

# Beds and cycles in cyclo-stratigraphy

W. Schwarzacher

*Emeritus Professor.* School of Geosciences. The Queen's University of Belfast, Belfast BT7 1NN, United Kingdom  
W.Schwarzacher@qub.ac.uk

## ABSTRACT

Two well-known geological terms, the bed and the cycle are discussed. The bed is the smallest litho-stratigraphic unit defined by its composition and shape and in particular its thickness. Stratigraphic cyclicity deals with the order in which beds are repeated. Both composition and thickness of beds have to be repeated with at least statistical probability. Process cyclicity deals with the processes that are responsible for cycles. Cycles are intervals of the stratigraphic sequence that must be identical at the beginning and end. An example of a Cretaceous marl limestone series demonstrates the use of the two terms.

Key words: Cretaceous, cycle, lamina, sequence, stratigraphy

## **Capas y ciclos en cicloestratigrafía**

### RESUMEN

*Se discuten dos términos geológicos bien conocidos: capa y ciclo. La capa es la unidad litoestratigráfica más pequeña definida por su composición, su forma y, en particular, su espesor. La ciclicidad estratigráfica trata del orden en el que se repiten las capas. Tanto la composición como el espesor de las capas se han de repetir con al menos probabilidad estadística. La ciclicidad de procesos trata de los procesos que son responsables de los ciclos. Los ciclos son partes de la secuencia estratigráfica que deben ser idénticas al comienzo y al final. El uso de ambos términos se ejemplifica con una serie cretácica de alternancia de calizas y margas.*

*Palabras clave: ciclo, Cretácico, estratigrafía, lámina, secuencia*

### VERSION ABREVIADA EN CASTELLANO

#### **Introducción**

*El lenguaje técnico utilizado en estratigrafía trata con la descripción de los hechos observados y con la explicación de los procesos que los originaron. Capas y ciclos son términos que se usan con mucha frecuencia pero cuya definición es generalmente laxa; sin embargo, en cicloestratigrafía es vital su precisión. Las capas o estratos son unidades estratigráficas definidas por litologías alternantes o por una serie fija de puntos de muestreo. Los ciclos son partes de la secuencia estratigráfica que deben ser idénticas al comienzo y al final; las secuencias cíclicas son una serie de ciclos repetidos de manera idéntica. Las capas pueden ser ciclos, pero no todas lo son. Es tácitamente aceptado que los ciclos que forman sucesiones cíclicas son el resultado de procesos cíclicos y, por consiguiente, representan intervalos de tiempo idénticos. Los procesos y los datos geológicos no siguen modelos preconcebidos con precisión matemática y las definiciones basadas en dichos modelos deberían considerarse como situaciones abstractas que la realidad muy frecuentemente sigue, pero solo en un sentido estadístico. Dichas definiciones abstractas y su uso, son el objeto de estudio de este trabajo.*

#### **Propiedades básicas de los capas**

*La definición de un estrato o capa de acuerdo al código estratigráfico es: "una capa caracterizada por propiedades y atributos litológicos particulares que la distinguen de capas adyacentes". De acuerdo a esta definición, la capa tiene una composición definida (litología y contenido fósil) que junto a las medidas de*

su forma tridimensional son suficientes para su descripción completa. La definición es suficientemente vaga como para incluir capas que cambian en composición o que contienen dos litologías.

El reconocimiento de las capas depende de la precisión y método de observación, y hasta cierto punto, de sus condiciones de afloramiento y el estado de meteorización. Se deduce que las capas no son necesariamente unidades naturales sino unidades definidas por el investigador. La división del registro estratigráfico en capas simplifica su descripción pero al mismo tiempo pone límites definidos a la resolución estratigráfica.

Las capas están separadas por planos de estratificación, los cuales son horizontes originados por tasas o modos de sedimentación diferentes. La extensión lateral de las capas es muchas veces desconocida, pero es un importante atributo que está íntimamente conectado con los conceptos de auto- y alo-estratigrafía.

La definición de planos de estratificación, y de hecho de las capas, está lejos de ser objetiva, ya que algunas litologías gradan continuamente de unas a otras y los límites de las capas en sedimentos blandos son usualmente difusos. La definición de capas se hace incluso más difícil por el hecho de que cualquier cambio de textura y de composición pueden ser, fuertemente alterados por la compactación y la diagénesis. Dichos procesos pueden cambiar considerablemente el patrón de las capas originales.

La propiedad más remarcable de las capas sedimentarias es que la estratificación que forman es paralela y originariamente horizontal. La horizontalidad de una superficie sedimentaria significa que está en equilibrio gravitacional y se desarrolla cuando el sedimento es lo suficientemente móvil como para extenderse como un líquido o, alternativamente, cuando está expuesto prolongadamente a erosión y redépósito con la consiguiente peneplanización. Ambas condiciones solo ocurren en la superficie del sedimento y es lo que establece firmemente los planos de estratificación como planos temporales. Las teorías que tratan de explicar los planos de estratificación, y la estratificación misma, como el resultado de procesos diagenéticos, son solo creíbles si aceptan que alguna estratificación sedimentaria preexistente es la responsable de la formación de dichas superficies. La diagénesis puede cambiar, acentuar o eliminar la estratificación horizontal, pero no crearla. Por consiguiente, las superficies de sedimentación horizontales son siempre planos temporales que siguen la ley de superposición, pero la edad de cualquier posible cambio diagenético de estas superficies no sigue necesariamente dicha ley.

Los planos de estratificación como superficies bi-dimensionales pueden indicar solo una edad, en contraste a la capa tridimensional donde el espesor representa un intervalo temporal. Para estimar dicho intervalo temporal se ha de conocer el espesor determinado por la compactación y la erosión de la capa, así como su tasa de sedimentación. Si las capas se repiten muchas veces con idénticas estructuras, texturas y composición, entonces se puede asumir que tienen la misma tasa de sedimentación y que se pueden considerar como capas-ciclo que representan unidades estratigráficas más o menos equivalentes.

No todas las capas son repetitivas y un especial grupo de capas son los llamados estrato-eventos (eventitas) (Einsele et al., 1991). La estratificación de eventos está asociada frecuentemente con eventos catastróficos y de alta energía y representan intervalos temporales breves cuando se compara con la sedimentación cíclica normal. La nomenclatura de ambos tipos es desafortunada ya que evento no implica su rareza y los autores también parecen confundir repetición con ciclo. Los estratos-evento se pueden considerar como instantáneos, comparado con la sedimentación normal. Por lo tanto, solo pueden proporcionar una edad relativa y su espesor no proporciona información de tiempo.

### **La definición de ciclo**

El término ciclo puede referirse a dos conceptos diferentes. El primero describe las secuencias de sedimentos que se repiten a lo largo de la columna estratigráfica y el segundo se refiere a los procesos que producen dichas secuencias repetidas. Los dos tipos de ciclos se pueden llamar estratigráfico y de procesos, respectivamente (Schwarzacher, 2007). Las definiciones tradicionales de sedimentación cíclica están generalmente relacionadas con el orden en el que las diferentes litologías aparecen en una sección estratigráfica.

