

Uso de la biocronología en las cuencas petroleras de México, mediante la aplicación de métodos paleobioestadísticos

Alexandro Efraín Mendoza Zappi
amendoza@petroexplora.com

José Ramón Silva Arizabalo
gerencia@petroexplora.com

***Exploración, Bioestratigrafía Aplicada
y Servicios Petroleros S.A. de C.V.***

Información del artículo: recibido: enero de 2015-aceptado: marzo de 2015

Resumen

Una de las tareas fundamentales de la paleontología es la síntesis de correlaciones temporales locales para producir escalas de tiempo regionales y globales. Ambas actividades se han vuelto más cuantitativas y rigurosas en las últimas décadas (e.g., Shaw, 1964; Guex 1977; Agterberg & Nel 1982). Encontrando como una destacable dificultad, la integración de localidades fósiles estratigráficamente aisladas a esquemas bioestratigráficos, (Alroy, 1994).

En México, Pemex cuenta con una base de datos bioestratigráficos no explotada mediante análisis cuantitativos, lo que se convierte en una gran oportunidad para definir la biocronología de las cuencas petroleras del país, generando así oportunidades para realizar estudios más exactos que agreguen mayor valor a los realizados con métodos cualitativos tradicionales.

En contraste con los métodos cualitativos tradicionales, que se fundamentan en la experiencia del intérprete, los métodos paleobioestadísticos usan análisis cuantitativos objetivos, explícitos y repetibles de datos bioestratigráficos para llegar a una conclusión.

En este trabajo se presentan algunos de los métodos empleados en paleobioestadística para resolver problemas de seriación y biozonación, así como una demostración de la factibilidad de su utilización como herramientas en la generación de escalas de tiempo basadas en biocronología para las cuencas petroleras de México.

Los métodos CONOP, RASC, AEO y UA, fueron aplicados a una base de datos de presencia de microfósiles planctónicos provenientes de estudios bioestratigráficos de 15 pozos de la Cuenca Tampico – Misantla. Para contrarrestar la influencia de la contaminación por retrabajo y derrumbes, a esta base de datos se añadió una sección simulada a partir de las coocurrencias de foraminíferos planctónicos según lo propuesto por Bolli, (1985). Para mostrar la adaptabilidad de esta metodología a diferentes escalas de tiempo, se emplearon como límites superiores e inferiores los mencionados en Hardenbol, 1998 y GTS v 2014/02, obteniéndose la datación en millones de años para los eventos de primera y última ocurrencia de cada especie, una carta integrando los rangos estratigráficos en tiempo y una biozonación específica para la cuenca estudiada.

Palabras clave: Bioestratigrafía, paleobioestadística, biozonación, biocronología, escala de tiempo México.

Use of biochronology on oil basins of Mexico through the application of paleobiostatistical methods

Abstract

One of the most fundamental tasks of paleontology is the synthesis of local temporal correlations to produce regional and global scales of time. Both activities have become more quantitative and rigorous in recent decades (eg, Shaw 1964, Guex 1977, Agterberg & Nel 1982). Finding a remarkable difficulty integrating fossil localities stratigraphically isolated to biostratigraphic schemes (Alroy, 1994).

In Mexico, Pemex has a base of biostratigraphic data untapped by quantitative analysis, which becomes a great opportunity to define the biochronology of oil basins in the country, generating opportunities for more accurate studies that add greater value to those made with traditional qualitative methods.

In contrast to traditional qualitative methods, which are based on the experience of the interpreter, paleobiostatistical methods use objective, explicit and repeatable quantitative analysis of biostratigraphic data to reach a conclusion.

This paper discusses some of the methods used in paleobiostatistics to solve problems of serialization and biozonation, as well as a demonstration of the feasibility of their use as tools on the generation of biochronology based timescales for the Mexico oil basins.

The CONOP, RASC, AEO and UA methods were applied to a database of planktonic microfossils presence from biostratigraphic studies of 15 wells in Tampico – Misantla Basin. To counter the influence of contamination from reworking and caving, a simulated section from the co-occurrences of planktonic foraminifera as proposed by Bolli (1985) was added. To show the adaptability of this methodology to different timescales, were used as upper and lower limits those listed in Hardenbol, 1998 and GTS v 2014/02, yielding the dating in millions of years for the first and last occurrence events of each species, a chart integrating stratigraphic ranges in time and a specific biozonation for the studied basin.

Keywords: Biostratigraphy Paleobiostatistics Biozonation Biochronology Timescale México.

Introducción

Bioestratigrafía y biocronología

Schindewolf (1950) propuso que los estudios paleontológicos realizados para establecer una cronología de la sucesión temporal de los organismos o bien su subdivisión temporal teniendo en cuenta los fósiles deberían llamarse biocronología. La biocronología sería una parte de la paleontología, en tanto que la bioestratigrafía debería ser relacionada con la estratigrafía.

Sin embargo, los términos biocronología y bioestratigrafía han sido utilizados por razones operativas con otros significados para conseguir distintos objetivos prácticos. La conveniencia geológica de ambos sistemas está justificada por razones metodológicas, por lo que la relación entre ambos conceptos fue desarrollada por otros autores como Teichert(1958), Callomon, (1965), Ziegler (1973) y Rey (1983) quienes propusieron un sistema biocronoestratigráfico.

