

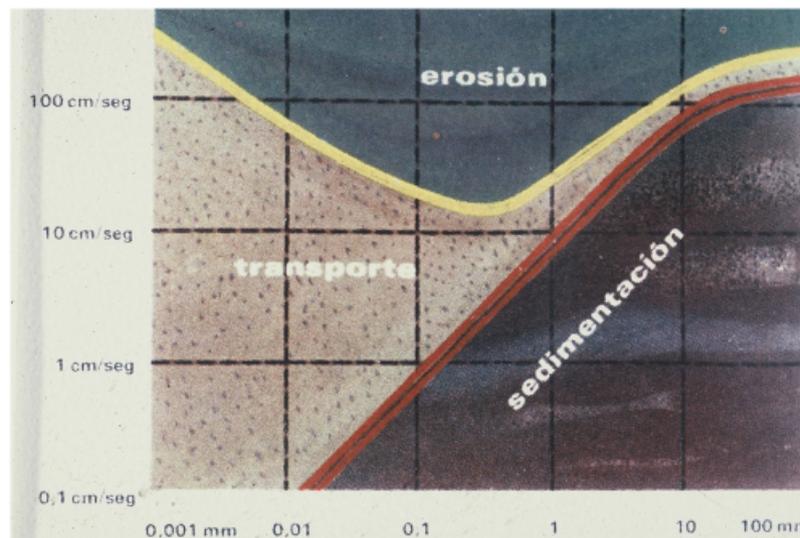
Apuntes de Sedimentología
Dr. José M. Martín (Universidad de Granada)

Tema 4.- **Transporte y depósito II. Corrientes de tracción, mareas, olas y viento.**
Características. Estructuras sedimentarias resultantes.

Las corrientes de agua (ríos, corrientes marinas, etc.) representan, en muchos casos, ejemplos típicos de corrientes de tracción. Se trata de flujos unidireccionales, en régimen laminar, capaces de movilizar y transportar el sedimento suelto grueso (arena/conglomerado) del lecho sobre el que se desplazan. Las partículas de sedimento “grueso” se dejan simplemente empujar, siendo arrastradas por la corriente en movimiento. Fluido (agua en movimiento) y sedimento “grueso” constituyen dos fases independientes, claramente diferenciadas e inmiscibles entre sí. En los ríos, las partículas de tamaño de grano más fino (limo/arcilla) viajan en suspensión y la que resultan de la meteorización y se liberan en estado iónico, lo hacen disueltas.

En el caso de las corrientes tractivas, estamos hablando en realidad de una situación de equilibrio ya que una determinada partícula de sedimento, en función de su tamaño de grano, va a estar sometida unas veces a erosión (puede ser arrancada del lecho por la corriente), ser simplemente arrastrada (transportarse) o depositar (sedimentar). El diagrama experimental que gobierna los campos de equilibrio entre erosión, transporte y sedimentación en función el tamaño de grano de la partícula de sedimento y de la energía de la corriente (o su equivalente expresado en velocidades en cm/seg) se conoce como “Diagrama de Hjulström” (1939).

**DIAGRAMA DE EQUILIBRIO EROSIÓN-
TRANSPORTE-SEDIMENTACIÓN**



La curva que gobierna los campos de equilibrio entre transporte y sedimentación tiene una respuesta lineal, lógica (cuanto más grande es la partícula mayor es la energía de la corriente necesaria para su transporte; y al disminuir la velocidad de la corriente las

partículas de mayor tamaño dejan ser transportadas y depositan antes que las de menor tamaño).

Sin embargo, si consideramos el equilibrio erosión/transporte la situación es un poco sorprendente, ya que la curva muestra que para arrancar partículas de tamaño de grano pequeño se necesitan energías de corriente equivalentes a las necesarias para erosionar las de gran tamaño.

Dicho de otro modo, para erosionar partículas de tamaño arcilla se necesita energías de corriente equivalentes a la de los grandes bloques de conglomerado. A partir de un determinado tamaño de grano de partícula (ligeramente por debajo del mm) hacia abajo, para arrancar (erosionar) las partículas de sedimento se necesitan energías de corriente cada vez más altas cuanto más pequeña es la partícula. Es lo que se conoce como el “efecto Hjulström”.

La explicación al porque se produce el efecto Hjulström no está del todo clara. Parece ser que, en el caso de las arcillas, las fuerzas electroestáticas entre los distintos minerales de la arcilla, proporcionan la cohesión necesaria e impiden su arranque.

Cuando una corriente de tracción se desplaza sobre un lecho arenoso, con velocidades de corriente bajas o muy bajas los granos de arena del fondo permanecen inmóviles. Por encima de cierto umbral de energía de corriente, los granos de arena se ponen en movimiento, modulándose el techo del lecho de arena formando pequeñas ondulaciones denominadas rizaduras (“ripples”). Estas rizaduras, de tamaño centimétrico, tienen perfil asimétrico con un lado de pendiente más suave (el que se enfrenta directamente a la corriente: lado de “barlovento”/“stoss side”) y otro de pendiente más pronunciada (situado al abrigo de la corriente: lado de “sotavento”/“lee side”).

