
6

*Los Ciclos de Milankovitch: Origen, Reconocimiento,
Aplicaciones en Cicloestratigrafía y el estudio de Sistemas
Petroleros.*

Manuel Martínez, Érica Lorenzo, Alamir Álvarez.

*Recibido: Mayo de 2017
Aprobado: octubre de 2017*

Los Ciclos de Milankovitch: Origen, Reconocimiento, Aplicaciones en Cicloestratigrafía y el estudio de Sistemas Petroleros

Milankovitch Cycles: Origin, Recognition, Applications in Cyclostratigraphy and the study of Petroleum Systems

Manuel Martínez S.1; Érica Lorenzo G.1; Alamir Álvarez L.1

(1)Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE)
Campus La Libertad, vía principal Santa Elena – La Libertad, Ecuador
Email: mmartinez@upse.edu.ec

Resumen

Además de la rotación y la traslación, el planeta Tierra ejerce otros movimientos menores, que si bien imperceptibles, son de consecuencias importantes en los cambios climáticos que ha sufrido durante el pasado geológico. La conexión entre los movimientos de precesión, oblicuidad y excentricidad, con los grandes cambios climáticos y las glaciaciones fue presentada por Milankovitch en 1941. Cada uno de los movimientos orbitales presenta una periodicidad que es detectable a partir de datos geológicos y geoquímicos. Sin embargo, procesos posteriores en el sedimento, tales como diagénesis, patrones cíclicos superpuestos, y el llamado ruido litológico, interfieren en la detección precisa de los ciclos de Milankovitch. Una vez establecidos los patrones orbitales en un registro sedimentario, esta herramienta cicloestratigráfica es muy eficaz en correlaciones litológicas, temporales, y se demuestra además su utilidad en el análisis de rocas madre y rocas reservorio de hidrocarburos dentro del sistema petrolero.

Palabras Clave: Milankovitch, correlación, Cicloestratigrafía, cuencas petroleras.

Abstract

In addition to the rotational and translational movements, The Earth exhibits other minor, though imperceptible, movements with consequences on the climatic change undergone during the geological past. Milankovitch in 1941 published a connection between the movements of precession, obliquity and eccentricity with the great climatic changes and glaciations. Each of the orbital movements presents a periodicity, detectable by means of geological or geochemical data. However, later processes in the sediment (e.g. diagenesis, overlapping cyclic patterns or the so-called lithological noise, affect the accurate detection of Milankovitch cycles. Once the orbital patterns are established in the sedimentary record of a basin, this cyclostratigraphic tool is very suitable in lithological and temporal correlations, demonstrating the usefulness in the analysis of source- and reservoir rocks of oil within the petroleum system.

Keywords: Milankovitch, correlation, Cyclostratigraphy, petroleum basins.

1. Introducción

Los efectos de los movimientos planetarios forman parte de nuestra cotidianidad: los ciclos circadianos (día y noche), así como las mareas y las estaciones están determinados todos ellos por las relaciones gravitatorias entre la Tierra y los restantes cuerpos estelares en el sistema solar¹. Estos cambios ambientales pueden ser registrados en sedimentos, por lo que el estudio de los ciclos es parte importante del análisis de las secuencias sedimentarias en general².

Una de las complejidades del estudio de la Teoría de

Milankovitch reside en la superposición de los diferentes ciclos orbitales a otros ciclos no Milankovitch (ocasionados por procesos no vinculados con los movimientos orbitales) que oscurecen los patrones cíclicos originales (Figura 1). Más aún, en muchos casos el problema consiste en cómo distinguir los ciclos orbitales del ruido litológico en secuencias sedimentarias. La detección de los ciclos orbitales supone un reto que no puede resolverse mediante inspección visual de los afloramientos o con las técnicas geológicas convencionales; es menester un análisis matemático del sistema. Inicialmente se hacía uso de herramientas engorrosas y manuales de análisis

matemático, mas hoy en día, con el advenimiento de la era digital ha ocurrido un importante progreso, al hacer uso de programas informáticos específicos que

permiten un análisis más riguroso y resoluble en muy corto tiempo.