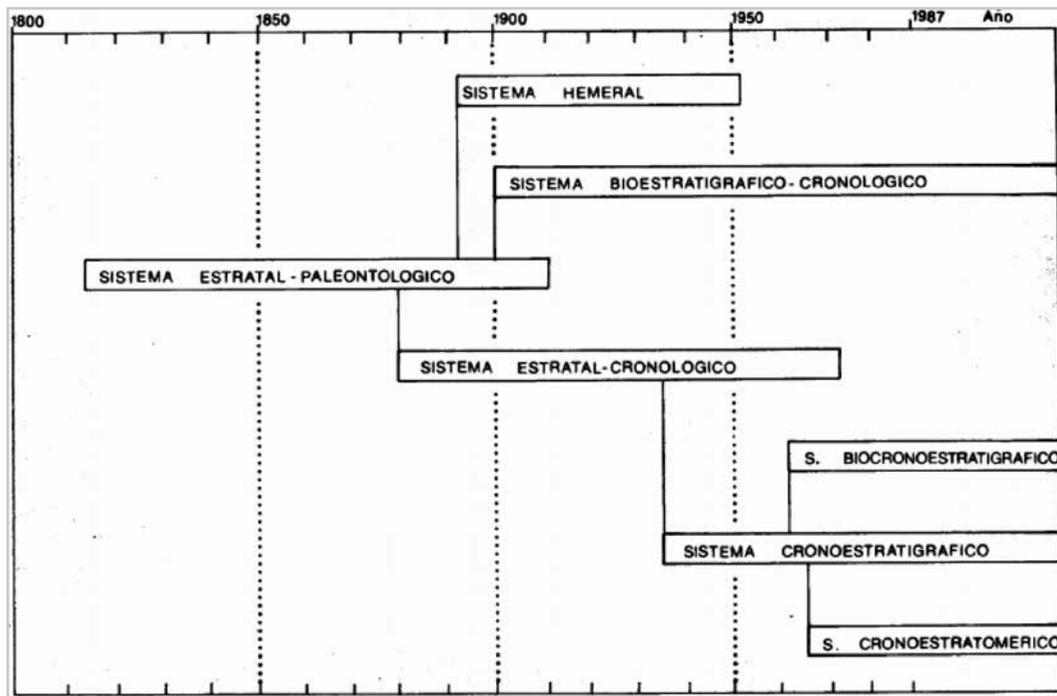


Figura 1. Orden de sucesión temporal y relación conceptual entre varios sistemas de clasificación utilizados para justificar la historia de la tierra.

Dejando de lado la semántica, es generalmente aceptado que el propósito principal de la biocronología es definir una secuencia global de orígenes y extinciones taxonómicas, llamadas muchas veces primeras y últimas apariciones, (Alroy, 1994).

La aproximación más común a la bioestratigrafía sigue siendo que algún experto decide qué fósiles usar para una zonación y correlación, hasta que algún otro experto siente que esos fósiles son demasiado raros, demasiado difíciles de identificar, demasiado dependientes de las facies o demasiado restringidos geográficamente como para ser buenos marcadores y selecciona nuevos fósiles índice.

Aunque esta aproximación puede producir buenos resultados en muchos casos, es subjetiva y no toma en cuenta todos los datos disponibles. Lo ideal sería contar con algún protocolo "objetivo" para la zonación y correlación, con la finalidad de minimizar las contradicciones y maximizar la resolución estratigráfica. Este es el objetivo de la bioestratigrafía cuantitativa, como ha sido evaluado por Cubbitt & Reyment (1982), Tipper (1988), Armstrong (1999) y Sadler (2004).

Durante los últimos 30 años en particular, la paleontología se ha unido confortablemente a otras ciencias en su énfasis en metodologías cuantitativas, (Harper & Ryan, 1990).

Los métodos cuantitativos o semi cuantitativos para la bioestratigrafía no son de uso común todavía, excepto por la aproximación relativamente subjetiva de la correlación gráfica, (Hammer, 2001).

Esto probablemente es debido a que la bioestratigrafía cuantitativa es un proceso iterativo, que implica repetir muchas veces el algoritmo utilizado, afinando los datos hasta que se obtiene un resultado estable y que comúnmente es percibido como un proceso complicado que requiere de gran cantidad de tiempo y habilidades matemáticas. Aunque esto es un mito, ya que el desarrollo de la capacidad de proceso de las computadoras ha avanzado a pasos agigantados, Moore (1975), dejando esta idea sin ningún fundamento práctico.

Aunque la mayoría de los métodos estadísticos analíticos y explorativos dependen de computadoras para su implantación práctica, en la actualidad son usados en

todas las ramas de la paleontología, desde la sistemática y la morfología a la paleoecología y la bioestratigrafía. Durante los últimos 100 años las técnicas han evolucionado con el hardware disponible, desde los cálculos a mano de

principios de siglo, pasando por la implementación de lentos algoritmos en supercomputadoras de mediados del siglo XX hasta la revolución de la microcomputadora a finales del siglo, (Hammer, 2006).

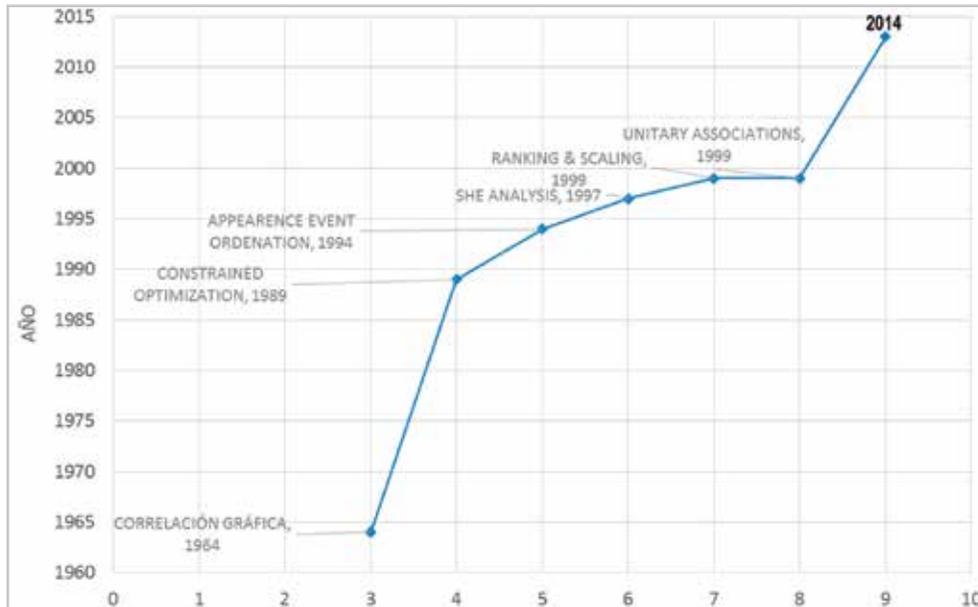


Figura 2. Secuencia temporal del desarrollo de métodos cuantitativos aplicables a la bioestratigrafía.

Dentro de la historia de la exploración petrolera de México no existe otra disciplina con mayor tradición que la bioestratigrafía. Con una trayectoria en nuestro país de más de un siglo, los resultados de los estudios micropaleontológicos y bioestratigráficos han ofrecido ininterrumpidamente un apoyo invaluable para determinar la edad y ambiente de depósito de las rocas con importancia económico – petrolera a todo lo largo y ancho de nuestro territorio, (Rosales, 2003).

Los estudios bioestratigráficos han variado a través de las décadas, acorde con las necesidades de la industria petrolera; comprenden desde reportes del contenido microfaunístico de columnas de pozo o superficie hasta ser parte primordial en los estudios de “plays”, generación de localizaciones y caracterización inicial de yacimientos, abarcando toda la cadena de valor del proceso exploratorio, (Rosales, 2003).