Si una serie de sedimentos o un proceso consta de tres partes (litologías o fases) A, B, C, entonces ABCA es un ciclo y llega a ser una secuencia cíclica: ABCABCABC... si se repiten los ciclos. Las partes son capas y por consiguiente estratos, pero se convierten en ciclos solo si se repiten de manera idéntica. La repetición de estratos implica la repetición de la secuencia composicional y de los espesores de las capas. Particularmente importante es la repetición de las capas con igual o aproximadamente igual espesor en el registro estratigráfico. La importancia de espesores repetidos en capas cíclicas fue enfatizada por primera vez por Sander (1936) y la desviación estándar de los espesores de los ciclos como una "medida" de ciclicidad se desarrolló en su tesis doctoral. Si no se consideran las dimensiones de las capas y se toman las capas como sinónimos de ciclos, se pierden los valiosos conceptos de estratificación y ciclicidad.

Una importante diferencia entre fases repetidas y secuencias cíclicas emerge si se examinan los procesos que generan ciclos. Está bien establecido que la sucesión de litologías en las secciones no aparece al azar, sino que forman grupos relacionados. En dichas secuencias, correlacionadas de forma seriada, cualquier repetición de una litología clave puede producir un ciclo. Sin embargo, si el mismo ciclo se repite de manera predictiva, se asume que la secuencia cíclica es el resultado de un sistema oscilante en el que el estadio final conduce automáticamente al comienzo de un nuevo ciclo.

La teoría de los sistemas oscilantes se ha estudiado extensivamente (Andranov et al., 1966) y una breve discusión de los sistemas oscilantes, desde el punto de vista de un geólogo, se puede encontrar en el capítulo 2 de Schwarzacher (1993). En sentido estricto, todos los ciclos naturales (geológicos) se deberían llamar oscilaciones, y se debería utilizar el término ciclo para referirse también a oscilaciones menos regulares.

La diferencia entre ciclo y secuencia cíclica es importante en las definiciones de evento y de la llamada estratificación cíclica. Solo la última produce secuencias cíclicas. Las secuencias producidas por los procesos oscilatorios son secuencias representando ciclos de igual, o similar, longitud de tiempo que corresponde a estratos de igual, o similar, espesor. Las capas que forman secuencias cíclicas se pueden llamar ciclos-capa. La relación entre espesores de capas y tiempo está resumida en la "regla de Sanders" que establece que: iguales espesores de capas implica iguales intervalos de tiempo pero espesores distintos de las capas no implica intervalos de tiempo distintos.

La naturaleza oscilante de las secuencias cíclicas se puede establecer a partir de las probabilidades de transición de las litologías. Las probabilidades de transición (matrices de Markov) de los procesos oscilantes tienen valores propios negativos y máximos de recurrencia en transiciones mayores que uno. El análisis espectral se puede usar cuando se puede expresar un registro estratigráfico en términos de valores numéricos. Este análisis encuentra máximos de frecuencia con significación medible (Pardo-Igúzquiza et al., 2000), si una secuencia es cíclica y fue generada por un proceso oscilante.

Como la ciclicidad depende de la repetición, pero los procesos geológicos nunca siguen reglas exactas, se debe aceptar que la ciclicidad es esencialmente una propiedad estadística. La ciclicidad se puede desarrollar en varios grados que van desde el absoluto, periódico a cuasi-periódico, oscilante y el orden aleatorio no oscilante.

### **Capas como unidades estratigráficas**

Para establecer la capa (o un ciclo, que puede verse como una o más capas) como una unidad estratigráfica, esta debe representar un intervalo no solo estratigráfico, sino también temporal y debe tener conectividad dentro de un área definida. Una capa está conectada si sus planos de estratificación son continuos. Asimismo, estará estratigráficamente correlacionada cuando sus planos de estratificación inferior y superior tengan edades idénticas en localidades diferentes. Se considera que todas las capas conectadas pueden estar estratigráficamente correlacionadas, pero no todas las capas correlacionadas tienen que ser continuas. La continuidad es difícil de probar, siendo frecuentemente la explicación más factible de capas correlacionadas que repentinamente (aunque solo localmente) pueden estar interrumpidas.

El siguiente modelo ilustra la relación del proceso que forma la capa con el tiempo. Se asume que las partículas sedimentarias son continuamente suministradas a un área dada, pero solo se depositan con una cierta probabilidad  $p$ , mientras con probabilidad  $q = 1-p$  se transportan a un lugar diferente. El espesor del sedimento en este modelo se incrementa en pasos aleatorios y a intervalos aleatorios. Este modelo se puede ilustrar gráficamente por la llamada caminata aleatoria (Fig. 1). Los pasos se pueden interpretar como partículas sedimentarias de diferente tamaño, o pulsos de sedimentación o incluso intervalos estacionales. Cuando las propiedades estadísticas de los pasos se mantienen, las caminatas aleatorias repetidas (intervalos de sedimentación) alcanzarán puntos finales (espesor total de sedimento) que están normalmente distribuidos. El modelo es importante porque muestra que incluso bajo las condiciones más generales, se encontrará una relación estadística entre tiempo y duración de sedimentación.

Considerando la longitud de los intervalos de sedimentación ininterrumpida, se puede modelar la formación de capas. Por ejemplo, uno puede asumir que los planos de estratificación se desarrollan cuando el depósito es interrumpido por fases de no depósito. De acuerdo con las asunciones originales, la probabilidad de obtener una capa de espesor 1, 2, 3,... está dada por las probabilidades:  $pq, ppq, pppq, \dots$  que puede escribirse como una expansión geométrica: Probabilidad (capa =  $n$ ) =  $p^n q$ . Reemplazando la variable discreta con un espesor continuo  $x$ , se obtiene la distribución negativa exponencial con densidad,  $\rho$ : Probabilidad (capa =  $x$ ) =  $\rho \exp(-\rho x)$ .

Las distribuciones exponencial y geométrica resultan cuando el espesor de la capa es un valor aleatorio que es completamente independiente de su posición en una secuencia de capas. Geológicamente esta situación es muy inverosímil. Por ejemplo, cambiando de la condición de no depósito a erosión (que reduce la capa infrayacente) durante la sedimentación, lo que indica la facilidad con la que puede aparecer la dependencia entre capas sucesivas.

Como el registro estratigráfico representa el resultado de una multitud de procesos, es esperable que la mayoría, si no todos, los registros estratigráficos tengan la propiedad de Markov para la correlación entre capas sucesivas y son por consiguiente procesos aleatorios no independientes.

