

PABLO GROEBER Y LA DILATACIÓN DE LA TIERRA

Miguel E. RAMOS¹, Edmundo D. RAMOS² y Victor A. RAMOS¹

¹ Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber, UBA-CONICET. Departamento de Ciencias Geológicas, FCEN, Universidad de Buenos Aires. Email: miguelestebanramos@hotmail.com

² Secretaría de Investigaciones, Universidad de la Marina Mercante.

RESUMEN

Se presenta la visión de Groeber acerca de *La dilatación de la Tierra*, su pionero trabajo de finales de la década del 50'. En éste brinda una explicación de diversos mecanismos y fenómenos que actuarían en el planeta Tierra, tales como su expansión a través del tiempo y el desarrollo de corrientes convectivas. Buscó una respuesta a la paleogeografía de los continentes y océanos desde el Neopaleozoico a la actualidad, vinculándolos a una eventual dilatación de la Tierra. Esta teoría que comenzaba a ganar adeptos entre los geólogos, si bien sigue parcialmente vigente, no explica adecuadamente la movilidad de los continentes. Sin embargo, es defendida aún por una pequeña porción de la comunidad científica. Para justificar esta hipótesis Groeber, explica cómo en una Tierra en expansión dominada por esfuerzos extensionales, podían convivir esfuerzos compresivos responsables del levantamiento de las cordilleras, producidos por las corrientes convectivas y el accionar de la zona de Benioff. Discute aspectos tanto de la geología teórica como aquellos obtenidos a través de evidencias de campo. En la presente contribución se destacan elementos significativos asociados a un cambio teórico en la geología en un momento en que se estaba abandonando el paradigma de los continentes fijos y de la teoría geosinclinal y trata de explicar la movilidad de los continentes a través de la dilatación de la Tierra. Si bien hoy sabemos que fue un acto fallido, es interesante destacar la solidez de los razonamientos de Groeber en busca de explicar esa movilidad.

Palabras clave: *Dilatación de la Tierra, corrientes convectivas, zona de Benioff, levantamiento andino, densidad de la Tierra*

ABSTRACT

Pablo Groeber and the expanding Earth

The Groeber's vision on "The Expanding Earth" is presented based on his pioneering work published in the late 50's. This essay provides an explanation of various mechanisms and phenomena that would act on planet Earth, such as its expansion over time and the development of convective currents explaining the variation of paleogeography of the continents and oceans over time. The theory began to gain adherents among geologists and it is still partially valid, but does not adequately explain the mobility of the continents. To justify this hypothesis Groeber explains how in an expanding Earth dominated by extensional efforts, compressive efforts could uplift mountain ranges, produced by convective currents and the Benioff zone. He discusses aspects of both theoretical geology and those obtained through field evidence. This new contribution highlights significant elements related to a theoretical change in geology at a time when the paradigm of fixed continents and the geosynclinal theory was being abandoned, trying to explain the mobility of the continents through the expanding Earth. Although we know today that it was a failed act, it is interesting to emphasize the robustness of Groeber's reasoning in order to explain that mobility.

Keywords: *Expanding Earth, convective currents, Benioff zone, Andean uplift, Earth density*

INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es revisar algunas contribuciones del Dr. Pablo Groeber al estudio de los procesos tectónicos que actuarían en la Tierra. Es conveniente aclarar que no se persigue realizar una crítica de su trabajo, sino más bien destacar las virtudes que en éste se encuentran con el fin de revalorar algunos enunciados propuestos bajo una vi-

sión actualizada de los conceptos teóricos.

La fundamentación del ensayo de Groeber sobre la *Dilatación de la Tierra*, se basaba en primer lugar en conceptos fillosóficos. En la introducción combate las teorías contraccionistas, postuladas por la influyente obra de Suess (1904-1909), de gran influencia entre los geólogos del hemisferio norte. Este contraccionismo por enfriamiento del planeta involucraba

“un pensamiento antropocéntrico, el del envejecimiento y el de la muerte”, donde el “universo marcha hacia su muerte por frío” (Groeber 1959, pág. 4). Estas teorías explicaban fácilmente la contracción y el plegamiento, pero con ellas no se podía entender la existencia de procesos extensionales y compresivos que actúan simultáneamente en la Tierra.

La naciente propuesta de la deriva continental había impactado por ese enton-

ces en la comunidad geológica. La teoría tenía todavía escasa aceptación y confrontaba con los denominados “fijistas” que no aceptaban la condición móvil de los continentes, en especial aquellos pertenecientes al hemisferio norte. En este contexto Groeber, aceptando las premisas de Wegener, resuelve las variaciones en la posición de las masas continentales recurriendo a un incremento del radio terrestre, hipótesis que sería seguida años más tarde por diversos especialistas en tectónica. Esta hipótesis lo lleva a escribir en 1959 su ensayo sobre “*La dilatación de Tierra*”.

En ese trabajo el autor presenta una serie de argumentos para sostener esta nueva hipótesis de la Tierra en expansión. Su contribución consta de dos secciones. La primera, con un marco introductorio, plantea los principales fundamentos geofísicos para apoyar la teoría. Con ese fin, realiza una serie de análisis basados en trabajos previos logrando obtener la variación interna de la densidad en la Tierra, y así justificar la dilatación de la Tierra considerando la necesidad de una serie de procesos en el núcleo terrestre. A su vez, revisando datos sismológicos (Bullen 1940, Jeffreys y Bullen 1958) realiza una descripción e interpretación de la composición y condición de las capas internas de la Tierra. En la segunda parte el autor desarrolla los fundamentos geológicos que soportan el sistema expansionista. Describe la geología tanto a una escala global como regional, y aborda los procesos geodinámicos implicados. Concluye finalmente con una justificación de la dilatación terrestre y cómo pueden convivir en ese proceso esfuerzos contraccionales asociados a la zona de Benioff responsables del levantamiento de la cordillera, junto con un modelo que muestra cómo aumentó el radio terrestre en el tiempo, el cual implica diferentes paleoposiciones de los continentes.