Este trabajo bioestratigráfico en constante evolución se debe principalmente al trabajo laborioso, dedicado y arduo de los paleontólogos de Petróleos Mexicanos y del Instituto Mexicano del Petróleo. Los resultados por ellos obtenidos se han plasmado en cientos de apéndices paleontológicos,

informes de proyectos, resúmenes de simposios nacionales e internacionales y más recientemente en bancos de datos construidos especialmente para preservar, consultar y estandarizar esa gran cantidad de información paleontológica y bioestratigráfica, (Rosales, 2003).

Pemex cuenta con una gran cantidad de datos bioestratigráficos listos para ser explotados, dentro de su sistema institucional de información bioestratigráfica. Desde 2002, en conjunto con el IMP, se comenzó a desarrollar un sistema informático nacional capaz de administrar de forma eficiente y confiable información paleontológica, bioestratigráfica y geológica generada por la comunidad de especialistas de PEP y del IMP.

Este sistema está diseñado para facilitar la captura, edición, actualización, aplicación y consulta de la información paleontológica y bioestratigráfica, generada en el ámbito nacional por los especialistas e investigadores de PEP e IMP, como producto enfocado a resolver problemas del proceso exploración-producción, garantizando su integridad, confiabilidad, disponibilidad, así como su óptima administración, (Gómez, 2005).

En la actualidad este sistema se ha convertido en una gran base de datos que incluye información bioestratigráfica desde 1910, (Meza, 2008, comunicación personal) puede ser explotada más allá de sus alcances originales, empleando técnicas de análisis de datos cuantitativos que permitan identificar patrones y soportar hipótesis basadas en la experiencia de los especialistas que durante años ha sido el sustento de los estudios bioestratigráficos en México.

Las cuencas petroleras de México

En el país se han identificado 16 cuencas sedimentarias con potencial petrolero: Sabinas, Burgos, Tampico, Misantla, Veracruz, del Sureste, Sierra Madre Oriental, Golfo de México Profundo, Sierra de Chiapas, California, Golfo de California y Chihuahua.

De éstas, las principales por su producción acumulada y reservas remanentes de aceite son las Cuencas del Sureste y la Tampico-Misantla, mientras que por su producción de gas y potencial destacan Sabinas, Burgos y Veracruz, (Escalera, 2010).

Aunque Pemex ha avanzado mucho en el estudio del subsuelo, aún se encuentra con dificultades para reducir su riesgo geológico en algunas cuencas, mientras que en otras podría mejorar su producción con un conocimiento estratigráfico más profundo y específico.

Chicontepec en la cuenca Tampico - Misantla, las Cuencas del Sureste y de Veracruz sufren los efectos de fallamientos y discontinuidades depositacionales, que dificultan la caracterización y delimitación de yacimientos. Cuencas maduras como Burgos pueden beneficiarse de estudios biocronológicos, los cuales podrían definir con mayor precisión trayectorias de pozos, al igual que en cuencas con yacimientos no convencionales.

Ante la falta de estudios bioestratigráficos disponibles y la diferencia en nomenclatura entre Pemex y las compañías del lado americano, la exploración del Golfo Profundo podría verse beneficiada con la fortaleza de los métodos cuantitativos para generar biozonaciones de manera predictiva.

Dentro de los principales retos técnicos planteados por A. Escalera en 2010 para alcanzar los objetivos de Pemex, se encuentran varios en los que la bioestratigrafía juega un papel fundamental, como son el mapeo estructural complejo y restauración, la determinación de propiedades

de sedimentos de aguas profundas, el mapeo de secuencias de alta resolución y facies y la predicción y caracterización de fracturas.

El mismo considera que el costo asociado puede ser mejorado con una eficiente visualización, conceptualización y definición, tanto de los proyectos de exploración, como de sus actividades de levantamientos sísmicos y perforación-terminación de pozos, ya que estas implican más del 80% de las inversiones; por lo que se deberán realizar programas de reducción de costos y de optimización de operaciones, (Escalera, 2010).

El objetivo de este trabajo es mostrar que existen herramientas metodológicas de aplicación inmediata que pueden capitalizar el vasto conocimiento bioestratigráfico recabado por Pemex generando marcos biocronológicos individuales, objetivos, claros, consistentes y reproducibles para las diversas y complejas cuencas petroleras de México.

Paleobioestadística

Aunque la geocronología (escala de tiempo geológico) puede ser independiente de los datos fósiles (biocronología), frecuentemente se asume que los datos fósiles no pueden ser usados para investigar patrones temporales fuera de un contexto geocronológico restringido definido en un pozo.

Sin embargo, los estudios biocronológicos pueden realizarse, no sólo en ausencia de información bioestratigráfica, sino en ausencia de cualquier dato geocronológico.

Esto es debido a que el principio de sucesión faunística subyacente a la biocronología, sólo considera la composición taxonómica de la colección de fósiles, como primero reconoció y explotó cuantitativamente Lyell, (1833).

Por lo tanto, listas de taxones ocurriendo en una colección individual (pozo, afloramiento, etc.) pueden ser útiles biocronológicamente incluso aunque no existan datos geocronológicos disponibles para las localidades fósiles, aparte de lo que es mínimamente necesario para demostrar que cada colección representa un intervalo de tiempo relativamente corto.

Todo lo que se requiere adicionalmente es ordenar las listas composicionalmente para reflejar el patrón de retorno biótico a través del tiempo. El método delineado por Alroy (1992) opera bajo este principio.

En el año 1964 Shaw desarrolló una técnica cuantitativa no estadística para determinar la relación entre dos secciones comparando los rangos de los taxones contenidos en ellas. Esta técnica llamada correlación gráfica compara la tasa de acumulación de sedimentos en una sección con otra y por lo tanto permite considerar los eventos sedimentológicos junto con los eventos bioestratigráficos. Al repetir este proceso en muchas secciones puede llegar a proponerse la sucesión precisa de las apariciones y extinciones de los taxones estudiados. Esta información puede ser integrada con mediciones confiables de la edad de los sedimentos para convertir la sección compuesta en una escala de tiempo.

Sin embargo, esta aproximación todavía depende en gran medida de las decisiones de los especialistas, por lo que la búsqueda del método “objetivo” continuó.

La llegada de la computadora personal permitió realizar mayor cantidad de cálculos por unidad de tiempo, aumentando la capacidad de extraer información de un conjunto de datos de manera más eficiente, dando factibilidad a la aplicación de métodos numéricos que hasta ese momento sólo eran teóricos y el desarrollo de algunos nuevos.

Para Hammer (2006), el uso de algoritmos rápidos basados en microcomputadoras han hecho que hasta las más complejas técnicas de análisis multivariado sean accesibles virtualmente a todos los investigadores, permitiendo mejorar en gran medida la descripción, análisis y comparación de taxones fósiles y sus asociaciones. El mismo autor afirma “Las hipótesis científicas pueden ser enmarcadas más claramente y por supuesto, estadísticamente probadas con datos numéricos”.