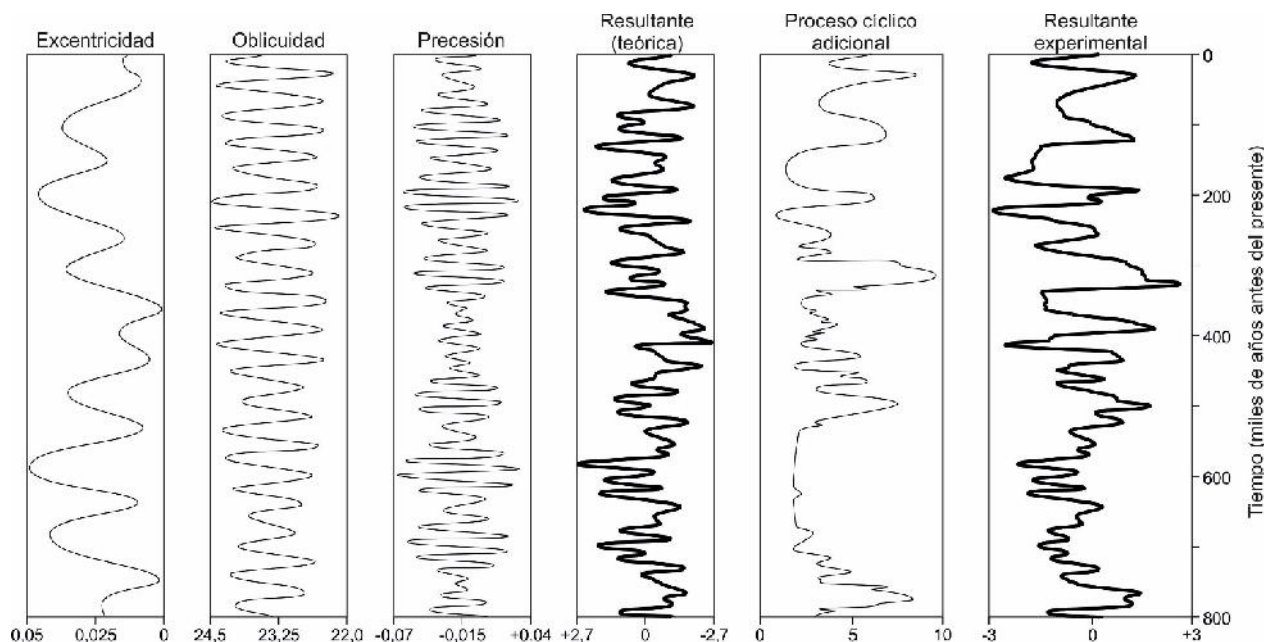


Figura 1: Las señales combinadas de los ciclos de excentricidad, oblicuidad y precesión generan una resultante teórica (d) ya de por sí compleja, que solo puede resolverse por deconvolución. La superposición adicional de algún fenómeno cíclico irregular no Milankovitch, como por ejemplo, sedimentación episódica originada por tsunamis, sismos recurrentes o actividad volcánica (e) generan una resultante (f) en la que el patrón original generado por los movimientos orbitales queda oscurecido. Modificado de House (2013)³.

El propósito de esta contribución es presentar la naturaleza y origen de los distintos ciclos orbitales, exponer algunas técnicas empleadas para detectar y cuantificar tales ciclos, mostrando varios casos de estudio, y por último exponer su aplicación en el análisis de las condiciones fisicoquímicas y climáticas de la sedimentación en el pasado, con clara atención en la precisa caracterización de un sistema petrolero.

2. ¿Quién fue Milutin Milankovitch?

Milutin Milankovi o Milankovitch como también se escribe, nació en 1879 en Serbia y murió en Belgrado, en 1958. Estudió en el Instituto de Tecnología de Viena, graduándose en 1904 con un doctorado en Ciencias Técnicas. Trabajó en la Universidad de Belgrado en Matemáticas Aplicadas desde 1909. Dedicó su carrera a desarrollar teorías matemáticas del clima basadas en la variación de estaciones con la latitud, dependiendo de la radiación solar recibida por la Tierra. Fue uno de los primeros visionarios en desarrollar teorías relativas al movimiento de la Tierra y su influencia a largo plazo en los cambios climáticos. Sin embargo, es sabido que otros investigadores ya habían asomado, muchos años antes, estas relaciones: destacan Adhemar en 1842⁴, y Croll en 1875⁵.

El matemático francés Joseph Adhemar en 1842 sugirió que las glaciaciones fueron originadas por factores astronómicos que ocasionaron la disminución en la cantidad de irradiación que la Tierra recibe del sol⁴. Por otra parte, el escocés James Croll, un científico autodidacta que se desempeñaba como conserje del *Andersonian College and Museum* de Glasgow, expuso ya que la excentricidad de la órbita de la Tierra alrededor del Sol sufría variaciones por interacciones gravitacionales, por lo que la órbita planetaria pasaba desde trayectorias circulares con climas cálidos, hasta elongaciones pronunciadas que ocasionaban períodos glaciales⁵.

No obstante, los antecedentes indicados no restan mérito al trabajo de Milankovitch. Entre los años 1912 a 1914 publicó 3 artículos cortos, totalmente ignorados. En este último año fue hecho prisionero por la Armada Austro-húngara, en plena primera guerra mundial, y luego liberado por mediación del Decano de la Facultad en la que trabajaba. Entre 1920 y 1941 publicó varios trabajos relacionados todos con las variaciones en el influjo solar sobre el planeta como efecto de los movimientos de precesión, oblicuidad y excentricidad del planeta. A diferencia de Adhemar y Croll, el aporte de Milankovitch fue una teoría completa, con un riguroso análisis matemático. Fue miembro de la Academia Serbia de

Ciencias, la Academia Yugoslava de Ciencias y Artes, la Academia Alemana de Naturalistas, y del Instituto Italiano de Paleontología. En total escribió más de 70 artículos durante su vida, y sólo en 1969 se tradujo al inglés su artículo más importante, originalmente publicado en idioma alemán en 1941, y que resume todas las hipótesis de los hoy justamente denominados ciclos de Milankovitch.

El trabajo de Milankovitch no recibió atención y cayó en el olvido hasta la década de los 50, cuando Cesare Emiliani publicó sus primeros trabajos sobre la composición isotópica de las conchas de foraminíferos cuyos esqueletos carbonatados al morir, quedan enterrados en los sedimentos del fondo marino⁶. La composición isotópica del agua en que vivían estos organismos queda fosilizada con sus conchas carbonatadas a causa del equilibrio cinético que se establece entre los isótopos de oxígeno-18 del carbonato cálcico y los del agua en la que vivieron, que es a su vez un reflejo de la temperatura del agua y constituyendo así un testimonio indirecto del volumen de hielo que almacenaban los casquetes polares en el momento.