Es interesante destacar que en esa década se inician los estudios paleomagnéticos, al poder obtener el magnetismo remanente de rocas de diferentes edades. Sin embargo, los primeros estudios publicados por Runcorn (1955) como gran no-

vedad en *Nature*, que comparan paleopolos de Estados Unidos con los del Reino Unido, concluyen que los resultados son relativamente buenos para una correlación entre ambas regiones y postular una deriva de los polos. En esos trabajos se descarta la existencia de una deriva continental apreciable como la postulada por Wegener y Du Toit (véase Runcorn 1956). Se debe esperar al famoso “*A Symposium on Continental Drift*” de 1965, para discutir las nuevas herramientas que el paleomagnetismo aporta a la deriva de los continentes donde recién en forma explícita se demuestra la deriva (Creer 1965 a) y años más tarde la incorporación de datos de América del sur en Valencio y Vilas (1969). Esos trabajos no fueron conocidos por Groeber, quien fallece en 1964. Para poder comprender y asimilar las implicancias del trabajo de Pablo Groeber, es necesario, en primer lugar hacer una breve mención histórica de la teoría expansionista. Posteriormente se resumirán los aspectos destacados del trabajo de Groeber para finalmente discutirlos y contrastarlos sobre la base de nuestro conocimiento actual.

Trabajos pioneros sobre la teoría de una Tierra en expansión

A fines del siglo XIX la idea de la expansión de la Tierra encontró sus primeras participaciones de la mano de Roberto Mantovani, quien partiendo de las mismas premisas que Wegener, propuso un incremento en el radio terrestre para justificar el desacople de Sudamérica y África (Mantovani 1924, Scalera 2009). Sin embargo, no hay duda que fue el mismo Alfred Wegener (1912) quien presentó los primeros argumentos sólidos sustentados con evidencias geológicas, paleontológicas y geofísicas para introducir el concepto de la “deriva continental”. En un principio estos nuevos mecanismos no contaban con la aceptación de la comunidad científica, pero de a poco fueron abriendo el camino a nuevas teorías que proponían un cambio de paradigma que dejaba de lado los modelos fijistas. Vine y Matthews (1963) proporcionaron una prueba favorable a la hipótesis de la

expansión del fondo marino. Se basaron en las anomalías magnéticas observadas mientras cruzaban el norte del océano Atlántico y el noroeste del Índico. Estos indicios desempeñaron un papel principal en la hipótesis de la expansión del suelo marino y en la deriva continental (Vine y Hess 1968) y dieron inicio, así, a nuevas propuestas. Por un lado se encontraban quienes justificaban la deriva continental a partir de la tectónica de placas (Wilson 1965, Mckenzie y Parker 1967) y por otro lado un grupo de geólogos y geofísicos que retomaban el antiguo concepto de la dilatación terrestre para justificar el movimiento de las grandes masas continentales.

Las ideas de Mantovani de una Tierra en expansión fueron continuadas en Alemania por Hilgenberg (1933 y 1965) y en Rusia por Bogolepow (1930), entre otros. Hacia la segunda mitad del siglo XX, se incrementó el número de investigadores que trabajaban en esta nueva teoría: Egyed (1956), Creer (1965 b), Dearnley (1965), Carey (1975, 1976), Shields (1979), Owen (1981), Blinov (1987), Krep (1992), Chudinov (1998), por nombrar algunos destacados (véase una lista más completa en Carey 1975 y Scalera 2003). Es interesante destacar que si la Tierra estaba en expansión, la variación de las paleoinclinaciones obtenidas mediante estudios paleomagnéticos en un mismo bloque a lo largo de un meridiano, debería mostrar valores cada vez menores (van Andel y Hobster 1966). Estos estudios presentaban resultados consistentes tanto para una Tierra con radio constante, como para una Tierra con radio en expansión (véase en Valencio 1980, una completa discusión sobre el alcance de estos métodos). Debemos esperar varios años para que los estudios paleomagnéticos mostrasen que esa expansión era de la misma magnitud que la sugerida por las teorías cosmológicas (Blanco *et al.* 1980) e insuficientes para las variaciones paleogeográficas observadas en la Tierra.

Entre los pioneros se destaca Samuel Carey quien fue el primero en realizar modelos análogos de la Tierra en expansión y realizar una descripción y justificación

detallada de los mecanismos que la generan (Carey 1975). Este último, como profesor en Australia, enseñó estos conceptos en sus cátedras y en simposios a varias generaciones de estudiantes y colegas. Por esta razón fue considerado como “El Padre de la teoría de expansión moderna” (Hurrell 2011). En su libro “*The Expanding Earth*” (1976) introduce muchos de los conceptos que hoy en día la comunidad geológica utiliza comúnmente. Definiciones como “oroclino” que han sido aceptadas y discutidas a nivel internacional, han perdurado hasta nuestros días y siguen aún vigentes.

Dentro de esta generación cabe incluir a Pablo Groeber (1959) con su ensayo de la dilatación de la Tierra. Si bien este trabajo no tuvo ni la divulgación ni el impacto de los anteriores, las hipótesis en él propuestas están a la altura de sus contemporáneos, con algunas proposiciones sobresalientes dentro del estado del arte de aquel entonces. Las estimaciones de densidad para el núcleo terrestre, así como una serie de modelos propuestos para justificar el mecanismo expansionista, sustentado por datos sísmicos, de gravedad y fundamentalmente de geología general, forman parte de las virtudes de su trabajo.

Con el pasar de los años, la teoría de la tectónica de placas fue alcanzando gran aceptación y consenso entre la comunidad científica. Es difícil establecer en qué momento exacto se impuso esta nueva teoría. Como parte de toda revolución científica el cambio de paradigma se dio de manera paulatina (Kuhn 1970). Ya si, en las últimas décadas del siglo XX, los modelos tectónicos fueron progresando vertiginosamente y se propagaron de una manera estentórea en el ámbito científico en general. Lograron así, ubicarse como “la teoría dominante” del nuevo paradigma, en términos kuhnianos. No obstante, la hipótesis expansionista sigue parcialmente vigente, representada por un grupo minoritario. En algunos casos, dedican todo su esfuerzo en refutar y comprobar las falencias de la tectónica de placas, presentando trabajos donde muestran punto por punto las ventajas de la expansión por sobre los axiomas tectó-

nicos (Kremp 1992, Maxlow 2001, Scalerla 2003). Otros autores buscan mejorar el modelo y avanzar en su desarrollo individual (Scalerla 2015). Recientemente se obtuvieron interesantes valores para las tasas de expansión y de incremento del radio terrestre, a partir de mediciones de GPS y datos del campo gravitatorio (Gerasimenko 1993, Shen *et al.* 2011, 2015). De cualquier forma, el modelo expansionista es una “voz” que sigue sin afectar el curso del flujo principal (*main stream*) del conocimiento presente de la Ciencia de la Tierra dominado por la tectónica de placas.