Otra ventaja de la bioestratigrafía asistida por computadora, como manifiestan Saddler & Cooper (2003), es que puede incrementar la resolución en un orden de magnitud comparado a las zonas de intervalo bioestratigráfico o zonas de conjunto tradicionales, porque muestra la secuencia de los eventos de primeras y últimas apariciones.

En México se han llevado a cabo diversas iniciativas para emplear métodos cuantitativos no estadísticos, como son los trabajos desarrollados por el equipo del Instituto Mexicano del Petróleo encargado del sistema de información bioestratigráfica de Pemex o el Proyecto F.53951/2004 “Bioestratigrafía del Mesozoico”, dentro del cual se generó como producto una “Integración y Correlación de Eventos

del Jurásico Superior - Cretácico en las Cuencas del Golfo de México Mediante el Método de Correlación Gráfica”.

Sin embargo, mientras que la aplicación de métodos cuantitativos estadísticos es una actividad desarrollada en otros partes del mundo, en México continúa como un área de oportunidad.

Un ejemplo de lo que puede lograrse con la aplicación de este tipo de métodos es el trabajo del investigador chino Di Zhou, quien en 2008 aplicó el método RASC en el análisis de la bioestratigrafía de la cuenca de la desembocadura del río de las Perlas en China.

Para su estudio, Di Zhou empleó los datos de ocurrencia de cientos de fósiles provenientes de docenas de pozos. Como resultados, obtuvo la secuencia óptima de eventos fósiles a través de la permutación de la matriz de calificaciones, la zonación bioestratigráfica automatizada y la correlación de eventos - tiempo. A partir de estos resultados construyó la escala de tiempo geológico regional y la correlación cronológica entre pozos, así como el análisis de subsidencia de alta resolución, incluso para pozos con registro fósil incompleto. Adicionalmente, los resultados del estudio también ayudaron a identificar problemas en localización de eventos fósiles y datación de divisiones litológicas.

Marco teórico

Los datos crudos en bioestratigrafía provienen de las muestras recuperadas durante la perforación. Éstos se registran en reportes que referencian la ocurrencia de cada especie encontrada con la profundidad en que se encontró.

La información contenida en dichos reportes es convertida en una carta estratigráfica, que muestra la extensión estratigráfica del rango de los taxones. La labor del intérprete es determinar la secuencia y espaciamiento de las terminaciones de los rangos, para así poder construir una línea de tiempo local. Las cartas pueden mostrar también los niveles estratigráficos de otros eventos para integrarlos a la secuencia: datos radiométricos, límites de secuencia, inversiones paleomagnéticas, etc.

Normalmente es hasta aquí que la metodología se detiene, aunque de estos mismos datos se puede obtener más información, como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Propiedades e información aportada por eventos con relevancia tiempo - estratigráfica.

	Unicidad del evento		Libertad para ajustar la posición estratigráfica				Características del dato			Puede ocurrir en una superficie de hiatus	Criterio de confiabilidad
	Único	Múltiple	Solo hacia arriba	Arriba o abajo	Solo hacia abajo	Ninguno	Presencia - ausencia	Repetible	Momentáneo		
Límites de rango de los taxones											
Última Aparición retrabajada	X			X			X			Si/No	Sobre Primera Aparición
Última Aparición	X		X				X			Si/No	Solo superposición
Primera Aparición	X				X		X			Si/No	Solo subposición
Primera Aparición "Caída"	X			X			X			Si/No	Debajo de Última Aparición
Eventos											
Límites de secuencia		X				X		X		Si	Posición
Superficies de inundación		X				X		X		Si	Posición
Evento de Máxima Abundancia (ACME)		X		X					X	No	Entre Primera y Última Aparición

La solución fundamental de la correlación estratigráfica y la seriación son secuencias de eventos antiguos, principalmente la aparición y extinción de taxones fósiles que representan su orden histórico correcto con o sin un intento por escalar los intervalos entre los eventos. La solución puede ser representada como un diagrama de cercas o una escala de tiempo respectivamente. Ambos pueden ser representados como curvas de diversidad que trazan riqueza de taxones como una función del tiempo. Otros productos derivados incluyen series de tiempo de longevidad de taxones, tasa de extinción, etc. La diferencia entre correlación y seriación es una de grados: el grado en que un par de secciones estratigráficas se sobreponen (correlación) o no (seriación) en los intervalos de tiempo que representan, (Saddler, 2006).

Métodos cuantitativos

Aunque la correlación gráfica es un método clásico en bioestratigrafía (Shaw 1964, Edwards 1984, Mann & Lane 1995, Armstrong 1999), que permite correlacionar un pozo con un estándar compuesto a la vez, al construir el estándar

los pozos no son tratados simétricamente y el orden en que son añadidos puede influenciar el resultado. De hecho, Hammer (2006), considera que éste es un enfoque simplista, lento y cuestionable por razones metodológicas, inferior a los métodos de Constrained Optimization, Ranking & Scaling y Unitary Associations, que ofrecen un fundamento estadístico sólido.

CONOP

CONOP (Kemple et al. 1989, 1995), es como un método que supera las dificultades presentadas por el empleo de métodos cualitativos y de correlación gráfica, ya que las secciones son tratadas igual y simultáneamente.

En correlación gráfica, dos secciones son correlacionadas a la vez, construyendo una línea de correlación en el espacio bidimensional creado por la posición de los eventos en las dos secciones, mientras que en CONOP se construye una sola línea de correlación en un espacio de *J*-dimensiones, donde *J* es el número de secciones, **Figura 3**.

