

LA ARQUITECTURA DE LA TIERRA.

El entendimiento de la estructura del planeta ha evolucionado más en los últimos 20 años que en toda la historia de la ciencia.

Cuando, con Charles Darwin, terminó la era de los grandes científicos "generales", las ciencias de la Tierra empezaron a estudiarse desde un punto de vista cada vez más especializado. Durante casi un siglo, distintos aspectos de nuestro planeta fueron analizados cada vez con mayor detalle. Pero de esta creciente especialización surgió una marcada falta de comunicación entre los científicos concentrados en las distintas ramas en que se dividió el estudio de la Tierra. Sin embargo, aún entonces, la mayoría de los especialistas estaban conscientes de la existencia de un grupo de problemas fundamentales, sobre los cuales no existía ningún tipo de respuesta que los satisficiera a todos. Algunos de estos problemas eran: ¿por qué el fondo rocoso de los océanos es más joven que el océano mismo?, ¿por qué las zonas sísmicas y volcánicas están concentradas a lo largo de estrechas bandas de gran longitud? ¿por qué los perfiles continentales de América del Sur y África, y los de América del Norte y Europa parecen ajustarse como las piezas de un rompecabezas?

Las ciencias de la Tierra hasta antes del decenio de los sesentas, no habían sido capaces de explicar consistentemente todas las observaciones anteriores. Curiosamente, en los dos últimos decenios se invirtió esa situación. Durante esos 20 años se sintetizó el conocimiento, hasta entonces disperso, en una teoría más o menos unificada sobre la naturaleza de la Tierra y sus movimientos. El decenio de los ochentas marca con su inicio, la formación de nuevas especialidades que, en general, tienen poco en común con las que existían antes de la aparición de los modelos unificados.

La teoría unificada sobre la naturaleza de los fenómenos geológicos es el resultado de cinco líneas de medidas y experimentos, independientes y más o menos contemporáneas. La primera es el resultado obtenido del mapeo del fondo de los océanos utilizando ecosondas. Estos aparatos permiten determinar la topografía del fondo marino, al registrar el tiempo que le toma a un pulso de sonido ir y regresar a un barco en la superficie, tras haberse reflejado en el fondo marino. Estos estudios confirmaron la existencia de largas cordilleras que se extienden por el fondo de los océanos.

La segunda línea fue resultado de la cuidadosa determinación de focos sísmicos, en su posición y su mecanismo, por medio de la red mundial de sísmómetros. Gran parte de esta red fue originalmente diseñada y construida para la detección y localización de explosiones nucleares. La tercera proviene de la medida del campo magnético terrestre sobre el fondo marino, utilizando magnetómetros de gran sensibilidad, principalmente los del tipo "compuerta de flujo" y posteriormente de precisión nuclear. Estos magnetómetros fueron capaces de distinguir pequeñas discrepancias o anomalías.

lías del campo geomagnético respecto a los valores esperados en una región dada si la Tierra fuera perfecta y homogénea. Un resultado sorprendente fue el descubrimiento de una serie de anomalías en forma de bandas magnéticas paralelas a las cordilleras oceánicas.

La cuarta línea se generó con el descubrimiento y cronología de las inversiones que ha experimentado el campo magnético terrestre en el pasado geológico. La mayoría de las rocas son capaces de "congelar" el campo magnético que se encontraba presente en el momento de su formación. Por ejemplo, una roca volcánica que se enfría en presencia de un campo magnético externo quedará ligeramente magnetizada, como si fuera un débil imán, en la dirección del campo externo cuando su temperatura bajó de cierto punto (temperatura de Curie). Cuando se analizaron rocas de muy distintas edades se encontró que muchas de ellas tenían una magnetización opuesta a la que actualmente presenta la Tierra. Estudiando las edades de esas rocas pudo observarse que, en forma consistente, todas las rocas de ciertas edades determinadas presentaban una magnetización invertida. Esto permitió sugerir a los científicos que el campo geomagnético se había invertido numerosas veces en el pasado geológico.

Finalmente, la quinta línea que contribuyó a la convergencia de ideas fue la del estudio de la distribución de los volcanes activos y su composición química. Aunque las erupciones volcánicas rara vez están directamente asociadas con temblores de gran magnitud, existe sin duda una alta correlación espacial entre las zonas volcánicas y aquellas donde abundan los temblores. También en forma consistente, las zonas marinas de sismicidad débil y somera, coinciden con un volcanismo relativamente pobre en óxidos de silicio y rico en óxidos de fierro y magnesio (rocas como el basalto por ejemplo), mientras que en zonas de gran sismicidad, tanto somera como profunda, domina el volcanismo rico en silicatos.

El que estas cinco líneas separadas de investigación, programadas y desarrolladas en forma independiente por diversos organismos - cuyas existencias eran en ocasiones mutuamente ignoradas -, se hayan conglomerado en una teoría unificada, marca sin duda, una de esas afortunadas situaciones en las que un factor casual genera conocimientos trascendentales a partir de información aparentemente inconexa.