LOS ARGUMENTOS DE GROEBER

a) Argumentos geofísicos

En este apartado Groeber busca reconocer la variación de la densidad de la Tierra en función de la profundidad. Para tal objetivo, el autor realiza dos aproximaciones, una desde el punto de vista analítico, realizando un interesante ensayo matemático, y otra basada en las validaciones sismológicas. El desarrollo teórico surge a partir de una revisión y recopilación de los valores de la densidad media de la Tierra calculados hasta ese momento. Este análisis basado en determinaciones de la constante de gravitación universal conduce a valores de densidad promedio de 5,60 para el globo terráqueo. Tomando como punto de partida la incongruencia que existe entre este valor promedio de densidad y el dato observable en la superficie terrestre, que él estima entre 2,5 y 3, se plantea como interrogante calcular la variación de la densidad interna de la Tierra. Este ejercicio fue realizado anteriormente de manera similar por Helmer (1884) y es este trabajo el que motiva a Groeber a repetir el análisis sistemático con datos más actualizados.

El ensayo publicado originalmente en 1959 en el Boletín de Informaciones Petroleras pierde parte de su riqueza debido a serios problemas de edición así como de imprenta. A su vez el autor comete algunos descuidos a lo largo de su desarrollo. Por tales motivos a continuación se

reescribe el desarrollo matemático para calcular la curva de densidades realizado para el presente trabajo, con el fin de rescatar la valiosa información que se intentaba difundir en el trabajo original.

Considerando a la Tierra como un elipsoide de revolución de densidad homogénea, el momento de inercia del mismo, alrededor del eje de rotación (I_x), se puede calcular analíticamente y resulta

$$I_x = 0,4 \alpha_0^2 M \quad (1)$$

donde α_0 es el radio ecuatorial de la Tierra y M su masa. Si bien Groeber cita esta expresión del trabajo de Helmer (1884), la misma se puede obtener descomponiendo el elipsoide en discos paralelos al ecuador, e integrando desde un polo hasta el otro. Sin embargo, debido a que no existe una solución analítica para el caso de un elipsoide no homogéneo, cuya densidad varía en función del radio como propone Groeber, se utiliza para el desarrollo, de aquí en adelante, un modelo esférico simplificado de la Tierra. En este caso sigue siendo válida la ecuación (1)

El hecho de que el valor observado a través de mediciones astronómicas (Helmer 1884) sea

$$I_x = 0,332 \alpha_0^2 M \quad (2)$$

indica que la Tierra no es homogénea y que hacia el centro de la misma, su densidad debe aumentar para que el momento de inercia sea menor que en la expresión (1).

Considerando la Tierra como una esfera, Groeber propone una aproximación polinómica para la densidad en función de la distancia “ a ” al centro de la Tierra. La densidad puede expresarse

$$\delta(a) = \delta_c \left(1 + c_1 \left(\frac{a}{a_0} \right)^2 + c_2 \left(\frac{a}{a_0} \right)^4 \right) \quad (3)$$

Donde δ_c es la densidad en el centro de la Tierra $\delta(a=0)$. La ecuación (3) ya contempla que $\left(\frac{d\delta(a)}{da} \right)_{(a=0)} = 0$ garantizando que

la densidad se mantiene constante para el centro de la Tierra.

Los coeficientes c_1 , c_2 y la densidad al cen-

tro de la Tierra δ_c son las tres incógnitas que se determinarán satisfaciendo las siguientes condiciones:

$$\delta(a_0)=2,8 \quad (4.1)$$

$$\delta_{promedio}=5,6 \quad (4.2)$$

$$I_{\xi}=0,332 a_0^2 M \quad (4.3)$$

Nótese que la tercera condición surge de las mediciones astronómicas de Helmert (1884) enunciadas en la ecuación (2).

Combinando la ecuación (3) y la condición (4.1) los coeficientes c_1 , c_2 y la densidad al centro de la Tierra δ_c deben satisfacer

$$\delta(a_0)=\delta_c(1+c_1+c_2)=2,8 \quad (5)$$

Se calcula $\delta_{promedio}$ como el cociente entre la masa de la Tierra y el volumen de la misma, condición (4.2). Se obtiene la masa de la Tierra considerando la densidad como se expresa en la ecuación (3), para lo cual se descompone la esfera en una sucesión de cáscaras concéntricas de distinta densidad.

La masa de una cáscara esférica dM con radio a y espesor da , y una densidad $\delta(a)$ es

$$dM=\delta(a)4\pi a^2 da$$

En consecuencia la masa de una esfera de radio a_0 es

$$M=\int_0^{a_0} \delta(a)4\pi a^2 da = \frac{4}{3} \pi \delta_c a_0^3 \left(1 + \frac{3}{5} c_1 + \frac{3}{7} c_2\right)$$

Dividiendo por el volumen de la esfera $\frac{4}{3} \pi a_0^3$ se obtiene

$$\delta_{promedio} = \delta_c \left(1 + \frac{3}{5} c_1 + \frac{3}{7} c_2\right) = 5,6 \quad (6)$$

Finalmente se debe calcular el momento de inercia I_{ξ} de una esfera cuya densidad varía en función del radio, según la ecuación (3). Nuevamente descomponiendo la esfera en una suma de cáscaras de espesor da , e integrando los momentos de inercia dI_{ξ} de cada una entre $a=0$ y $a=a_0$. Obsérvese que de esta forma las cáscaras esféricas tienen densidad constante según ecuación (3), y su momento de inercia es

$$dI_{\xi} = \frac{8}{3} \pi \delta(a) a^4 da$$

Integrando se obtiene

$$I_{\xi} = \int_0^{a_0} dI_{\xi} = \frac{8}{15} \pi \delta_c a_0^5 \left(1 + \frac{5}{7} c_1 + \frac{5}{9} c_2\right)$$

Utilizando el momento de inercia enunciado en (2) y dividiéndolo por la masa

$$M = \delta_{promedio} \frac{4}{3} \pi a_0^3 \text{ se obtiene}$$

$$I_{\xi}/M = 0,830 \delta_{promedio} = \delta_c \left(1 + \frac{5}{7} c_1 + \frac{5}{9} c_2\right) \quad (7)$$