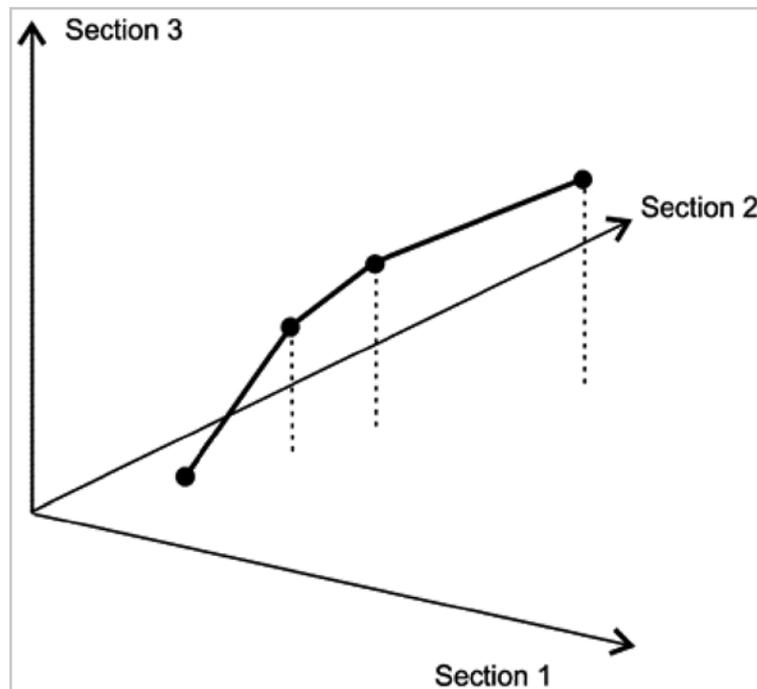


Figura 3. Cuatro eventos apareciendo en tres secciones. La línea de correlación está construida en tres dimensiones.

Obviamente, la construcción manual de una línea de correlación en altos espacios dimensionales está fuera de cuestión por razones prácticas y es indeseable por todas las decisiones complicadas y subjetivas que tendrían que tomarse. En CONOP la construcción de línea es automática, basada en el principio de parsimonia, que es la preferencia por la explicación más simple entre varias alternativas, (Hammer, 2006).

El resultado es una sección compuesta presentada como una carta de rangos conteniendo todos los taxones en un eje de espesor de sedimentos o número de horizontes.

AEO

Appearance Event Ordination (AEO) está fundamentado en criterios de parsimonia (explicación más simple entre varias opciones), emplea algoritmos de ordenación multivariados y se basa en un tipo de dato biocronológico inusual: la observación que las primeras apariciones de algunos taxones son previas a la última aparición de otros.

Para su desarrollador John Alroy, este tipo de datos debería ser preferido sobre otros como la relación entre

pares o grupos de primeras apariciones. Este método toma en cuenta ocurrencias, relaciones estratigráficas y la probabilidad de muestreo de especies individuales para generar una hipótesis del orden relativo de las primeras y últimas ocurrencias que sea más probable de acuerdo a los datos provistos.

Para lograrlo, primero transforma los patrones de aparición y de sobreposición de las especies en la base de datos a sentencias del tipo: la especie X aparece antes que la especie Y.

Después aplica un algoritmo de ordenación multivariado para derivar una secuencia hipotética inicial de eventos de primeras y últimas apariciones. El siguiente paso es mezclar los eventos usando un criterio de máxima verosimilitud para cuantas sobreposiciones de rangos sea posible, especialmente si involucran especies comunes.

Una vez que la secuencia relativa de eventos ha sido establecida, es convertida a tiempo numérico con un algoritmo de interpolación no lineal que compara las posiciones de la secuencia de eventos con estimados de edad geocronológica conocidos.

RASC

Ranking & Scaling (RASC) es un método que crea una secuencia óptima de los eventos observados en diferentes pozos o secciones sujetas a inconsistencias estratigráficas en la dirección de la flecha del tiempo. Estas inconsistencias que resultan en cruces de líneas de correlación de secciones son debidas a varios errores de muestreo y otras fuentes de incertidumbre incluyendo retrabajo y mala identificación, mientras que permite integrar otros datos, como horizontes sísmicos o marcadores en registros geofísicos, (Agterberg & Gradstein, 1999).

La parte de Ranking (ordenamiento), es resuelta al usar promedios estadísticos combinados con razonamiento estratigráfico.

La parte de Scaling (ajuste de los rangos estratigráficos), puede ser obtenido al estimar los intervalos entre eventos sucesivos a lo largo de una escala de tiempo relativa. Esto resulta en una secuencia óptima escalada.

Ya sea la secuencia óptima clasificada (Ranking), o la secuencia óptima escalada (Scaling), pueden ser usadas para biozonación o correlación entre pozos o secciones.

RASC permite sintetizar grandes cantidades de datos de fósiles automática y objetivamente basados en reglas estadísticas y estratigráficas establecidas (Grastein et al, 1985; Agterberg, 1990). De esta forma, la zonación bioestratigráfica, la columna bioestratigráfica compuesta y las correlaciones entre pozos resultantes son usualmente más cercanas a la realidad, porque son menos subjetivas y menos sujetas a errores al azar que aquellas sintetizadas cualitativamente por el cerebro humano, (Zhou, 2008).

UA

Unitary Associations (Guex, J. 1991) genera un número de zonas de asociación (parecidas a las Zonas de Opper), que son óptimas en el sentido de dar máxima resolución estratigráfica con un mínimo de contradicciones.

Una de las características más importantes del método Unitary Associations es que está basado en asociaciones y no en eventos. Este método busca usar la información de coocurrencia de especies para generar una zonación que sólo incluya las asociaciones observadas realmente.

Este método puede ser considerado conservador, ya que da más importancia a la certeza de sus resultados que a la resolución estratigráfica que podría obtenerse de los datos. Por esta razón, no calcula los intervalos de confianza, sino que reporta las contradicciones e incertidumbres que encuentra.

Este método es un tanto complejo e implica una cantidad de pasos que podrían resumirse de la siguiente manera:

1. Extiende los rangos de las especies desde la primera hasta la última aparición en cualquier pozo, aunque no existan datos entre ellas en alguno de los pozos y descarta cualquier subconjunto de datos que encuentre.
2. Los pares de datos (primera, última aparición), para todas las especies en todos los pozos son analizadas para observar las relaciones entre sus sobreposiciones: A sobre B, B bajo A, A y B al mismo tiempo.
3. Se calculan los grupos de especies que ocurren conjuntamente y que no son subgrupos de ningún otro grupo de especies.
4. Se vuelven a evaluar los datos del paso 3 usando el procedimiento empleado en el paso 1. Si existen contradicciones, se eliminan los datos menos frecuentes.
5. Las asociaciones restantes son evaluadas. Si existen contradicciones más frecuentes son eliminadas.
6. Las zonas resultantes son reducidas al mínimo, tomando en cuenta las especies que comparten y eliminando los casos únicos.
7. Se genera una secuencia entre las zonas, dándoles un orden consecutivo y se les asigna un índice de similitud.
8. Se correlacionan las muestras originales usando las asociaciones unitarias. Si a la muestra le faltan especies para diferenciar entre una zona u otra, se le asigna un rango.

Con las asociaciones obtenidas de esta manera puede construirse una propuesta de biozonación o manualmente intentar unir algunas zonas, para mejorar la resolución de una región geográfica específica.

