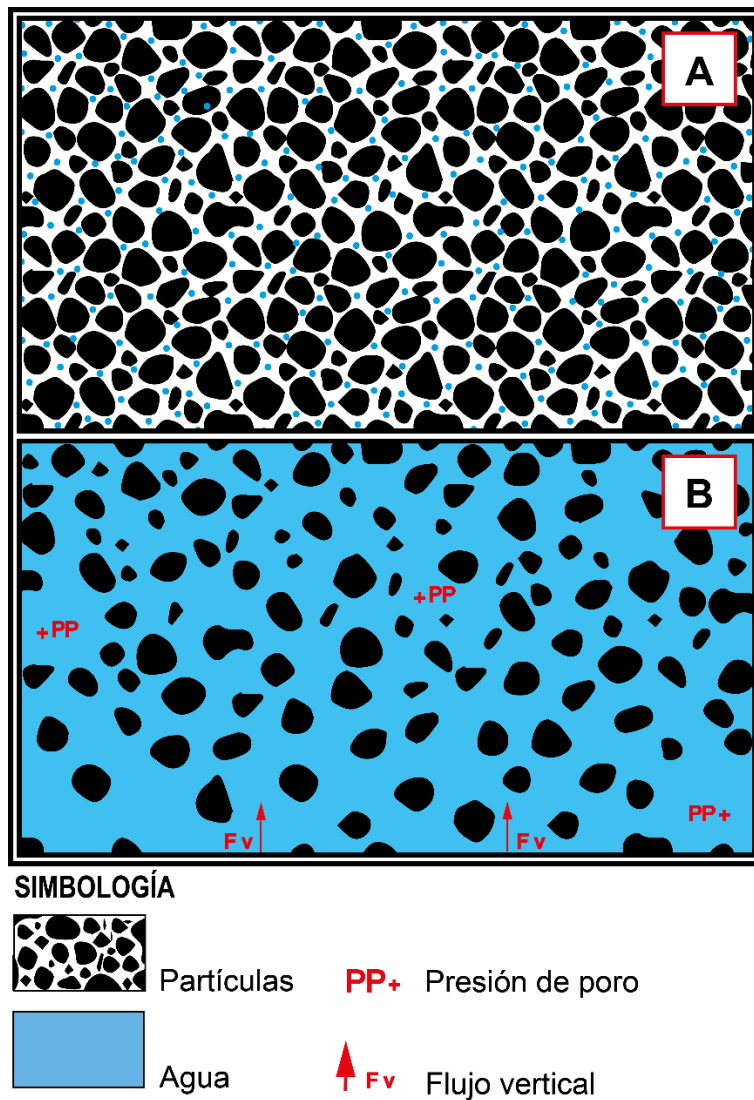


Figura 4A y 4B. Esquema representativo de escape de fluidos.

Estructuras orgánicas

Las estructuras orgánicas son aquellas estructuras que se forman como resultado directo de la actividad de organismos, como plantas y animales. En términos generales, pueden englobar cualquier estructura que se encuentre relacionada directamente con la actividad de organismos, tanto antes como después de su depósito. Tucker (2003) menciona que las estructuras orgánicas “varían considerablemente su tamaño, desde definidas y vagas hasta presentar un arreglo organizado”, donde dependiendo su origen se le puede dar un nombre en específico.

De acuerdo con Bromley (1996), durante la etapa de génesis las estructuras orgánicas se crean a menudo debido a: a) preservación en entornos reductores, b) mineralización y c) condiciones.

a) Preservación en entornos reductores

En medios reductores (anóxicos) la preservación de estructuras orgánicas es posible debido a la ausencia o el bajo nivel de oxígeno, lo que tiene como implicación la preservación de los restos de organismos.

La reducción de oxígeno ralentiza la actividad de organismos descomponedores y reduce los procesos de oxidación, promoviendo la preservación de materia orgánica.

b) Mineralización

Durante la mineralización las estructuras orgánicas son reemplazadas por diversos minerales, implicando procesos como la advección y la difusión de fluidos. Durante el transporte de advección se transportan de manera homogénea elementos y fluidos producto de organismos excavadores que alteran o alteraban en gran medida los gradientes químicos. De acuerdo con Aller y Yingst (1978, como se citó en Bromley, 1996), el silicio, hierro, manganeso y zinc son algunos de los elementos movilizados por transporte advectivo. Por su parte, durante la difusión los fluidos enriquecidos en iones reemplazan a la materia orgánica permitiendo la mineralización y preservación de la estructura orgánica.

c) Condiciones

Si bien, la preservación de las estructuras orgánicas depende de la mineralización, éstas no están exentas de procesos, como: a) tasas de sedimentación, en donde si ésta es rápida puede aumentar la probabilidad de preservación de la estructura, b) composición del sedimento, siendo

los limos y las arcillas los sedimentos que presentan mayor homogenización de compactación y preservación de estructuras y c) condiciones químicas del ambiente, las cuales dependen de cada tipo de ambiente y de cada especie. Bromley (1996) menciona que el proceso de "reelaboración orgánica de sedimentos rara vez se produce por una sola especie en solitario. Más a menudo, una comunidad subdivide el hábitat en muchos nichos ecológicos, cada uno de ellos ocupado por especies especializadas en un modo de vida particular", por tanto, las condiciones químicas y la estructura del sedimento se vuelven variables.

4. Descripción de las estructuras sedimentarias primarias

4.1 Estructura de deformación

Basándose en la clasificación de Collinson y Mountney (2019), dentro de las estructuras de deformación pueden encontrarse las siguientes:

- Estructuras de carga (load structure)
- Estructuras almohadilladas
- Estructuras flamiformes (flame structure)
- Laminación convoluta
- Estructuras de inyección
- Estructuras de deslizamiento (slumps)
- Brechas intraformacionales
- Cantos de arcillas armados

Dentro del grupo de las estructuras de carga, de acuerdo con Gough (2021), las estructuras de carga son estructuras posdeposicionales que suelen presentar una similitud en sus procesos de formación, procesos físicos y mecánicos, además de ocurrir en una gran variedad de ambientes sedimentarios.

I. Nombre de la estructura: Estructuras o moldes de carga (load structure)

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

Se presenta en forma de bultos redondeados, de tamaño y dimensiones variables, donde “los ejemplares pequeños se miden en milímetros y los grandes pueden tener decenas de centímetros o incluso metros de diámetro. Rara vez ocurren de forma aislada y generalmente cubren grandes áreas del estrato” (Collinson y Mountney 2019).

Kuenen (1957) las describe como “hinchazones en forma de ligeras protuberancias, sacos profundos o redondeados, excrecencias protuberantes o protuberancias muy irregulares” (Figura 5A y 5B).

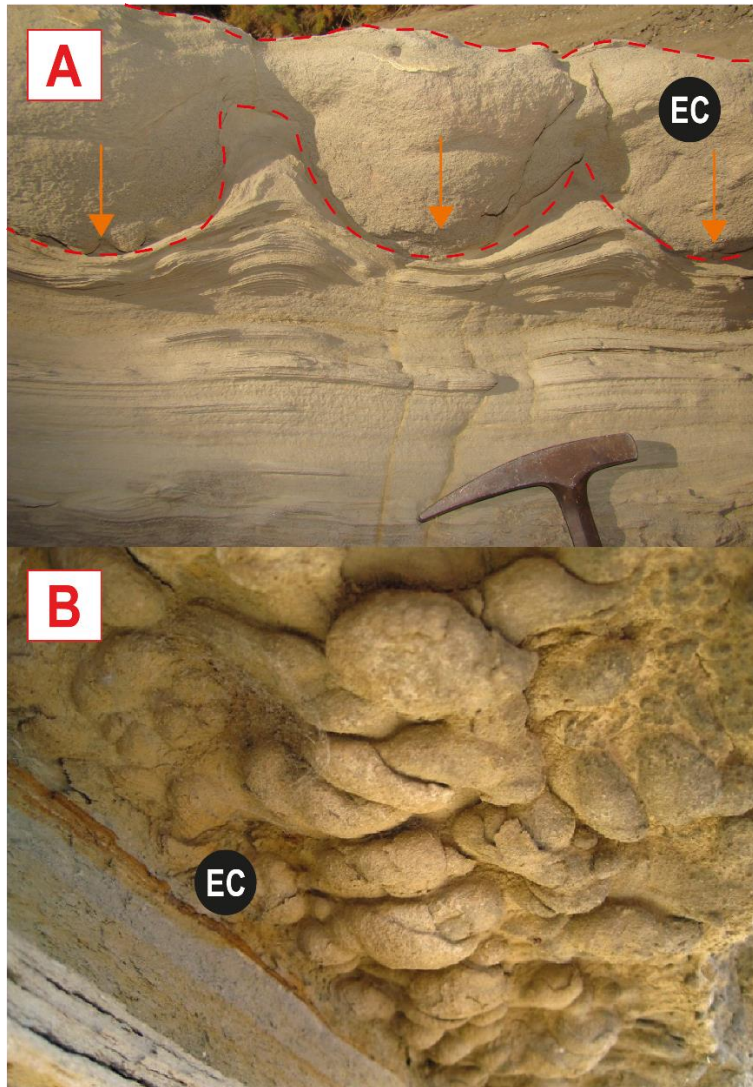


Figura 5. Estructuras de carga (EC) vistas desde sección transversal (5A) en la Rambla de Tabernas (Almería, España) y desde bajo de un lecho de arenas (5B) en La Malahá, Granada, España. (tomadas y adaptadas de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

IV. Formación de la estructura

De acuerdo con Collinson y Mountney (2019), los moldes de carga son formaciones resultantes de la gravedad que actúa sobre los lechos inestables debido a la falta de compactación, baja cohesión, alta porosidad y diferencias de densidades entre los sedimentos.

En la estratificación inicial, los sedimentos se depositan en capas horizontales compuesta por sedimentos más fino y de menor densidad, generalmente limos y arcillas, subyacente a una capa de sedimentos más

gruesos y de mayor densidad (capa suprayacente), compuesta generalmente por arenas.

La carga generada por la capa superior ejerce presión sobre la capa inferior, lo que provoca inestabilidad. Como resultado de esta presión y de la inestabilidad, el sedimento más fino es empujado hacia arriba mientras que el más grueso se hunde, creando así la estructura o molde de carga (Figura 6).

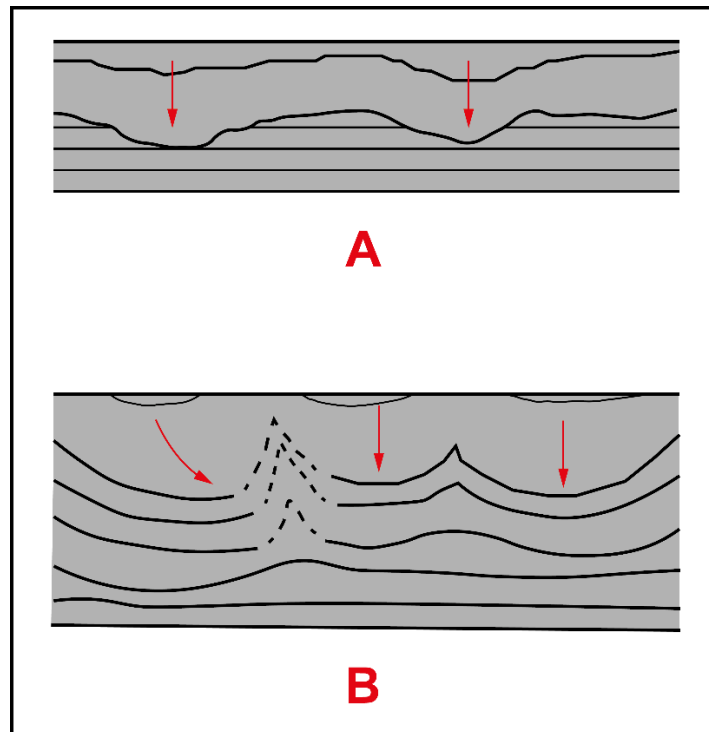


Figura 6. Moldes de carga, donde las estructuras se van formando de la secuencia A a la secuencia B (tomada y adaptada de Tucker, 2003).

V. Ambiente sedimentario

Allen (1982) cita que estas estructuras aparecen en ambientes fluviales, deltaicos, depósitos marinos poco profundos (siendo más comunes en turbiditas) y en ambientes de alta energía. También suelen aparecer en depósitos de sedimentos lacustres y sucesiones piroclásticas.

VI. Inferencias en campo

Los moldes de carga pueden registrar eventos de inestabilidad sedimentaria, proporcionando información sobre la sedimentación y los cambios en las condiciones durante su formación. Además, gracias a su geometría (cóncava hacia arriba), nos permite establecer la polaridad de la secuencia.

I. Nombre de la estructura: Estructuras almohadilladas

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

Se presentan con formas variables; redondeadas o globulares, similar a las almohadillas de lava, pero formadas por la inestabilidad de los sedimentos y no por enfriamiento de magma. El tamaño suele variar desde algunos centímetros hasta una decena de metros.

Allen (1982) cita que son masas de arena de varios tamaños empaquetadas vertical y horizontalmente. Las más grandes las describe como cojines o almohadillas y rollos, mientras que las más pequeñas las describe como bolas. (Figura 7).

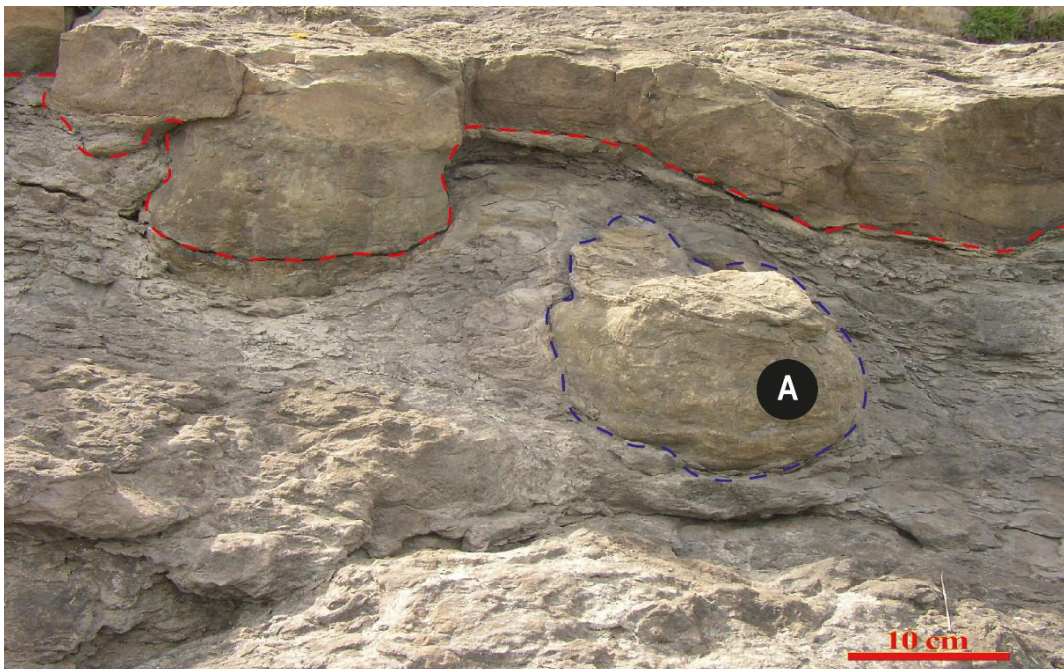


Figura 7. Estructura almohadillada (A) de Faro de Tazones, Asturias, España (tomada y adaptadas de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

IV. Formación de la estructura

De acuerdo con Allen (1982), las estructuras almohadilladas son formaciones producto de la gravedad que actúa sobre los lechos inestables debido a la falta de compactación, diferencia de densidades entre los lechos y los principales movimientos verticales, donde Petijhon

y Potter (1964) atribuyen los movimientos principales de formación de estas estructuras a un reordenamiento mecánico generado por el asentamiento y las diferencias de densidades entre los lechos.

Para Ponce et al. (2018), las estructuras almohadilladas presentan una formación similar a las estructuras de carga, pero se diferencian en que las primeras presentan una ruptura de la estructura respecto al estrato que las contiene, además de estar compuestas por arenas medianas a gruesas (Figura 7).

Durante el depósito, el sedimento de mayor densidad y más grueso (arenas) ejerce presión sobre el sedimento más fino (limo-arcillosos) volviéndose inestable. Debido a la diferencia de densidades y a la presión, el sedimento más denso se hundirá sobre el sedimento más fino. Finalmente, cuando se exceda la resistencia al corte o la componente de la resistencia sea mayor que la resistencia de los sedimentos, se desprenderá la masa del estrato que la contiene, creando la estructura almohadillada (Figura 8).

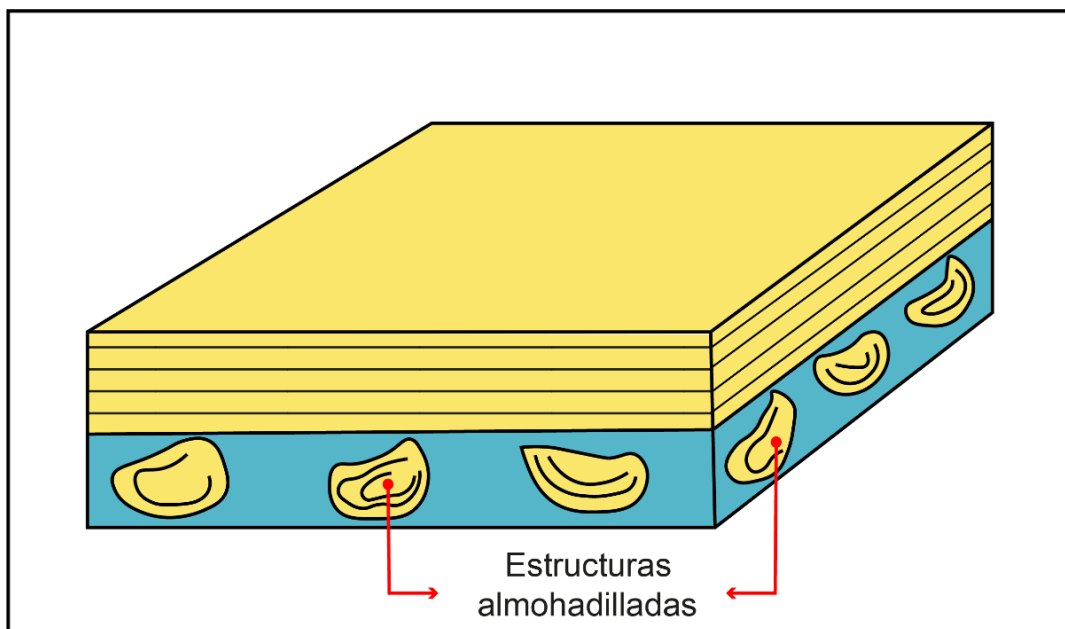


Figura 8. Estructuras de almohadilla producto de la ruptura de los estratos, donde el sedimento azul-verde es de grano más fino y "fluidizado". (tomada y adaptada de Ponce et al., 2018).

V. Ambiente sedimentario

Petijhon y Potter (1964) mencionan que, aunque las estructuras presentan un proceso de formación similar a los moldes de carga, estas presentan una distribución ambiental diferente, originándose en ambientes marinos lacustres y deltaicos. También pueden presentarse en ambientes carbonatados entre calizas y lutitas calcáreas.

VI. Inferencias en campo

Las estructuras almohadilladas proporcionan información sobre las condiciones ambientales y dinámicas de sedimentación del pasado, que al igual de las estructuras de carga, “sirven como criterios de polaridad” (Ponce et al., 2018), en la cual las características de la estructura permiten determinar su lado inferior y superior, antes de desprenderse del estrato que la contenía, además de identificar la base o la cima del sedimento.

I. Nombre de la estructura: Estructura flamiforme (flame structure)

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

Se presentan comúnmente en areniscas en forma de llamas o flamas, con forma ondulada o espiral (Figura 9), cuyas crestas apuntan hacia la capa suprayacente (hacia arriba). Pueden variar en tamaño desde milímetros hasta decenas de centímetros, aunque, por lo general, las crestas suelen presentar la misma dirección.