Los granos de arena son arrastrados pendiente arriba por el lado de barlovento y caen en avalancha, por gravedad, en el lado de sotavento, al expandirse el flujo en el techo del “ripple” y perder bruscamente energía la corriente que los desplaza. Ello genera, por delante de la rizadura, un dispositivo interno de láminas (de espesores centimétricos), inclinadas a favor de la pendiente, que se conoce como “laminación cruzada”.

La forma de “ripple” guarda una estrecha relación con el dispositivo de flujo de la corriente de fondo y en ella juega también su papel la corriente de retorno que se genera desde aproximadamente media altura hacia abajo en el lado de “barlovento” del mismo.

Rizaduras (formas de superficie) y laminación cruzada (dispositivo interno) son estructuras sedimentarias genéticamente relacionadas y se forman al mismo tiempo, conforme el “ripple” se desplaza movido por la corriente tractiva. Cuando esta se desacelera y se para el “ripple” se “congela”, y de esta manera se preserva.

RIZADURAS DE CORRIENTE EJEMPLO DE CAMPO (Triásico Medio, Alpes de Bérghamo)



Los primeros “ripples” que se originan son de crestas rectas (con energías de corriente relativamente bajas) y la laminación cruzada interna que se desarrolla coetáneamente se califica como “tabular” (las superficies límite entre conjuntos de láminas son planares).

Conforme aumenta progresivamente la energía de la corriente las crestas de las rizaduras pasan de rectas a onduladas (“ripples” de crestas sinuosas) y finalmente las rizaduras adquieren formas totalmente irregulares (“ripples” lingüoides y en media luna). Las superficies límite entre los “sets” (conjuntos) de láminas cruzadas son en estos casos de traza curva y la laminación cruzada interna que se desarrolla coetáneamente se denomina “en artesa”.

Si aumenta aún más la energía de la corriente, los ripples desaparecen y se generan estructuras idénticas, pero de mayor tamaño (de altura métrica). Son las denominadas “dunas” o “megaripples”.

La estructura interna que se genera coetáneamente es en este caso una “estratificación cruzada”, con espesores de capas de decimétricos a métricos.

La secuencia de estructuras, al incrementar progresivamente la energía de la corriente, es también geoméricamente muy similar: dunas de crestas rectas (que muestran internamente estratificación cruzada tabular) (foto inferior: Mioceno de Agua Amarga, Almería) y dunas de crestas sinuosas, lingüoides y en media luna (con estratificación cruzada en artesa).

ESTRATIFICACIÓN CRUZADA TABULAR



ESTRATIFICACIÓN CRUZADA EN ARTESA





El Argamesón (Plioceno), arriba y Agua Amarga (Mioceno), debajo

Las estructuras hasta ahora mencionadas (rizaduras y dunas) se forman en “bajo régimen de flujo”. Con condiciones de alto nivel de energía de la corriente tractiva (“alto régimen de flujo”) las dunas desaparecen. Los granos de arena se desplazan ahora a alta velocidad por el fondo, paralelos al mismo, desarrollándose “laminación paralela”. Si se incrementa el umbral de energía el flujo se ondula y el fondo arenoso se modula congruentemente con las “olas” de superficie. Las estructuras sedimentarias que se forman se denominan “standing waves”. Finalmente, en condiciones de muy alta energía, dichas olas de superficie rompen y sobre el fondo arenoso se crean remolinos que excavan en el sedimento y desplazan los granos contracorriente generándose las “antidunas” (que migran contracorriente).