Es posible el desarrollo de modelos más realistas de formación de capas que resultan en distribuciones de espesores que son muy similares a las distribuciones observadas. Sin embargo, suele pasar que diferentes modelos producen distribuciones de espesores que son similares y difíciles de discriminar (Schwarzacher, 1975). Por consiguiente es improbable que las distribuciones de espesores de capas puedan identificar un

*proceso específico de formación de capas, pero pueden ser utilizados de modo efectivo para describir la estratificación de diferentes formaciones y facies.*

### **La relación entre capa y ciclo**

*Los ciclos se han definido en la introducción o como una capa simple o como un grupo de capas que se repiten idénticamente. Por consiguiente, las capas se pueden desarrollar como ciclos pero no todas las capas son ciclos. Resulta clara la importancia de conocer si las capas son cíclicas o no. Como las capas, de acuerdo a la definición aceptada en este trabajo, no se pueden subdividir, la única evidencia de repetición idéntica es la repetición de un mismo espesor de las capas. Cualquier decisión acerca de un espesor igual de capas sucesivas es siempre incierta debido a la variabilidad innata en la sedimentación. La ciclicidad se puede establecer con dataciones precisas, pero también se puede inferir cuando varios órdenes de ciclos muestran ratios de frecuencias que se ajustan a los ratios de procesos cíclicos bien conocidos. Por ejemplo, si se encuentra que un número dado de capas  $n$  representa el mismo número de  $n$  años, se puede concluir que las capas representan ciclos anuales. Si además, las series contienen un ciclo de 11 años (ciclo de las manchas solares), se reforzará dicha conclusión.*

*En muchos registros estratigráficos, la relación entre ciclo y capa es incierta y difícil de determinar. Esto se ilustrará con datos de dos localidades: Contessa Highway y Mt Petrano en los Apeninos italianos del distrito de Gubbio (Cresta et al., 1989). Dos secciones en esta área proporcionan datos de estratificación para casi todo el Cenomaniense (Schwarzacher, 1994). Las capas se han definido en este estudio como las capas visibles o bien de caliza micrítica blanca o bien de marga. Los niveles de sílex se registraron como tales pero se clasificaron como caliza. Las medidas de espesores se hicieron a mano, y las litologías se basan en clasificaciones de campo. En los muros de las secciones las capas se desarrollan como alternancias caliza-marga, pero en las partes de techo de las secciones los espesores de las margas disminuyen y las capas de marga con menos de 5 mm de espesor se trataron como planos de estratificación. En ambas secciones hay planos de estratificación prominentes (maestros) que se repiten a intervalos de aproximadamente un metro para formar ciclos de estratificación (conjuntos de capas). Estos han sido interpretados como el resultado del ciclo de excentricidad de 100 kiloaños (ka). Este ciclo es difícil de definir y la identificación de los límites de los ciclos en el campo y el análisis de los espesores de las capas dan diferentes resultados, con un número de ciclos en las secciones que varían desde 64 a 72. Esto dio como resultado un espesor medio de los ciclos de 90 a 104 cm. Como las secciones no representan el Cenomaniense completo, que acuerdo a la escala de tiempo geológico tiene una duración de 6,1 millones de años (Ma), los valores son demasiado altos y solo de un orden aproximado.*

*Las principales causas de la formación de capas en las facies caliza-marga son alternativamente: fluctuaciones en la producción de carbonatos, solución o fluctuaciones de flujos de entrada de material no carbonatado, o cualquier combinación de las anteriores. Para determinar cuáles son los procesos más importantes, serían necesarios datos regionales muy detallados. Con los datos disponibles se reconoció que las dos localidades tienen diferentes distribuciones de espesores de capas cuando marga y caliza se consideran juntas. Sin embargo, tienen casi distribuciones idénticas cuando solo se consideran las capas de caliza. Esto indica posiblemente que el flujo de entrada de marga muestra variaciones regionales. Examinando los espesores de capas de caliza sin margas se obtienen resultados más definitivos que cuando se consideran parejas de alternancia caliza-marga. La distribución de los espesores de caliza sin marga se muestra en la Fig. 2. Esta distribución tiene una moda bien desarrollada para la clase entre los 9 y 10 cm que corresponde al número de capas por ciclo de 9 a 10 (ver Tabla 1). La distribución de espesores es distintivamente polimodal con modas a 5, 10, 15 y 20 cm. Estas podrían ser el resultado de un ciclo básico de una capa (¿ciclo?) de 5 cm, aunque no está apoyado por los resultados del análisis espectral de los espesores de las capas. La amplia dispersión de la distribución puede deberse en parte a la pérdida de planos de estratificación, aunque también sugiere que las secuencias son una mezcla de capas con orígenes dispares. Como las capas son las unidades más pequeñas (representando la frecuencia de Nyquist) el análisis espectral no se puede utilizar para obtener información más detallada acerca de su estructura. Para obtener información de su estructura interna se necesitarían tomar más datos a intervalos menores que los espesores de las capas. Por consiguiente, no hay evidencia de la repetición cíclica de las capas.*

*Como ambas secciones abarcan el mismo intervalo estratigráfico, un test obvio para la continuidad de las capas y de los ciclos métricos es que el número de ciclos y capas en ambas secciones debería ser el mismo. Las discrepancias en el número de capas y ciclos se podrían justificar por las diferentes condiciones de meteorización de los dos afloramientos. Se considera que un gran número de capas son de hecho continuas entre las dos localidades.*

*Para examinar la correlación y la relación entre capas y ciclos en más detalle, se utilizan las curvas acumuladas ajustadas. Estas curvas muestran el espesor acumulado de capas sucesivas después de sustraer la cantidad que habría resultado de una acumulación constante. La Fig. 3 muestra las curvas para ambas secciones, usando la combinación de las capas de caliza y marga. El eje horizontal presenta el número de capas*

*multiplicado por el espesor medio de las capas. Esto proporciona solo una posición aproximada de las capas en metros desde el muro de las secciones. El eje vertical muestra la distancia que una capa o bien no ha alcanzado o bien ha excedido, desde la posición asumida de sedimentación constante.*

*Para que las curvas acumuladas ajustadas sean de utilidad, se ha de conocer una correlación aproximada entre las secciones, que permita establecer la tendencia lineal (tasa de sedimentación constante) de las curvas.*

*Si esta tendencia está basada en una gran cantidad de datos, la precisión de esta correlación no es muy importante y las curvas se pueden utilizar para refinar más la correlación. En los ejemplos dados existe muy buena correspondencia entre las dos secciones. Las dos curvas concuerdan, incluso en las fluctuaciones menores causadas por el ciclo de un metro.*

*El segundo uso importante de las curvas acumuladas es la comparación de la acumulación de capas con la de ciclos de estratificación. Como anteriormente, las curvas para espesores de ciclos (Fig. 4) se dibujan frente a ciclos consecutivos. El eje horizontal se calibra con el número de ciclos; una posición estratigráfica aproximada para cada ciclo se obtiene multiplicando este número por el espesor medio de los ciclos (esto es, 100 cm). La escala vertical indica por cuanto el techo de un ciclo particular no ha alcanzado o ha sobrepasado la posición de acumulación constante.*