Collinson y Mountney (2019) las definen como “llamas o cuñas que apuntan hacia arriba sobre la unidad que la suprayace y sobre de la que la subyace, revistiendo a las estructuras de carga”.

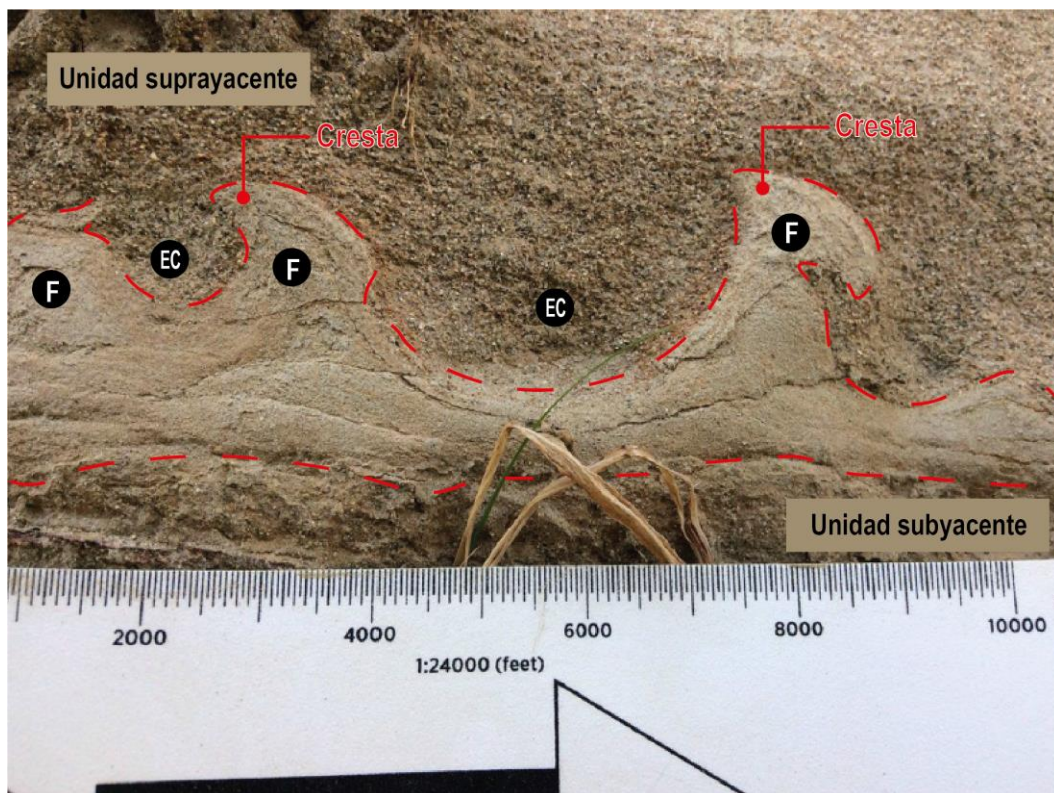


Figura 9. Estructuras flamiformes (F) que se extienden hacia arriba acompañadas de estructuras de carga (EC) de los depósitos fluviales de la Formación Irrawaddy del Pleistoceno, cerca de Minbu, Myanmar (tomada y adaptada de Gough, 2021).

IV. Formación de la estructura

Las estructuras flamiformes son formaciones producto de la gravedad, la diferencia de densidades y “la carga de un sedimento de mayor densidad sobre un sedimento subyacente no litificado” (Gough 2021).

De acuerdo con Tucker (2003) y Stow (2005), mencionan que la formación de estas estructuras se encuentra compuesta por sedimentos de menor densidad (limo-arcillosos) y sedimentos de mayor densidad (arenas) que, durante la sedimentación, la capa suprayacente (sedimento más denso) ejerce presión sobre la capa subyacente (sedimento menos denso) promoviendo el proceso de la licuefacción y por consiguiente provocando la pérdida de estabilidad entre sedimentos. Posteriormente, en la capa subyacente, el sedimento con menor densidad comienza a deformarse y a migrar hacia arriba por causa de la fluidización. Finalmente, el sedimento menos denso es forzado a ascender en forma de llamas o cuñas, dentro del sedimento suprayacente generando una deformación plástica (Figura 10).

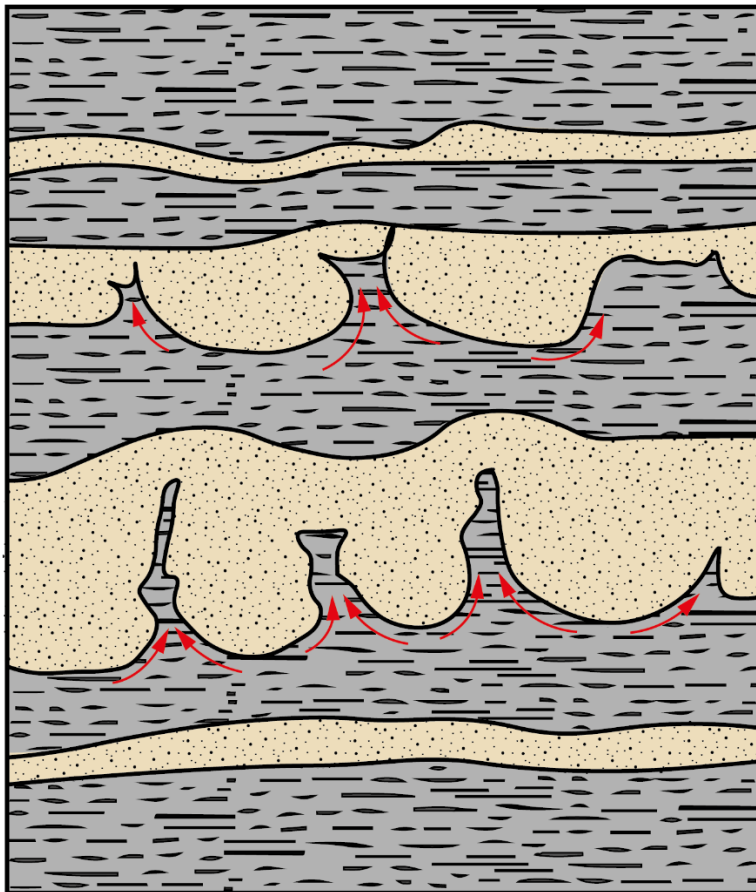


Figura 10. Estructuras flamiformes (tomada y adaptada de Innovative, Earth-related teaching ideas, 2014).

Collinson y Mountney (2019) mencionan que, aunque las estructuras flamiformes ocurren más comúnmente en las superficies inferiores de la arenisca intercaladas con lutitas, rara vez ocurren de forma aislada y son un acompañamiento inevitable de las estructuras de molde de carga (Figura 11).



Figura 11. Estructura flamiforme (F) acompañada de moldes de carga (L) del Mioceno, cuenca de Miura, centro-sur de Japón (tomada de Stow, 2005).

V. Ambiente sedimentario

Al igual que los moldes de carga, Allen (1982) cita que estas estructuras aparecen en ambientes fluviales, ambientes deltaicos, depósitos marinos poco profundos (siendo más comunes en turbiditas) y de alta energía. También, suelen aparecer en depósitos de sedimentos lacustres y sucesiones piroclásticas.

VI. Inferencias en campo

Con base en su geometría se pueden establecer las condiciones de paleoflujo y polaridad de la secuencia, además de que la presencia de las estructuras, nos permiten identificar eventos de inestabilidad sedimentaria proporcionando información sobre la sedimentación y los cambios en las condiciones durante su formación.

I. Nombre de la estructura: Laminación convoluta

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

De acuerdo con Dott y Howard (1962), la laminación convoluta se presenta como un conjunto de láminas onduladas o contorsionadas, "acompañada de pequeños anticlinales y sinclinales agudos" (Tucker, 2003). El tamaño suele variar, "donde los sinclinales más amplios presentan longitudes de onda de unos pocos centímetros a decímetros" (Leeder, 1982) (Figura 12).

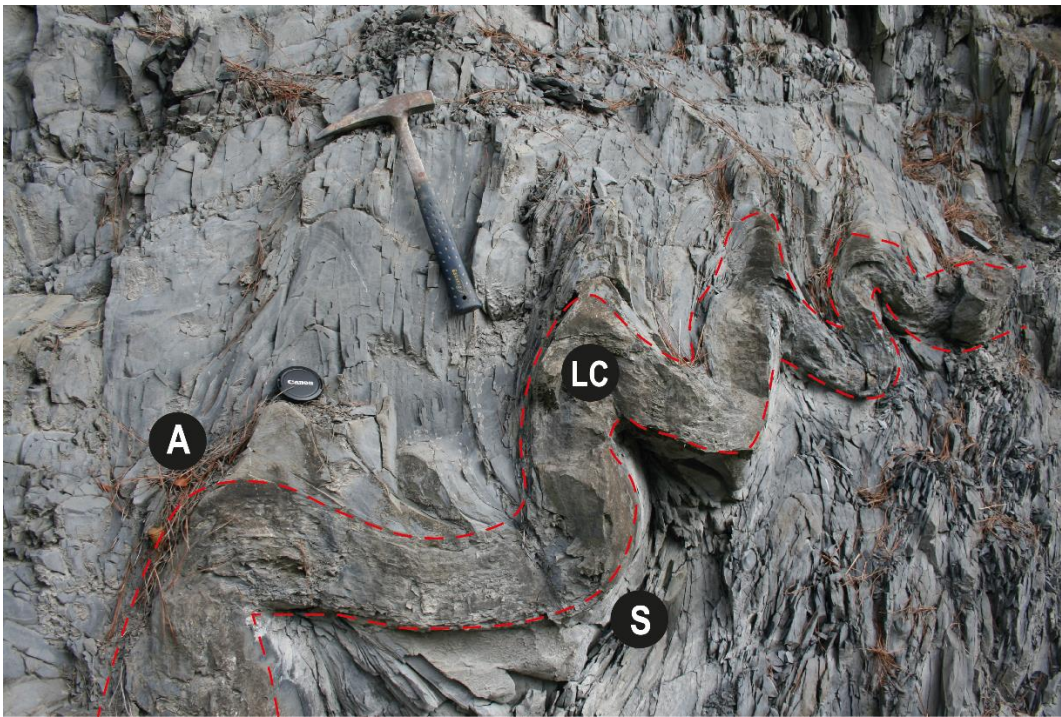


Figura 12. Laminación convoluta (LC) con anticlinales (A) y sinclinales (S) marcados (tomada y adaptadas de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

Boggs (2009) las describe como capas delgadas o laminaciones complejamente intercaladas que suelen estar confinadas dentro de una sola unidad de sedimentación, donde, los estratos que se encuentran por encima y por debajo de esta unidad pueden mostrar evidencias de deformación.

En adición, la laminación convoluta puede estar truncada por superficies erosivas (Figura 12) o por la superficie de estratificación superior (Figura

13). Sin embargo, por lo general, se pueden observar con un carácter de pliegue.

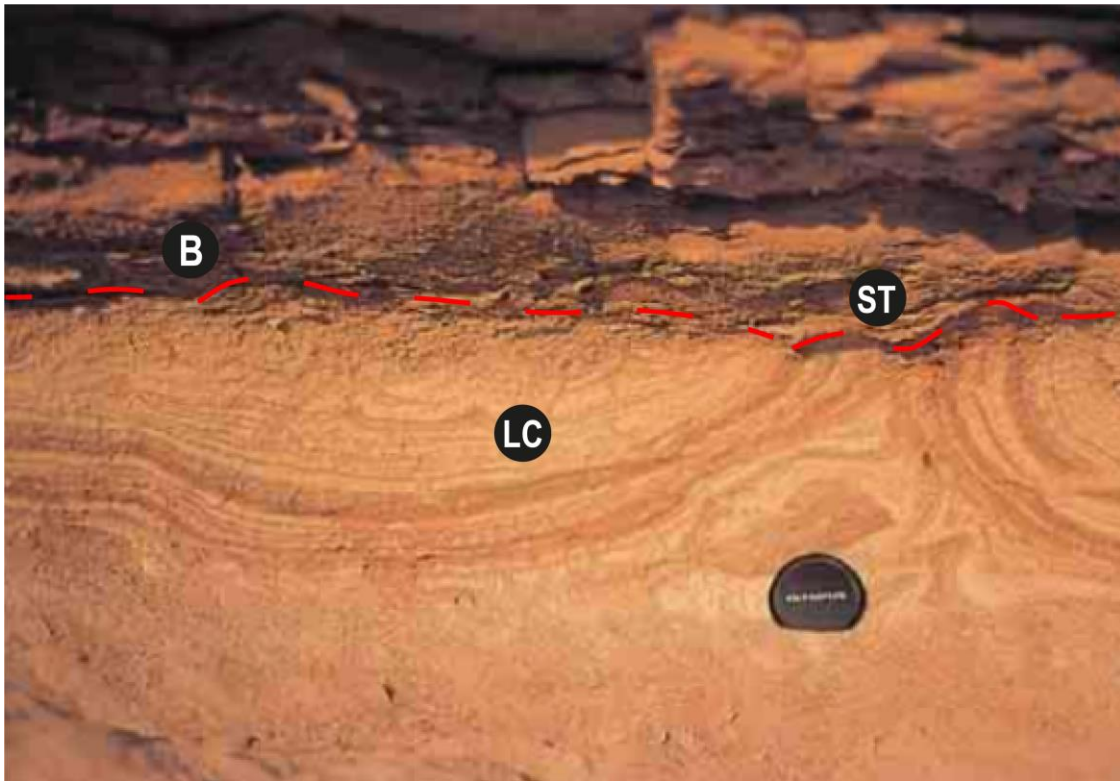


Figura 13. Laminación convoluta (LC) acompañada por una superficie de truncamiento (ST) generada por la superficie de estratificación (B) en la parte superior de un lecho de turbiditas de arenisca. Tapa de lente 6 cm.

Paleógeno, sur de California, EE. UU. (tomada y adaptada de Stow, 2005).

IV. Formación de la estructura

La laminación convoluta es una formación producto de la gravedad y del escape de fluidos, que incluye procesos de fluidificación y licuefacción en las arenas y arcillas. Estos procesos causan cizallamiento sobre el sedimento no litificado.

De acuerdo con Allen (1982), la laminación convoluta presenta tres etapas de formación: a) postdeposicional: la estructura se genera en un tiempo después del inicio del enterramiento (Figura 14A), b) metadeposicional: la estructura se genera justo antes o inmediatamente a la laminación (Figura 14B) y c) sindeposicional: la estructura se genera de manera episódica o continuamente durante el depósito de sedimento (Figura 14C).

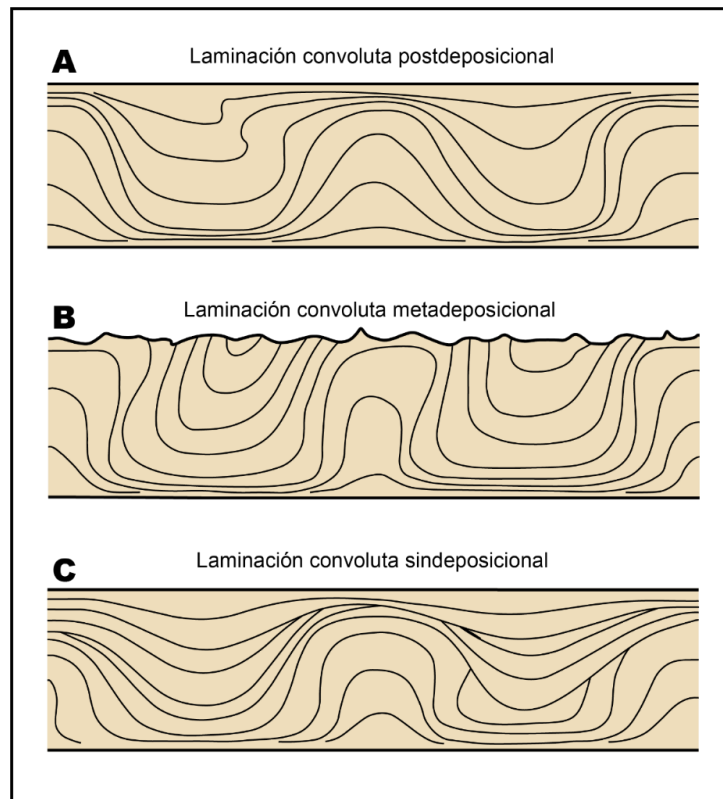


Figura 14 A, B y C. Tipos de laminación convoluta (tomada y adaptada de Collinson y Mountney, 2019).

V. Ambiente sedimentario

De acuerdo con Boggs (2009), el origen de estas estructuras no se entiende por completo, pero suelen ocurrir en ambientes fluviales (como pueden ser las barras de punto (point bar)), deltaicos y eólicos, aparecen particularmente en turbiditas.

Dott y Howard (1962) indican que estas estructuras son evidencias de sedimentación de corriente de turbidez, ya que se han observado repetidamente en secuencias caracterizadas por estratificaciones gradadas, lo que permite asociarlas a ambientes fluviales y de abanico profundo.

VI. Inferencias en campo

La presencia de laminación convoluta puede indicar condiciones de sedimentación turbulenta o cambios de energía en el ambiente de depósito. Además, su geometría nos permite establecer la dirección de las paleocorrientes, ya que las láminas onduladas o contorsionadas pueden ser analizadas para inferir la dirección de la corriente en el momento de su formación.

Nombre de la estructura: Estructuras de inyección

I. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

II. Descripción

Son aquellas estructuras que se forman cuando los sedimentos presentan condiciones de fluidización y licuefacción. Bajo tales condiciones la arena y el lodo “adquieren un estado por el cual se comportan como un líquido viscoso, pudiendo así ser inyectados” (Petijhon y Potter, 1964) a través de las grietas y las fisuras de sedimentos más consolidados.

Dentro del grupo de las estructuras de inyección, de acuerdo con autores como Pettijohn y Potter (1964), Gough (2021) y Ponce et al, (2018) podemos encontrar las siguientes:

- Volcanes de arena y lodo.
- Estructuras de plato.
- Diques clásticos.

➤ **Volcanes de arena**

Los volcanes de arena suelen presentar una geometría cónica o de domo, con una depresión central en forma de cráter (Figura 15B). Además, suelen tener extremos redondeados y lóbulos de arena radiales que indican la dirección de flujo (Figura 15A). El tamaño suele variar en decenas de centímetros a metros de diámetros, pero de acuerdo con Collinson y Mountney (2019), estos pueden alcanzar diámetros que varía entre 10 cm y varios metros, con una altura de hasta 50 cm.