Valores altos de ¹⁸O en el fósil indican que los organismos vivieron durante épocas glaciares y, por contra, valores bajos permiten inferir condiciones interglaciares. De esta manera, el análisis de testigos de sedimentos marinos suministró los primeros registros continuos de las secuencias de estadios glaciares e interglaciares cuaternarios. Sobre estos registros se confirmó la teoría astronómica de Milankovitch.

3. Los Ciclos de Milankovitch

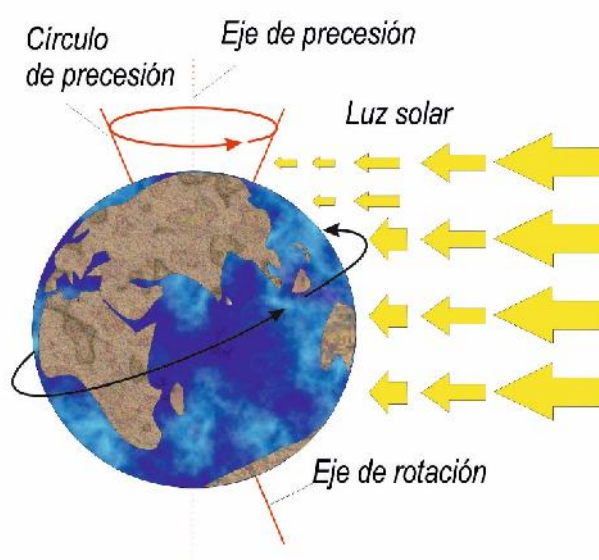
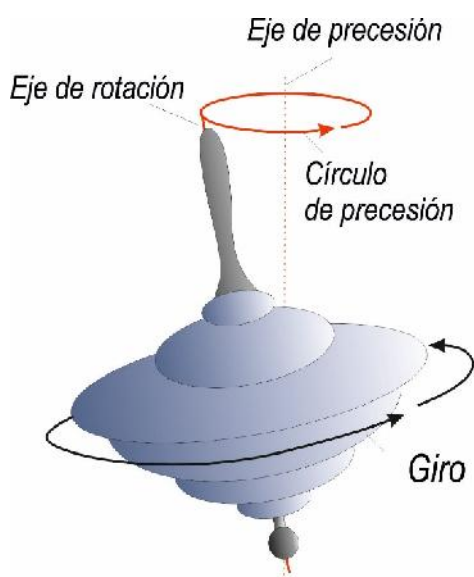


Figura 3: Al igual que una peonza o trompo, que al girar sobre sí mismo presenta un bamboleo (izquierda), la Tierra se bambolea levemente (derecha), en forma imperceptible en la escala de tiempo humana, pero evidente a nivel geológico.

A causa de este movimiento, aparece una inversión en el hemisferio de la Tierra que recibe el mayor

Los ciclos orbitales o ciclos de Milankovitch son esencialmente tres: precesión, oblicuidad y excentricidad. Estos movimientos imperceptibles se suman a los ya conocidos de rotación y traslación del planeta sobre sí mismo y alrededor del Sol, respectivamente. Los ciclos orbitales o ciclos de Milankovitch son esencialmente tres: precesión, oblicuidad y excentricidad. Estos movimientos imperceptibles se suman a los ya conocidos de rotación y traslación del planeta sobre sí mismo y alrededor del Sol, respectivamente.

Precesión orbital

El planeta Tierra no es homogéneo. La desigual distribución de las masas continentales hacia el hemisferio norte (Figura 2) genera en el planeta un movimiento de precesión, similar al de un trompo, oscilando sobre su eje (Figura 3).

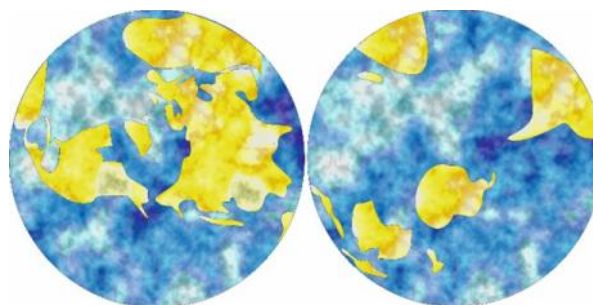


Figura 2: Representación de los hemisferios norte y sur terrestres. Queda evidente la mayor distribución de masas continentales en el hemisferio norte que en el sur.

influjo de radiación cuando se halla más cerca del sol, aproximadamente cada 11000 años (Figura 4). El

resultado de esto es el refuerzo de las estaciones, en particular cuando el hemisferio que recibe la radiación solar directamente (verano) se halla a la mínima distancia del sol, y viceversa. Cuando esos dos factores tienen el mismo efecto en uno de los hemisferios, se tienen efectos contrarios entre sí en el hemisferio opuesto.