Aplicación de métodos paleobioestadísticos en una cuenca mexicana

Para probar la utilidad de los métodos paleobioestadísticos y su factibilidad de ser usados en datos disponibles para México, se capturaron los datos de estudios paleontológicos de 27 estudios bioestratigráficos provenientes de una cuenca petrolera de México.

Paralelamente se construyó un pozo simulado capturando las especies registradas para el Eoceno -Paleoceno en Bolli (1985), asignando como profundidad el número consecutivo de la biozona en la que estaba registrada cada taxón, con la finalidad de ser integrado al estudio y servir de ayuda en la disminución del impacto de la contaminación por retrabajo y caídos en los cálculos realizar.

La base de datos resultante de la integración de los pozos reales y el pozo simulado, fue depurada aplicando los criterios siguientes:

- Eliminación de especies calificadas, (cf., aff., sl., etc.)
- Eliminación de géneros sin identificación de especie, (sp)
- Eliminación de muestras sin datos
- Eliminación de especies sin datos de ocurrencia
- Eliminación de especies con una sola aparición
- Eliminación de muestras con una sola especie
- Eliminación de especies de rango restringido al Mesozoico

De esta la base de datos resultante, se seleccionaron para integrar el estudio los 15 pozos que contenían la mayor cantidad de especies en común con el pozo simulado. Aunque la calidad de los datos no es óptima debido a lo variado de los estudios disponibles, la cantidad de datos es basta, como muestra la **Tabla 2**.

Tabla 2. Concentrado de datos integrados al estudio.

Pozos	15
Muestras	1,086
Especies	250
Eventos de primera y última aparición	1,630
Ocurrencias	6,834

Para determinar la sucesión de eventos bioestratigráficos y subsecuentemente la edad en millones de años, los datos fueron procesados usando los métodos CONOP y AEO, empleando como límite superior la cima del Priaboniano y como límite inferior la cima del Cretácico Tardío.

Los valores en millones de años no están definidos de manera estática, sino que varían de acuerdo al autor de

referencia, por lo que, con la finalidad de mostrar que los métodos cuantitativos son independientes de la escala de tiempo utilizada, en este estudio se emplearon tanto los datos de edad de Hardenbol, 1998 como los propuestos por la Comisión Internacional de Estratigrafía actualizados al año 2014. Las diferencias entre estos valores se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Diferencia entre límites de edad propuestos por Hardenbol, 1998 y GTS 2014 v2.

	HARDENBOL, 1998	GTS 2014 v2
Cima del Priaboniano	65 m.a.	66 m.a.
Límite Cretácico Superior	33.7 m.a.	33.9 m.a.

Resultados

Se aplicó el método CONOP usándolos como parámetros de temperatura inicial, pasos de enfriamiento, tasa de enfriamiento y pruebas por paso a 400, 300, 95 y 20 respectivamente. El proceso tomó tres minutos y generó el ordenamiento de los taxones con sus rangos bioestratigráficos locales expresados por número de evento.

A cada evento de primera o última aparición le corresponde un número de orden en la sección optimizada por el proceso. Este número fue relacionado mediante la ecuación de la recta con los límites de edad de Hardenbol, 1998 para el Priaboniano (33.7 m.a.) y el Cretácico Tardío (65 m.a.), resultando en la ecuación:

$$Y=0.1252X - 65$$

Donde Y es la edad en millones de años y X el orden de un evento de primera o última aparición dentro de la sección optimizada.

Para calcular los millones de años con referencia, la carta GTS 2014 v2 se aplicó el mismo procedimiento, usando los valores correspondientes, Priaboniano (33.9 m.a.) y Cretácico Tardío (66 m.a.), obteniéndose la ecuación siguiente:

$$Y = 0.1284X - 66$$

En la **Tabla 4** se muestran algunos valores calculados usando este procedimiento.

Tabla 4. Valores de edad para algunas especies calculados por CONOP usando como referencia Hardenbol, 1998 y GTS 2014 v2.

Taxón	Millones de Años Hardenbol, 1998		Millones de Años GTS,20014 v2	
	Primera Aparición	Última Aparición	Primera Aparición	Última Aparición
Globoconusa daubjergensis	64.6244	63.8732	65.6148	64.8444
Globigerina fringa	64.4992	62.7464	65.4864	63.6888
Globigerina eugubina	64.8748	61.9952	65.8716	62.9184
Planorotalites pusilla laevigata	63.122	58.3644	64.074	59.1948
Morozovella praecursoria	63.748	57.9888	64.716	58.8096
Planorotalites compressa	64.8748	56.862	65.8716	57.654
Morozovella conicotruncata	64.1236	55.7352	65.1012	56.4984
Morozovella angulata	62.9968	55.61	63.9456	56.37
Planorotalites pusilla pusilla	63.3724	55.4848	64.3308	56.2416
Morozovella uncinata	64.374	54.8588	65.358	55.5996
Morozovella inconstans	64.8748	54.1076	65.8716	54.8292

Para la aplicación del método AEO fueron empleados como parámetros el ordenar los resultados con la mayor verosimilitud posible, usando como filtro un número mínimo de ocurrencia por par de eventos igual a seis y mezclando la secuencia de adición de los pozos al cálculo. El procedimiento demoró 34 segundos en completarse, arrojó un listado de especies según el orden óptimo

calculado. En la **Figura 4** se relaciona el número de eventos calculados por AEO con los millones de años de Hardenbol, 1998. Los quiebres horizontales de la curva representan concentraciones de eventos de última aparición, lo cual puede ser usado para establecer una subdivisión de los pisos, conformando un criterio de biozonación local con una precisión de miles de años igual que con CONOP.