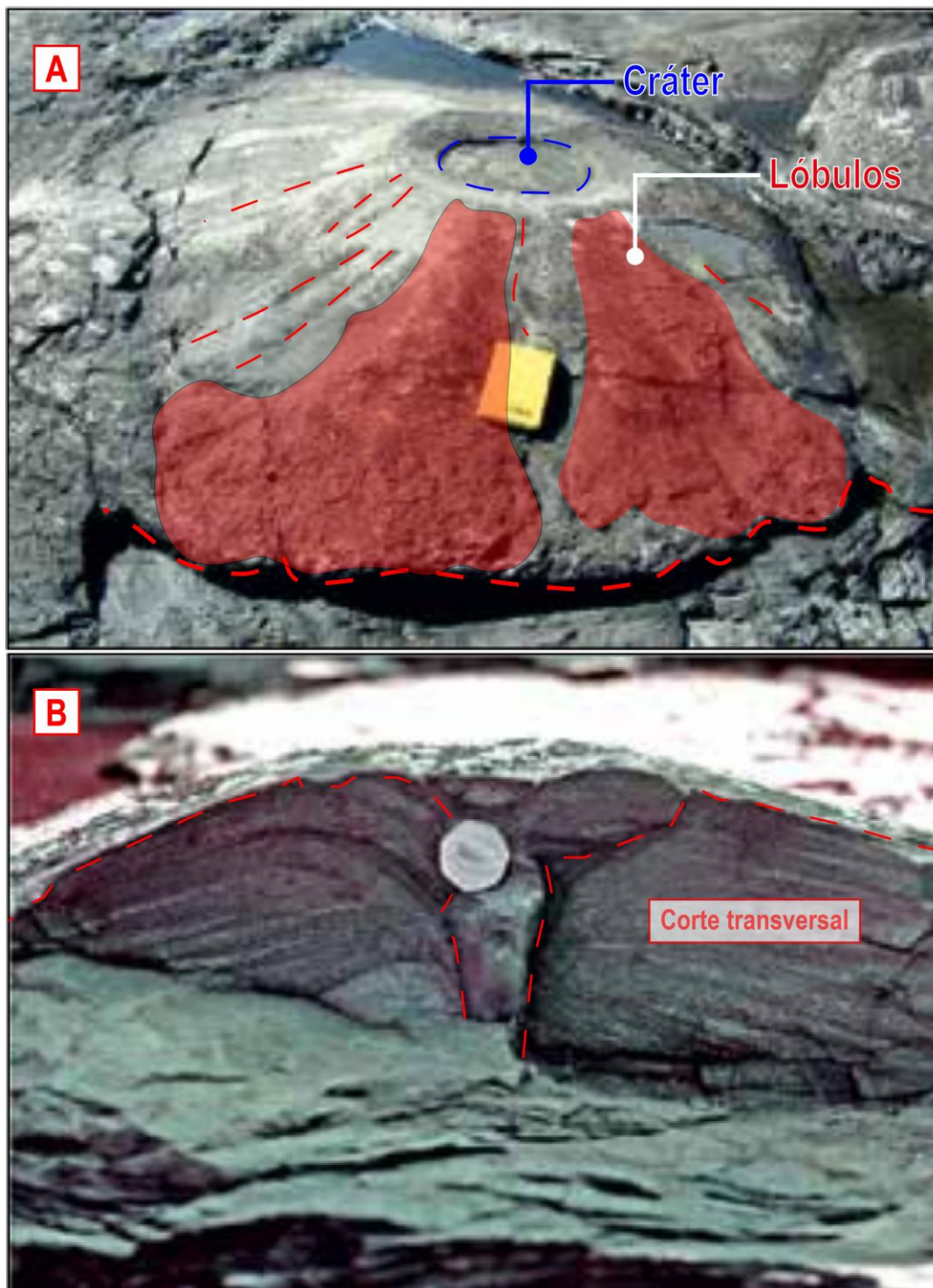


Figura 15 A y B. Volcanes de arena de distintos tamaños en las superficies superiores de lechos de arenisca de la Formación Ross, Carbonífero Superior, Condado de Clare, Irlanda Occidental (tomada y adaptada de Collinson y Mountney, 2019).

➤ Volcanes de lodo

A diferencia de los volcanes de arena, los volcanes de lodo suelen presentar dimensiones variables y no cuentan con lóbulos. En su lugar, suelen estar asociados con grietas de desecación y extremos difuminados, pero suelen conservar una geometría cónica o domos con una depresión central en forma de cráter (Figura 16).

Collinson y Mountney (2019), los describe como estructuras relativamente raras y efímeras, con un potencial muy bajo de incorporación al registro rocoso, ya que, al estar formados por lodo suelen erosionarse con facilidad.

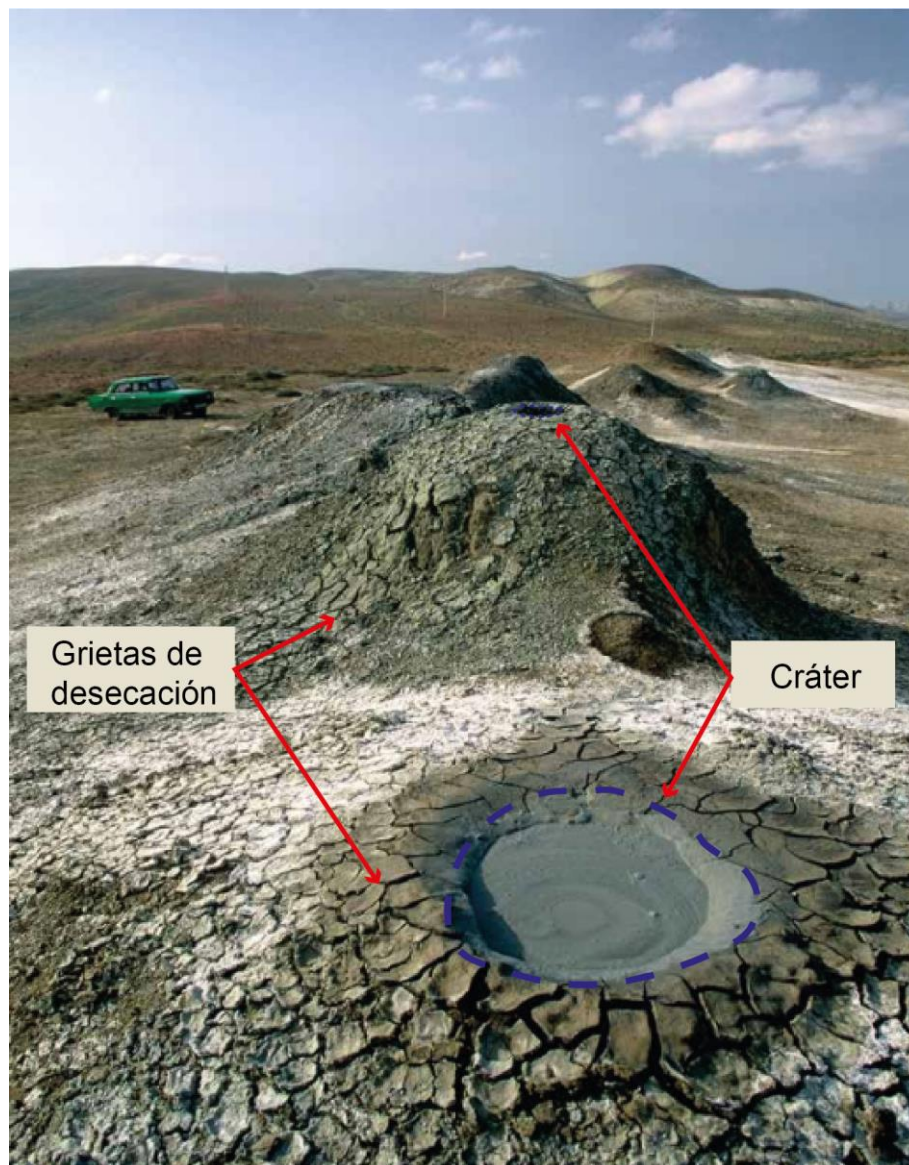


Figura 16. Volcanes de lodo (tomada y adaptada de Collinson y Mountney, 2019).

III. Formación de la estructura

➤ Volcanes de arena

Los volcanes de arena son estructuras que se presentan por inyección de sedimento fluidificado desde el subsuelo hacia áreas de menor presión, y “se encuentran asociados a diques clásticos” (Nichols, 2009).

De acuerdo con Gough (2021), los volcanes de arena son estructuras producto de la licuefacción y actúan como indicadores de eventos sísmicos, siendo formados por agua presurizada. El sedimento blando del subsuelo es inyectado a través de las fracturas y fisuras hacia la superficie, donde se depositan en estratos inclinados en todas las direcciones alejándose del cráter (Figura 17).

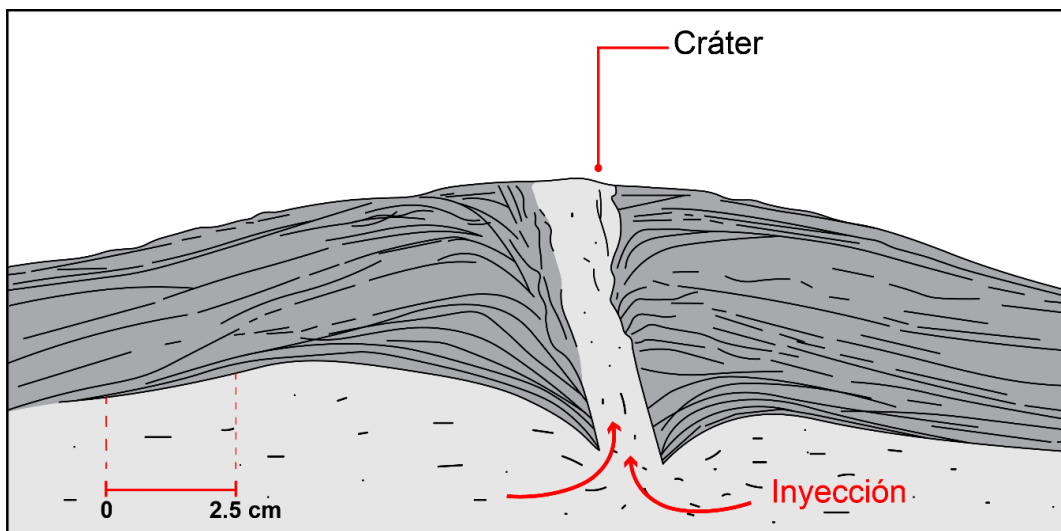


Figura 17. Estructura de inyección, volcán de arena (tomada y adaptada de Allen, 1982).

➤ Volcanes de lodo

Los volcanes de lodo se forman a partir de la inyección de sedimento fino fluidificado desde el subsuelo, hacia áreas de menor resistencia. El sedimento que es inyectado a través de las fracturas y fisuras se deposita en una serie de capas delgadas alejándose de cráter, siendo éstas una mezcla de lodo, fluido y gases.

La inyección del sedimento puede iniciarse debido al calentamiento del lodo en el subsuelo, y además de que, el sedimento “puede ser arrastrado por terremotos” (Gough, 2021).

IV. Ambiente sedimentario

➤ Volcanes de arena

Estas estructuras se presentan en ambientes deltaicos, estuarios y en zonas con depósitos fluviales. Son estructuras posdeposicionales que permanecen sobre las “superficies de estratificación” (Collinson y Mountney, 2019), pero “solo si las condiciones de baja energía impiden que la arena sea rebajada o erosionada por las corrientes” (Nichols, 2009).

➤ Volcanes de lodo

Estas estructuras son características de áreas tectónicamente activas y de regiones donde las superficies presentan condiciones de sobrepresión a profundidad.

V. Inferencias en campo

La presencia de volcanes de arena y lodo sugiere que en algún momento existieron condiciones de sobrepresión y saturación de agua en los sedimentos del subsuelo. La movilidad de estos sedimentos puede indicar inestabilidad del terreno y la ocurrencia de eventos sísmicos, ya que los volcanes de lodo son características “típicas de zonas tectónicamente activas, donde la tasa de sedimentación es alta y se libera el exceso de presión del agua licuada” (Collinson y Mountney, 2019).

I. Nombre de la estructura: Estructuras de plato

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

En sección transversal, presentan una geometría cóncava hacia arriba, similar a los platos apilados, y en algunos casos planas. El tamaño suele variar desde unos milímetros de diámetro hasta más de un metro de ancho y varios metros en la sección vertical.

Allen (1982) los describe como estructuras poligonales, circulares, ovaladas o elípticas, que presentan una elongación marcada con una concavidad hacia arriba y una convexidad hacia abajo (Figura 18).

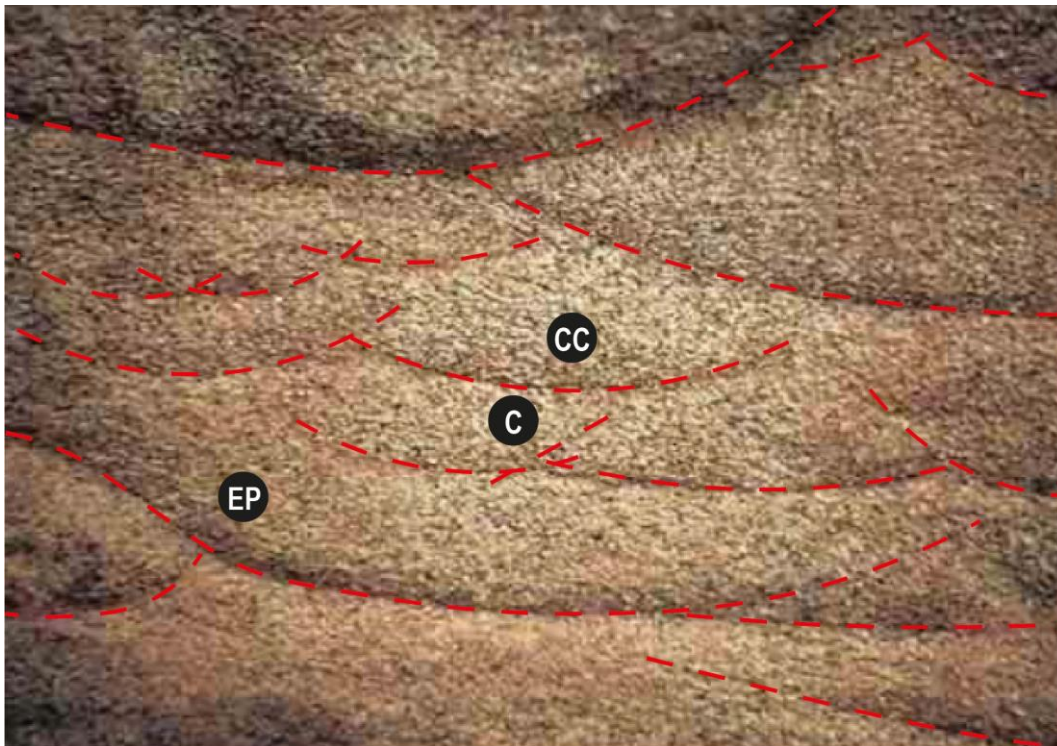


Figura 18. Estructuras de plato (EP), con lado cóncavo (CC) y un lado convexo (C), presentes en una sucesión de arenisca masiva de turbiditas de aguas profundas. Ancho de vista 20 cm. Eoceno, cuenca de Cantua, centro de California, USA. (tomada y adaptada de Stow, 2005).

IV. Formación de la estructura

Las estructuras de plato son principalmente producto de la inyección de fluidos provenientes de corrientes de turbidez, así como de la licuefacción y fluidización de sedimento.

Durante la fluidización de sedimento, el sedimento es inyectado mediante flujos horizontales por debajo de una serie de láminas semipermeables "o debajo de agua muerta atrapada en regiones de cierre debajo de láminas semipermeables, provocando la licuefacción del sedimento" (Lowe y LoPiccolo, 1974).

De acuerdo con Allen (1982), las estructuras se componen de dos partes, el plato en sí y el sedimento contenido dentro del plato, que a su vez se encuentran delimitados por otras estructuras similares. Collinson y Mountney (2019) denominan a este sedimento como "sedimento huésped", donde se forman y se presentan las estructuras de plato, las cuales disponen laminas extensas que "varían desde limos gruesos hasta arenas gruesas y gravas finas" (Figura 19)

En adición, las estructuras de plato siempre presentarán un color más oscuro respecto al sedimento huésped, ya que presentan un mayor contenido de arcillas y materia orgánica, además de estar asociadas comúnmente con columnas transversales denominadas diques clásticos (Figura 19).

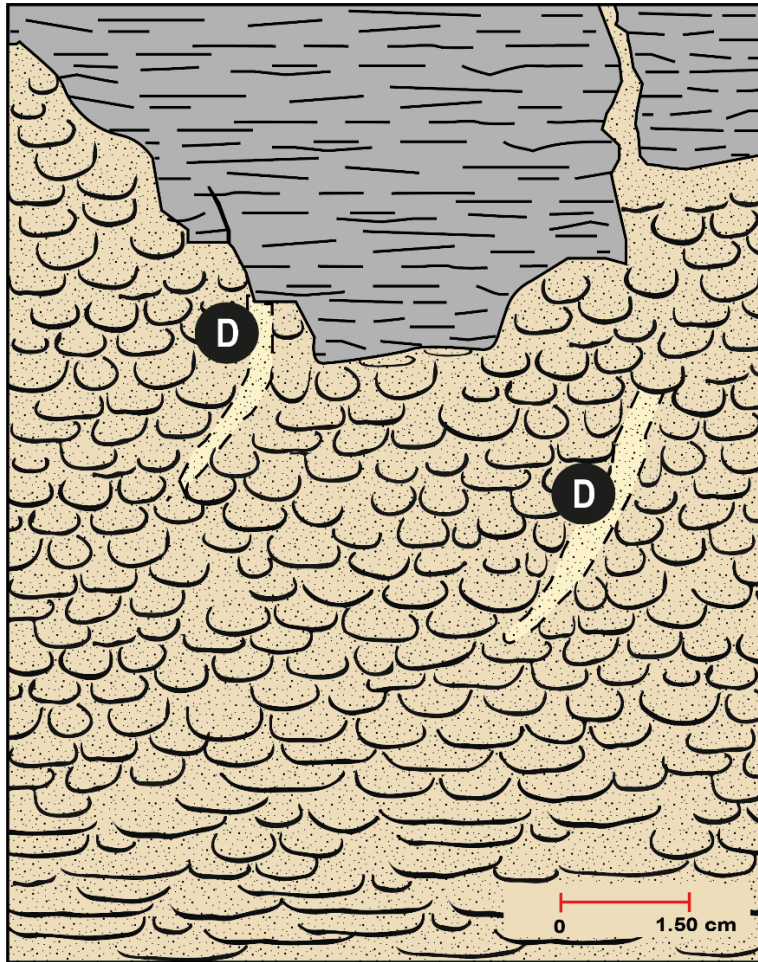


Figura 19. Estructuras de plato acompañadas por diques clásticos (D) (adaptada de Allen, 1982).

V. Ambiente sedimentario

De acuerdo con Lowe y LoPiccolo (1974), la formación de las estructuras de plato se presenta en tres tipos de ambientes sedimentarios: vertientes continentales proximales submarinas, frentes deltaicos y abanicos aluviales.

VI. Inferencias en campo

La presencia de estructuras de plato proporciona condiciones de sedimentación en las que el sedimento se deposita mediante flujos de alta energía o de turbidez, procesos de inyección de sedimentos y dirección de paleocorrientes, aunque está no siempre es una información directa, ya que su formación suele estar asociada a otras estructuras.

I. Nombre de la estructura: Diques clásticos (filones clásticos)

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

Se presentan mediante formaciones casi rectas, transversales y con lados más paralelos. Generalmente, suelen presentar orientaciones aleatorias sobre la superficie de estratificación (Figura 20A) o sobre el sedimento huésped que las contiene (Figura 20B). El tamaño suele variar, desde decenas de centímetros hasta presentar extensiones de varios metros.

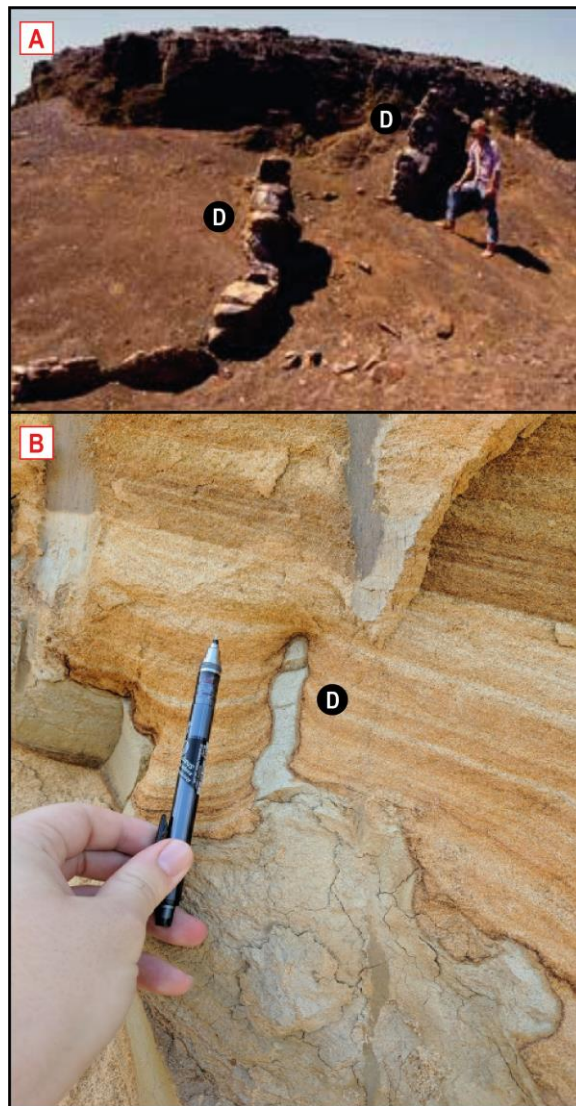


Figura 20 A y B. 20A) Dique de clástico (D) a gran escala sobre la superficie de estratificación erosionada de la formación Etjo, Cretácico,

Namibia (tomada y adaptada de Collinson y Mountney, 2019). 20B)
Dique clástico (D) pequeño de la Formación Kyaukkok, Mioceno,
Nyanmar central (tomada y adaptada de Gough, 2021).