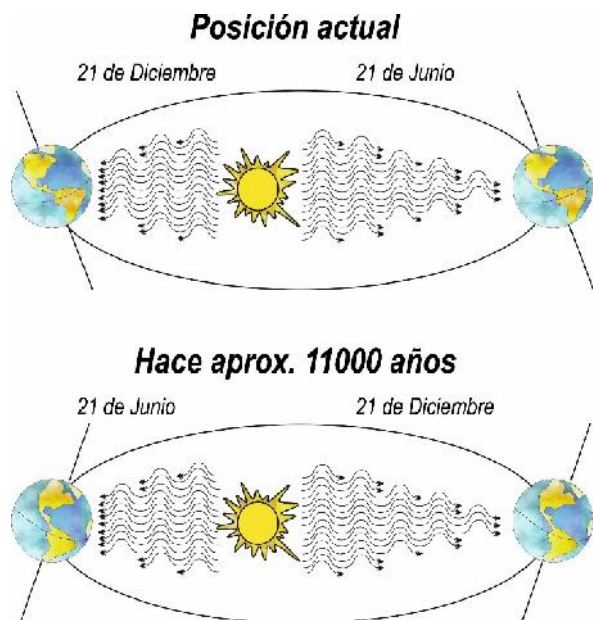


Figura 4: Diferencia en la posición relativa actual del planeta respecto al plano de la eclíptica, en contraste con su posición 11000 años atrás; en ese momento el hemisferio norte presentaba sus veranos coincidiendo con la mayor proximidad al Sol (Junio-Julio), mientras el hemisferio sur tenía veranos coincidentes con la posición más alejada al Sol (Diciembre-Enero).

Ya en los alrededores de 125 a. c., el astrónomo griego Hiparco de Nicea (190-120 a. c.) descubrió que el polo norte de la Tierra no apunta siempre en la misma dirección entre las estrellas. El polo norte se mueve muy lentamente, con un periodo de 26 mil años. La causa de este fenómeno es el movimiento de precesión, que se podría visualizar como si el eje de la Tierra formara un cono en el espacio, completando un cono entero cada 26 mil años. En la actualidad el eje de la Tierra apunta hacia la estrella Polar (o estrella del Norte), pero en 13000 años en el futuro apuntará hacia la estrella Vega.

Movimiento de Oblicuidad

El plano de la órbita terrestre alrededor del sol no es ortogonal a su eje de rotación. Este eje se halla actualmente a una inclinación de $23^{\circ} 27'$; este ángulo se denomina oblicuidad de la eclíptica.

La oblicuidad del planeta es determinante para la existencia de las estaciones, pues en un momento de la trayectoria traslacional alrededor del sol, los haces lumínicos de la estrella inciden directamente sobre un hemisferio, dando lugar al verano, mientras en el hemisferio opuesto, los haces inciden en forma oblicua, y esta atenuación de la luz solar es responsable del invierno en ese hemisferio.

Sin embargo, la oblicuidad del planeta dista mucho de ser una propiedad constante en el tiempo. Lejos de ser estático, el ángulo de oblicuidad terrestre está disminuyendo a razón de 48 segundos de arco en cada siglo y seguirá en disminución durante varios miles de años más, hasta alcanzar aproximadamente 22° , después de lo cual volverá a aumentar (Figura 5).

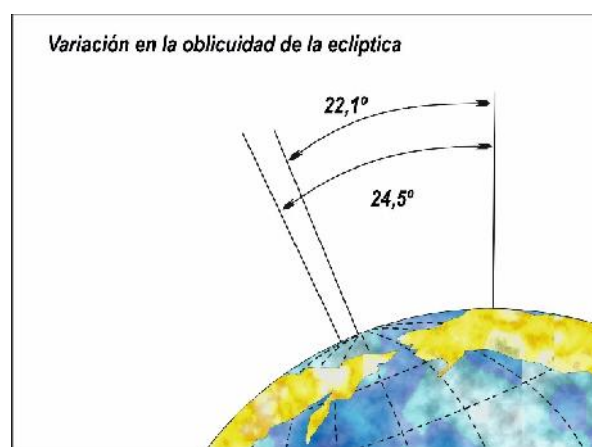


Figura 5: Variación de la oblicuidad de la eclíptica en el planeta. La periodicidad del fenómeno es de aproximadamente 41000 años. En la actualidad la inclinación del eje es $23,5^{\circ}$ y está disminuyendo a razón de $48''$ de arco cada siglo.

Las variaciones en la oblicuidad de la eclíptica generan cambios más pronunciados o atenuados entre las estaciones climáticas, dando lugar a veranos e inviernos suaves, cuando la oblicuidad es baja ($\sim 22^{\circ}$), hasta veranos sofocantes y calurosos seguidos de inviernos muy fríos y rigurosos, para ángulos altos ($\sim 25^{\circ}$). El período de este fenómeno cíclico es de aproximadamente 41000 años.

Excentricidad

Un tercer movimiento orbital es responsable de cambios climáticos aún más pronunciados que los que derivan de los movimientos de precesión y de cambio de oblicuidad: la excentricidad. La órbita de la Tierra alrededor del sol tiene forma elíptica, donde la estrella se halla en uno de los focos. Al igual que la oblicuidad, la forma de esta elipse no es estática, sino que por el contrario, a lo largo del tiempo geológico modifica su excentricidad (Figura 6).

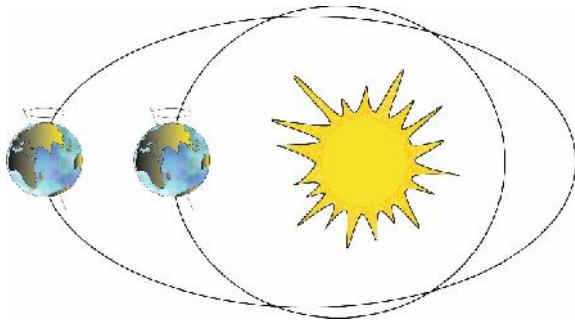


Figura 6: La órbita de la Tierra no es circular sino elíptica. Sin embargo, la excentricidad de la elipse no es constante, sino que se modifica con el paso del tiempo, desde una órbita aproximadamente circular, hasta una elipse moderadamente elongada.