*La Fig. 4 indica una tendencia que es muy similar a la tendencia de la Fig. 3. Las capas decrecen bajo la tasa de acumulación constante en los primeros dos tercios de las secciones y entonces aumentan más o menos continuamente. Los espesores de los ciclos también muestran discrepancias entre las dos localidades, probablemente debidas a varias interpretaciones erróneas de los límites de los ciclos de un metro y posiblemente también a una falla estructural que pasó desapercibida cerca del ciclo 30 en la sección de Mt. Petrano. La similitud entre la acumulación de la capa y el ciclo (Figs. 3 y 4) no debería sorprender. Ambas se pueden interpretar o bien representando tasas variables de acumulación, o como una profundidad relativa variable de la cuenca, comparado o bien con una sedimentación constante o con una subsidencia que pueden haber sido comunes a ambas.*

*Si se acepta la interpretación del ciclo de un metro como indicativo del ciclo de Milankovitch de 100 ka, entonces uno podría argumentar como sigue a continuación. La tendencia que determina el espesor de los ciclos de un metro (Fig. 4) debe ser la tasa de acumulación. Esta es la misma tasa que determina el espesor de las capas (Fig. 3). Ya que los ciclos de un metro son el resultado de procesos cuasi-periódicos, igual debe ocurrir para las capas. Sin embargo, la gran variación del espesor de las capas y la ausencia de información sobre si las capas se repiten idénticamente, resulta bastante posible e incluso verosímil, que las unidades se separaron como capas como resultado de una mezcla de diferentes procesos.*

## **Conclusiones**

*Si se usa el término capa (estrato) y ciclo en estratigrafía se han de respetar las definiciones ya aceptadas, dentro de lo razonable. La intención de este trabajo ha sido remarcar que hay una diferencia fundamental entre estratificación cíclica y no cíclica. Se ha apuntado además, que la ciclicidad como una descripción de un sedimento es en cierto modo inútil, a menos que se pueda relacionar a procesos cíclicos que son o periódicos o al menos cercanos a las oscilaciones periódicas. La interpretación de los procesos que formaron un sedimento del registro estratigráfico, es muy frecuentemente una situación de "si fue antes el huevo o la gallina". Si se conocen los procesos, se pueden predecir sus comportamientos y viceversa. Se acepta que las variaciones ambientales que están influenciadas por movimientos planetarios serán cíclicas y estarán con más probabilidad cerca de ser periódicas. Se conoce mucho menos de los ciclos que o bien se originan o se han modificado dentro del ámbito terrestre.*

*En los sistemas complejos de los ambientes, muchos de sus componentes, climáticos regionales y ecológicos, pueden interaccionar y generar oscilaciones. Uno puede construir una amplia variedad de modelos para explicar las oscilaciones, pero los ciclos de baja frecuencia, que son mayores que los periodos de las posibles observaciones son difíciles, si no imposibles, de controlar. Esto es aplicable en particular a los llamados ciclos de sub-Milankovitch con duración de milenios (1-10 ka). Es lógico que las frecuencias y los dominios de los ciclos registrados por sedimentación estén sesgados por resonancias ambientales. Si el ambiente contiene un número de componentes que son capaces de oscilar, pueden influenciarse mutuamente entre ellos. Es posible que los ciclos de baja frecuencia puedan producir ciclos más cortos por la alteración de una o más partes del sistema ambiental. La regla de Sander establece que una ciclicidad estratigráfica es resultado de procesos cíclicos, pero no todos los procesos cíclicos producen ciclos estratigráficos. En este sentido, es importante tener presente que las condiciones geológicas frecuentemente pueden haber dificultado la ciclicidad estratigráfica observable aun cuando un registro estratigráfico haya sido generado por un sistema oscilante.*

*El conocimiento completo de las capas y de los ciclos necesitará de más trabajo, con una mejor resolución estratigráfica y un entendimiento amplio de la distribución regional (dominios) de posibles sistemas oscilantes complejos.*

## Introduction

The technical language used in stratigraphy has to deal with describing observed facts and also with explaining the processes that created them. Beds and cycles are examples of words that are used frequently but are often only loosely defined; in cyclo-stratigraphy however, their definitions are critical. Beds or strata are stratigraphic units defined by successive lithologies or by a fixed series of sampling points. Cycles are intervals of the stratigraphic sequence that must be identical at the beginning and end. Cyclic sequences are a series of identically repeated cycles. Beds can be cycles but not all beds are cycles. It is tacitly accepted that cycles in cyclic sequences are the result of cyclic processes and therefore represent identical time intervals.

Geological data and processes do not follow preconceived models with mathematical precision and definitions based on such models should be considered as abstract situations that are very often approached by reality only in a statistical sense. It is the abstract definitions and their use that will be discussed in this paper.

## Basic properties of beds

The definition of a stratum or bed according to the stratigraphic code is "a layer characterized by particular lithological properties and attributes that distinguishes it from adjacent layers". The bed, according to this definition, has a definite composition (lithology and fossil content) and this, together with the measurements of its three dimensional shape, is enough to fully describe it. The definition is sufficiently vague to also include beds that change in composition, such as the graded bed, or even beds containing two lithologies that appear to belong together, such as silt-clay or marl-limestone couplets.

Beds are commonly regarded as real visible objects but in fact, recognising beds depends not only on the accuracy and method of observing them but also, to a large degree, on the state of exposure and weathering of the sediment. It follows that beds are not necessarily natural units but are units that are (often inadequately) defined by the investigator. Dividing the stratigraphic record into beds has the advantage that it simplifies its description but it also sets definite limits to the stratigraphic resolution.

Beds are separated by bedding planes, which are horizons that are caused by different rates or modes of sedimentation. A change of sedimentation often makes bedding-planes become surfaces along which

consolidated sediments physically part. The lateral extent of beds is often unknown, but is an important attribute that is closely connected with the concepts of auto- and allo-stratigraphy. The defining of bedding-planes and indeed of beds is far from objective because some lithologies grade continuously into each other and the boundaries of layers in soft sediments are usually diffuse. Defining beds is made even more difficult by the fact that any change of texture and material can be, and usually is, strongly altered by compaction and early and late diagenesis. Such processes can change the pattern of the original layers considerably.

The most remarkable property of sedimentary beds is that the stratification they form is parallel and originally horizontal. Geopetal or top and bottom structures in sediments record the direction of gravity during deposition and prove the horizontal position, sometimes with extreme accuracy. Horizontality of a sediment surface means that it is in gravitational equilibrium and it develops when sediment is sufficiently mobile to spread like a liquid or alternatively, when it is exposed to prolonged erosion and re-deposition that causes peneplanation. Both conditions only occur at the sediment surface and this firmly establishes bedding planes as time-planes. Theories that try to explain bedding planes and stratification as the result of diagenetic or even tectonic processes are only credible if they accept that some pre-existing sedimentary stratification is responsible for the formation of such surfaces. Diagenesis can only change, accentuate or remove horizontal stratification but it cannot create it. Therefore, horizontal sedimentation surfaces are always time planes that follow the law of superposition but the age of any possible diagenetic change to this surface does not necessarily follow this rule.