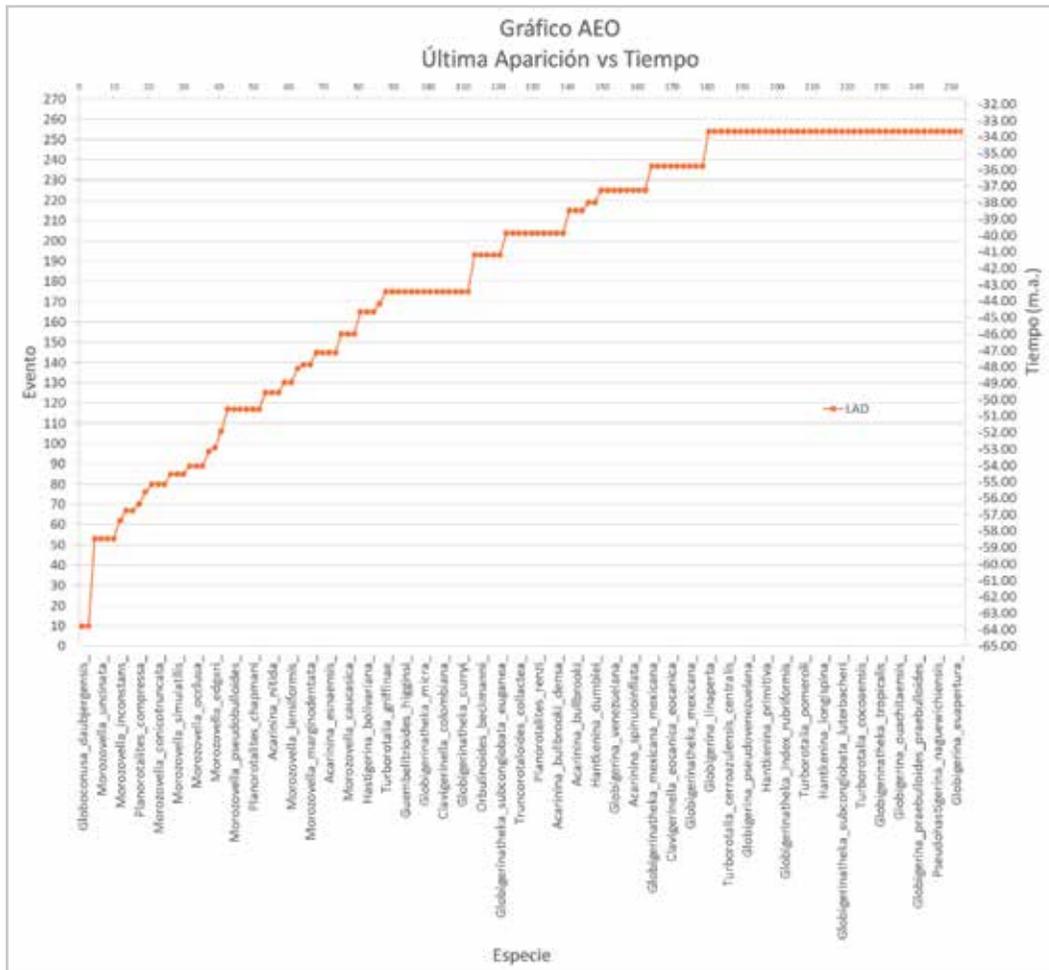


Figura 4. Gráfico mostrando la correspondencia entre la ordenación de los eventos de última aparición calculada por AEO y los millones de años en Hardenbol, 1998.

El método RASC puede resolver el problema de la contaminación por retrabajo o fósiles caídos, al establecerse un número mínimo de pozos donde deba ocurrir un evento. En este caso se aplicó un criterio conservador, exigiendo que los eventos estuvieran presentes cuando menos en ocho de los 15 pozos estudiados, para poder ser incluidos en el cálculo. Al requerir una mayor cantidad de ocurrencias de eventos, se pueden eliminar datos anómalos originados por contaminación, errores de captura o mala identificación taxonómica.

El cálculo tomó menos de un segundo y arrojó como resultados un dendrograma que muestra las relaciones entre grupos de fósiles calculadas a través de sus distancias euclidianas. En la Figura 5 se muestra cómo las agrupaciones de fósiles calculadas pueden ser relacionadas con las biozonas de Bolli, 1985, y que los cambios más drásticos en composición de estos grupos pueden relacionarse con cambios de edad a nivel de piso.



Figura 5. Diagrama de clusters mostrando la equivalencia de las biozonas determinadas por RASC con las biozonas de Bolli, 1985 in Hardenbol, 1998.

El método UA ofrece una gran cantidad de resultados bioestratigráficos, aunque en este trabajo sólo se consideró el resultado más emblemático: las asociaciones unitarias considerando los eventos de primera y última aparición. Los cálculos requeridos por este método sólo tomaron ocho segundos y dieron lugar a la identificación de 40 biozonas

locales entre el Eoceno Tardío y el Cretácico Tardío. En la Figura 6 se muestran los rangos estratigráficos de 250 especies referidos a estas asociaciones, que constituyen en sí un esquema de biozonación útil, aún sin estar referido a una escala de tiempo establecida.

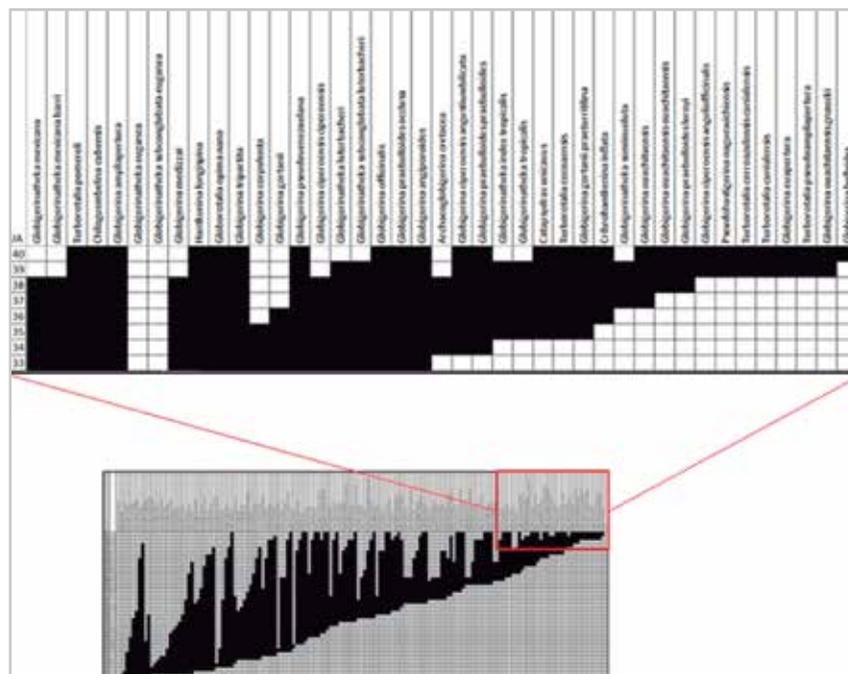


Figura 6. Detalle de la tabla de rangos estratigráficos locales determinados por UA para la cuenca estudiada.

Conclusiones

Este trabajo deja de manifiesto que los métodos paleobioestadísticos pueden ser aplicados en los datos bioestratigráficos existentes en México, para generar esquemas biocronológicos de manera clara, rápida, repetible, objetiva y adaptable a la escala de tiempo que se desee o para generar una escala biocronológica local, basada en biozonas sin una escala de tiempo.

Ambos resultados permiten caracterizar los sedimentos de manera más detallada que si se usara una biozonación global. Esto abre la puerta para la realización de estudios bioestratigráficos a escala de yacimiento enfocados en apoyar la producción de hidrocarburos, un área aún no explotada por la bioestratigrafía en México.