De acuerdo con Gough (2021), los describe como "vetas de material clástico que atraviesan estratos estratificados" (Figura 21).

En adición, los diques clásticos pueden estar truncados por superficies de erosión y truncados por superficies subyacentes.

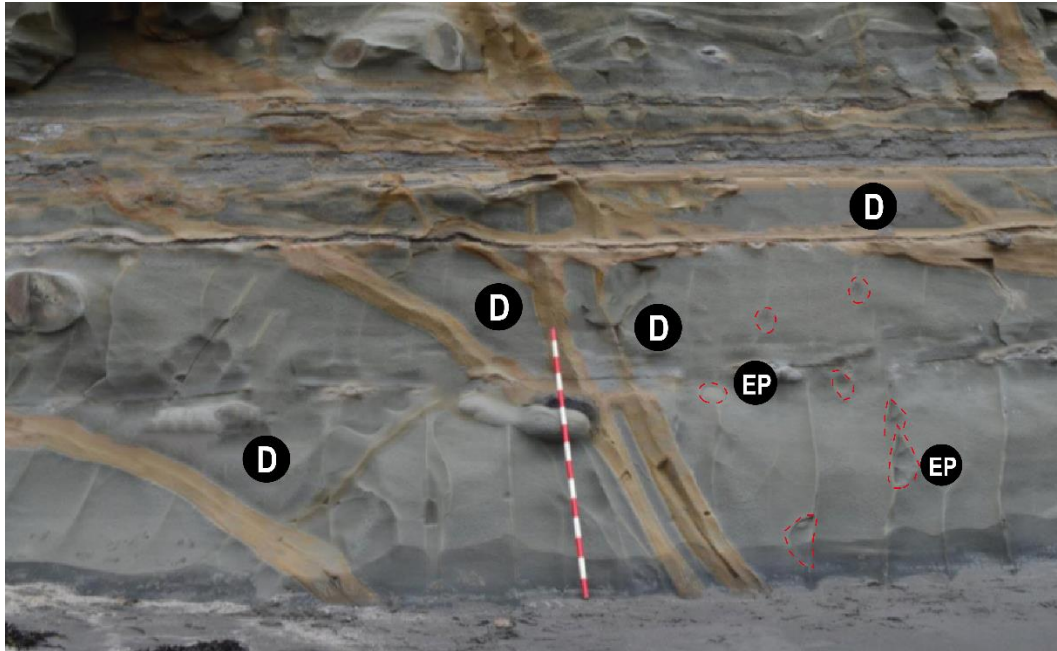


Figura 21. Diques clásticos (D) acompañados por estructuras de plato (EP) dentro de bancos de arenisca masiva. Báculo de 1.5 metros (tomada y adaptada de Rodríguez, 2022).

IV. Formación de la estructura

Los diques clásticos, o *filones clásticos*, son formaciones producto de la inyección y de la fluidificación o licuefacción de sedimentos. Estas estructuras suelen aparecer junto a las estructuras de plato. Comúnmente, los diques suelen "cortar transversalmente o ser cortados por las estructuras de plato, o formarse entre los márgenes cóncavos de los platos adyacentes" (Lowe y LoPiccolo, 1974) (Figura 22).

De acuerdo con Collinson y Mountney (2019), el sedimento es inyectado a través de las grietas y fracturas de un sedimento consolidado. Estas fracturas pudieron haberse generado por algún evento sísmico o por la sobrecarga de sedimentos suprayacentes. La inyección ocurre a partir de una capa fuente, ya sea subyacente o suprayacente, a partir de un evento

posdeposicional, y el sedimento inyectado suele presentar una composición similar a la capa de la fuente.

Finalmente, el material fluidificado rellena las grietas y fracturas. El material inyectado suele ser desde areniscas y lutitas, hasta gravas gruesas.

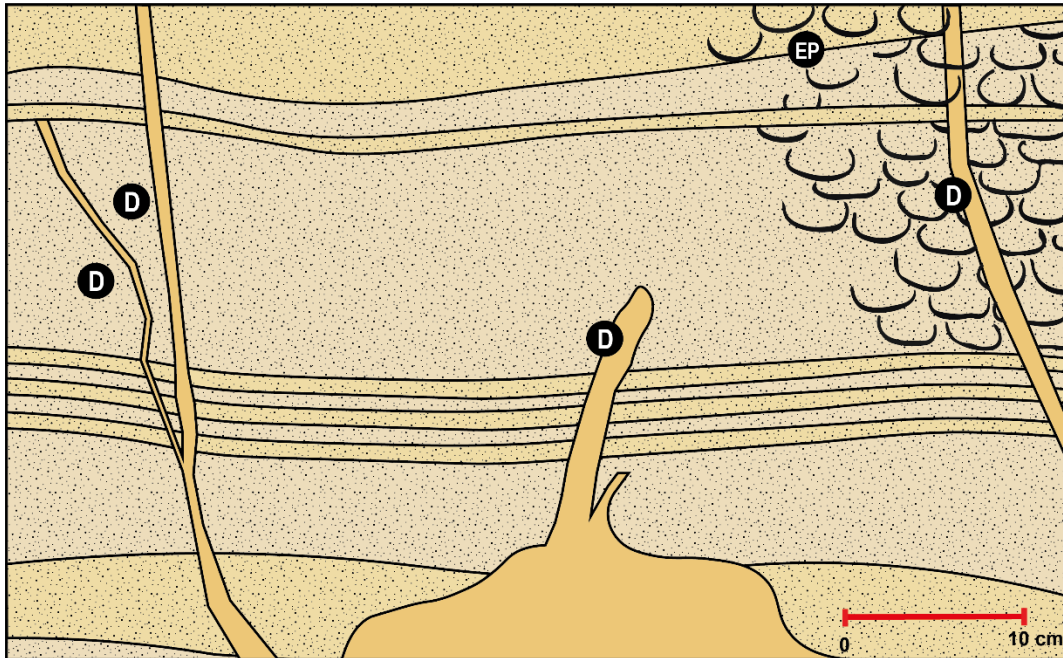


Figura 22. Diques clásticos (D) acompañados por estructuras de plato (EP).

V. Ambiente sedimentario

Al igual que las estructuras de plato y que los volcanes de arena, los diques clásticos suelen ocurrir en depósitos fluviales, “vertientes continentales proximales submarinas, frentes deltaicos y abanicos aluviales” (Lowe y LoPiccolo, 1974), “además de aparecer en una amplia variedad de sucesiones de areniscas y lutitas” (Collinson y Mountney, 2019).

VI. Inferencias en campo

La presencia de diques clásticos proporciona información sobre las condiciones paleohidráulicas en el momento de su formación y actúa como un indicador de actividad sísmica o de movimientos tectónicos.

I. Nombre de la estructura: Estructura de deslizamiento (slumps)

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

Las estructuras de deslizamiento o *slumps*, son estructuras sinuosas que se presentan como sedimentos o rocas deformadas. Usualmente, las estructuras de deslizamiento suelen estar confinadas por “estratos no perturbados”, arriba y abajo, y en contacto sobre una superficie subyacente (la superficie sobre la que se produjo el deslizamiento), que corta la estratificación” (Tucker, 2003) (Figura 23). Este rasgo distintivo permite diferenciarlas de los lechos perturbados tectónicamente.

De acuerdo con Allen (1982), el tamaño suele variar dependiendo del ambiente de su formación. Algunas formaciones llegan a presentar aproximadamente 0.5 m de espesor y extenderse por algunas decenas de metros, llegando a alcanzar los 100 metros de espesor.

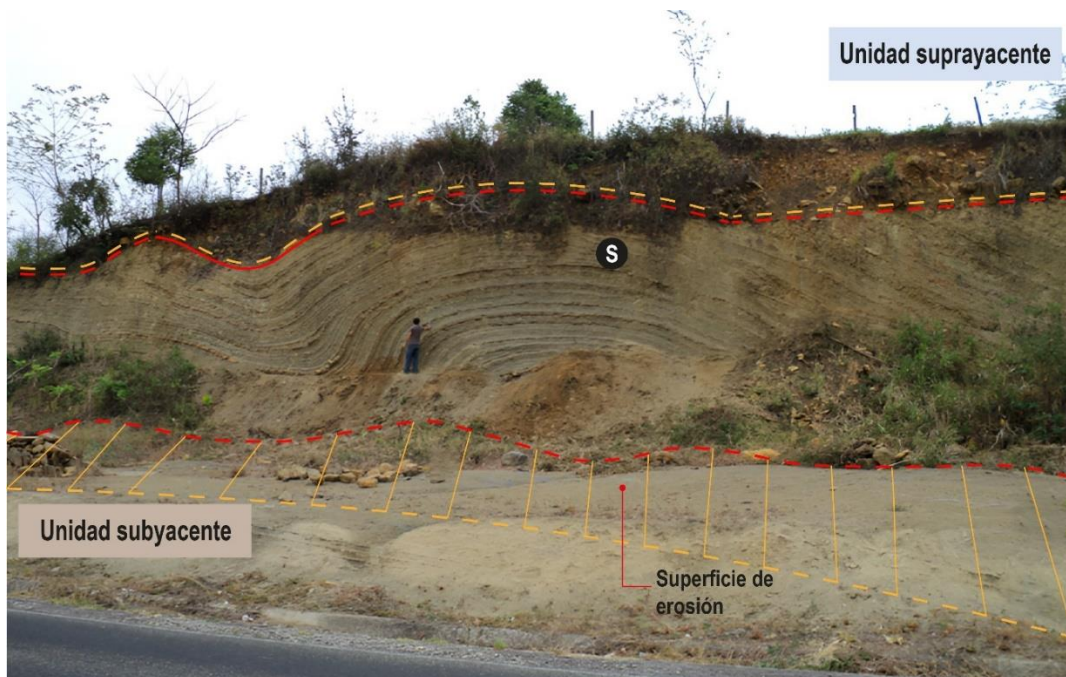


Figura 23. Estructura de deslizamiento tipo slump (S) confinada por dos unidades, donde la unidad subyacente es la superficie de deslizamiento. Formación Chicontepec, Huejutla de Reyes, Hidalgo (fotografía cortesía del M.C. Noé Santillán, 2024).

Nichols (2009) las describe como “deslizamientos de masas coherentes de un lecho de roca que se ha movido pendiente abajo sin romperse

significativamente durante el proceso”, y se encuentran limitadas por sedimentos no perturbados (Figura 24).

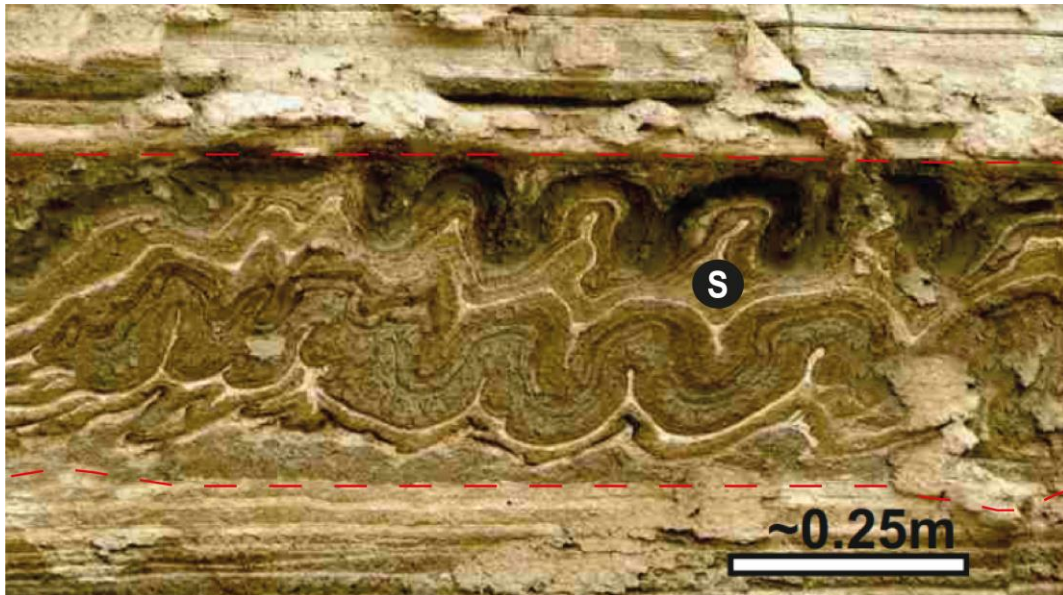


Figura 24. Estructura de deslizamiento tipo slump (S) (tomada y modificada de Alsop et al., 2016).

IV. Formación de la estructura

Las estructuras de deslizamiento son producto de procesos gravitacionales, licuefacción y por “zonas de quiebre de pendiente cuya magnitud de movimiento horizontal es pequeña” (Ponce et al., 2018). Estas estructuras, de acuerdo con Allen (1982) y Collinson y Mountney (2019), suelen estar compuestas por areniscas intercaladas con lutitas negras, calizas arcillosas y sedimentos carbonatados.

Durante los procesos gravitacionales se producen una serie de eventos que ayudan a la formación de las estructuras, como los siguientes: a) acumulación de sedimentos: estos se acumulan por sedimentación en un ambiente de baja energía o por la misma acumulación en una pendiente, b) inestabilidad de sedimentos: a medida que la pendiente se vuelve más pronunciada, la masa sedimentaria disminuye su estabilidad y ésta se vuelve inestable debido al peso y a la saturación de agua, c) durante el deslizamiento: se produce el movimiento del sedimento hacia abajo por fuerza de la gravedad debido a que la componente de gravedad es mayor a la componente de resistencia a la fricción (Figura 25).

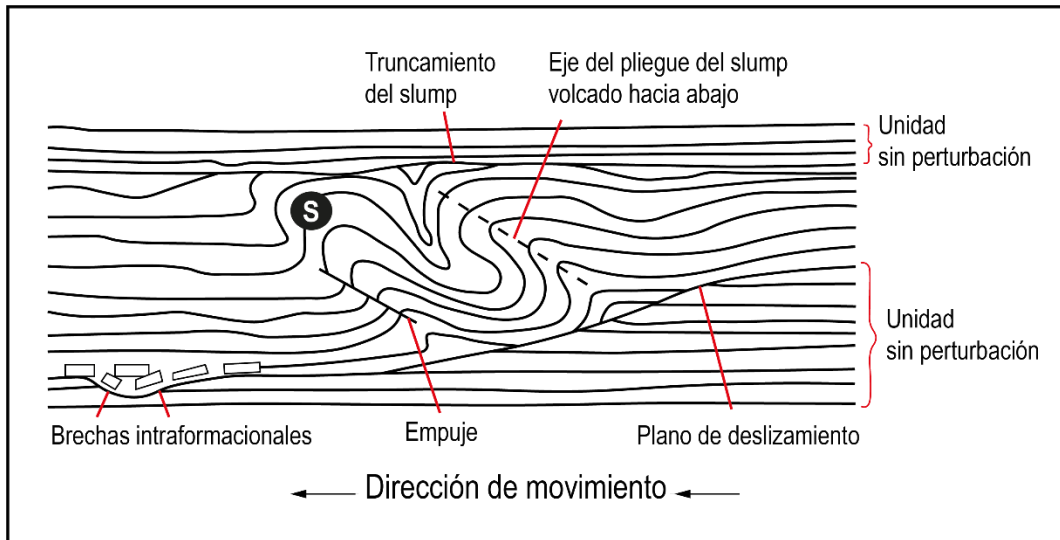


Figura 25. Principales características de una estructura de deslizamiento tipo slump (S) (tomada y adaptada de Tucker, 2003).

V. Ambiente sedimentario

De acuerdo con Gough (2021), las estructuras de deslizamiento se forman principalmente en ambientes de aguas profundas, como las turbiditas o ambientes lacustres profundos.

VI. Inferencias en campo

Los pliegues pueden ayudar a interpretar direcciones de paleo-taludes (dirección de pendiente). Además pueden indicar la presencia de procesos gravitacionales que afectan a los sedimentos, así como la "actividad tectónica de una cuenca" (Shanmugan, 2016).

I. Nombre de la estructura: Brechas intraformacionales

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

Las brechas intraformacionales son estructuras que se caracterizan por estar formadas de fragmentos de rocas, mejor conocidos como clastos. Se presentan con bordes afilados y esquinas no desgastadas, además de estar embebidas dentro de una única unidad geológica o unidad sedimentaria.

De acuerdo con Pellant y Pellant (1993), las describe como fragmentos angulosos que pueden ser de cualquier tipo de roca (sedimentaria, ígnea o metamórfica).

Tucker (2003) cita que una característica clave para la identificación y descripción de una brecha intraformacional es la observación de "los tipos de clastos presentes y la textura de la roca" (Figura 26).

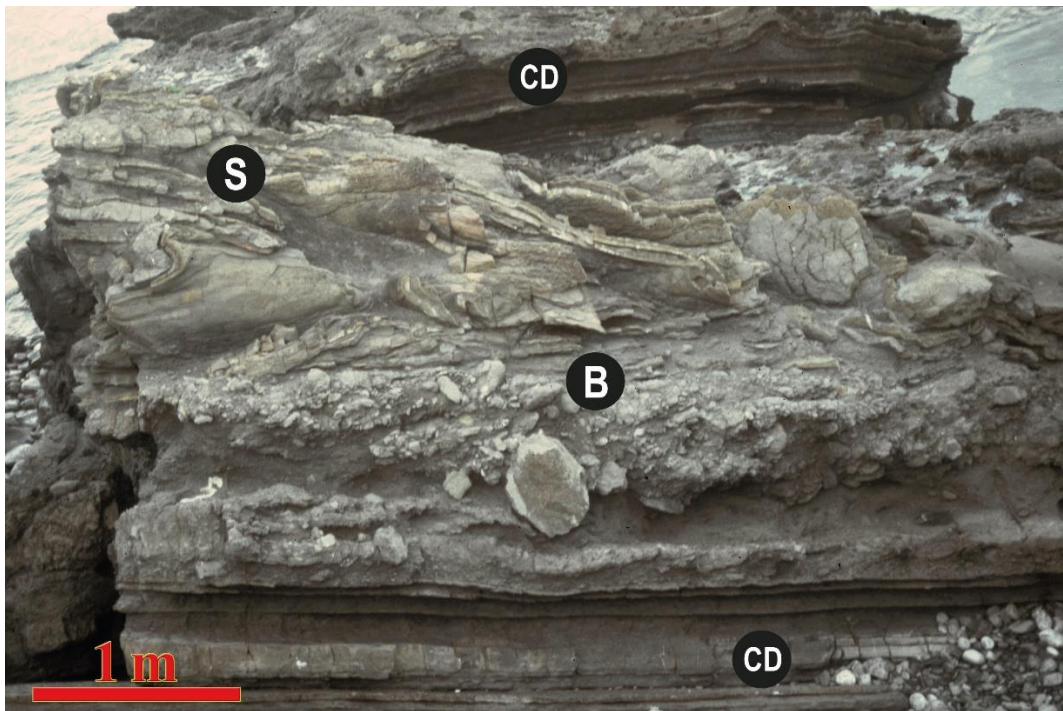


Figura 26. Brecha intraformacional (B) acompañada en la parte superior por slumps (S), así como capas sin deformación (horizontales)(CD), en la parte inferior y superior de la secuencia. San Juan Gaztelugache, Vuzcaya, España (tomada y adaptada de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

IV. Formación de la estructura

De acuerdo con Stow (2005) y Tucker (2003), la formación de estas estructuras depende de procesos gravitacionales, fluido de flujos y de los clastos que conforman a la estructura. Con base al origen de los clastos, podemos encontrar los siguientes: a) brechas intraformacionales y b) brechas extraformacionales.