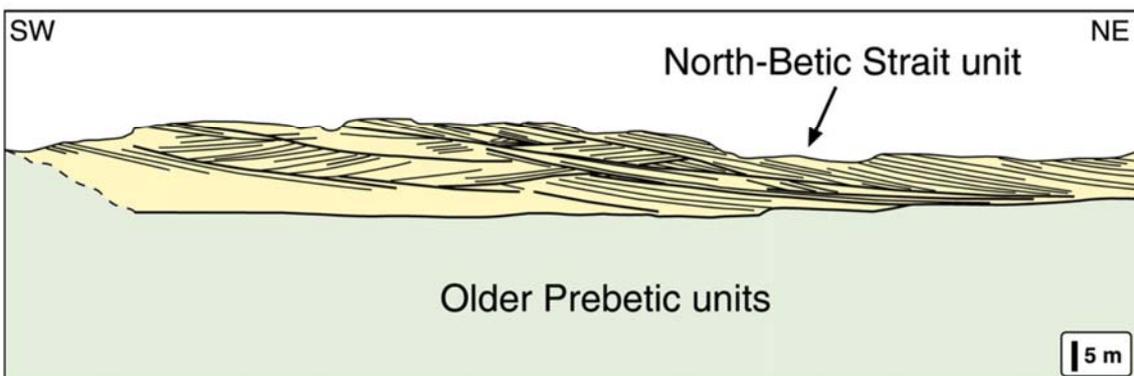
Mareas

La marea es un movimiento periódico de elevación y descenso del mar causado por la atracción del Sol y la Luna sobre las aguas oceánicas. Por causa de la mayor proximidad de la Luna a nuestro planeta, la atracción ejercida por el Sol, a pesar de su gran masa, es sólo un tercio del total. La Luna es pues el factor dominante en el control del período y altura de la marea. La amplitud de las mareas varía de forma sistemática y está relacionada con las fases lunares. Amplitudes mayores que el rango medio caracterizan las mareas vivas (“spring tides”). Amplitudes menores, las mareas muertas (“neap tides”). Se observa mayor amplitud (marea viva) cuando la Luna y el Sol están en conjunción (Luna nueva), o en oposición (Luna llena), ya que se suman los efectos de atracción de ambos. Las mareas muertas, por el contrario, se producen cuando están en cuadratura.

Las mareas son movimientos periódicos que se suceden aproximadamente cada 12 horas y 26 minutos. No son exactamente dos veces al día por causa del movimiento de translación de la Luna que introduce un cierto retardo. La corriente de marea en la práctica se comporta como una corriente unidireccional, de tipo tractivo, que cambia periódicamente de sentido y afecta sobre todo a áreas costeras y marino marginales.

La marea moviliza dos tipos de sedimento. Sedimento grueso: arena (conglomerado), allí donde las corrientes se canalizan y aceleran localmente (canales de marea, estrechos someros, etc.) y sedimento fino: limo (arena fina), en áreas costeras protegidas y de bajo relieve (de escasa pendiente), tales como "llanuras de marea", bahías, márgenes de estuarios, etc. La intensidad de la corriente de marea en uno y otro sentido (ascenso y descenso) varía en función de factores topográficos, oceanográficos y atmosféricos lo que se traduce en la práctica en que en la mayoría de las situaciones una de ellas sea local y/o temporalmente dominante.

En canales, plataformas marinas restringidas y estrechos mareales son frecuentes las estructuras de "sand waves" (foto inferior). Se trata de grandes dunas (de hasta varios metros de altura y de varios metros a decenas de metros de amplitud), de crestas irregulares, que migran en sentidos opuestos generando estratificación cruzada en artesa. Los "cross beddings" en uno y otro sentido marcan las direcciones concretas de desplazamiento de las diferentes generaciones de dunas. Dichas dunas se solapan parcialmente y se "cortan" unas a otras. La base sobre la que se desplaza cada duna en particular es irregular y se forma por arrasamiento previo, parcial, de la duna infrayacente, presumiblemente durante las tormentas. Estas superficies limitantes entre dunas se conocen como "superficies de reactivación", y sobre ellas se desplaza y deposita el sedimento de la nueva duna movido por la corriente de marea.



"SAND WAVES" MAREALES

En pequeños canales, fondo de estuarios, etc. con menor energía, la estructura más típica es la estratificación cruzada en doble sentido, de envergadura métrica, que se conoce como "en cola de pez" ("herringbone cross stratification").

ESTRUCTURAS MAREALES ESTRATIFICACIÓN CRUZADA EN COLA DE PEZ



Tortonense inferior ("Estrecho Norbético")



Tortonense superior. Alhama de Granada (Cuenca de Granada)

En llanuras costeras mareales y zonas protegidas de bahías y estuarios, el sedimento típico que deposita en su parte más alta (somera) es el limo, introducido en suspensión

por la marea de subida y abandonado allí, una vez decantado, al no tener la corriente de marea de retorno (reflujo) fuerza suficiente como para arrancarlo de nuevo del fondo (por el efecto Hjulström). En zonas algo más profundas la corriente de marea moviliza también una cierta cantidad de arena (además del limo), que migra formando pequeños “ripples” que generan laminación cruzada de doble sentido (según los mueva la marea ascendente o la de reflujo) y se generan una serie de estructuras conocidas como “heterolíticas”. Cuando el limo es dominante (zonas más altas del denominado “mixed flat”) la estructura se llama “lenticular bedding”; en las zonas intermedias es la “wavy bedding”, con proporciones equivalentes de arena y limo y, en la parte más distal, profunda del “mixed flat” la estructura dominante es la “flaser”, con dominio de la arena y el limo concentrado en semilentes localizadas en los senos (partes más deprimidas) de las rizaduras.