Se tiene así el sistema de ecuaciones (5), (6) y (7) que permite obtener las constantes

$$c_1 = -1,12$$

$$c_2 = +0,36$$

$$\delta_c = +11,595$$

En consecuencia la ecuación (3) se puede expresar de la siguiente manera

$$\delta(a) = 11,6 \left\{ 1 - 1,12 \left(\frac{a}{a_0}\right)^2 + 0,36 \left(\frac{a}{a_0}\right)^2 \right\} \quad (8)$$

Al final de este desarrollo Groeber considera una reformulación de la ecuación (8) considerando una densidad media $\delta_{promedio} = 5,6$ y una densidad para la superficie de la Tierra de $\delta(a_0) = 0,8$. De esta manera resulta

$$c_1 = -1,00$$

$$c_2 = +0,036$$

$$\delta_c = +11,220$$

$$\delta(a) = 11,2 \left\{ 1 - 1,12 \left(\frac{a}{a_0}\right)^2 + 0,36 \left(\frac{a}{a_0}\right)^2 \right\}$$

Se considera que Groeber posiblemente asume una densidad muy baja para la superficie terrestre en la última fórmula con el fin de obtener un valor de 11,2 para la densidad del núcleo, reproduciendo el valor de densidad obtenido por Helmert (1884).

Lo destacable del desarrollo que llevó a cabo Groeber es la representación de manera sencilla y realista, como se muestra en la figura 1, del comportamiento de la densidad en el interior de la Tierra basado en tres simples parámetros como la densidad en la superficie, la densidad media y su momento de inercia observado con mediciones planetarias externas.

A partir del desarrollo de estos cálculos Groeber logra construir una curva de

densidades en función de la profundidad (Fig. 1). Posteriormente comprueba las similitudes entre las variaciones de esta curva y los datos obtenidos del reconocimiento sísmológico de las superficies de discontinuidades internas de la Tierra (Jeffreys y Bullen 1940). Así obtiene algunas de las conclusiones más notables de su informe. Contrastando el valor de la densidad obtenida para el núcleo terrestre, tanto de manera analítica como a partir de los datos sísmicos, entre 11 y 11,6 y conociendo la densidad calculada para un núcleo *Nífico* (compuesto únicamente por Fe y Ni) de 8,5. Era consecuentemente necesaria la presencia de otros elementos más pesados, generalmente radioactivos, en el núcleo para justificar este déficit de masa. El autor reconoce también que es necesaria la presencia de gas en una capa que denomina “*manto de transición*” para justificar la falta de propagación de las ondas sísmicas transversales. Ambas premisas lo llevan a conjeturar la presencia tentativa de nitrógeno en el núcleo, con lo cual podría obtener una densidad de 11,6. Asume a su vez que la desintegración de las sustancias radioactivas del núcleo generaría nuevo gas en el mismo y que la liberación de neutrones vinculada a este proceso estaría siendo manifestada en las denominadas “*fuerzas endógenas*”. La desintegración trae aparejado un aumento del volumen y los gases generados en ésta actúan como agentes que contribuyen a la distensión, y sobre todo en lo que respecta a la movilidad de la Tierra.

b) Fundamentos geológicos

En la segunda parte del extenso trabajo de Groeber se presentan una serie de argumentos de geología global demostrando como la configuración de los continentes apoya la teoría de la deriva de Wegener. Aquí, el autor justifica el movimiento de los continentes a partir de la distensión de la Tierra advirtiendo que aparece un nuevo sima rellenando los espacios que se generan al aumentar el radio terrestre. Desde este punto hace unas estimaciones de las medidas de dispersión en el tiempo calculando la superficie que cubren “*las cubetas sísmicas*” repre-

sentadas en el océano Atlántico, Pacífico y otros paleo-océanos. Extrapolando estos valores a la base del Proterozoico inferior alcanza un valor para la densidad de la Tierra en ese tiempo de 33 gr/cm^3 . Consecuentemente, el mismo autor resalta este hecho como improbable y propone entonces que la dilatación habría comenzado a partir del Proterozoico. De esta manera asume que la expansión de la Tierra no ha sido permanente, infiriendo incluso una posible futura contracción.

Es destacable el dominio que tiene Groeber en este trabajo para reconstruir los diferentes sistemas de plegamiento. En su reconstrucción del continente de Gondwana para el Pérmico inferior hace un exhaustivo análisis de los sistemas de plegamiento circumgondwánicos y circumlaurénticos, los que explica como un resultado de la expansión de la Tierra. Los primeros estarían ubicados sobre el flanco occidental del Gondwana, en especial en América del Sur, donde se desarrolla la cadena andina. En un ensayo anterior había explicado el origen de los Andes por grandes deslizamientos gravitacionales de la corteza sílica (Groeber 1927), sin poder vislumbrar el origen mecánico de la fuerza que los originaba. En el presente ensayo encuentra a través de la dilatación y la formación de cuencas “sísmicas” (cuencas oceánicas) las fuerzas necesarias para el ascenso y deformación posterior. Trata de desterrar el viejo concepto de la contracción de la Tierra por enfriamiento que venía siendo postulado desde la propuesta original de Bacon (1620) y popularizado en la comunidad geológica por Suess (1904-1909) en sus teorías contraccionistas en su libro *Das Antlitz der Erde*.

Este libro es citado por Groeber y considerado por numerosos geólogos europeos, como el de mayor influencia para el entendimiento de los procesos geológicos después de los *Principles of Geology* de Lyell (1833). Mediante el uso de corrientes convectivas Groeber puede explicar la coexistencia de fuerzas extensionales, en los sectores donde las mismas ascienden como se ilustra en la Fig. 2 y fuerzas contraccionales en los márgenes de las masas continentales como indica la Fig. 3.