Si la Tierra fuese el único cuerpo celeste que girase alrededor del sol, su órbita sería totalmente circular. Sin embargo, el campo gravitatorio de Júpiter, y en menor grado de Saturno, generan perturbaciones en el sistema Tierra-Luna, lo que ocasiona la elipse. En realidad el movimiento orbital de excentricidad consta de dos ciclos: un ciclo menor, denominado “excentricidad corta” cuya duración es de aproximadamente 93000 años; y uno más largo y de mayor relevancia en sus efectos sobre el clima, denominado “excentricidad larga” de una duración aproximada de 420000 años.

¿Cómo afecta la variación en la excentricidad sobre el clima terrestre? Básicamente de dos formas diferentes. Cuando la excentricidad es mínima, la órbita es bastante cercana a un círculo, lo que determina que a lo largo de todo el año la distancia Tierra – Sol es muy similar; esto trae como consecuencia cambios estacionales suaves. Cuando la excentricidad es pronunciada, se acentúan los cambios climáticos debidos a la precesión, y los cambios estacionales son más acentuados entre los distintos hemisferios.

La segunda forma en que la excentricidad actúa es a través de su efecto en la rotación terrestre. La velocidad de rotación del sistema Tierra-Luna crece cuando la Tierra y la Luna están más cerca del Sol. Cuanto más lento sea este giro, más fuerte será el campo magnético terrestre, que a su vez tiende a proteger la Tierra de las partículas de alta energía del Sol y, por tanto, el clima se enfría.

4. Análisis espectral

La detección visual de patrones cíclicos es muy difícil; tan solo en una escala mesoscópica podría, por simple inspección visual, establecer la posibilidad de un patrón cíclico. Y aun así, sería un análisis cualitativo. La forma más sencilla, matemáticamente hablando, de detectar patrones

cíclicos, se obtiene mediante el Análisis de Fourier. Esta herramienta matemática permite la conversión de las señales que se hallan en el dominio del tiempo, al dominio de las frecuencias.

Cualquier función periódica puede escribirse de la forma

$$x(t) = x(t + np) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{Ec.1}$$

Si una variable $x(t)$ puede observarse a diferentes tiempos t , entonces se trata de una función periódica de período p . El matemático francés J.B.J. Fourier (1768-1830) demostró que cualquier función periódica, sin importar su forma, puede ser representada mediante una combinación de senos y cosenos de una onda. Esta representación puede hallarse desarrollando la función de la forma

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi f n t + b_n \sin 2\pi f n t) \quad \text{Ec. 2}$$

Los coeficientes a_n y b_n se denominan coeficientes de Fourier y determinan la amplitud de la onda. No es la intención aquí profundizar en los aspectos matemáticos: baste establecer que mediante herramientas matemáticas tan sencillas como las transformadas de Fourier, podemos analizar un set de datos periódicos. No obstante, el uso de esta herramienta tiene una limitación inherente: se parte del supuesto de que la tasa de sedimentación es constante, lo que permite asociar espesores linealmente con tiempo. Sin embargo, no necesariamente (en realidad casi nunca) es así. La tasa de sedimentación en litologías de grano fino es normalmente muy inferior a la que se verifica en arenas o gravas. Este efecto ocasiona cambios en la frecuencia de la señal repetitiva, y por tanto, genera ruido en el estudio por Análisis de Fourier.

Una herramienta más adecuada para el análisis espectral de series de tiempo en el registro sedimentario se logra con las transformadas de ondículas (*análisis wavelet o Transformadas de Morlet*). El análisis de ondículas o *wavelet* permite establecer uno o más patrones cíclicos en el registro sedimentario, e incluso detecta los cambios de frecuencia que la señal pueda presentar.

En síntesis, estos procedimientos utilizan como herramienta básica el concepto de ventanas deslizantes (“*sliding windows*”) para evaluar variaciones en las tasas de sedimentación y su efecto en el ajuste de posibles patrones cíclicos.

5. Ruido litológico

Uno de los problemas más difíciles en la detección e interpretación de patrones cíclicos en el registro sedimentario viene dado por lo que se conoce como

ruido litológico, que consiste en eventos aleatorios que se manifiestan dejando una huella sedimentaria, cambios no usuales para esa cuenca, y que alteran el patrón periódico de sedimentación. En muchos casos el origen del problema es simplemente un error observacional¹, que se añade a la función periódica que define el ciclo estudiado:

$$X_{(t)} = A \text{ sen } \tilde{S}t \quad \text{Ec. 3}$$

$$X_{(z)} = k A \text{ sen } \tilde{S}z + v(z) \quad \text{Ec. 4}$$

La ecuación 3 describe el patrón cíclico en la secuencia sedimentaria, como una onda. En la ecuación 4, la adición del término $v(z)$ permite recoger el posible error ocasionado por el mismo geólogo que observa la sección, o errores debidos al proceso sedimentario en sí mismo, que se supone que registra la señal ambiental cíclica.

No importa qué parámetro se tome como indicador de la ciclicidad, ya sea la variación en la composición isotópica para registrar cambios de temperatura, o la concentración de algún elemento que permita

cambios geoquímicos sutiles como los indicadores redox-sensibles, un marcador fósil, o simplemente cambios litológicos sensibles a las variaciones de energía en el medio sedimentario, jamás representarán en forma totalmente fiel la variación ambiental cíclica que se está estudiando¹.