Oleaje

En el oleaje, el movimiento de las partículas individuales de agua describe una trayectoria circular (es de tipo “oscilatorio armónico simple”) y el del conjunto ondulatorio. En mar abierto, las olas se amortiguan en profundidad, al disminuir progresivamente el diámetro de oscilación de las partículas de agua conforme aquella aumenta, hasta desaparecer completamente. La profundidad máxima capaz de alcanzar la ola es lo que se conoce como “nivel de base del oleaje”. Las olas de mayor envergadura, ligadas a los temporales, son de mayor tamaño y tienen mayor capacidad de penetración que las formadas en épocas de buen tiempo. El nivel de base de las olas de tormenta es por tanto mayor (varias decenas de metros) que el del oleaje de buen tiempo (unos pocos metros), en una misma zona.

En áreas costeras de escasa profundidad las olas interfieren directamente con el fondo y las órbitas que describen las partículas individuales de agua se van aplastando progresivamente y pasan de circulares a elípticas. En el fondo mismo, el movimiento final al paso de la ola de las partículas de agua, es de vaiven en uno y otro sentido, y se transmite también a las partículas de sedimento suelto allí existentes, lo que se traduce finalmente en la formación de “ripples” (rizaduras).

Los “ripples” de oleaje son simétricos. Las partículas de sedimento se mueven desde el seno hasta la cresta adyacente, desarrollándose un “lee face” empinado, cuya pendiente corresponde al ángulo de reposo de los granos. Al mismo tiempo se desarrolla un remolino frontal sobre el “lee side”, análogo al de los “ripples” de corriente. Durante la etapa siguiente al paso de la ola, de flujo opuesto, se establece un perfil similar en dirección inversa.

Los “ripples” de oleaje presentan crestas agudas y senos redondeados.

**RIZADURAS DE OLEAJE. EJEMPLO FÓSIL.
FORMA DE SUPERFICIE**
(Triásico. Cobertera Tabular de la Meseta, Cordillera Bética)



La estructura interna es totalmente congruente y mimetiza perfectamente a la forma de superficie. Se la conoce como “estructura chevron” (en “galón”). Su tamaño varía en función de la envergadura de la ola. Los ligados a olas más grandes (olas de tormenta) alcanzan mayor tamaño (decimétrico). En zonas litorales muy someras los “ripples” de oleaje son normalmente asimétricos al desarrollarse más en un sentido (hacia costa), donde el movimiento de la ola se acelera, que el otro (hacia mar abierto).

**RIZADURAS DE OLEAJE. EJEMPLO FÓSIL.
ESTRUCTURA INTERNA**
(Messiniense. Rambla de Góchar, Sorbas, Almería)



Viento

En el caso del viento (aire en movimiento) la capacidad de transporte es mucho menor que en el agua, debido a que el contraste de densidades entre el fluido y la partícula en movimiento es mucho mayor. De hecho, el aire sólo moviliza sedimentos con tamaños de partícula muy concretos: arenas, como carga de fondo, y limo, en suspensión. Las partículas de mayor tamaño (conglomeráticas) por su peso permanecen inmovilizadas; las de tamaño extremadamente pequeño (arcillas) tampoco se erosionan y arrancan por el viento, por el “efecto Hjulström”.

Las estructuras sedimentarias ligadas al viento en arena son de dos escalas diferentes. De pequeña envergadura (centimétricas) (“ripples”) y de mayor tamaño (métricas) (dunas). Las rizaduras ligadas al viento son de perfil simétrico y no presentan laminación interna. Los granos de arena son desplazados por saltación y los más gruesos suelen concentrarse en la cresta de los “ripples”. Las dunas de viento son de morfologías muy diferentes (ver Tema 15) y tienen estructura interna compleja, debido a la enorme variabilidad en la dirección, sentido e intensidad con la que normalmente sopla el viento en una misma zona.

Internamente muestran numerosas “superficies de reactivación” y exhiben también, frecuentemente, “foresets” con láminas muy inclinada (ligeramente superiores incluso a los 40°), por encima de la denominada “pendiente de equilibrio” de los granos.



*Estratificación cruzada en dunas eólicas del “backshore”
Cuaternario antiguo. El Playazo (Rodalquilar, Almería)*

Hielo

Finalmente, el hielo glaciar (no tratado aquí expresamente a fondo) como agente de movilización y transporte de sedimento es también muy importante. La razón en este caso es opuesta a la del aire. El contraste de densidades entre el hielo y las partículas de sedimento es menor que las del agua líquida, por lo que su competencia (capacidad de carga) es mucho mayor. Se trata sin embargo de un flujo denso, extremadamente viscoso y lento (comparado con las corrientes de agua), aunque eso sí capaz de desplazar incluso los grandes bloques enormes distancias (caso de los “glaciares de casquete”), si actúa durante mucho tiempo (ver Tema 16).