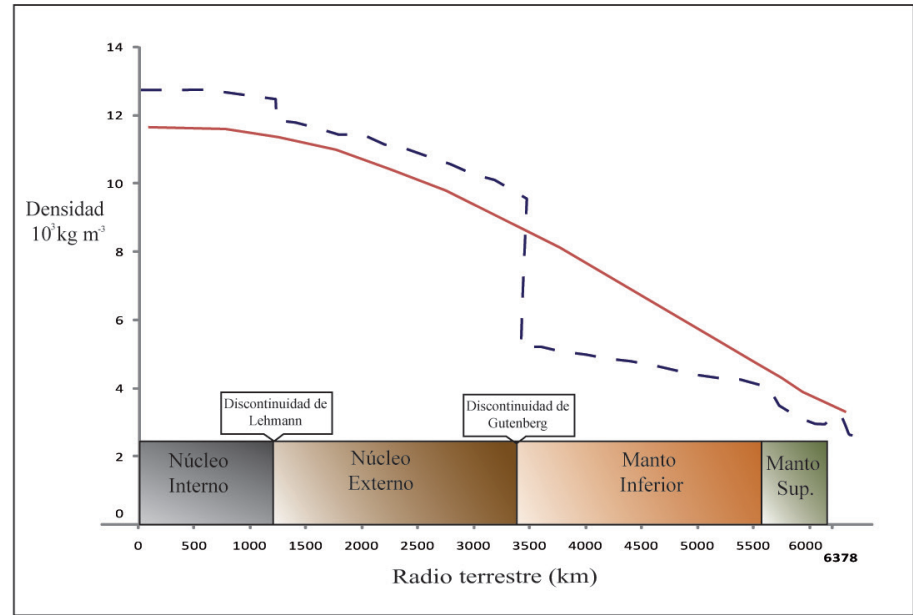


Figura 1: Representación de la variación de la densidad en el interior de la Tierra. En línea continua se muestra la curva obtenida a partir del desarrollo de Groeber. La línea entrecortada muestra la curva comparativa del trabajo de McDonough (2003). Las principales discontinuidades del interior de la Tierra son el resultado de observaciones sísmológicas (Jeffreys y Bullen 1940).

En su análisis utiliza el concepto de Amferer (1906) de subducción de la corteza para explicar la compleja estructura de los Alpes, hoy día conocido como subducción del tipo A. Ésta caracteriza la estructura cortical de zonas de colisión entre dos bloques continentales yuxtapuestos tectónicamente. A su vez aplica los nuevos conceptos de Benioff (1955), no sólo para explicar los terremotos alineados en el margen continental, sino como una mecánica que explicaría la deformación en el frente de avance, hoy día conocida como subducción del tipo B (Roeder 1973), que involucra corteza oceánica.

En el origen de las fuerzas tectónicas tienen relevancia la acción de las corrientes convectivas. Es interesante destacar la asociación que realiza Groeber entre las corrientes convectivas y el desplazamiento de los continentes. Esa idea había sido propuesta originalmente por Holmes (1931), quien fue el primero en establecer cuantitativamente que la convección termal era un mecanismo viable en un manto sólido con las viscosidades estimadas. Años más tarde en su famoso trabajo en *Nature* desarrollaba en forma más com-

pleta cómo los esfuerzos generados por un lento movimiento convectivo eran suficientes para romper y desplazar los continentes (Holmes 1953). Actualmente se han confirmado las premisas iniciales sobre la viscosidad del manto y la viabilidad de las propuestas iniciales de Holmes (véase Schubert *et al.* 2001).

Si bien Groeber no cita a Holmes, sus ideas habían quedado plasmadas en su famoso libro *Principles of Physical Geology* (Holmes 1945 y subsecuentes ediciones en español), e influenciado a toda una generación de geólogos. Entre ellos se destacan trabajos como los de Gilluly (1955), el que es usado por Groeber en su análisis.

La relación entre la ruptura de los continentes y las corrientes convectivas era un proceso ya bien conocido, siendo el mérito principal de Groeber el haber vinculado estas corrientes con el levantamiento de la cordillera de los Andes a través de la zona de Benioff (Fig. 3). Estas corrientes convectivas brindaban una justificación para generar plegamientos en un sistema en expansión. Groeber aplica el criterio de plegamientos gravitacionales a los Andes, dándole una base teórica,

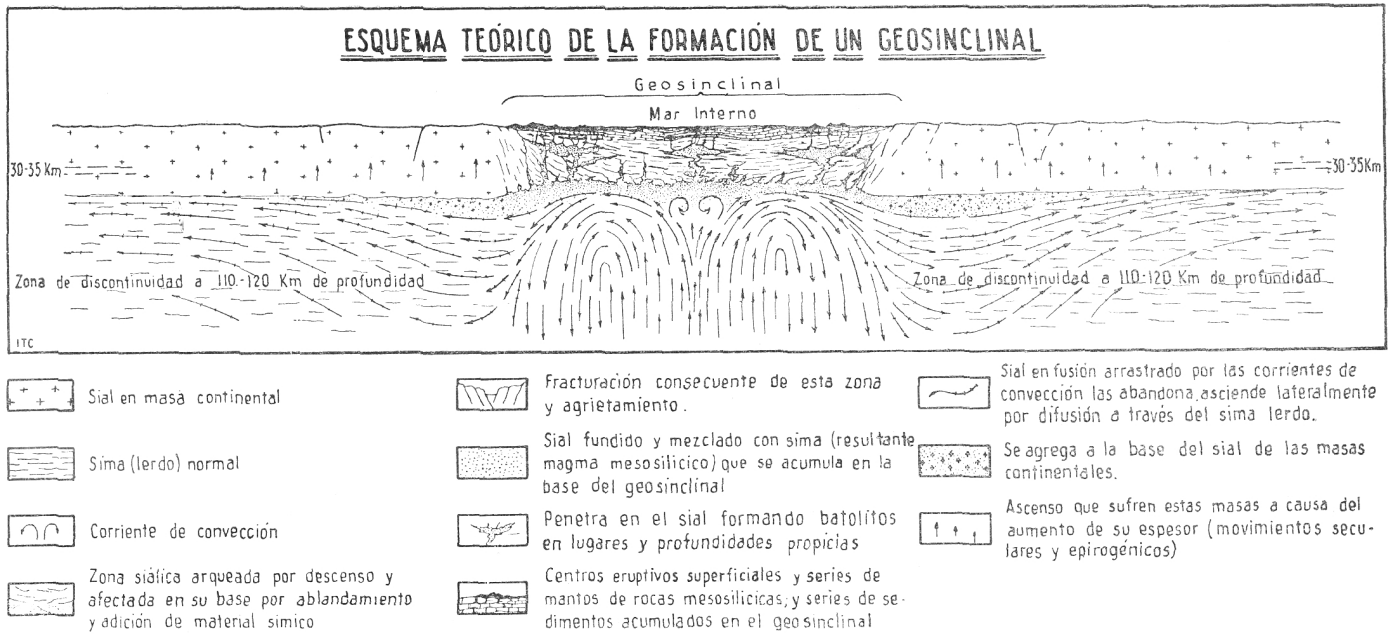


Figura 2: Esquema de Groeber (1959) en donde muestra el comportamiento de las corrientes convectivas.