Referencias

- Agterberg, F.P. y F.M. Gradstein. 1999. The RASC Method for Ranking and Scaling of Biostratigraphic Events. *Earth Science Review* 46 (1-4): 1-25. [doi:10.1016/S0012-8252\(99\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00007-0).
- Aguayo Camargo, J.E., Arellano Gil, J., Santillán Piña, N. et al. 2013. Contribution to the Improvement of the Sedimentological Model for the Chicontepec Paleo-Channel. Mexico. Heavy Oil Latin America Conference & Exhibition, Puerto Vallarta, México, septiembre 24-16.
- Alroy, J. 1994. Appearance Event Ordination: A New Biochronologic Method. *Paleobiology* 20 (2):191-207.
- Bolli, H.M., Saunders, J.B. y Perch-Nielsen, K., eds. 1985. *Plankton Stratigraphy*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. et al. 2013. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36 (3): 199-204. http://www.academia.edu/4671360/The_ICS_International_Chronostratigraphic_Chart [Fecha de acceso 10 de enero 2014].
- Cooper, R.A., Crampton, J.S., Raine, J.I. et al. 2001. Quantitative Biostratigraphy of the Taranaki Basin, New Zealand: A Deterministic and Probabilistic Approach. *AAPG Bulletin* 85 (8): 1469-98.
- Escalera Alcocer, J.A. 2010. *Estrategia, Logros y Desafíos de la Exploración Petrolera en México*. México, D.F.: Academia de Ingeniería. <http://www.ai.org.mx/ai/archivos/ingresos/escalera/Estrategia%20logros%20y%20desafios%20de%20la%20exploracion%20petrolera%20en%20Mexico.pdf> [Fecha de acceso 10 de enero 2014].
- Fernández López, S. 1987. Bioestratigrafía y Biocronología: Su Desarrollo Histórico. En *Curso de Conferencias sobre Historia de la Paleontología*, 185-215. Madrid: Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. http://eprints.ucm.es/21130/1/023_88_Bioestratigrafia_Desarrollo_historico.pdf [Fecha de acceso 15 de enero 2014].
- Gómez Luna, M.L., Castillo Domínguez, R., Segura Treviño, A. et al. 2005. Sistema de Información Bioestratigráfica PEP-IMP (SIBIO). *El Trilobites: Boletín de Geociencias, Órgano Informativo de la AMGP Delegación Poza Rica 1 (1): 1-7*. <http://www.amgp.org/ws/images/stories/delegaciones/poza-rica/ElTrilobitesV1No12005.pdf> [Fecha de acceso 18 de febrero 2014].
- Guex, J. 1991. *Biochronological Correlations*. Berlin: Springer Verlag.
- Hammer, Ø. y Harper, D.A.T. 2006. *Paleontological Data Analysis*. Malden, Massachusetts: Blackwell Publishing.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. 2001. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4 (1). http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf [Fecha de acceso 10 de enero 2014].
- Hardenbol J.A., Thierry J., Farley, B. et al. 1998. Mesozoic and Cenozoic Sequence Chronostratigraphic Framework of European Basins. En *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*, eds. P.-C. de Graciansky, J. Hardenbol, T. Jacquin et al., 3-13. Tulsa, Oklahoma: Society for Sedimentary Geology, Special Publication 60. <http://dx.doi.org/10.2110/pec.98.02.0003>.
- Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. 1990. Towards a Statistical System for Palaeontologists. *Journal of the Geological Society* 147 (6): 935-48. <http://dx.doi.org/10.1144/gsjgs.147.6.0935>.
- Kemple, W.G., Sadler, P.M. y Strauss, D.J. 1989. A Prototype Constrained Optimization Solution to the Time Correlation Problem. En *Statistical Applications in the Earth Sciences*, eds. F.P. Agterberg y G.F. Bonham-Carter, 417-425. Ottawa, Canadá: Geological Survey of Canada, Paper 89-9. <http://ftp2.cits.rncan.gc.ca/pub/geott/>

ess_pubs/128/128125/pa_89_09.pdf [Fecha de acceso 18 de noviembre 2013].

Meza, R. 2008. Comunicación Personal. Centro Regional de Estudios de Laboratorio Región Norte. Pemex.

Moore, G.E. 1975. Progress in Digital Integrated Electronics. IEEE International Electron Devices Meeting, Vol. 21, 11-13.

Sadler, P.M., 2000, Constrained Optimization Approaches to the Paleobiologic Correlation and Seriation Problems: A Users' Guide and Reference Manual to the CONOP Program Family, Version 6.5, University of California, Riverside.

Shaw, A.B. 1964. Time in Stratigraphy. New York: McGraw-Hill.

Rosales Domínguez, M.C. 2003. Editorial. En Segundo Simposio de Bioestratigrafía en la Exploración Petrolera de México y Exposición, junio 19–21, Reynosa, Tamaulipas, México: PEMEX Exploración y Producción. CD-ROM.

Zhou, D. 2008. RASC/CASC: Example of Creative Application of Statistics in Geology. Natural Resources Research 17 (3): 145-154. <http://dx.doi.org/10.1007/s11053-008-9075-8>.

Semblanza de los autores

Alexandro Efraín Mendoza Zappi

Ha desarrollado su actividad como bioestratígrafo a lo largo de la última década, prestando sus servicios a la industria petrolera de México a través de varias compañías, labor a la que ha podido sumar su pasión por las ciencias de la información, resultando en diversos procesos y sistemas informáticos innovadores orientados al aumento de la calidad y estandarización de la disciplina.

En los últimos años se ha desempeñado como Gerente de bioestratigrafía para la empresa Petroexplora, donde, junto con su grupo de trabajo dedica gran parte de su tiempo a la investigación y desarrollo de tecnologías aplicadas a la bioestratigrafía.

José Ramón Silva Arizabalo

Se desempeñó como bioestratígrafo para Pemex Exploración durante nueve años y posteriormente fundó la compañía Petroexplora, iniciando con proyectos de bioestratigrafía de alta resolución para la industria petrolera, dando servicio a PEP como a compañías operadoras privadas, ya por más de seis años continuos y participando activamente en el desarrollo de investigación e impulsando a su equipo de trabajo a desarrollar nuevas metodologías que aporten valor a México y la industria energética.

Actualmente es el Director general de la empresa Petroexplora y han diversificado tanto sus proyectos de trabajo como sus áreas de investigación en temas como geología, registro de hidrocarburos, parámetros de perforación e interpretación aplicada, promoviendo en todo momento la innovación con capital humano 100% mexicano.