6. Interferencias por diagénesis

La diagénesis oscurece los patrones cíclicos que originalmente quedan registrados en el sedimento, debido al conjunto de cambios físicos y químicos que éste experimenta, y que suelen ocasionar modificaciones sutiles o notables en la geometría de las láminas o estratos.

Tal vez el mejor ejemplo es ocasionado por la compactación que acompaña a la litificación de los sedimentos, que es diferencial a causa de los variables contenidos en agua y de poros primarios que albergan distintos tipos de sedimentos.

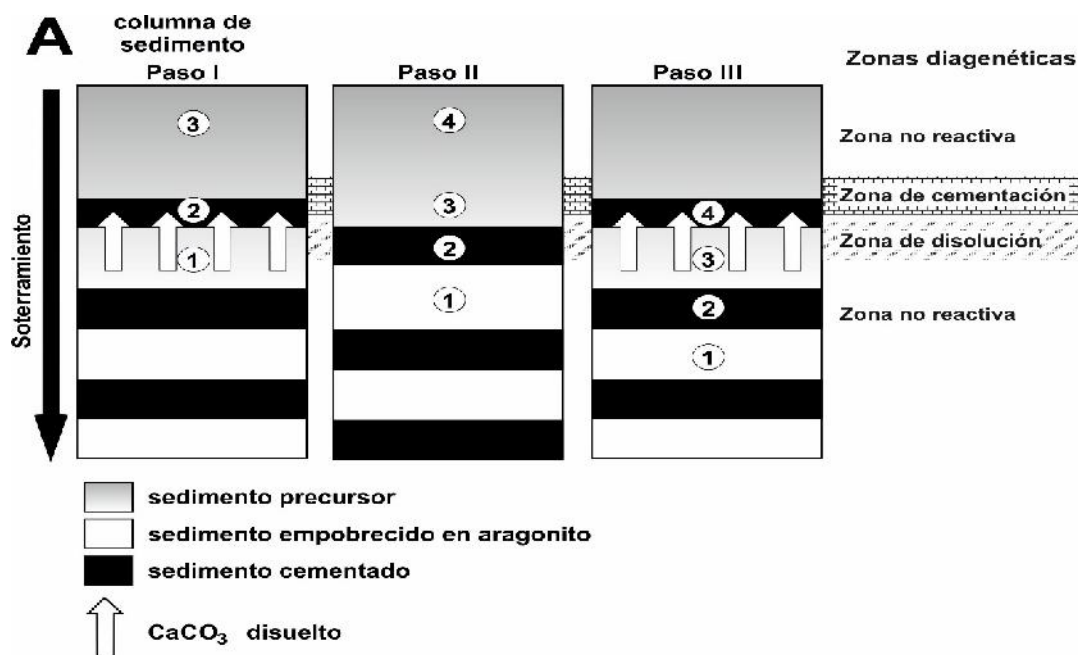


Figura 7: Modelo diagenético que ilustra los procesos concomitantes de disolución de aragonito, removilización de iones y posterior precipitación. Se muestran tres pasos en el tiempo, en los que la columna de sedimentos es progresivamente soterrada. En el paso 1, la capa 2 es cementada con calcita que deriva de la disolución de aragonito proveniente de la capa 1. En el paso II, comienza la disolución de aragonito proveniente de la capa 2, pero esta capa 2 está "sellada" por cemento por lo que no tiene lugar disolución en forma extensiva, y la capa 3 por tanto no es cementada. En el paso III, La capa no cementada 3 entra en la zona de disolución de aragonito, con disolución y cementación posterior en la capa 4. El resultado es un patrón rítmico que no tiene origen sin-sedimentario, mucho menos orbital (modificado y traducido de Westphal *et al.*, 2004⁷)

Un caso ilustrativo de efectos diagenéticos que generan patrones cíclicos se presenta durante la diagénesis de ciertas secuencias carbonáticas de subsidencia moderada⁷, en donde tienen lugar procesos de disolución, con flujo de iones disueltos hacia estratos suprayacentes donde luego precipitan (Figura 7). Este proceso puede darse sucesivamente a medida que la secuencia es soterrada, generando patrones alternados de cristalización y disolución en forma de ritmitas cíclicas.

7. Ciclicidad previa al Cuaternario

La detección y verificación de la ciclicidad tipo Milankovitch en los registros geológicos desde el Plioceno y durante el Cuaternario puede llevarse a cabo con relativa facilidad, ya que normalmente se preservan muy bien y sin alteraciones los caracteres distintivos que permiten su análisis⁸. No obstante, a medida que trasladamos el estudio hacia secuencias más antiguas, se vuelve más difícil la detección de patrones cíclicos⁸⁻¹⁰.

Los movimientos de precesión y oblicuidad se han vuelto cada vez más largos acorde con el incremento de la edad del planeta, y se desconoce qué tan estable fueron estos movimientos orbitales en el pasado remoto. Los ciclos de Milankovitch han sido registrados tan atrás en el tiempo como el Precámbrico y Cámbrico Temprano¹¹ y no muestran evidencia de cambios no predecibles. Ha sido posible detectar un evento de excentricidad máxima de 2 Ma justo en el límite Cretácico-Terciario, hace 65,5 millones de años, y aparece exactamente donde es predicho atendiendo los Ciclos de Milankovitch normales¹².