derivada de sus estudios en la Cordillera. Este criterio desarrollado en un trabajo previo (Groeber 1927), considera que las corrientes convectivas se ponen en movimiento en el sima (o sea en el manto) al disminuir la carga sílica (debido al estiramiento la corteza continental). Este estiramiento lo adjudica a la dilatación de la Tierra. Estas corrientes convectivas símicas (mantélicas) procedentes del interior (Fig. 2), generan la fusión del sial (de la corteza) que se mezcla con el sima subyacente produciendo las masas efusivas mesosilícicas. En términos actuales lo que Groeber está describiendo es como un subplacado basáltico puede fundir la base de la corteza y mediante mezcla de magmas originan rocas mesosilícicas. El adelgazamiento del sial (de corteza) es el responsable de la exhondación de la cuenca geosinclinal que es rellena por sedimentos de menor densidad, y trae consigo un defecto de masa y como consecuencia un ajuste isostático expresado en un ascenso “epirogénico” de la cadena plegada. En los casos en los que no podían ser acarreados sedimentos terrígenos a estas depresiones, porque las mismas se hallaban excesivamente alejadas de los continentes, se abrían ventanas símicas, como la del Atlántico. A su

vez, en este apartado el autor desliza, vinculándolo con este proceso de adelgazamiento, el concepto de *foredeep* (antefosa), como las grandes zonas de hundimiento que se generan asociadas a la fajas de plegamiento.

Finalmente aplica todas sus proposiciones teóricas a un ejemplo de campo en la cordillera andina entre los 20° y 40°S. En esta descripción de la geología regional andina, destaca una serie de evidencias neotectónicas a lo largo de los Andes, a las que el autor se refiere como levantamientos de la zona costera. Según Groeber (1927), este levantamiento está generado por fallas a las que denomina como “subempujes” o bajocorrimientos. En este nuevo trabajo, aprovecha para demostrar que los “subempujes” bajo su punto de vista, se encuentran constreñidos por las, en ese momento, recientes evidencias sísmicas de Benioff (1955) (Fig. 3). A raíz de esto justifica la necesidad de una inclinación de los planos de fractura entre 30° y 32°. Tal inclinación posibilita el desplazamiento de porciones continentales, y el consecuente plegamiento. A su vez, destaca el comportamiento diferencial entre el sima y el sial (entre el manto y la corteza), donde este último es el que exclusivamente presenta plegamiento. Esta es la

primera aproximación que el autor tuvo con el concepto posteriormente conocido como zona de subducción (Isacks *et al.* 1968, Roeder 1973).

DISCUSIÓN

En las líneas anteriormente desarrolladas se busca resaltar la ardua tarea que ha sido llevada a cabo de una manera impecable y por sobre todo bien resuelta por Groeber en su publicación sobre “*La dilatación de la Tierra*”. Es simple comprender que su trabajo no haya tenido amplias repercusiones a un nivel internacional, en primer lugar por la escasa divulgación que presentaba en ese entonces el Boletín de Informaciones Petroleras, y en segundo lugar por un conflicto comunicacional debido al idioma utilizado. En esos años las publicaciones escritas en español en revistas nacionales tenían mucho menos impacto en la comunidad científica, que el que podrían alcanzar en la actualidad con la ayuda de la tecnología. Es por esta razón que no se encuentran referencias a este artículo en los trabajos posteriormente publicados sobre la temática expansionista. De la misma manera, la dificultad comunicacional afectó a este autor. Es notable la ausencia en su trabajo

de autores reconocidos por sus investigaciones en la temática de la expansión, composición interna de la Tierra o en fundamentos geodinámicos (Bull 1921, Mantovani 1924, Hilgenberg 1933, Lehmann 1936, Gutenberg 1951). Indudablemente, contar con estos antecedentes hubiese mejorado potencialmente el trabajo y las conclusiones de Groeber.

A lo largo de la historia en las ciencias geológicas como en toda ciencia se han presentado sucesivas posiciones de confrontación y debate entre teorías; “uniformistas y catastrofistas”, “movilistas y fijistas” y podríamos agregar a estas “expansionistas y tectonistas”. Pablo Groeber, en sus primeras contribuciones (Groeber 1927), se encontraba en una posición “intermedia” entre los “movilistas y fijistas” donde comenzaba a aceptar, en parte la teoría de la deriva continental (Lazarte 2008). Sin embargo, posteriormente, halló en el modelo expansionista el marco necesario para poder justificar el movimiento de los continentes. De esta manera se alejó por completo de las ideas fijistas y de aquellas involucradas en una naciente teoría de tectónica de placas. De todas formas, como se demostró anteriormente en el presente artículo, sus aportes son por demás valiosos en el concepto de la geodinámica global y tectónica general.

En su propuesta de modelo expansionista el autor alcanza a través de un sencillo desarrollo una densidad para el núcleo interno de $11,6 \text{ gr/cm}^3$. Basado en este valor, propone la necesaria participación de otros elementos en la composición del núcleo, más allá del hierro y níquel. Este argumento, que parece débil en principio, encuentra su aval en trabajos posteriores sobre la composición del núcleo. A partir de ensayos análogos y modelos de cálculos se ha demostrado no solo la posible existencia de otros elementos en el núcleo, sino incluso la presencia de elementos radioactivos como U y Th (Jephcoat y Olson 1987, Labrosse *et al.* 2001), cuya presencia había sido propuesta por Groeber, y hasta incluso C, P y S (Wood 1993). Si bien de los cálculos recientes se obtienen valores de densidad

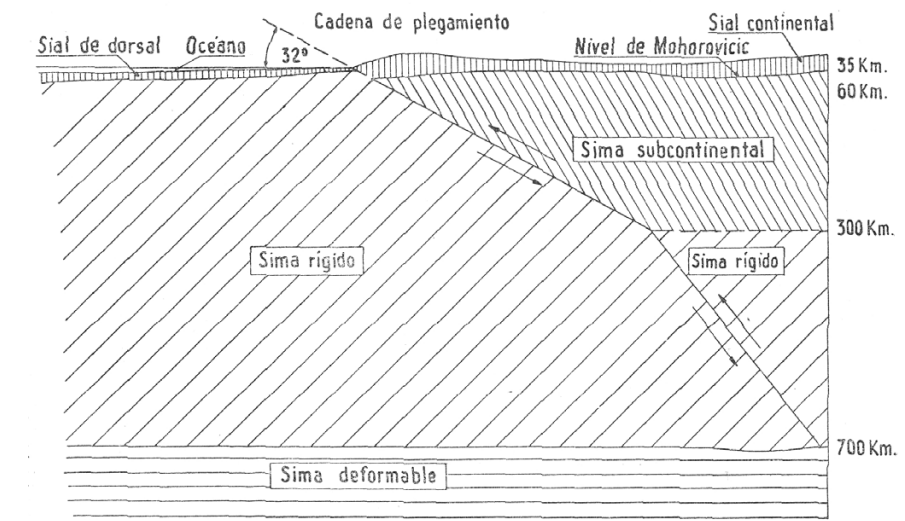


Figura 3: Propuesta de Groeber (1959), donde muestra un corte esquemático de los “subempujes” (*underthrusts*) y la arquitectura del margen determinada por datos sísmológicos de Benioff (1955).