A number of factors such as the consistency of the sediment, the presence of currents or irregularities in the substrate can lead to non-horizontal stratification. For example, the horizontality of current bedded sequences is only obvious on a large scale. The dimensions of the sediment for which horizontality can be established, largely determines its stratigraphic resolution.

Bedding-planes as two-dimensional surfaces can only indicate an age, in contrast to the three-dimensional bed, where its thickness represents a time interval. In order to estimate this time interval one must know the compaction as well as the erosion-corrected thickness of the bed and its rate of accumulation. If beds, as is often the case, are repeated many times with identical structures, textures and materials, then we assume that they have the same average rate of

accumulation and that they can be regarded as bed-cycles that represent more or less equivalent stratigraphic units.

Not all beds are repetitive and a special group of beds have been called event-strata (Einsele *et al.*, 1991). Event-stratification is often associated with high energy and even catastrophic events (landslides, storms or earthquakes) and they represent short time intervals when compared with normal, so-called cyclic, sedimentation. The naming of the two types is unfortunate since event does not imply the rarity of an event and some authors also seem to confuse repeated with cyclic. The difference between the two stratifications is important however. Event strata may be regarded as being instantaneous compared with normal sedimentation. Therefore they can provide only a relative age and their thickness provides no time-information. The recognition of event stratification has to rely on a sedimentological interpretation of the beds and on their uniqueness, but this, as always, depends upon the time scales one chooses. Event strata (like bedding-planes) follow the law of superposition and the distance between them (like the distance between two bedding-planes) is related to time.

### The definition of cycle

The term cycle refers to two concepts. The first describes the sequences of repeated sediments as they follow each other in the stratigraphic section and the second refers to the processes that produce repeated sediments. The two types of cycle can be called the stratigraphic and the process cycle (Schwarzacher, 2007). The traditional definitions of cyclic sedimentation are largely concerned with the order in which different lithologies appear in a stratigraphic section. If a series of sediments or a process contains three stages (lithologies or phases) A,B,C, then ABCA is a cycle and it becomes the cyclic sequence: ABCABCABC... if the cycles are repeated. The stages are layers and therefore strata, but they become cycles only if they are repeated identically. Repetition of strata implies not only the repetition of the compositional sequence but also repetition of the thickness of the layers. Particularly important is the repetition of layers or beds with equal or approximately equal thickness in the stratigraphic record. The importance of repeated thickness in cyclic layers was probably first emphasised by Sander (1936) and the standard deviation of cycle thickness as a "measure" of cyclicity was developed by this author in his doctoral thesis. If one disregards the dimensions of beds as many geologists do, and

one takes beds as being synonymous with cycles, then one loses the valuable concepts of stratification and cyclicity.

An important difference between repeated phases and cyclic sequences emerges if one examines the processes that generate cycles. It is well established that successive lithologies in sections do not occur at random but form related groups, ranging from single-graded beds to large-scale sedimentary associations: deepening or shallowing facies for example. In such serially correlated sequences any repetition of a key lithology can produce a cycle. Nevertheless, if the same cycle is predictably repeated, perhaps many times, one assumes that the cyclic sequence is the result of an oscillating system, which is a system in which the final stage leads automatically to the start of a new cycle. The theory of oscillating systems has been extensively studied (Andranov *et al.*, 1966) and a short discussion of oscillating systems from a geologist's point of view is given in chapter 2 of Schwarzacher (1993). Strictly speaking, all natural (geological) cycles should be called oscillations but we will use the term cycle, as most geologists do, also for less regular oscillations.

The difference between cycle and cyclic sequence is important in the definitions of event and so-called cyclic stratification. Only the latter produces cyclic sequences. Sequences produced by oscillating processes are sequences representing cycles of equal or near equal lengths of time that correspond to strata of equal or near equal thickness. Beds that form cyclic sequences can be called bed-cycles. The connection of bed thickness with time is summarized by "Sanders rule", which states that equal thickness of beds implies equal intervals of time but unequal thickness of beds does not imply unequal time intervals. The oscillating nature of cyclic sequences can be established from the transition probabilities of their lithologies. Transition probabilities (Markov matrices) of oscillating processes have negative eigenvalues and recurrence maxima in transitions higher than one. Spectral analysis can be used when it is possible to describe a record in terms of numerical values. This analysis will find frequency maxima with measurable significance (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2000) if a sequence is cyclic and was generated by an oscillating process. Since cyclicity depends on repetition and geological processes never follow exact rules, one has to accept that cyclicity is essentially a statistical property. Cyclicity can be developed in various degrees ranging from the absolute, the periodic to the quasi-periodic and the oscillating, and to the non-oscillating random order.

### Beds as stratigraphic units

Stratigraphy, which is based on individual strata, has been well-developed in varve analysis but it has also been particularly successful in marl-limestone sequences, for example in the Upper Jurassic of S. Germany (Freyberg, 1966), the Mesozoic in SE France (Cottillon, 1984) and in some Carboniferous limestones in England and Ireland (Schwarzacher 1989; Tucker *et al.* 2009). To establish the bed (or a cycle, which may be regarded as one or more beds) as a stratigraphic unit it must represent an interval of not only stratigraphic but also physical time and must also have connectivity within a defined area. A bed is connected if its bedding planes are continuous. It is stratigraphically correlated when its limiting lower and upper bedding-planes are identical in age in different localities. It follows that all connected beds can be stratigraphically correlated. This includes beds with different lithologies and indeed fossil content, but not all correlated beds have to be continuous. Continuity is difficult to prove but is frequently the most likely explanation for correlated beds that suddenly (but only locally) seem to be interrupted. An example of such local breaks could be "missed beats"; that is, the absence of a bedding plane where it would be expected in cyclic sediments.

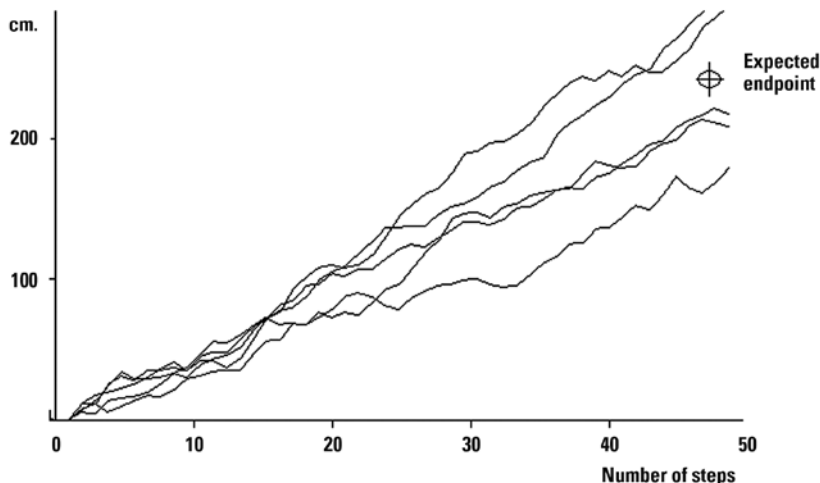
The following model illustrates the relation of bed-forming processes with time. Assume that sedimentary particles are continuously supplied to an area but only come to rest with a certain probability,  $p$ , and with probability,  $q=1-p$ , are transported to a different place. The sediment thickness in this model increases in random steps and at random intervals. Graphically, this can be illustrated by a so-called random-walk (see Fig. 1). Steps can be interpreted as different-sized sedimentary particles, or bursts of sedimentation, or even seasonal intervals. As long as the statistical properties of the steps

remain the same, repeated random-walks (intervals of sedimentation) will reach end points (total thickness of sediment) that are normally distributed. The model is important because it shows that even under the most general conditions one will find a statistical relationship between time and duration of sedimentation.