Las brechas formadas por clastos extraformacionales se componen de clastos que se originaron fuera de la propia formación, por lo que son más antiguos que el sedimento que los contiene.

En cuanto a las brechas intraformacionales, estas estructuras se formaron por "fragmentación penecontemporanea de estratos débilmente consolidados y por una posterior resedimentación de los fragmentos resultantes dentro de la misma unidad" (Boggs, 2009) (Figura 27). Finalmente, "la acumulación de fragmentos grandes y angulosos se da donde la meteorización mecánica se encuentra activa" (Pellant y Pellant (1993). Comúnmente, la matriz suele ser de grano fino a medio de arenas o de un cemento químico (cementante) que rodea los clastos.

En adición, las brechas intraformacionales se "encuentran genéticamente conectadas con los slumps" (Martín, 2020). Cuando la deformación supera el límite dúctil, junto con la acción de la gravedad y la resistencia a la fricción, el slump pierde estabilidad y se fractura. Los fragmentos disgregados se redepositarán, dando lugar a la formación de la estructura.

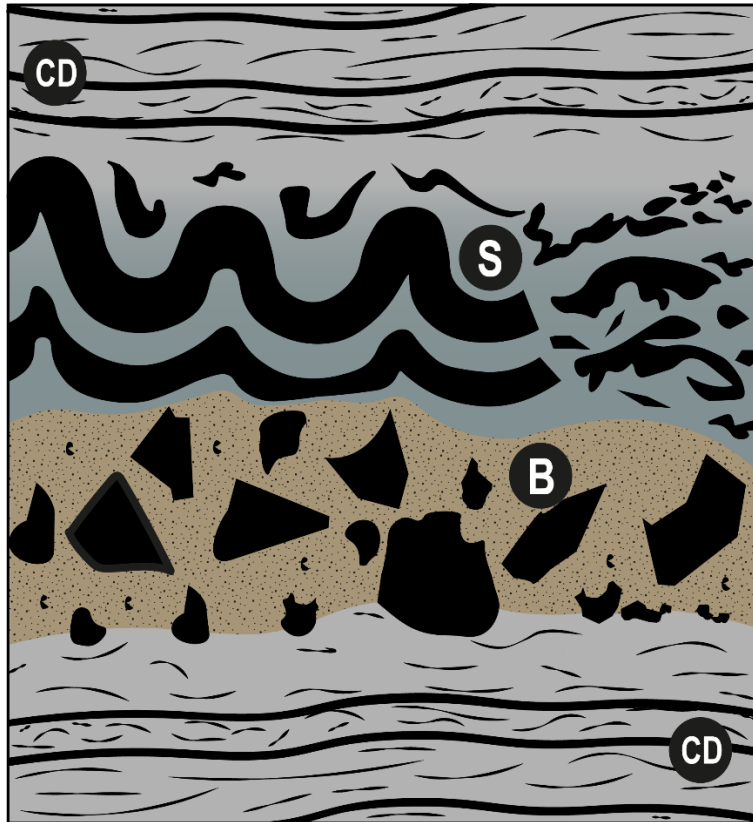


Figura 27. Brecha intraformacional (B) acompañada por remanentes de slump (S), así como capas sin deformación (CD).

V. Ambiente sedimentario

De acuerdo con Zepeda-Martínez (2021), las brechas intraformacionales pueden ocurrir en una gran variedad de ambientes, como los siguientes: ambientes fluviales y aluviales, depósitos gravitacionales en masa, deltas, playas y glaciares.

VI. Inferencias en campo

La presencia de brechas intraformacionales proporciona información sobre el origen del depósito y las unidades rocosas expuestas en la región, además de proporcionar información sobre los cambios en la dinámica de fluido que transporta los fragmentos y partículas que conforman la estructura y la matriz.

I. Nombre de la estructura: Cantos de arcillas armados

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria de deformación de sedimento blando

III. Descripción

Los cantos de arcillas armados son estructuras que se presentan mediante formaciones semiesféricas de sedimento blando, como arcillas, y de sedimento más grueso, como arenas, que son las causantes de crear la cubierta exterior.

De acuerdo con Molina et al., (2000), las describen como formaciones esferoidales o elipsoidales de lutitas que se encuentran cubiertas por arenas gruesas y gravas formando una especie de armadura que cubre al canto. El tamaño de estas estructuras oscila entre 4 y 29 cm, aunque comúnmente, las arcillas siempre son del doble de tamaño que las arenas y gravas que las recubren (Figura 28).



Figura 28. Cantos de arcillas armados de Poloria, Granda, España (tomada de Banco de imágenes geológicas, 2010).

IV. Formación de la estructura

De acuerdo con Cuesta (2020), la formación de estas estructuras se origina a partir de sedimentos blandos que son transportados mediante corriente acuosa sobre una pendiente, el cual va incorporando en su descenso partículas más gruesas, como arenas y gravas, que forman la armadura o el canto y de manera simultánea adquieren la redondez o esfericidad.

Estas estructuras son difícil de preservar, ya que, durante el transporte las formaciones presentan colisiones, pero si no se destruyen se fosilizan y quedan al descubierto durante las temporadas de sequía (Figura 29).

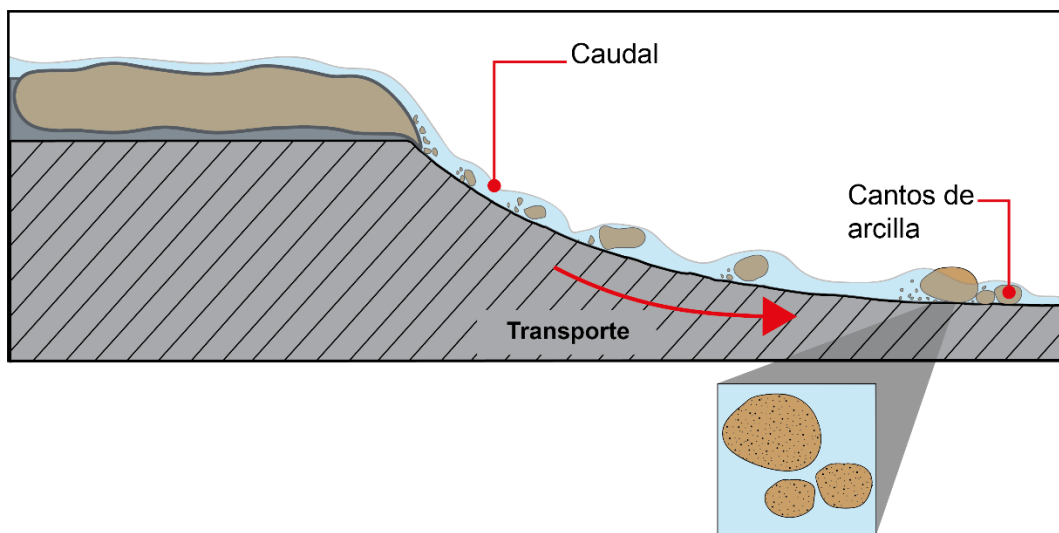


Figura 29. Cantos de arcillas armados (tomada y adaptada de Nichols, 2009).

V. Ambiente sedimentario

De acuerdo con Molina et al., (2000), los cantos armados son característicos de ambientes fluviales asociados a corrientes de alto gradiente, ambientes lacustres someros, costeros y llanuras de mareas.

VI. Inferencias en campo

La presencia de cantos de arcillas armados proporciona información sobre las características de ambientes fluviales, en los que ocurrieron procesos transicionales de alta y baja energía en ríos antiguos, frentes glaciales donde se forman las "till balls" o en zonas de flujo de detritos.

4.2 Organismos constructores de sedimento (condiciones de formación)

Basándose en autores como Tucker (2003) y Collinson y Mountney (2019), de acuerdo con su origen las estructuras orgánicas pueden clasificarse como: 1) Estructuras de construcción y 2) Estructuras de modificación o alteración (bioturbación). Dentro del primer subgrupo, podemos encontrar a los estromatolitos, carpetas de algas y cuerpos arrecifales; mientras que en el segundo subgrupo se encuentran las icnitas, perforaciones, pistas y galerías; siendo muy importante para éstas últimas, establecer las icnofacies o zonas características de cada organismo.

Estructuras de construcción

Las estructuras de construcción son aquellas estructuras orgánicas que se caracterizan por ser un conjunto de asociaciones y concentraciones de organismos, normalmente de algas, braquiópodos, briozoarios, corales, foraminíferos, etc., que viven bajo el agua en ambientes someros. De acuerdo con Collinson y Mountney (2019), las estructuras de construcción son producto de animales y plantas que viven en el mar y en entornos de agua dulce “que producen calcita y aragonita como estructura esquelética u otras estructuras de fortalecimiento, que después de la muerte de los organismos, este material esquelético puede convertirse en el componente principal de los sedimentos carbonatados”. Además de servir como estructuras de construcción, la estructura esquelética y sus partes duras, también sirven para proteger los tejidos blandos del medio exterior.

I. Nombre de la estructura: Estromatolitos

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria orgánica de crecimiento (constructora)

III. Descripción

Los estromatolitos son estructuras que se presentan en formas de capa, columnas o láminas, formadas mediante la actividad de microorganismos y cianobacterias (Figura 30).

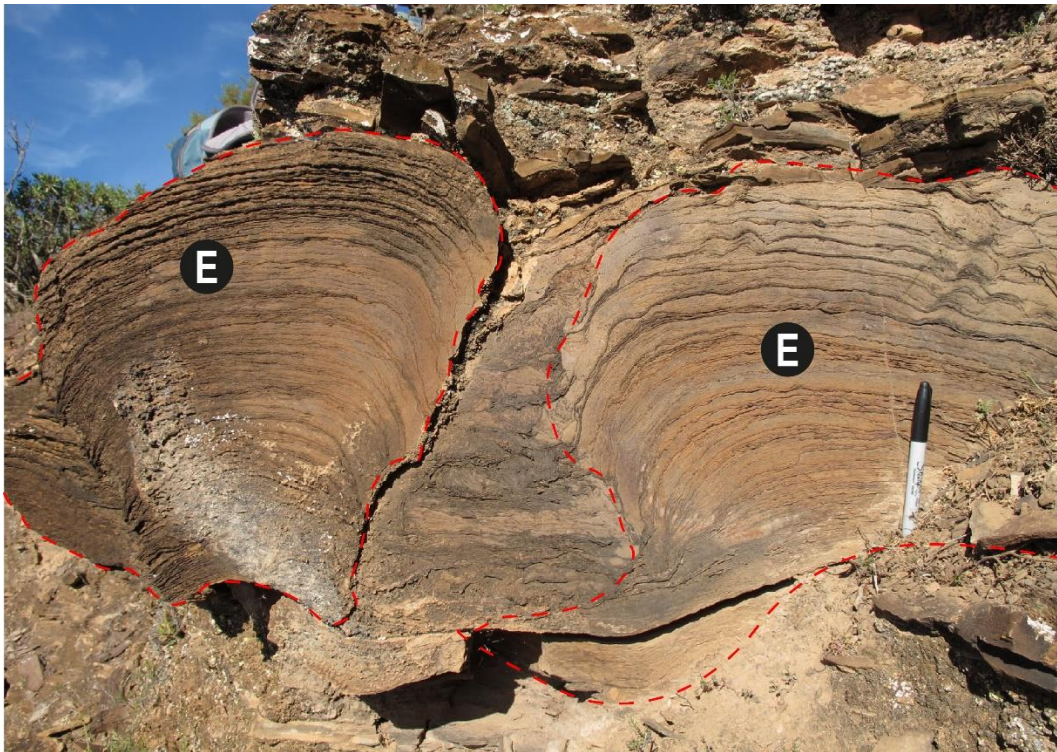


Figura 30. Estromatolitos expuestos (fósil) en corte transversal (E) (tomada y adaptada de Tipuana Fishapod, 2019).

Tucker (2003) las describe como estructuras “laminadas planas (Figura 31A), o laminitas (Figura 31B), hasta domos (Figura 31C) y columnas (Figura 31D), que generalmente, presentan varios milímetros de espesor y están formadas por micrita, peloides y restos esqueléticos finos”.

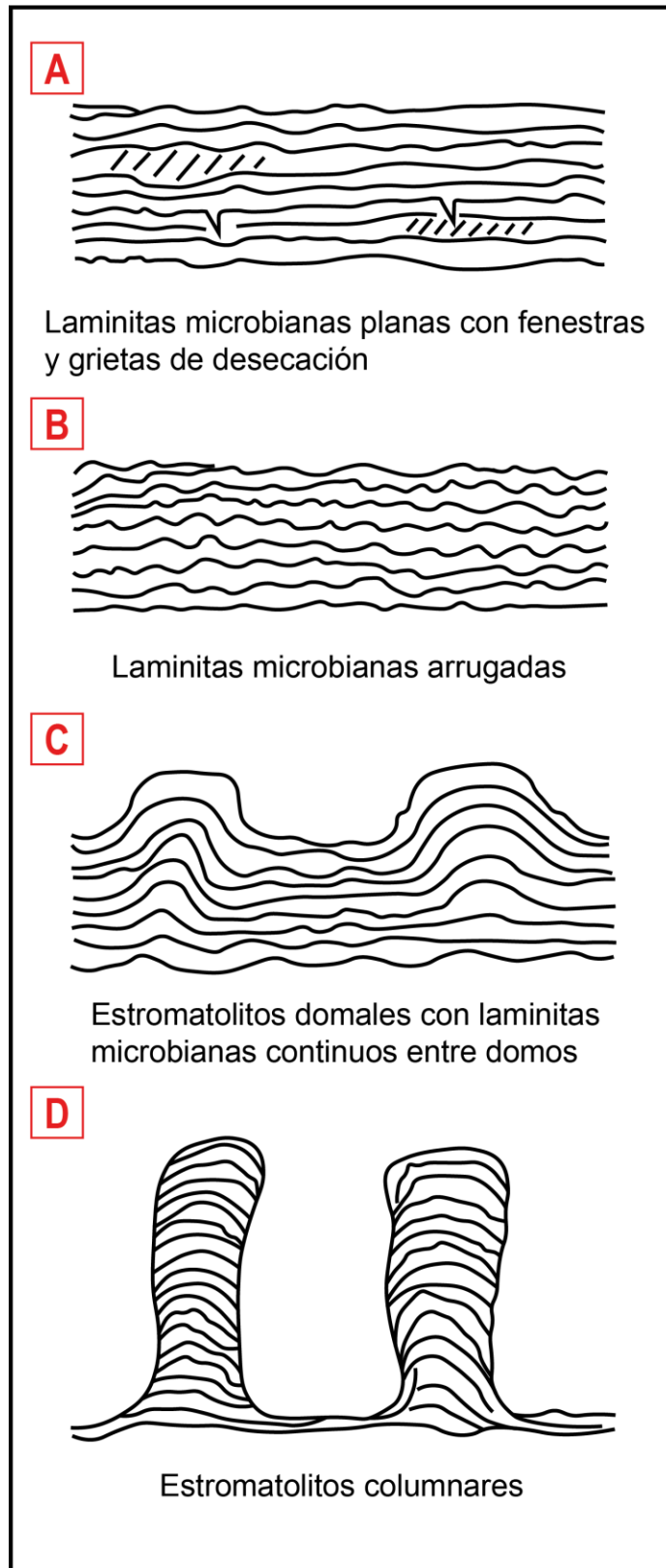


Figura 31 A, B, C y D. Estromatolitos, tipos de estructuras microbianas (tomada y adaptada de Stow, 2005).

IV. Formación de la estructura:

De acuerdo con Demicco y Hardie (1994), las estructuras pueden producirse mediante uno o un gran número de procesos, como los siguientes:

a) Sedimentación mecánica sin agentes microbianos: los sedimentos se acumulan en áreas de baja pendiente, sin sobre pasar el ángulo de máxima pendiente, y sin importar que haya o no un tapete microbiano presente. Partículas como arenas carbonatadas o siliciclásticas se depositan de forma mecánica sobre los tapetes sin influencia directa de microorganismos. Estos depósitos mecánicos pueden formar láminas y ondulaciones intercaladas con capas microbianas, reflejando una alternancia entre sedimentación (Demicco y Hardie, 1994).

b) Sedimentación producida por microorganismos: los tapetes microbianos capturan partículas mediante sus filamentos y capas mucilaginosas. Cianobacterias filamentosas, como *oscillatoria* producen láminas finas que se alternan con depósitos arenosos en zonas mareales. Las cianobacterias de mayor tamaño, como *Scytonema* y *Rivularia*, actúan como barreras que retienen sedimentos en la superficie, generando láminas porosas. También bacterias cocoides como *Entophysalis* crean capas ricas en materia orgánica que atrapan sedimentos durante las tormentas (Demicco y Hardie, 1994).

c) Precipitación química de carbonatos: la formación de carbonatos en tapetes microbianos puede darse mediante mecanismos tanto biológicos como abióticos. En un ambiente sobresaturado de carbonato, se cristalizan minerales como el aragonito o la calcita magnésica sin intervención de organismos, como ocurre en lagunas de evaporación. Por otro lado, la actividad de microorganismos fotosintéticos y heterótrofos facilita la precipitación localizada de carbonatos alrededor de sus células, dando lugar a tres tipos de láminas: micrítica, cristalina y micrítica-peloidal. Estos depósitos pueden contener restos fosilizados de cianobacterias, creando tejidos típicos de estromatolitos actuales (Demicco y Hardie, 1994).

d) Crecimiento episódico de una estera microbiana con sedimentación: las esteras microbianas formadas por cianobacterias filamentosas y cocoides pueden crecer con mínima o nula incorporación de sedimentos detríticos o precipitados. Estas capas, que alcanzan varios centímetros de grosor, alternan con depósitos de tormenta, señalando periodos prolongados de desarrollo microbiano en ambientes como marismas supramareales, donde solo reciben sedimentos suspendidos durante eventos de huracán. Una vez enterradas, la compactación desigual y la descomposición orgánica resultan en capas laminadas en la

roca, con divisiones ricas en materia orgánica entre las capas de sedimentos (Demicco y Hardie, 1994).

Ambiente sedimentario

De acuerdo con Tucker (2003), los estromatolitos “son muy comunes en las sucesiones carbonatadas del Precámbrico, pero también se dan en muchas calizas del Fanerozoico”.

Beraldi (2024), menciona que la secuencia del desarrollo de los estromatolitos, su composición mineral mayoritaria es carbonatada y describe las siguientes condiciones de formación:

a) Salinidad

Estas pueden desarrollarse en ambientes con distintos niveles de salinidad, desde hipersalino (>35 ppm NaCl), salino (35 ppm), salobre (<35 ppm) o dulceacuícola (<8 ppm).

b) Luminosidad

La formación de estromatolitos es ideal en ambientes con buena iluminación y un pH superior a 5, donde la fotosíntesis promueve la precipitación de carbonatos mediante la extracción de CO_2 , aumentando así la alcalinidad.

c) Presión

Las condiciones de baja presión, acompañados de abundante energía lumínica, son cruciales para el desarrollo de las estructuras.

d) Energía

La energía es generada por las bacterias, a través del proceso de fotosíntesis, que generan condiciones alcalinas al extraer CO_2 y permitir la precipitación de carbonatos. Usualmente, las cianobacterias se ubican en la capa superficial de una masa de agua (zona fótica), a 200 metros en zonas marinas, permitiendo la fotosíntesis.

Inferencias en campo:

La formación de estromatolitos proporciona evidencias paleoambientales, donde las capas laminadas indican períodos de estabilidad interrumpidos por eventos de tormentas. Además, son indicadores de la química y la salinidad del agua, y pueden ayudar a comprender la polaridad de una sucesión.

I. Nombre de la estructura: Carpetas de algas

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria orgánica de crecimiento (constructora)

III. Descripción

Las carpetas de algas son estructuras orgánicas que se presentan en forma de capas o laminaciones (Figura 32A y 32B) que recubren la superficie de los sedimentos acuáticos. Su espesor es del orden de varios milímetros.