de entre 10 y 14 gr/cm^3 , los modelos actuales del núcleo terrestre consideran para el mismo una densidad de $11,5 \text{ gr/cm}^3$ (McDonough 2003). Este dato respalda los cálculos realizados por Groeber en su obra “*La dilatación de la Tierra*”.

CONSIDERACIONES FINALES

Por último se debe considerar que Pablo Groeber realiza un aporte más que interesante a la teoría de la Tierra en expansión. Si bien su trabajo no tuvo gran repercusión, cabe destacar su mentalidad abierta para incorporar, en un momento donde dominaba el concepto de continentes estáticos, el carácter móvil de los mismos. Gracias a esta virtud de aceptación de cambios en el paradigma, es que el autor resuelve con novedosas ideas acomodar bajo ese nuevo modelo la evolución tectónica de la Tierra con sus comportamientos y mecanismos. No solo sus ideas se encuentran parcialmente en vigencia, sino que el modelo de expansión de la Tierra permanece hoy como una alternativa científicamente válida (Maxlow 2001). Como ya se desarrolló anteriormente existen novedosas contribuciones con mediciones que corroboran un aumento en el radio terrestre (Gerashenko 1993, Shen *et al.* 2011, 2015). Du-

rante muchos años se plantearon como teorías opuestas para justificar la deriva continental a la expansión de la Tierra y a la tectónica de placas. La evidencia actual permite postular que las evidencias de expansión pueden convivir con la tectónica de placas. Será objeto de futuros estudios demostrar su importancia relativa y como ambas pueden coexistir en los procesos que modelan la estructura interna de la Tierra.

Es de destacar finalmente que este ensayo lo escribe Groeber en 1959, a los 74 años de edad, afectado por una seria enfermedad que le impidió completar las citas bibliográficas de su trabajo, como es documentado por el editor en el pie de página (Groeber 1959, pág. 35). No obstante, la vigorosa expresión de sus ideas, y la solidez de sus razonamientos, apoyados en un notable dominio de la fundamentación matemática, permiten vislumbrar una mente brillante y un dominio de la literatura geológica extraordinarios para su tiempo. Sus propuestas han influenciado a varias generaciones en el desarrollo de diferentes hipótesis sobre la evolución geodinámica de nuestro territorio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento por la revisión crítica del ma-