By considering the length of intervals with uninterrupted sedimentation one can model the formation of beds. For example, one may assume that bedding planes develop when deposition is interrupted by non-deposition. According to our original assumptions, the probability of obtaining a bed of thickness 1,2,3... is given by the probabilities:  $pq$ ,  $ppq$ ,  $pppq$ , ..... which can be written as the geometric expansion: Probability (bed= $n$ ) =  $p^nq$ . By replacing the discrete variable with a continuous thickness  $x$ , one obtains the negative exponential distribution with density,  $\rho$ : Probability (bed= $x$ ) =  $\rho \exp(-\rho x)$ .

Exponential and geometrical distributions result when the bed-thickness is a random value that is completely independent of its position in a sequence of beds. Geologically this situation is very unlikely. For example, changing the condition of non-deposition to erosion during sedimentation, which reduces the underlying bed, indicates how easily dependence of successive beds can arise.

Because the stratigraphic record represents the development of a multitude of processes, it is not unexpected that most, if not all, stratigraphic records have the Markov property of correlation between successive beds and they are therefore, not independent random processes. It is possible to develop more realistic models of bed-formation that result in thickness distributions that are very close to observed distributions, but it often turns out that quite different models lead to bed-thickness distributions that are similar and difficult to discriminate between (Schwarzacher,



**Figure 1.** Five normal random walks with mean steps of  $\mu = 5$  units and length  $n = 50$ . The predictable expected end point is at  $n \mu = 250$ .

**Figura 1.** Cinco caminatas aleatorias normales con pasos de media  $\mu = 5$  unidades de longitud y  $n = 50$ . El punto final esperado se localiza en  $n \mu = 250$ .



1975). Therefore, it is unlikely that bed-thickness distributions can identify a specific bed-formation process, but they can be used effectively to describe the stratification of different formations and facies.

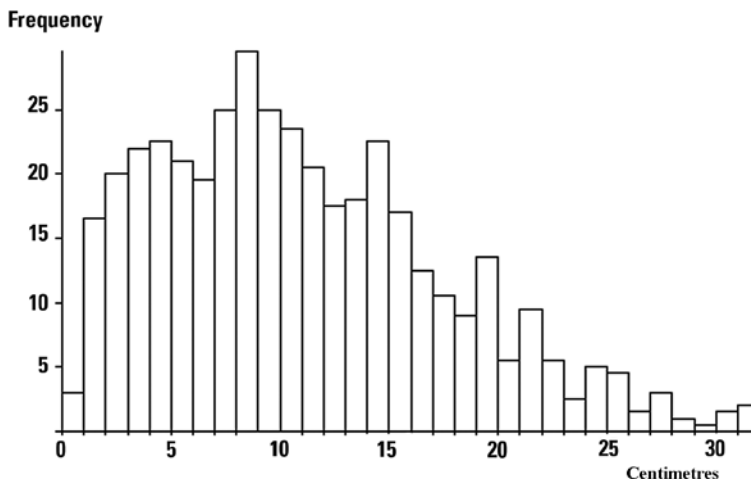
### The bed cycle relationship

In the introduction, cycles were defined as either a single bed or a group of beds that is identically repeated. Therefore, beds can be developed as cycles but not all beds are cycles. Clearly it is important to know whether beds are cyclic or not. Since beds, according to the definition accepted here, cannot be subdivided, the only evidence for identical repetition is the repeated equal thickness of beds. Any decision about the equal thickness of successive beds is always made uncertain by the innate variability of sedimentation. Cyclicity can be definitely established by accurate dating but it can also be inferred when several orders of cycles show frequency ratios that agree with those of well-known cyclic processes. For example, if a given number of beds is found to represent the same number of years, one can obviously conclude that the beds represent yearly cycles. If, in addition, the series contains a cycle of 11 years (sunspot cycle) this would support this conclusion.

In many stratigraphic records, the cycle-bed relationship is uncertain and difficult to determine. This will be illustrated with data from two localities: the Contessa highway and Mt Petrano in the Italian Apennines of the Gubio district (Cresta *et al.*, 1989). Two sections in this area provide stratification data for almost the complete Cenomanian (Schwarzacher, 1994). Beds in this study are defined as visible layers of either white micritic limestone or marl. The positions of coloured and black chert were recorded but classified as limestone. Thickness measurements were made

by hand and the lithologies based on field-identifications. In the lower parts of the sections the beds are developed as alternating limestone and marls but in the higher part of the section the marls decrease in thickness and marl layers of less than 5 mm in thickness were treated as bedding planes. In both sections, prominent bedding planes (master bedding planes) are repeated at approximately one-metre intervals to form stratification cycles (bed sets). The latter have been interpreted as being the result of the 100 ka eccentricity. This cycle is difficult to define and the identification of cycle boundaries in the field and analysis of bed-thickness indices gave different results with numbers of cycles in the sections ranging from 64 to 72. This resulted in an average cycle thickness of 90 to 104 cm. Since the sections do not represent the complete Cenomanian, which according to the geological time scale has a length of 6.1 Ma, the numbers are too high and only approximately of the right order.

The primary reasons for bed formation in the limestone-marl facies are alternatively: fluctuating carbonate production, solution or fluctuating non-carbonate influx, or any combination of these. A decision as to which are the most important processes would need very detailed regional data. In the present data, it was found when both limestone and marl beds are plotted together that the two localities had different bed-thickness distributions. They had, however, almost identical distributions when only limestone beds were considered. Possibly this indicates that the marl influx shows regional variations. Examining the thickness of limestone beds without marls, gives more definite results than when using limestone marl couplets. The distribution of limestone thickness without marl is given in Fig. 2. This distribution has a well developed mode at 9 to 10 cm that corresponds to the number of beds per cycle of 9 to 10 (see Table 1). The thick-



**Figure 2.** The frequency of limestone bed thickness.  
**Figura 2.** La frecuencia de los espesores de las capas de calizas.