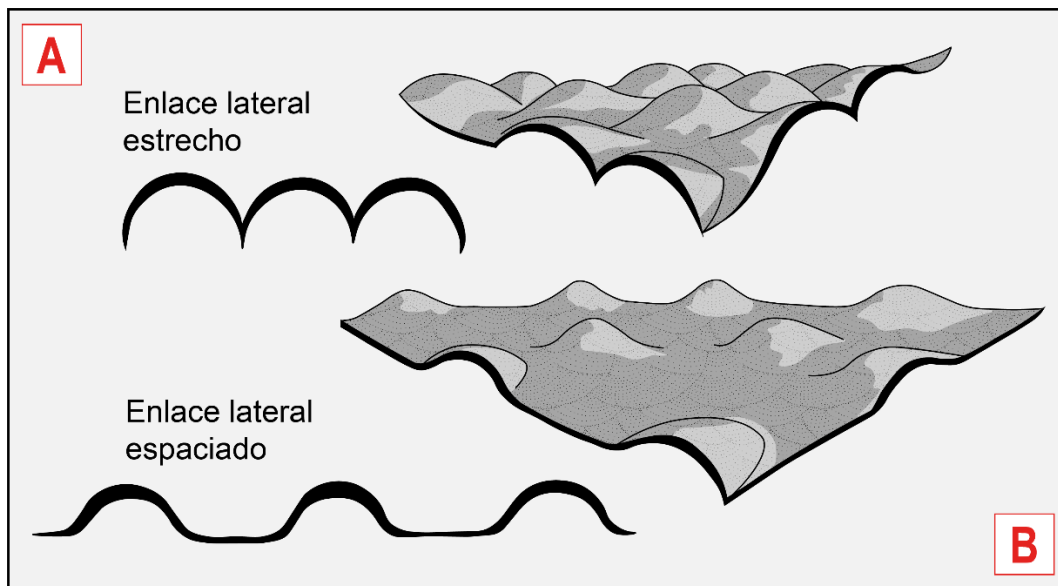


Figura 32 A y B. Carpetas de alga (tomada y adaptada de Logan et al., 1964).

Logan et al. (1964, citado en Kendall y Skipwith, 1968) las describen como "capas o películas de algas verdeazuladas, unicelulares y filamentosas, entrelazadas entre sí y con una estructura similar a la de los estromatolitos" (Figura 33A y 33B).

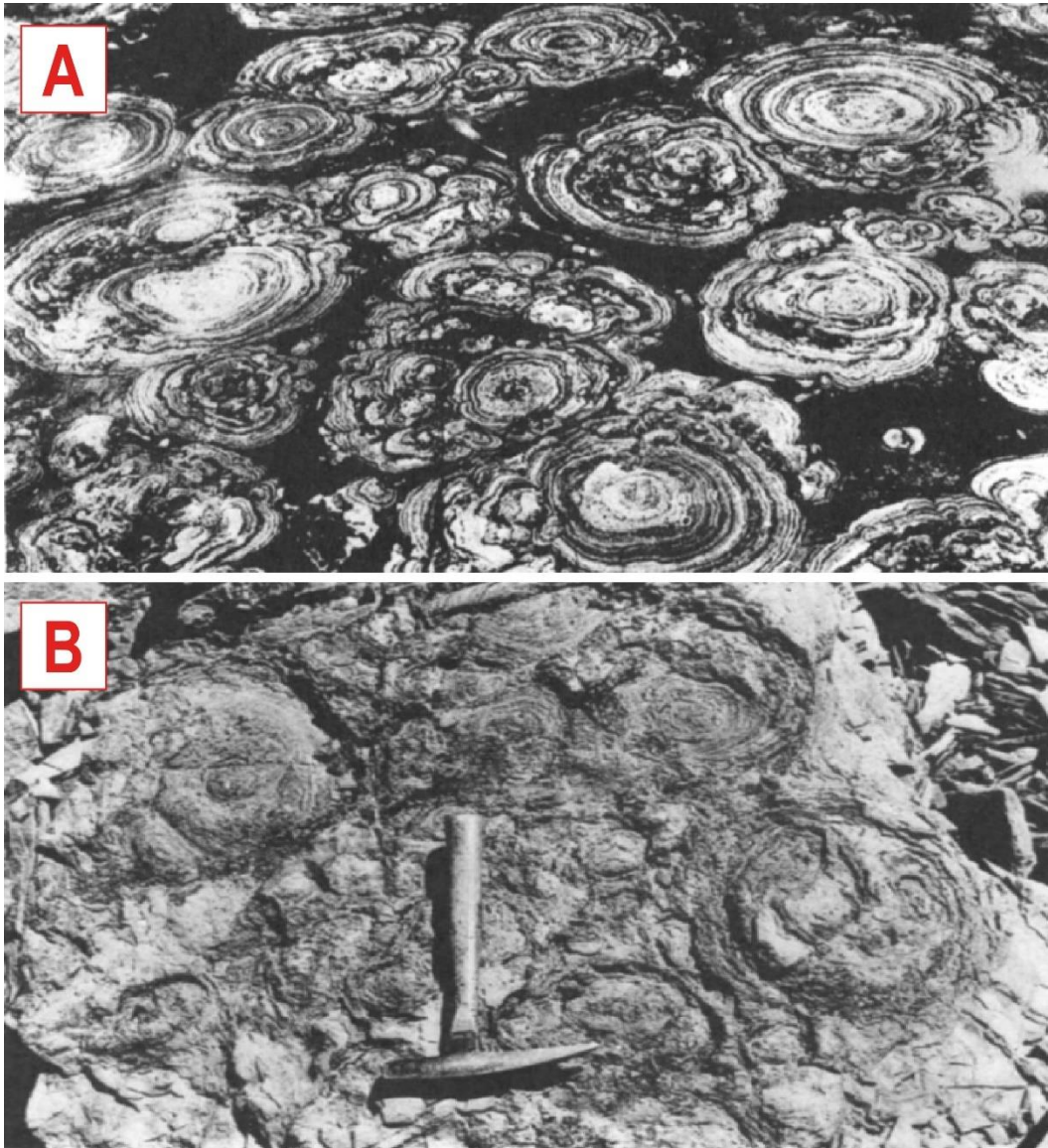


Figura 33 A y B. Carpetas de alga (tomada y adaptada de Logan et al., 1964).

IV. Formación de la estructura

Durante el proceso de formación, los microorganismos se establecen sobre el sedimento formando tapetes, en los cuales retienen partículas de "arena, limo y arcilla que son arrastradas sobre ellos" (Kendall y Skipwith, 1968). Estos microorganismos consolidan el sedimento suelto mediante filamentos y otros procesos biológicos. Con el tiempo, los microorganismos cementan el sedimento y segregan sustancias que ayudan a estabilizarlo, lo cual incrementa el espesor de las capas.

De acuerdo con Logan et al. (1964), la geometría de las carpetas de algas permite clasificar tres tipos principales: a) hemisferoides unidos

lateralmente (LLH), b) hemisferoides discretos apilados verticalmente (SH) y c) hemiesferoides discretos (SS).

V. Ambiente sedimentario

De acuerdo con Molina (S.f.), las carpetas de algas se encuentran principalmente en aguas continentales y zonas intermareales salinas, y su formación está condicionada por las siguientes condiciones:

a) Salinidad

Las carpetas de algas pueden desarrollarse en ambientes con diferentes niveles de salinidad, típicamente entre ~35 a 38%, donde domina el cloruro de sodio (NaCl). En aguas marinas, el pH es siempre alcalina debido a los carbonatos y bicarbonatos, con valores que oscilan entre ~8.1 a 8.3.

b) Luminosidad

La luz solar experimenta una disminución progresiva al penetrar en el agua marina. Aproximadamente entre el ~15 y 20% de la luz incidente es reflejada en la superficie. Según la longitud de onda, en los primeros ~10 m solo penetra radiación roja; a profundidades de ~75 a 100 m, únicamente una fracción limitada de radiación azul y verde es capaz de penetrar; y a los 200 m, ya no hay luz detectable.

c) Presión

La presión varía según el cuerpo de agua, pero el desarrollo de las algas queda restringido al límite de la región fótica, cuya profundidad máxima es de aproximadamente 200 m.

d) Energía

La energía necesaria para su desarrollo proviene del proceso de fotosíntesis en la cual las algas utilizan la radiación solar como fuente para transformar el dióxido de carbono (CO₂), liberando oxígeno (O₂) y convirtiendo el agua en compuestos orgánicos, como la glucosa.

VI. Inferencias en campo

La formación de estructuras de algas proporciona información del ambiente, caracterizados por una baja energía y poca profundidad (< 200 m). Además, estas estructuras son indicadores de ambientes de alta salinidad o pH que favorecen su preservación.

I. Nombre de la estructura: Cuerpos arrecifales

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria orgánica de crecimiento (constructora)

III. Descripción

Según Schwartz (2005), “no existe un acuerdo general sobre una definición completa que integre simultáneamente características tan diversas como la edad, la conformidad o discordancias estratigráficas, y la naturaleza autóctona o alóctona de los organismos desplazados”, que constituyen los cuerpos arrecifales.

De acuerdo con Cumings (1931), numerosos autores emplean el término de “cuerpos arrecifales” para describir estructuras estratificadas que no han sido elevadas desde el fondo marino. Sin embargo, estas no se ajustan a la definición de lo que realmente es un cuerpo arrecifal, ya que, por su propia naturaleza, un cuerpo arrecifal es una estructura heterogénea de arrecifes, rocas esféricas y no siempre presenta estratificación.

Para evitar dificultades, Cumings (1931), explica que a partir de su formación pueden presentarse dos tipos de estructuras arrecifales:

Biohermas (bioherms)

Una estructura biohermal es una estructura que se presenta en forma de “montículo o acumulación orgánica en forma de lente” (Chevalier, 1961, como se citó en Schwartz, 2005) (Figura 34A).

Biostromas (biostromes)

Una estructura biostromal es una estructura que se presenta en forma “plana y estratificada y ancha” (Chevalier, 1961, como se citó en Schwartz, 2005) (Figura 34B).

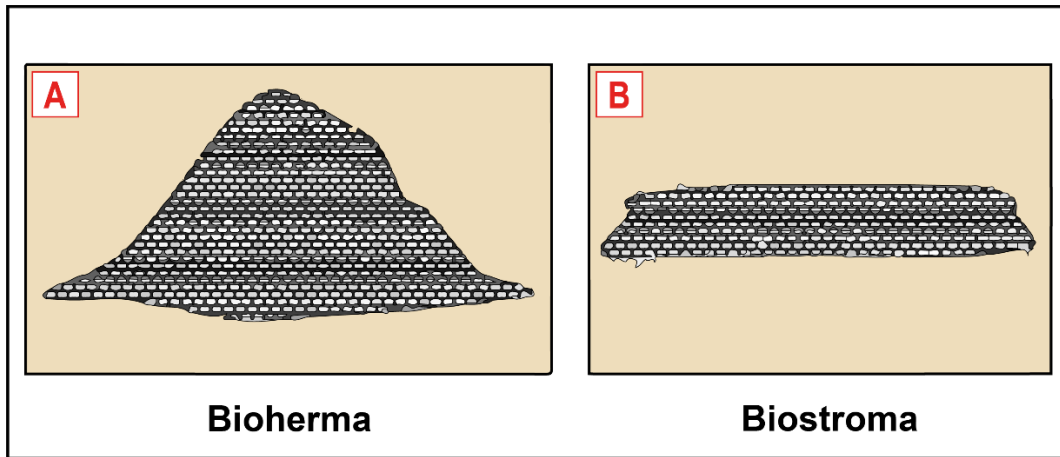


Figura 34 A y B. 34A) Bioherma arrecifal en forma de montículo o lenticular y 34B) Biostroma en forma tabular (tomada y adaptada de Medina, 2017).

IV. Formación de la estructura

Bioherma (bioherms)

De acuerdo con Cumings (1931), las estructuras biohermales son de origen orgánico, formadas principalmente de organismos constructores, como corales, algas calcáreas, esponjas y otros organismos bentónicos.

Biostroma (biostromes)

De acuerdo con Cumings (1931), las estructuras biostromales son estructuras estratificadas, constituidas de lechos de conchas, lechos de crinoideos, etc., y formadas principalmente por "organismos sedentarios".

V. Ambiente sedimentario

De acuerdo con Baskin (2014), y otros autores, la formación de cuerpos arrecifales se encuentra influenciada por ambientes sedimentarios específicos y relacionadas por condiciones locales.

a) Salinidad

Los cuerpos arrecifales pueden desarrollarse en ambientes con diferentes niveles de salinidad, desde concentraciones moderadas (~15%) hasta concentraciones elevadas (~25%). Sin embargo, los niveles extremos de salinidad "pueden restringir la colonización biológica" (Baskin, 2014).

b) Luminosidad

La luz es crucial para el desarrollo de las estructuras arrecifales, típicamente a menos de ~30 m de profundidad se encuentra el límite ideal para su desarrollo. En este límite se albergan aguas claras y someras, lo que permite que los rayos de luz penetren y ayuden a su formación.

c) Presión

De acuerdo con Morsilli et al. (2011), los cuerpos arrecifales se desarrollan en un rango de presión que abarca desde aguas someras hasta el límite de la zona mesofótica, a profundidades entre los ~30 y 150 metros de profundidad.

d) Energía

De acuerdo con Lee y Randolph (2010), la energía involucrada en el desarrollo de cuerpos arrecifales se encuentra relacionada con las condiciones de presión, profundidad y la dinámica del medio ambiente donde ocurre el proceso de formación. La energía moderada a alta facilita la limpieza de detritos y se favorece la cementación, favoreciendo el desarrollo de cuerpos arrecifales. Por otro lado, la baja energía inhibe la formación de los cuerpos arrecifales.

VI. Inferencias en campo

La formación de cuerpos arrecifales proporciona información sobre las condiciones ambientales durante el proceso de formación, incluyendo niveles de salinidad, transparencia o luminosidad y profundidad del agua. Así mismo, permite inferir procesos sedimentarios y las condiciones hidrodinámicas, de alta o baja energía. También son de utilidad para establecer el criterio de polaridad de la secuencia de la roca que los contiene, en función de su forma y geometría.

Estructuras por actividad orgánica (bioturbación)

De acuerdo con Sánchez et al., (2005), la materia orgánica es una mezcla heterogénea compuesta por residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, de agentes microbiológicos y químicos productos de la degradación, de los microorganismos vivos y muertos.

Esta materia orgánica, además de ayudar a mantener la estabilidad del suelo, contribuye a mantenerse fértil y a mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, apoyando en la formación y preservación de "*estructuras de modificación*". La interacción entre los organismos y el sustrato sedimentario colaboran en la generación de estructuras sedimentarias orgánicas (bioturbación).

Basándose en Bromley (1996), la interacción entre la actividad orgánica y los sedimentos pueden dar lugar a la generación de las siguientes estructuras: 1) Icnofósiles, 2) Icnitas, 3) Pistas y galerías y 4) Perforaciones.

Dentro del grupo de las estructuras de "*icnofósiles*", también conocidos como "*fósiles traza*", Seilacher (1964, 1967a, como se citó en Bromley, 1996), determinó que ciertos organismos formadores de estructuras de modificación presentan características paleoambientales similares, por lo que se "estableció el concepto de *icnofacies*".

Las "*icnofacies*" son una asociación de "*fósiles traza*" con condiciones semejantes en el tiempo y el espacio, y que reflejan condiciones ambientales, como la salinidad, batimetría y características del sustrato (Bromley, 1996). Las características sirven como forma de indicadores a través de un "registro geológico" (Seilacher, 1967a, como se citó en Ponce et al., 2018) (Figura 35).

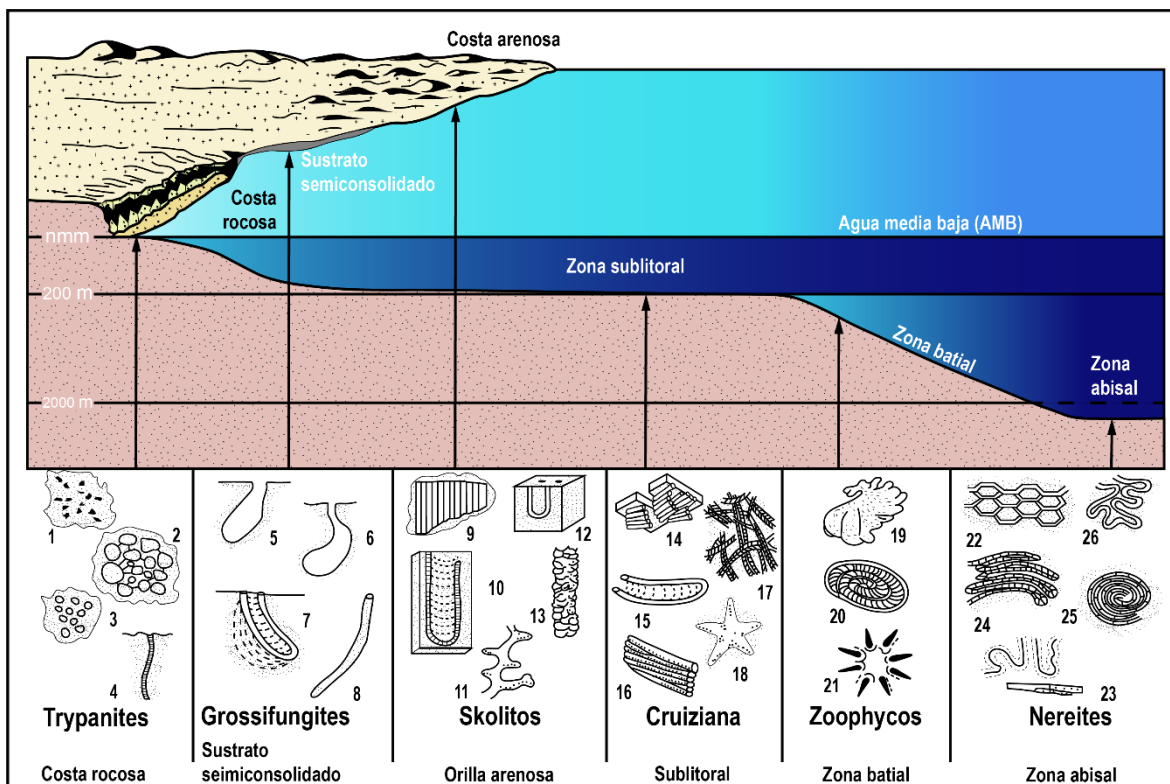


Figura 35. Icnofacies y fósiles traza: 1 Caulostrepis; 2 Entobia; 3 Perforación de equinoideo; 4 Trypanites; 5 Glossifungites, 6 Gastrochaenolites; 7 Diplocraterion; 8 Pylonichnus; 9 Skolithos; 10 Diplocraterion; 11 Thalassinoides; 12 Arenicolites; 13 Ophiomorpha; 14 Phycodes; 15 Rhizocorallium; 16 Teichichnus; 17 Crossopodia; 18 Asteriacites; 19 Zoophycos; 20 Zoophycos; 21 Lorenzina; 22 Paleodictyon; 23 Taphrhelminthopsis; 24 Helminthoida; 25 Spiroraphe; 26 Cosmoraphe (tomada y adaptada de Stow, 2005).

I. Nombre de la estructura: Icnofósil (fósiles traza)

II. Tipo de estructura: Estructura sedimentaria primaria orgánica de modificación o alteración

Trypanites

La icnofacies "trypanites" se desarrolla sobre sustrato silíceo cementado o sobre sustrato constituido por material orgánico como acumulaciones de huesos o coquina. El desarrollo de estas estructuras suele ser un indicador de largos períodos de bioerosión sin pausa por sedimentación (Buatois y Mágno, 2011, como se citó en Ponce et al., 2018).

Característicamente predominan las estructuras cilíndricas y en forma de U, aunque en ocasiones pueden llegar a presentar irregularidades en su morfología. De acuerdo con Ponce et al. (2018) las estructuras presentan relleno pasivo y límites netos, generalmente con forma perpendicular al sustrato y son evidencias de habitáculos de organismos suspensívoros y predadores. El fósil traza, o icnotaxón, son los Trypanites (Figura 36A y 36B).