8. Otros patrones cíclicos

Varios autores han puntualizado que otros fenómenos no necesariamente vinculados a los movimientos orbitales, pueden generar patrones de ciclicidad en la secuencia sedimentaria, y que podrían ser tomados equivocadamente como ciclicidad tipo Milankovitch. El mismo proceso matemático utilizado para evaluar los patrones cíclicos en ocasiones genera respuestas que tienden a ser interpretadas como debidas a ciclicidad orbital. Autores como Puetz *et al.* (2014)¹³ discuten un fenómeno cíclico llamado “Modelo Cíclico Universal” que tiene como sustento una hipótesis empírica según la cual, todos los ciclos a escala astronómica y global producen oscilaciones armónicamente relacionadas.

Patrones cíclicos específicos, aparentemente no ligados a la fenomenología Milankovitch y

conocidos como eventos sub-Milankovitch, corresponden a cambios climáticos rápidos registrados en secuencias pleistocenas y holocenas¹⁴. Destacan los fenómenos conocidos como ciclos Dansgaard-Oeschger (DO) y los eventos Heinrich (HEs). Los ciclos DO, llamados así en honor de los reconocidos geoquímicos *Willy Dansgaard* y *Hans Oeschger*, pioneros en el estudio de núcleos de hielo, consisten en una sucesión de episodios fríos y cálidos registrados como oscilaciones en las relaciones isotópicas de oxígeno de los núcleos de hielo de Groenlandia. Han sido detectados 25 eventos DO en el corto intervalo de 125 a 10 ka antes del presente, y corresponden a disminuciones de entre 5 y 10 °C durante unos 600 años, seguido de un enfriamiento más abrupto de otros 10°C en 300 años, para luego retornar a las condiciones iniciales de temperatura a una tasa de calentamiento del orden de 3 a 5° C por siglo. Por su parte, los eventos Heinrich se detectaron en sedimentos arenosos asociados a material glacial en núcleos recolectados en el tope de un monte submarino profundo en el Atlántico Norte. Harmut Heinrich observó este patrón cíclico en 1988, y lo atribuyó a períodos de fusión de icebergs y sedimentación de detritos derivados del arrastre de glaciares¹⁴. De los cinco eventos Heinrich detectados, cuatro de ellos se correlacionan apropiadamente con el estadio más frío de los eventos DO¹⁵.

9. Aplicaciones de la Cicloestratigrafía

Los ciclos sedimentarios pueden ser utilizados en infinidad de situaciones estratigráficas. Por ejemplo, la comparación en los espesores de ciclos constituye una forma de obtener tasas de sedimentación en diferentes ambientes. Además, los ciclos pueden constituir un calibrador excelente en la determinación de la longitud de biozonas. El análisis cicloestratigráfico puede servir igualmente para calibrar unidades cronoestratigráficas y correlacionar unidades. La comparación entre dataciones obtenidas por cicloestratigrafía con intervalos dados radiométricamente, puede estimarse el “*completeness*” de la secuencia¹⁶.

Mediante el análisis cicloestratigráfico aplicado a secuencias, se pueden detectar los hiatus en estratos pelágicos y hemipelágicos¹⁶. El análisis cicloestratigráfico de las asociaciones de facies sedimentarias, conjuntamente con los espesores de los mantos de carbón contenidos en la unidad y sus respectivos contenidos de cenizas y azufre (correlación estadísticamente significativa entre la concentración de azufre y cenizas con el espesor de los carbones y su ubicación en cada litofacies) permitió detectar un ciclo de longitud de onda de 72

m, y otros dos de mayor frecuencia, con longitudes de onda de 11 y 5 m en una secuencia fluvio-deltaica paleocena en los Andes Venezolanos¹⁷. El uso de cocientes entre longitudes de onda permitió identificar los ciclos de Milankovitch de excentricidad corta (123 ka) y de precesión orbital (18 ka).

El concepto de quimiociclo, aplicado a secuencias cicloestratigráficas, permite calibrar desde el punto de vista cronoestratigráfico las unidades de roca. Y una vez se establecen los quimiociclos, se pueden llevar a cabo correlaciones entre pozos o afloramientos a distancias de hasta 180 km o más, con alta precisión¹⁰.

10. Los Ciclos de Milankovitch en Cuencas Petroleras

La detección de patrones cíclicos en un pozo ya ha sido evaluada, tanto en rocas madre como en yacimientos productores. Se ha utilizado la ciclicidad debida a forzamiento orbital para datar y calibrar el límite Cenomaniense- Turoniense, un momento crucial del Cretácico que suele coincidir con la acumulación de muchas rocas madre a nivel mundial, y muy en particular, se sitúa en las fluctuaciones del denominado Evento Anóxico Global N° 2 (*OAE II*); así se ha logrado determinar que durante este evento anóxico no tuvo lugar una disminución de la tasa de sedimentación¹⁸. Este resultado es de vital trascendencia, porque los eventos anóxicos se pueden presentar ya sea por incremento de la tasa de detritos orgánicos, o por disminución de la tasa de sedimentación de clásticos finos.

Otras rocas madre de hidrocarburos como la Formación La Luna de la Cuenca del Lago de Maracaibo, o la Formación Kimmeridge Clay, en el Mar del Norte, han sido detalladamente estudiadas a través de los Ciclos de Milankovitch y sub-Milankovitch¹⁹⁻²⁰.

También en rocas yacimiento y en perforaciones en pozos, se ha hecho uso de los patrones cíclicos tipo Milankovitch. Así, la mayor resolución obtenida de edades calibradas a través de análisis de ciclicidad orbital permite una mayor precisión de la relación edad-profundidad. De esta manera también puede llevarse a cabo mejores correlaciones pozo a pozo, y una más detallada comprensión de la evolución de la cuenca, y por ende, de todo el sistema petrolero.