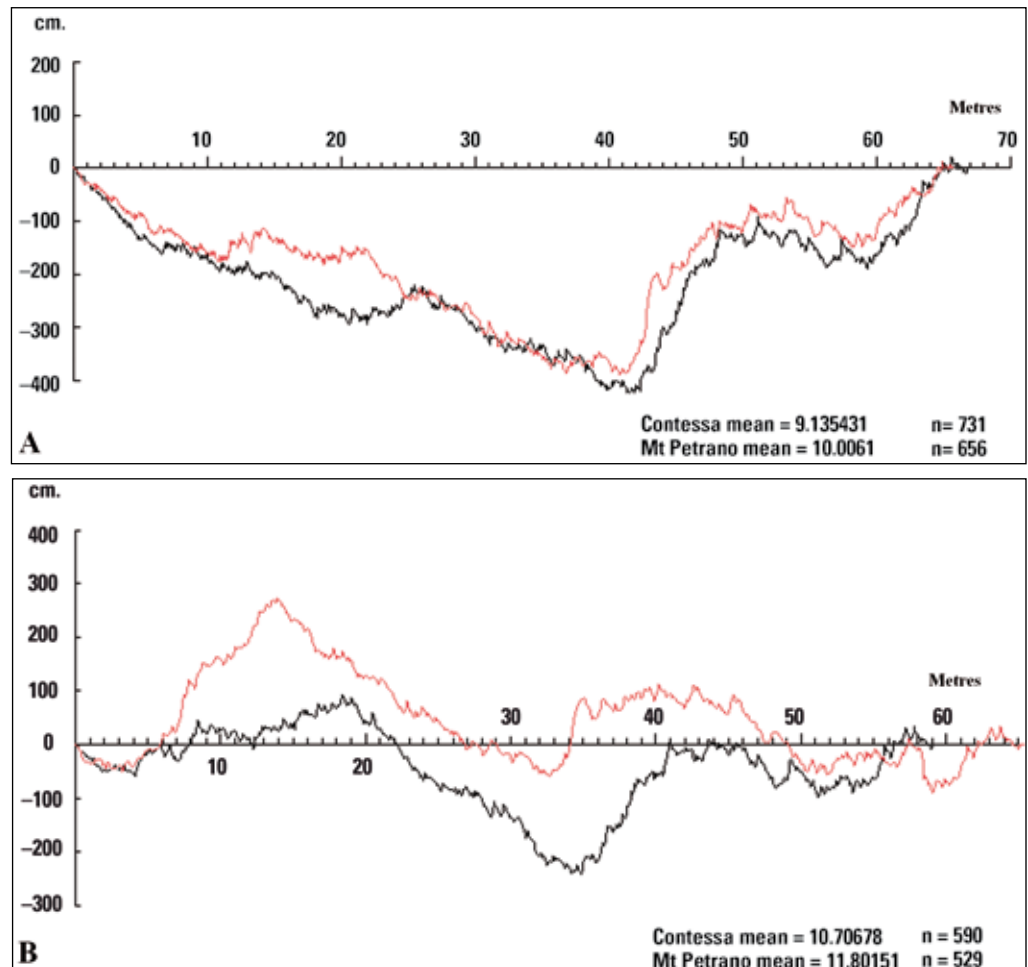
| Section    | Total thickness (cm) | Number of beds | Number of cycles | Number of beds per cycle |
|------------|----------------------|----------------|------------------|--------------------------|
| Contessa   | 6678                 | 678            | 64 – 71          | 9.5 – 10.6               |
| Mt.Petrano | 6479                 | 659            | 64 – 72          | 9.2 - 10.3               |

**Table 1.** Statistics of Contessa and Mt. Petrano sequences.

**Tabla 1.** Estadísticos de las secuencias de Contessa y Mt. Petrano.

ness distribution is distinctly polymodal with modes at 5, 10, 15, and 20 cm, which may be the result of a basic 5 cm bed (cycle?) but this is not supported by spectral analysis of bed thickness. The wide spread of the distribution may be partly due to missing bedding planes but it also suggests that the beds are a mixture of beds with quite different origins. Since beds are the smallest unit (representing the Nyquist frequency) spectral analysis cannot be used to obtain more detailed information about their structure. To obtain information about the internal structure one would need more data collected at closer intervals than the bed thickness. There is therefore no evidence for cyclic repetition of beds. Since both sections cover the

same stratigraphic interval, an obvious test for the continuity of beds and metre cycles is that the number of cycles and beds in both sections should be the same. The discrepancies in bed and cycle numbers could be accounted for by different weathering conditions undergone by the two outcrops. It is suggested that a large number of beds are in fact continuous over the distance between the two localities. To examine the correlation and the relationship between beds and cycles more closely, adjusted cumulative curves were used. Such curves give the cumulative thickness of successive beds after removing the amount that would have resulted from constant accumulation. Fig. 3 shows the curves for both sections, using the com-



**Figure 3.** Adjusted cumulative curve of beds. Black line: Contessa Highway section. Red line: Mt. Petrano section. A: Single beds; B: Couplets.

**Figura 3.** Curvas acumuladas ajustadas de las capas. Línea negra: sección de Contessa Highway. Línea roja: sección Mt. Petrano. A: Estratos individuales. B: Alternancias.

bined limestone and marl beds. The horizontal axis gives bed numbers multiplied by the mean thickness of the beds. This provides only an approximate position of beds in metres from the base of the sections. The vertical axis plots the distance a bed has either not reached or exceeded from the assumed position of constant accumulation.

For adjusted cumulative curves to be successful, a rough correlation between sections has to be known in order to establish the linear trend (constant rate of accumulation) of the curves. If this trend is based on a large number of data, the precision of this correlation is not very important and the curves can be used to further refine the correlation. In the given examples one finds extremely good agreement between the two sections. The two curves agree, even in the minor fluctuations that are caused by the one-metre cycle. The second important use of cumulative curves is in comparing the accumulation of beds with that of the stratification cycles. As before, the curves for cycle thickness (Fig. 4) are plotted against consecutive cycles. The horizontal axis is calibrated in cycle numbers; an approximate stratigraphic position for each cycle is obtained by multiplying this number by the average cycle thickness (i.e. 100). The vertical scale indicates by how much the top of a particular cycle has not reached or exceeded the position of constant accumulation. Fig. 4 indicates a trend very similar to that of Fig. 3. The beds decrease below the level of constant accumulation in the first two thirds of the sections and then rise more or less continuously. The cycle thicknesses also show discrepancies between the two localities and these are probably due to several wrong interpretations of metre cycle boundaries and possibly due also to an unnoticed fault near cycle 30 in the Mt. Petrano section. The similarity between the bed and cycle accumulation (Figs 3 and 4) is not surprising. Both can be interpreted as representing ei-

ther variable rates of accumulation or a variable relative depth of the basin compared with either constant sedimentation or subsidence that must have been common to both.

If one accepts the interpretation of the metre cycle as indicating the 100 ka Milankovitch cycle then one could argue as follows. The trend that determines the thickness of the metre cycles (Fig. 4) must be the rate of accumulation. This is the same rate that determines the thickness of the beds (Fig. 3). Since the metre cycles are the result of a quasi-periodic process, the same must be true for the beds. The large variation of bed thickness, however, and the absence of knowing whether the beds are identically repeated, make it quite possible and even likely that the units were separated as beds as a result of a mixture of different processes.