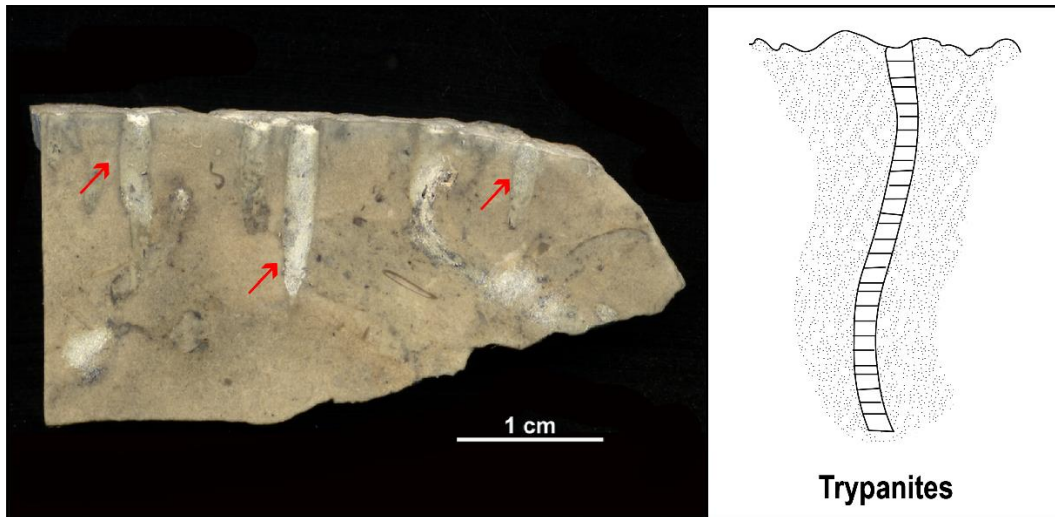


Figura 36. Trypanites (imagen tomada y adaptada de Vinn et al., 2015).

Glossifungites

La icnofacies "*glossifungites*" es considerada como la "*icnofacies marina*" (Pemberton y Frey, 1985, como se citó en Bromley, 1996) y se le reconoce como una fase transitoria, donde una superficie de omisión evoluciona de terreno blando a firme y eventualmente a duro, además de presentar superficies firmes expuestas por erosión local que son relevantes para su desarrollo. En estas condiciones, los períodos prolongados de no sedimentación favorecen a los fósiles traza que reflejan el crecimiento del organismo trazador más que su movimiento (Bromley, 1996).

Característicamente predominan las estructuras verticales a subverticales "generadas por organismos suspensívoros y predadores, que presentan márgenes netos, bien definidos y relleno pasivo" (Ponce et al., 2018). También son frecuentes la formación de estructuras en U de manera abundante. El fósil traza, o icnotaxón, característico son los Glossifungites (Figura 37).

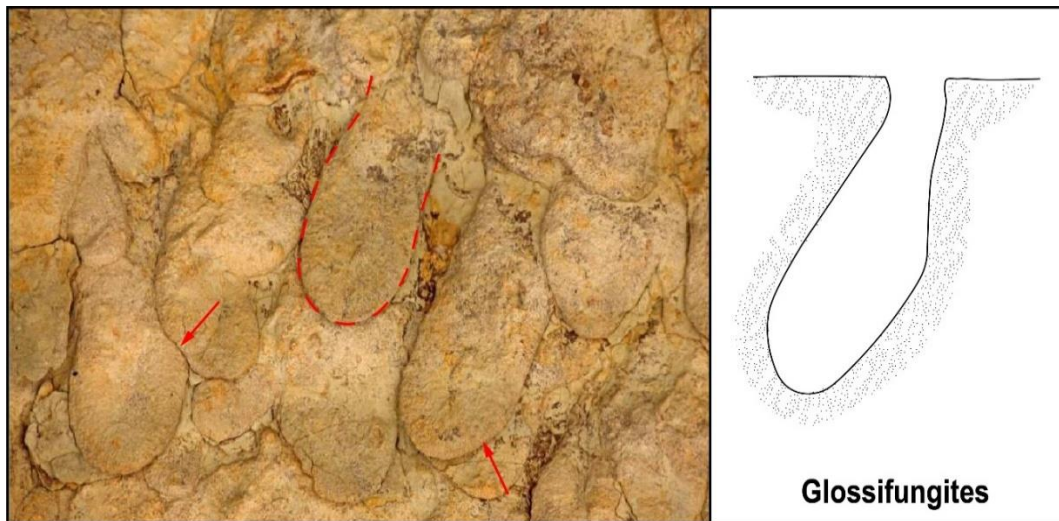


Figura 37. Glossifungites (tomada y adaptada de University of Alberta 2021).

Skolithos

La icnofacies "*skolithos*" se encuentra asociada a condiciones de energía moderada a alta, como las generadas por corrientes o por las olas. Se desarrolla en ambientes infralitorales con sedimentos bien clasificados, que pueden variar entre fangoso y limpios. Además de estar constantemente expuestos "a la erosión o sedimentación abrupta" (Frey et al., 1990, como se citó en Bromley, 1990).

Característicamente predominan "estructuras verticales cilíndricas o en forma de U (Figura 38B) y pocas trazas horizontales de organismos suspensívoros y depredadores pasivos" (Ponce et al., 2018). El fósil traza, o icnotaxón, característico son los Skolithos (Figura 38A).

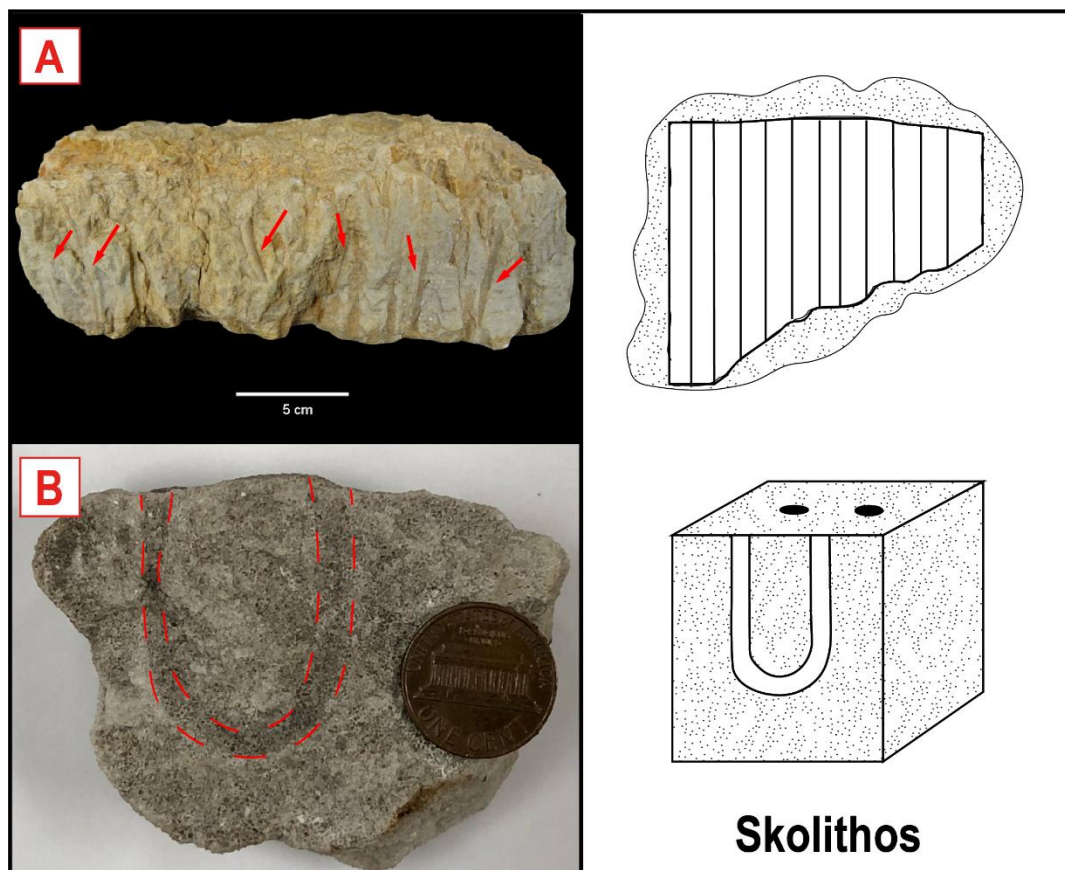


Figura 38 A y B. Skolithos (A) (tomada y adaptada de Universitat de Valencia, S.f.) y Arenicolites (B) (tomada y adaptada de Getty R. P., S.f.).

Cruziana

La icnofacies "*Cruziana*" se encuentra en la región comprendida entre la base de las olas diarias y la base de las olas generadas por tormentas, un entorno que favorece la preservación de los niveles superiores de la icnocenosis debido a las condiciones tafonómicas particulares (Frey y Pemberton, 1985, como se citó en Bromley, 1996).

Característicamente predominan las estructuras horizontales que se generan por organismos depositívoros y detritívoros. La icnodiversidad y abundancia de estructuras es alta, además de que los elementos más comunes son los de locomoción (Ponce et al., 2018). La diversidad alta es el reflejo de la alimentación por suspensión y depósito del sedimento. El fósil traza, o icnotaxón, característico son los *Rhizocorallium* (Figura 39).

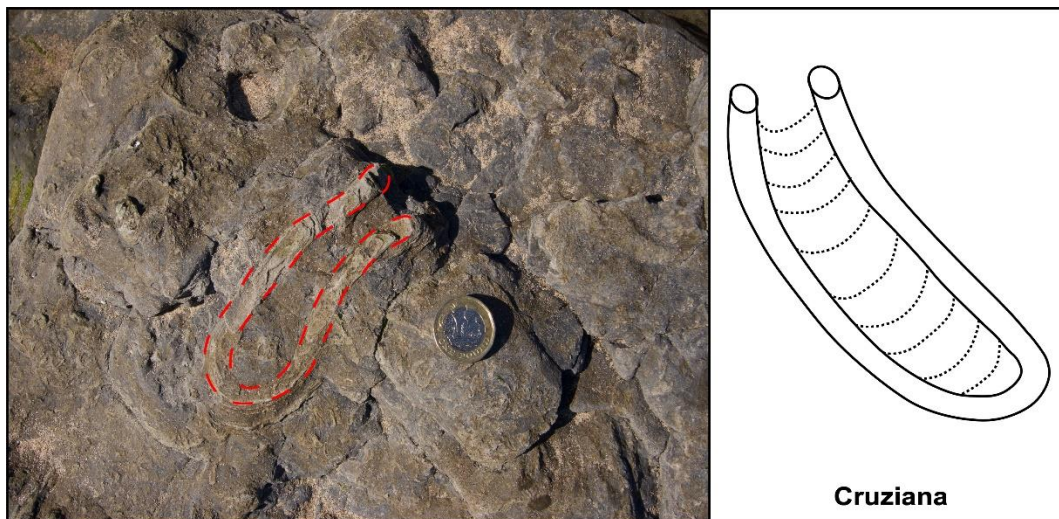


Figura 39. Fósil traza *Rhizocorallium* de la icnofacies *Cruziana* de las limolitas fangosas del Jurásico Temprano de Boggle Hole, al Norte de Yorkshire (tomada y adaptada de Liam Herringshaw, 2010).

Zoophycos

La icnofacies “zoophycos” es considerada una de las más controvertidas dentro de las icnofacies marinas de sedimento blando. “Sin embargo, este género aparece en una diversidad de asociaciones y entornos, lo que genera debates sobre su exclusividad dentro de esta icnofacies” (Frey y Pemberton, 1985, como se citó en Bromley, 1996).

Se desarrolla en zonas de litorales hasta batiales, “caracterizados por aguas tranquilas, con bajos niveles de oxígeno y sedimentos finos bioturbados” (Bromley, 1996). Usualmente estos ambientes se encuentran por debajo de la base de las olas de tormenta, lo que permite desarrollar comunidades.

Característicamente predominan estructuras de alimentación que presentan patrones simples a complejos de organismos depositívoros y de baja icnodiversidad (Buatois y Mángano, 2011, como se citó en Ponce et al., 2018). El fósil traza, o icnotaxón, característico son los Zoophycos (Figura 40).

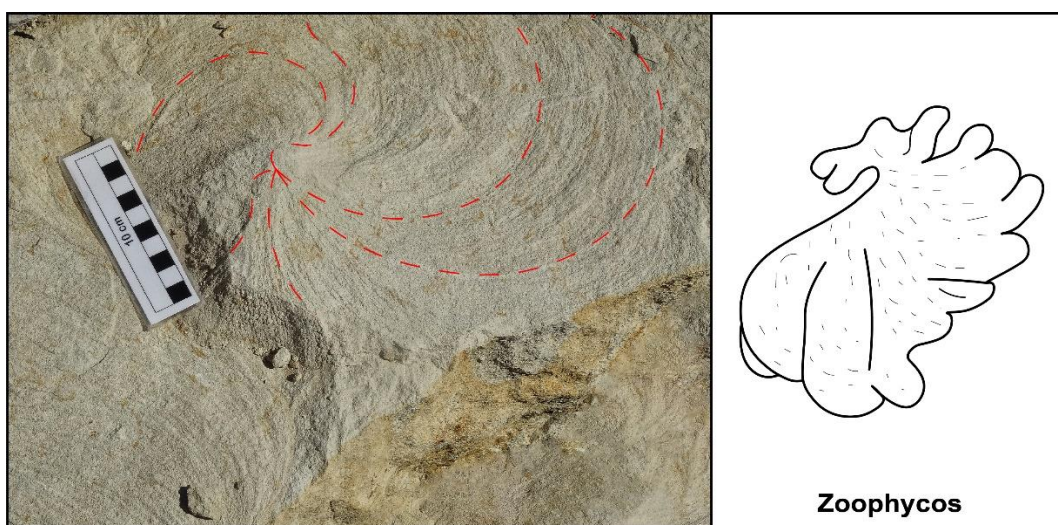


Figura 40. Zoophycos del Jurásico superior Bathoniense. Praia de Mareta, Sagres, Portugal (tomada y adaptada de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

Nereites

La icnofacies "nereites" se asocia con depósitos turbidíticos de grano fino y refleja un marco deposicional y tafonómico único. "Se desarrolla en ambientes tranquilos y con aguas oxigenadas. Las estructuras biogénicas que caracterizan esta asociación son someras y de baja energía, y se preservan gracias al relleno arenoso instantáneo que ocurre durante el evento turbidítico" (Buatois et al., 2002, como se citó en Ponce et al., 2018).

Característicamente predominan estructuras con patrones complejos, producto de actividad bacteriana y microorganismos, además de "organismos depositívoros y detrívoros" (Ponce et al., 2018). El fósil traza, o icnotaxón, es el *Paleodictyon* (Figura 41).

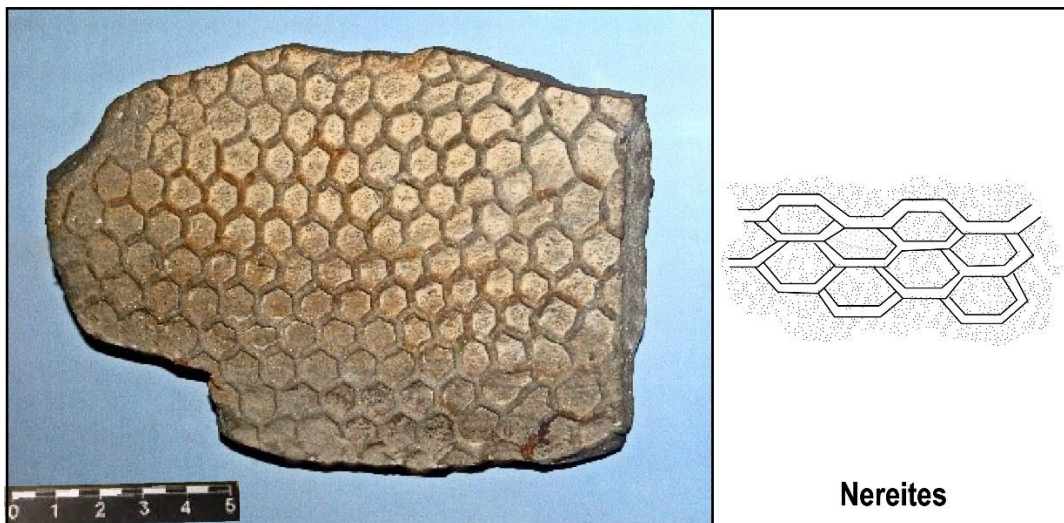


Figura 41. Fósil traza *Paleodictyon* de la icnofacies Nereites (tomada y adaptada de Paolo Faraoni, 2018).

Ignitas (huellas o pisadas)

Las "ignitas", también conocidas como huellas o pisadas (Figura 42A y 42B), son evidencias de forma de vida fosilizada impresas sobre la superficie, repetidas o individuales. Además, también proporcionan información sobre los seres vivos que dejaron las huellas, como posición del cuerpo, biomecánica y velocidad.

De acuerdo con Leonardi (1997), las ignitas son extremadamente variables por su simple naturaleza. Estas no son como los huesos que obedecen a las leyes de la genética, "y que, dentro de la misma especie, y eventualmente del mismo sexo e intervalo de edad, son relativamente iguales". Leonardi las describe como huellas "traza" y huellas "subtraza". Las huellas traza, denominadas como "*sensu stricto*" (s.s.), son huellas de superficie, es decir, las primeras que se imprimieron, y son relativamente raras y estrictas de conservarse debido a los factores paleoambientales. En cambio, las huellas subtraza son impresiones del rastro en capas o láminas que se forman por la deformación producida por el peso de un animal, preservándose debajo de la superficie fuera del alcance de los factores paleoambientales.

Los rasgos paleoambientales de las ignitas son los siguientes, presentan fases transgresivas (sin formación de huellas) y regresivas (en donde aparecen las huellas), posición y dirección de costa, donde las huellas son indicadores de posición (Lockley, 1991, como se citó en Leonardi, 1997).

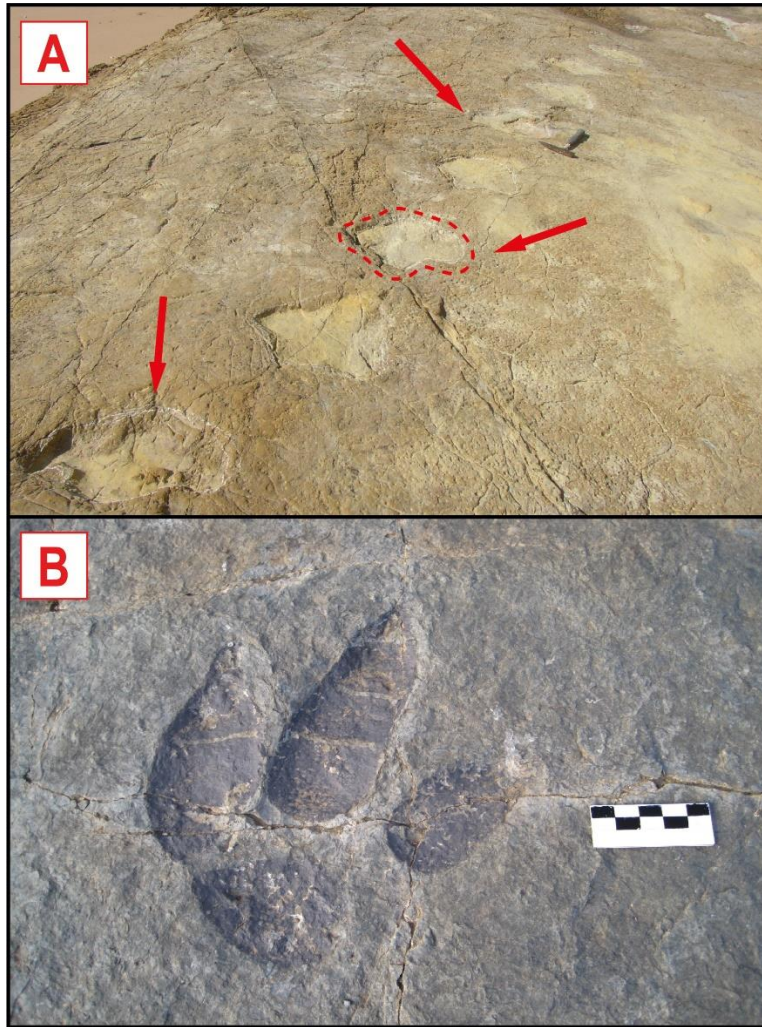


Figura 42 A y B. Figura 42A) Icnita de dinosaurios del Cretácico inferior. Salema, Portugal (tomada y adaptada de Banco de Imágenes Geológicas, 2010), 42B) Icnita de dinosaurios del Jurásico de Playa de Merón, Asturias, España (tomada y adaptada de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

Pistas y Galerías

Pistas

De acuerdo con Seilacher (2007), las pistas (Figura 43) son estructuras formadas a partir de actividad biogénica entre la interacción del organismo y el sedimento durante su desplazamiento.