Un ejemplo de la aplicación de la ciclicidad Milankovitch en reservorios está dada por la caliza Missisipiense, caracterizada por una estratigrafía jerárquica de secuencias de alta frecuencia (decenas de metros de espesor), junto a ciclos de unos pocos m, ocasionados por fluctuaciones en el nivel

eustático, dentro de la ciclicidad Milankovitch. Los patrones de apilamiento sedimentario se corresponden con ciclos de 4° y 5° orden²¹.

Las desviaciones del patrón ideal de sucesión sedimentaria son causadas por la ciclicidad de Milankovitch, y constituyen el principal factor que controla la compartimentación en los reservorios; este fenómeno puede generar compartimentos verticalmente estructurados²¹.

Referencias

- [1] Schwarzacher, W. 1993. Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory. In *Developments in Sedimentology* 52. 225 p.
- [2] Miall, A. 2010. *The Geology of Stratigraphic Sequences* 2nd ed., Berlin: Springer. 532 p.
- [3] House, M. 2013. Orbital Forcing Timescales: an introduction. In M. House & A. Gale, eds. *Orbital Forcing Timescales and Cyclostratigraphy*. Geological Society Special Publication 85: 1–18.
- [4] Adhémar, J. 1860. *Révolutions de la mer*. In *Déluges périodiques*. Paris: Lacroix-Common, 349 p.
- [5] Croll, J. 1875. *Climate and time in their geological relations: a theory of secular changes of the earth's climate*. Appleton, ed., New York. 577 p.
- [6] Emiliani, C. 1955. Pleistocene Temperatures. *Science*, 168(3): 822–825.
- [7] Westphal, H., Böhm, F. and Bornholdt, S. 2004. Orbital frequencies in the carbonate sedimentary record: Distorted by diagenesis? *Facies*, 50(1): 3–11.
- [8] Shackleton, N. and Opdyke, N. 1976. Oxygen-isotope and paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V 28-239: Late Pliocene to latest Pleistocene. *Memories of the Geological Society America*, 145: 449–456.
- [9] Barron, E., Arthur, M. and Kauffman, E. 1985. Cretaceous rhythmic bedding sequences: a plausible link between orbital variations and climate. *Earth and Planetary Science Letters*, 72(4): 327–340.
- [10] Jiang, D., Hao, W. and Bai, S. 1999. Relationship between Milankovitch eccentricity cyclicity and chemo-cycles from the upper Givetian (Devonian) in Guangxi, South China. *Chinese Science Bulletin*, 44(18): 1697–1700.
- [11] Grotzinger, J. 1986. Upward shallowing platform cycles: A response to 2.2 billion years of low amplitude, high-frequency (Milankovitch band) sea level oscillations. *Paleoceanography*, 1(4): 403–416.

- [12] Ten Kate, W. and Sprenger, A. 1992. Rhythmicity in deep water sediments, documentation and interpretation by pattern and spectral analysis. Free University, Amsterdam. 244 p.
- [13] Puetz, S., Prokoph, A. and Borchardt, G. 2014. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 170: 158–165.
- [14] Labeyrie, L., Skinner, L. and Cortijo, E. 2007. Paleoclimate Reconstruction | Sub-Milankovitch (DO/Heinrich) Events. *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, Editors: Elias S.A., pp.1964-1974.
- [15] Bond G., and Heinrich H. 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the glacial north Atlantic. *Nature*, 360: 245–249.
- [16] Meyers, S. and Sageman, B. 2004. Detection, quantification, and significance of hiatuses in pelagic and hemipelagic strata. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(1–2): 55–72.
- [16] Yu, J. Sui, F., Li, Z., Liu, H. and Wang, Y. 2008. Recognition of Milankovitch cycles in the stratigraphic record: application of the CWT and the FFT to well-log data. *Journal of China University of Mining and Technology*, 18(4): 594–598.
- [17] Martínez, M. Garbán, G., Benavides, A. and Escobar, M. 2005. Detection and interpretation of cyclic patterns in coals from Los Cuervos Formation, Venezuela. *Revista Técnica Facultad Ingeniería Universidad del Zulia*, 28(3): 240–250.
- [18] Prokoph, A. Villeneuve, M., Street, B. and Ontario K. 2001. Geochronology and calibration of global Milankovitch cyclicity at the Cenomanian-Turonian boundary. *Geochronology and calibration of global Milankovitch cyclicity at the Cenomanian-Turonian boundary*. *Geology*, 29(6): 6–10.
- [19] Tyson, R. 1996. Sequence-stratigraphical interpretation of organic facies variations in marine siliciclastic systems: general principles and application to the onshore Kimmeridge Clay Formation, UK. *Geological Society, London, Special Publications*, 103: 75–96.
- [20] Rey, O., Simo, J. and Lorente, M. 2004. A record of long- and short-term environmental and climatic change during OAE3: La Luna Formation, Late Cretaceous (Santonian-early Campanian), Venezuela. *Sedimentary Geology*, 170(1–2): 85–105.
- [21] Flinton, K. and Grammer, G. 2015. The Effects of High-Frequency Cyclicity on Reservoir Characterization Of The Mississippian Limestone, Anadarko Basin, Kingfisher County, Oklahoma. In *Geological Society of America Abstracts with Programs*. Stillwaters, Oklahoma, USA: Geological Society of America, p. 55.