nuscrito a los doctores Mario Giménez y Patricia Alvarado de la Universidad Nacional de San Juan y dejar constancia que el presente es la contribución R-216 del Instituto de Estudios Andino Don Pablo Groeber (Universidad de Buenos Aires-CONICET).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Ampferer, O. 1906. Über das Bewegungsbild von Faltengebirgen. *Jahrbuch Geologischen Reichsanstalt* 56: 539-622.
- Bacon, F. 1620. *Novum Organum*. Open Court Publishing Company, Chicago and LaSalle, Illinois, 194 p., Traducido y editado por Urbach, P. y Gibson, J., 1994.
- Benioff, H. 1955. Seismic evidence for crustal structure and tectonic activity. *Geological Society of America, Special Paper* 62: 61-74.
- Blanco, S.A.A., Vilas, J.F. y Valencio, D.A. 1980. The expansion of the Earth on basis of paleomagnetic data for the Gondwana. 26° *Congrès Géologique International, Résumés* 2: 713.
- Blinov, V.F. 1987. On continental drift and Earth extension on the basis of instrumental measurements. *Pacific Geology* 5: 94-101.
- Bogolepow, M. 1930. Die Dehnung der Lithosphäre. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 82: 206-228.
- Bull, A.J. 1921. A hypothesis of mountain building. *Geological Magazine* 58(8): 364-367.
- Bullen, K.E. 1940. The problem of the Earth's density variation. *Bulletin of the Seismological Society of America* 30(3): 235-250.
- Carey, S.W. 1975. The Expanding Earth – an Assay Review. *Earth Science Reviews* 11: 105-143.
- Carey, S.W. 1976. *The Expanding Earth*. Elsevier, 488 p., Amsterdam.
- Chudinov, Y.V. 1998. Global eduction tectonics of the expanding Earth. VSP BV, 201 p., The Netherlands.
- Creer, K.M. 1965 a. Palaeomagnetic data from the Gondwanic continents. En Blackett, P.M.S., Bullard, E. y Runcorn, S.K. (eds.) *A Symposium on Continental Drift*. *Philosophical Transactions Royal Society of London* 258: 27-90.
- Creer, K.M. 1965 b. An expanding Earth? *Nature* 205: 539-544.
- Dearnley, R. 1965. Orogeny, fold-belts, and expansion of the Earth. *Nature* 206: 1284-1290.
- Egyed, L. 1956. Determination of changes in the dimensions of the Earth from palaeogeographical data. *Nature* 173: 534.
- Gerasimenko, M.D. 1993. Modelling of the change of the Earth dimensions and deformations from space tracking data. *Centre de Recherche Mathématiques, Proceedings* 93: 6-11.
- Gilluly, J. 1955. Geologic contrasts between continents and ocean basins. En Poldervaart, A. (ed.) *Crust of the Earth - A Symposium*, Geological Society of America, *Special Paper* 62: 7-18.
- Groeber, P. 1927. Ensayo sobre tectónica teórica y provincias magnéticas. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias* 30: 177-231, Córdoba.
- Groeber, P. 1959. La dilatación de la Tierra. *Boletín de Informaciones Petroleras (Segunda Época)* 311: 101-116 y 312: 181-201, Buenos Aires.
- Gutenberg, B. 1951. *Internal constitution of the earth (Vol. 7)*. Dover Publications Inc., Mineola, 150 p., New York.
- Helmert, F.R. 1884. *Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie* 2, Leipzig Teubner.
- Hilgenberg, O.C. 1933. *Vom Wachsen der Erde*. Gießmann and Bartsch, 56 p., Berlin-Pankow.
- Hilgenberg, O.C. 1965. Die paläogeographie der expandieren der Erde vom Karbon bis zum Tertiär nach paläomagnetischen Messungen. *Geologische Rundschau* 55: 878-924.
- Holmes, A. 1933. The thermal history of the earth. *Journal Washington Academy of Sciences* 23: 169-195.
- Holmes, A. 1945. *Principles of Physical Geology*. Thomas Nelson, London (American Printing, Ronald Press), 532 p., New York.
- Holmes, A. 1953. The South Atlantic: land bridges or continental drift? *Nature* 171: 669-671.
- Hurrell, S. 2011. *Dinosaurs and the Expanding Earth*. One off Publishing, 218 p.
- Isacks, B., Oliver, J. y Sykes, L.R. 1968. Seismology and the new global tectonics. *Journal of Geophysical Research* 73(18): 5855-5899.
- Jeffreys, H. y Bullen, K.E. 1958. *Seismological tables*. British Association for the Advancement of Science, 50 p., London.
- Jephcoat, A. y Olson, P. 1987. Is the inner core of the Earth pure iron? *Nature* 325: 332-335.
- Kuhn, T.S. 1970. *The structure of scientific revolutions*. *International Encyclopedia of Unified Science* 2: 2.
- Kremp, G.O.W. 1992. Earth expansion theory versus static Earth assumption. En Chatterjee, S. y Horton, N. (eds.) *New concepts in global tectonics*: 297-307.
- Labrosse, S., Poirier, J.P. y Le Mouél, J.L. 2001. The age of the inner core. *Earth and Planetary Science Letters* 190(3): 111-123.
- Lazarte, J.E. 2008. Pablo Groeber y las posibilidades de una tectónica teórica: explicaciones orogénicas para un refinamiento de la teoría de los geosinclinales. *Serie Correlación Geológica* 24: 195-206.
- Lehmann, I. 1936. *Publications du Bureau Central Séismologique International*. A14: 87-115.
- Lyell, C. 1833. *Principles of Geology*. John Murray, 398 p., London.
- Mantovani, R. 1924. Les points de contact entre la théorie de la dilatation planétaire et la théorie de la dérive des continents de Wegener. *Compte-Rendu Sommaire de Séance de la Société Géologique de France* 16: 167-168.
- Maxlow, J. 2001. *Quantification of an Archaean to Recent Earth Expansion Process Using Global Geological and Geophysical Data Sets*. PhD thesis, Curtin University of Technology, Perth, Western Australia, 438 p.
- McDonough, W.F. 2003. *Compositional model for the Earth's core*. *Treatise on geochemistry* 2, 568 p.
- Mckenzie, O.P. y Parker, R.L. 1967. The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature* 216: 1277-1280.
- Owen, H.G. 1981. Constant dimensions or an expanding Earth. En Cocks, L.R.M. (ed.) *The evolving Earth*. British Museum (Natural History) and Cambridge University Press, 179-192, London and Cambridge.
- Roeder, D.H. 1973. Subduction and orogeny. *Journal of Geophysical Research* 78(23): 5005-5024.
- Runcorn, S.K. 1955. Palaeomagnetism of sediments from the Colorado Plateau. *Nature* 176: 505.
- Runcorn, S.K. 1956. Paleomagnetic survey in Arizona and Utah: preliminary results. *Bulletin of the Geological Society of America* 67: 301-316.
- Scalera, G. 2003. *The expanding Earth: a sound idea for the new millennium. Why expanding Earth? A book in honour of O. C. Hilgen-*

- berg. INGV, 181-232, Roma.
- Scalera, G. 2009. Roberto Mantovani (1854-1933) and his ideas on the expanding Earth, as revealed by his correspondence and manuscripts. *Annals of Geophysics* 52(6): 615-649.
- Scalera, G. 2015. The sea level enigmatic rising: New perspectives from an expanding globe. *Annals of Geophysics* (en prensa).
- Schubert, G., Turcotte, D.L. y Olsen, P. 2001. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. Cambridge University Press, 956 p., Cambridge.
- Shen, W., Sun, R., Chen, W., Zhang, Z., Li, J., Han, J. y Ding, H. 2011. The expanding Earth at present: evidence from temporal gravity field and space-geodetic data. *Annals of Geophysics* 54(4): 436-453.
- Shen, W., Shen, Z., Sun, R. y Barkin, Y. 2015. Evidences of the expanding Earth from space-geodetic data over solid land and sea level rise in recent two decades. *Geodesy and Geodynamics* 16(4): 248-252.
- Shields, O. 1979. Evidence for initial opening of the Pacific Ocean in the Jurassic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 26: 181-220.
- Suess, E. 1904-1909. *The Face of the Earth*. Traducido por Sollas, H.B.C. vol. 1, 1904; vol. 2, 1905; vol. 3, 1906; vol. 4, 1909; vol. 5, 1920. Clarendon Press, Oxford. Publicado en alemán como *Das Antlitz der Erde*. vol. Ia, 1883; vol. Ib, 1885; vol. II, 1888; vol. 3/1, 1901; vol. 3/2, 1904, Tempsky, Prague.
- Valencio, D.A. 1980. *El magnetismo de las rocas*. Editorial Universitaria de Buenos Aires, Temas, 351 p., Buenos Aires.
- Valencio, D.A. y Vilas, J.F. 1969. Age of the separation of South America and Africa. *Nature* 223: 1353-1354.
- Van Andel, S.I. y Hospers, J. 1966. Systematic errors in the palaeomagnetic inclination of sedimentary rocks. *Nature* 212: 891-893.
- Vine, F.J. y Hess, H.H. 1970. *Sea-floor spreading*. En Maxwell, A.E., Bullard, E.C., Goldberg, E. y Worzel, J.L. (eds.) *The Sea*, vol. IV, Princeton University: New York, Interscience Publishers, 664 p.
- Vine, F.J. y Matthews, D.H. 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature* 199 (4897): 947-949.
- Wegener, A. 1912. Die Entstehung der Kontinente. *Geologische Rundschau* 3: 276-292.
- Wilson, J.T. 1965. A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature* 207: 343-347.
- Wood, B.J. 1993. Carbon in the core. *Earth and Planetary Science Letters* 117(3): 593-607.

Recibido: 11 de octubre, 2016

Aceptado: 5 de diciembre, 2016