Generalmente, las formas de las pistas suelen ser sinuosas y lineales, de acuerdo del patrón de desplazamiento del organismo, y pueden ser continuas o interrumpidas.

Los rasgos paleoambientales de las pistas nos permiten indicar las condiciones del sustrato, el comportamiento del organismo y su interacción con el sedimento, así como que son indicativos de la facies icnológica correspondiente.

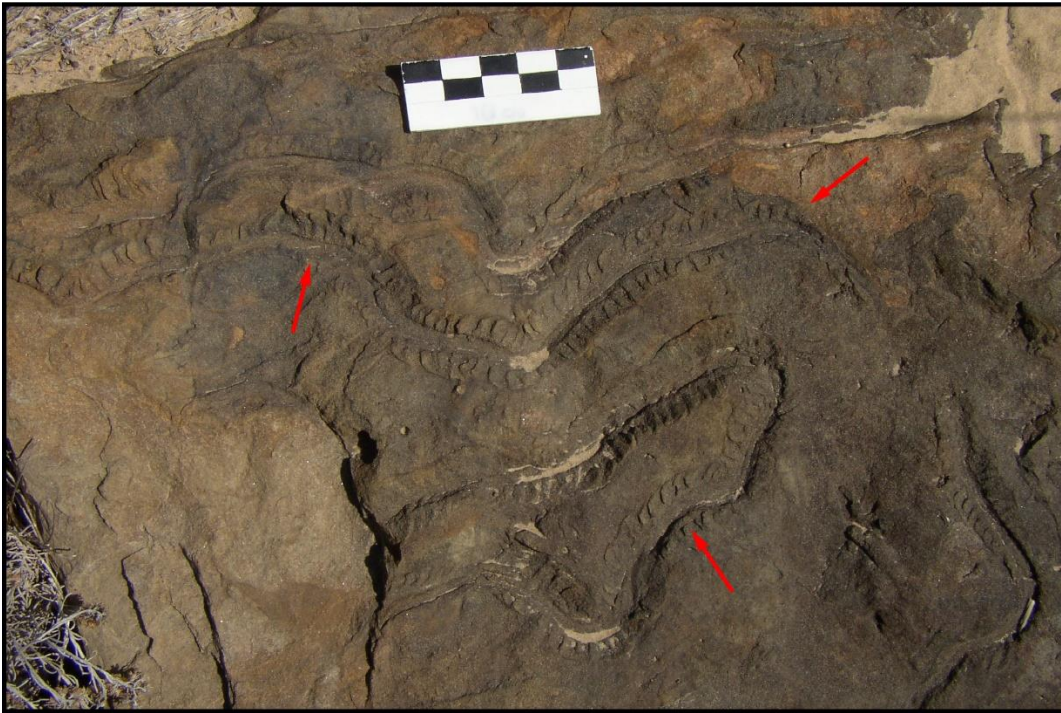


Figura 43. Pistas de equinodermos de Punta de García, Bolonia, Cádiz, España (tomada y adaptada de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

Galerías

De acuerdo con Mayoral y Pendón (1987), las galerías (Figura 44) son estructuras formadas a partir de actividad biogénica de organismos excavadores. Las galerías tienen por función servir como redes de alimentación o refugios comunales.

El tamaño de la estructura (diámetro, espesor de pared y longitud máxima) dependerá del organismo excavador y de las condiciones del ambiente en las que se haya formado. Mayoral y Pendón (1987) mencionan que suelen presentarse en formas cilíndricas (verticales o ligeramente inclinadas), que raramente se encuentran bifurcadas.

Los principales rasgos paleoambientales de las galerías, es que suelen ser indicadores de ambientes someros y litorales de energía moderada (ej. icnofacies de Skolithos); además de ser una subcategoría dentro del grupo de las madrigueras (burrows).

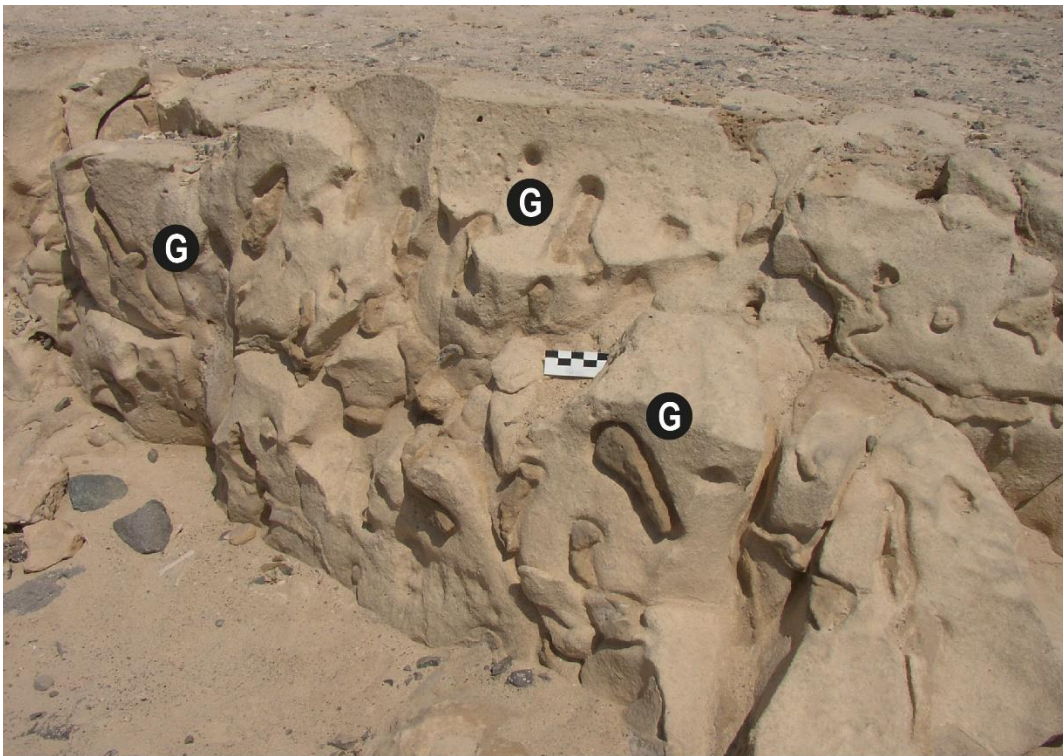


Figura 44. Galerías (G) de Ajui (Fuerteventura, Islas Canarias, España) (tomada y adaptada de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

Madrigueras (burrows)

De acuerdo con Seilacher (2007), las madrigueras son un ejemplo de arquitectura biogénica, que se crean a partir de organismos excavadores. Las madrigueras tienen como función la protección contra depredadores (refugios o fuentes de escape) o condiciones paleoambientales, como trampas (alimentación) e intercambio de gases en ambientes pobres de oxígeno o anóxicos. Además, Seilacher menciona el concepto de "ecoforma" en la que establece que cada madriguera es creada de acuerdo con el propósito del organismo.

La forma de las madrigueras varía de acuerdo con el organismo, Brombley (1996) y Seilacher (2007) mencionan que existen madrigueras en U, L (Figura 45A), ramificadas (Figura 45B) y en espiral (Figura 45C). Suelen presentar orientaciones verticales, horizontales u oblicuas (Figura 45D). El tamaño suele variar de milímetros a algunos decímetros.

Los principales rasgos paleoambientales de las madrigueras (burrows), es que suelen ser indicadores de oxigenación y condiciones de alta energía dentro de la zona litoral o submareal.

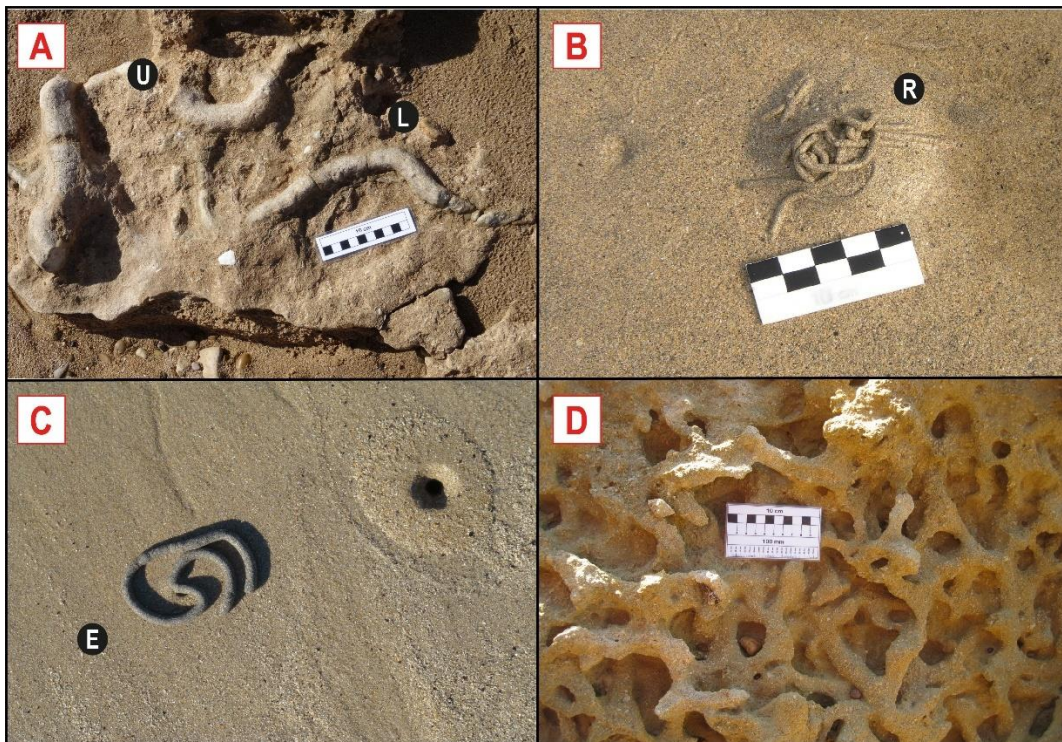


Figura 45 A, B, C y D. 45A) Madrigueras tipo U (U) y L (L) de Sidi Kaouki, Essaouira, Marruecos (tomada y adaptada de Banco de Imágenes Geológicas, 2010), 45B) Madrigueras actuales tipo ramificación (R) de Arenicola sp. Patreksfjörður, Islandia (tomada y

adaptada de Banco de Imágenes Geológicas, 2010), Figura 45C)
Madrigueras actuales tipo espiral (E) de Arenicola sp. Panxón,
Pontevedra, España (tomada y adaptada de Banco de Imágenes
Geológicas, 2010), Figura 45D) Madrigueras biogénicas de crustáceos
decápodos de Conil de la Frontera, Cádiz, España (tomada y adaptada
de Banco de Imágenes Geológicas, 2010).

5. Conclusiones

El catálogo de estructuras sedimentarias primarias, con énfasis en estructuras de deformación y orgánicas, constituye una herramienta didáctica que contribuye de manera directa a la comprensión de los procesos sedimentarios y de su expresión en el registro geológico. La integración sistemática de descripciones basadas en diversos autores, material fotográfico representativo, esquemas interpretativos de los mecanismos y procesos de formación, así como la contextualización de los principales ambientes sedimentarios en los que se desarrollan estas estructuras, permite una aproximación clara y coherente a su estudio.

Desde el punto de vista docente, este material fortalece el proceso de enseñanza y aprendizaje en la asignatura de Sedimentología, al facilitar la vinculación entre los conceptos teóricos y su aplicación práctica en el análisis del registro sedimentario. En particular, favorece la comprensión de procesos físicos, químicos y biológicos involucrados en la deformación y modificación de los sedimentos, aspectos que suelen resultar complejos para los estudiantes durante su formación inicial.

Asimismo, el catálogo fomenta el desarrollo de habilidades fundamentales en la formación del geólogo, tales como la observación detallada en campo, la interpretación de estructuras sedimentarias y la inferencia de ambientes de depósito a partir de evidencias directas. De este modo, el trabajo no solo apoya la docencia en Sedimentología y Petrología Sedimentaria, sino que también constituye un recurso formativo aplicable al trabajo geológico de campo y a la práctica profesional.

6. Bibliografía

- Allen R. L. J. (1982). *Sedimentary Structures; their character and physical basis*. Volume 2. Elsevier.
- Alsop, G. I., Marco, S., Weinberger, R., & Levi, T. (2016). *Sedimentary and structural controls on seismogenic slumping within mass transport deposits from the Dead Sea Basin*. Sedimentary Geology.
- Baskin, R. L. (2014). *Occurrence and spatial distribution of microbial bioherms in Great Salt Lake, Utah*.
- Boggs, Jr S. (2009). *Petrology of Sedimentary Rocks*. 2nd ed. Cambridge University Press.
- Bromley R. G. (1996). *Trace Fossils:biology, taphonomy and applications*.
- Collinson, J., & Mountney, N. (2019). *Sedimentary structures*. Liverpool University Press.
- Cuesta, E. N. (2020). *Apuntes de estratigrafía y sedimentación*.
- Cumings, E. R. (1932). *Reefs or bioherms?* Bulletin of the Geological Society of America.
- Demicco V. R. and Hardie A. L. (1994). *Sedimentary Structures and Early Diagenetic Features of Shallow Marine Carbonate Deposits*. SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Dott Jr, R. H., & Howard, J. K. (1962). *Convolute lamination in non-graded sequences*. The Journal of Geology.
- Gough A. (2021). *Sedimentary Structures.*, Royal Holloway, University of London, Egham, United Kingdom. Elsevier Ltd.
- Kendall, C., & Skipwith, P. (1968). *Recent algal mats of a Persian Gulf lagoon: Journal of Sedimentary Petrology*.
- Kuenen, P. H. (1947). *Two problems of marine geology; atolls and canyons*. Kon. Ned. Akad, Wet., Verh.
- Kuenen, P. H. (1957). *Journal of Geology*. The University of Chicago Press. University of Groningen, Netherlands.

- Leeder R. M. (1982). *Sedimentology: Process And Product*. Department of Earth Sciences, University of Leeds.
- Leonardi G. (1997). *Problemática actual de las icnitas de dinosaurios*. Revista de la Sociedad Geológica España.
- Logan, B. W., Rezak, R., & Ginsburg, R. N. (1964). *Classification and environmental significance of algal stromatolites*. The Journal of Geology.
- Lowe, D. R., & LoPiccolo, R. D. (1974). *The characteristics and origins of dish and pillar structures*. Journal of Sedimentary Research.
- Lowe, D.R., (1975). *Water escape structures in coarse-grained sediments*. *Sedimentology*.
- Martín J. M. (2020). *Apuntes de Sedimentología*.
- Mayoral E. M. & Pendón J. G. (1987). *Icnofacies y sedimentación en zona costera. Plioceno superior (?), litoral de Huelva*. Acta Geológica Hispánica.
- Molina M. J., Nieto L. M, & Ortiz, P. A. R. (2000). *Origen de cantos de arcilla armados en medios fluviales actuales*. Geotemas (Madrid).
- Morsilli M., Bosellini, F. R., Pomar, L., Hallock, P., Aurell, M., & Papazzoni, C. A. (2011). *Mesophotic coral buildups in a prodelta setting (Late Eocene, southern Pyrenees, Spain): a mixed carbonate-siliciclastic system*.
- Nichols G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*. 2nd Edition. John Wiley & Sons.
- Pellant, C., & Pellant, H. (1993). *Manuales de identificación: Rocas y Minerales*.
- Pettijohn, F. and P. E. Potter (1964). *Atlas and glossary of primary sedimentary structures*. Berlin: Springer.
- Ponce, J. J., Carmona, N. B., & Montagna, A. O. (2018). *Atlas de estructuras sedimentarias inorgánicas y biogénicas: descripción,*

análisis e interpretación a partir de afloramientos, testigos corona y registro de imágenes de pozo.

- Rodriguez M. (2022). *Facies, arquitecturas sedimentarias y paleoambientes de las Capas del Cabo Ladrillero, Mioceno, Tierra del Fuego, Argentina.*
- Sánchez B., Ruiz M. y Ríos M. (2005). *Materia orgánica y actividad del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua.* Agronomía tropical.
- Schwartz, M. (2005). *Encyclopedia of coastal science.* Springer Science & Business Media.
- Seilacher A. (2007). *Trace fossil analysis.* Berlin: Springer.
- Stow A. V. D. (2005). *Sedimentary Rocks in the Field: A color guide.* Gulf Professional Publishing.
- Tucker E. M. (2003). *Sedimentary Rocks in the Field, 3rd Edition (Geological Field Guide).*
- Vinn O., Wilson M. A. & Toom U. (2015). *Bioerosion of inorganic hard substrates in the Ordovician of Estonia (Baltica).*
- Zepeda M. (2021). *Apuntes de clase para Sedimentología.*

Páginas Web

- Banco de Imágenes Geológicas (20 de septiembre de 2010). *Cantos de arcillas armados.* Recuperado el 29 de septiembre de 2024 de https://www.flickr.com/people/banco_imagenes_geologicas/
- Beraldi H. (2024). *Estromatolitos.* Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Recuperado el 2 de noviembre de 2024 de <https://www.geologia.unam.mx/contenido/estromatolitos>
- Getty R. P. (S.f.) *Trace fossil gallery: invertebrate trace acanthichnus.* Recuperado el 9 de enero de 2025 de <https://patrickrgetty.wordpress.com/trace-fossil-gallery/>

- Innovative, Earth-related teaching ideas (26 de mayo de 2014). *Load casts – Sedimentary structures*. Recuperado el 26 de agosto de 2024 de <https://earthlearningidea.blogspot.com/2014/05/load-casts-sedimentary-structures.html>
- Lee C. G. y Randolph B. (2010). *Reef modeling: Progress in simulation of carbonate environments*. Recuperado el 4 de diciembre de 2024 de <https://www.kgs.ku.edu/Publications/Bulletins/233/Gerhard/>
- Liam Herringshaw (2010). *Rhizo*. Recuperado el 19 de enero de 2024 de <https://www.flickr.com/photos/liamherringshaw/48766692722/>
- Medina V. (2017). *Biostroma*. Geología – Publicaciones. Recuperado el 3 de diciembre de 2024 de <https://post.geoxnet.com/glossary/biostroma/>
- Molina T. R. (S.f.). *Lección Hipertextuales de Botánica: Las algas*. Instituto de Ciencias de la Educación. Universidad de Extremadura (UEX). Recuperado el 4 de noviembre de 2024 de <https://www-archiv.fdm.uni-hamburg.de/b-online/ibc99/botanica/botanica/algas3.htm>
- Paolo Faraoni (2018). *VER SACRUM: Ricerche di storia, ambiente e cultura locale*. Recuperado el 9 de enero de 2025 de <https://versacrumricerche.blogspot.com/p/il-fossile-enigmatico-di-secchiano.html>
- Tipuana Fishapod (2019). *Estromatolitos, la primera civilización*. Recuperado el 8 de diciembre de 2024 de <https://fishapodpaleontologia.home.blog/2019/05/12/estromatolitos-la-primera-civilizacion/>
- Universitat de Valencia (S.f.). *Skolithos isp.* Recuperado el 9 de enero de 2025 de <https://colecciones.uv.es/s/mtic/item/1637097#?c=&m=&s=&cv=&xywh=-628%2C69%2C1922%2C555>
- University of Alberta (2021). *Newly discovered fossil named after paleontologist*. Recuperado el 9 de enero de 2025 de <https://phys.org/news/2021-01-newly-fossil-paleontologist.html>