## Conclusions

If one uses the term bed (stratum) and cycle in stratigraphy one has, within reason, to keep to accepted definitions. It has been the contention of this paper that there is a fundamental difference between cyclic and non-cyclic stratification. It has also been pointed out that cyclicity as a description of a sediment is somewhat meaningless unless it can be related to cyclic processes that are either periodic or at least nearly periodic oscillations. To deduce the process that formed a sediment from the stratigraphic record is very often a chicken and egg situation. If we know the process we can predict its behaviour and vice versa. We know that environmental variations that are influenced by planetary movement will be cyclic and are most likely to be at least nearly periodic. Much less is known about cycles that either originate or are modified within the terrestrial domain. In the complex system of the en-

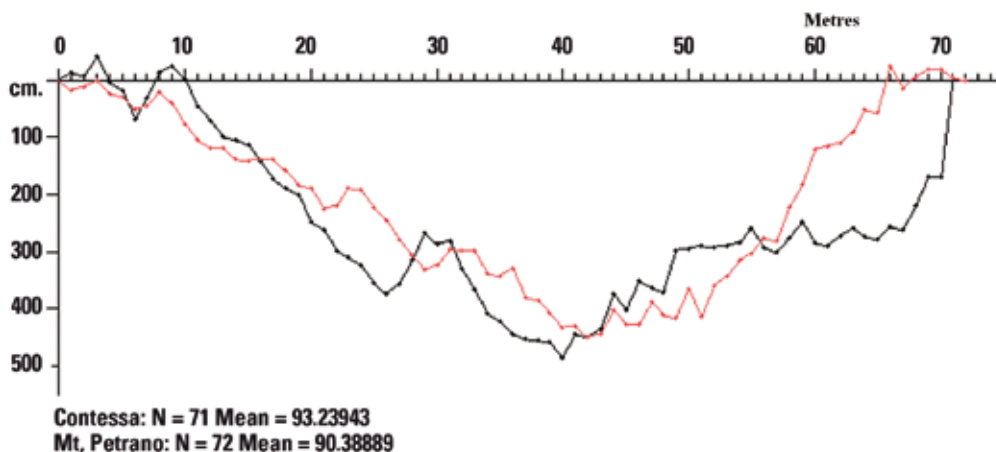


Figure 4. Adjusted cumulative curve of metre cycles. Black line: Contessa Highway section. Red line: Mt. Petrano section.

*Figura 4. Curvas acumuladas de los ciclos de un metro. Línea negra: sección de Contessa Highway. Línea roja: sección Mt. Petrano.*

vironment many of its components, climatic regional and ecological, can interact and generate oscillations. One can construct a wide variety of models to explain oscillations, but low-frequency cycles, which are longer than periods of possible observation, are difficult if not impossible to test. This applies in particular to the so-called sub-Milankovitch cycles of millennial (1-10 ka) duration. Cycles of this order are known from the Quaternary (Daansgard-Oeschger oscillations) and also from the Mesozoic (Zülke 2004) and Palaeozoic (Ellrik and Hinnov 2007; Tucker *et al.* 2009), but as yet the detailed mechanism that produces such oscillations is not known. It is possible and indeed likely that the frequencies and domains of cycles recorded by sedimentation are biased by environmental resonances. If the environment contains a number of components that are capable of oscillating, they can mutually influence each other. It is possible that low-frequency cycles can produce shorter cycles by exciting one or more parts of the environmental system.

Sander's rule states that stratigraphic cyclicity is very probably the result of cyclic processes but not all cyclic processes produce stratigraphic cycles. It is therefore important to keep in mind that geological conditions may frequently have prevented observable stratigraphic cyclicity when in fact a record was generated by an oscillating system.

The full understanding of beds and cycles will need more work with increased stratigraphic resolution and a full understanding of the regional distribution (domains) of possibly complex oscillating systems. This will depend upon the quality of the available data, on the accuracy with which they have been collected, and on the correctness with which they have been interpreted. Each stage in the study of a stratigraphic record can introduce errors that are difficult to estimate, but a detailed analysis of such errors will be needed.

## Acknowledgements

The anonymous reviewers are thanked for their suggestions.

## References

Andranov, A.A., Virt, A.A. and Khaikin, S.E. 1966. *Theory of Oscillators*. Pergamon Press, New York, 815 pp.

- Cottillon, P., 1984 Tentative world-wide correlations of early Cretaceous strata in pelagic deposits. *Bulletin Geological Society Denmark*, 33, 92-101.
- Cresta, S., Monechi, S. & Parisi, G. 1989. Mesozoic-Cenozoic stratigraphy in the Umbria-Marche area. Geological field trips in the Umbria-Marche Apennines (Italy). *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia*, 39, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 185 pp.
- Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A. 1991. Cycles and Events in Stratigraphy – Basic Concepts and Terms. In: Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A. (eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*: Springer, Berlin, 1-19.
- Ellrik, M. and Hinnov, L. A. 2007. Millennial-scale paleoclimate cycles recorded in widespread Paleozoic deeper water rhythmites of North America. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, 243, 348-372.
- Freyberg, B., 1966. Der Faziesverband im unteren Malm Frankens. Ergebnisse der Stromatometrie. *Erlanger Geol. Abh.*, 62, 1-111.
- Pardo-Igúzquiza, E., Schwarzacher, W. and Rodriguez-Tovar, F.J. 2000. A library of computer programs for assisting teaching and research in cyclostratigraphic analysis. *Computers & Geosciences*, 26, 723-740.
- Sander, B. 1936. Beiträge zur Kenntnis der Anlagerungs Gefüge. *Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 48, 27-139.
- Schwarzacher, W. 1975. *Sedimentary Models and Quantitative Stratigraphy*. Elsevier, Amsterdam. 382 pp.
- Schwarzacher, W. 1989. Milankovitch type cycles in the Lower Carboniferous of NW Ireland. *Terra Nova*, 1, 468-473.
- Schwarzacher, W. 1993. *Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory*. Elsevier, Amsterdam, 225 pp.
- Schwarzacher, W. 1994. Cyclostratigraphy of the Cenomanian in the Gubbio district, Italy: a field study. In: De Boer, P.L. and Smith, D.G. (eds.), *Orbital forcing and cyclic sequences*. Special Publication International Association of Sedimentology, 19, Blackwell Scientific, Oxford, 87-97.
- Schwarzacher, W. 2007. Sedimentary cycles and Stratigraphy. *Stratigraphy*, 4, 1-4.
- Tucker, M.E., Gallagher, J., Leng, M.J. 2009. Are beds in shelf carbonates England. *Sedimentary Geology*, 214, 15-34.
- Zühlke, R. 2004. Integrated Cyclostratigraphy of a model Mesozoic Carbonate platform - the Latemar (Middle Triassic, Italy). In: *Cyclostratigraphy: Approaches and Case Histories*. Edited by D'Argenio, B., G. Fischer, A.G., Premoli, I. HELMUT Weissert, H. and Ferrari V. (eds.) Society for Sedimentary Geology Special Publication, 81, 183-211.

Recibido: octubre 2012

Revisado: diciembre 2012

Aceptado: enero 2013

Publicado: abril 2013