Las grandes preguntas que agobian a los científicos de los decenios anteriores empezaron a tener respuesta. El problema del ajuste de la forma de los continentes que en algún momento se sugirió como una "coincidencia" perdió ese carácter cuando alrededor del año 1965 se encontró que si a los continentes se les "desplazaba" (en un modelo de computadora) sobre la superficie del globo se les podía "encajar" con un grado de ajuste que ninguna casualidad podría explicar. Esto revivió un grupo de teorías que desde principios de siglo se habían sugerido. Entre éstas destaca la "deriva continental", que un meteorólogo alemán, A. Wegener, propusiera en 1912. En ella se presentaba a los continentes como balsas moviéndose en un "océano" de roca "fluida". Esta idea encontró gran oposición cuan

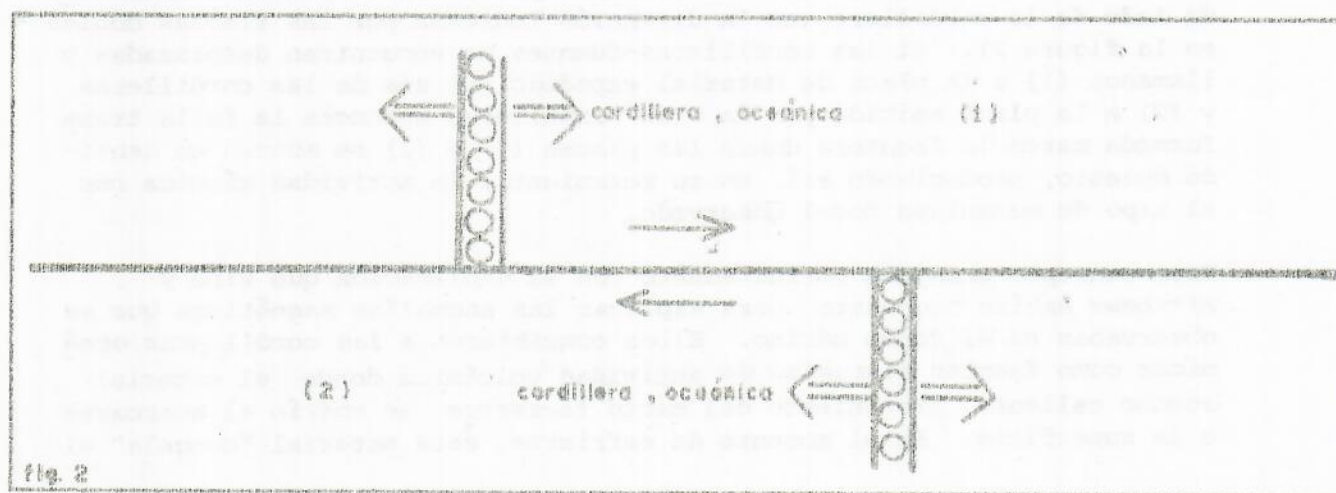
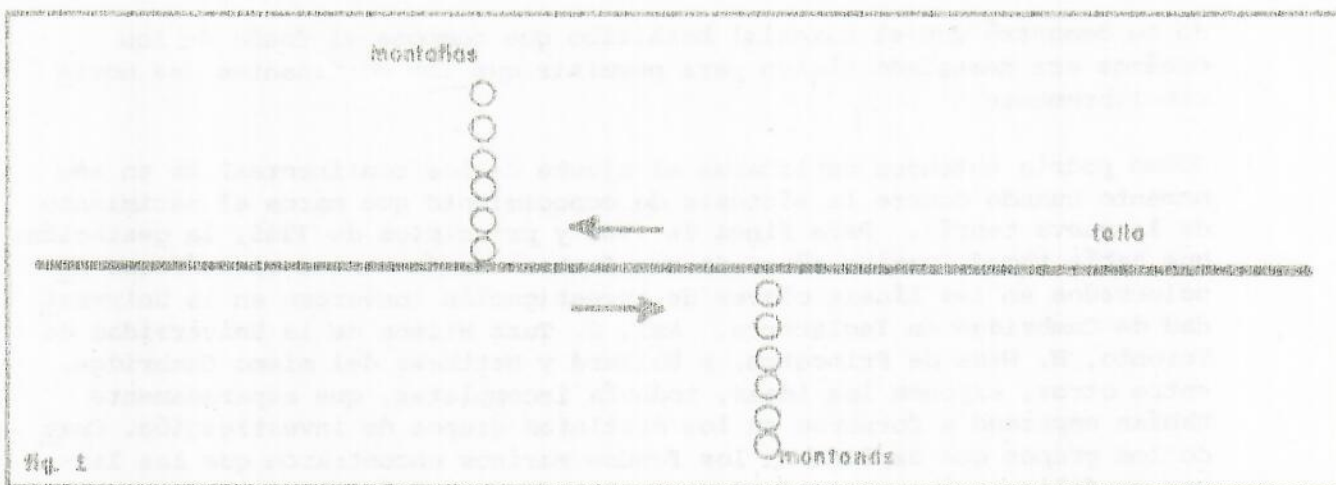
do se demostró que el material basáltico que compone el fondo de los océanos era demasiado rígido para permitir que los continentes se movieran libremente.

¿Cómo podría entonces explicarse el ajuste de los continentes? Es en ese momento cuando ocurre la síntesis de conocimiento que marca el nacimiento de la nueva teoría. Para fines de 1964 y principios de 1965, la gestación, que había tomado varios años, da sus frutos cuando varios científicos involucrados en las líneas claves de investigación convergen en la Universidad de Cambridge en Inglaterra. Así, J. Tuzo Wilson de la Universidad de Toronto, H. Hess de Princeton, y Bullard y Matthews del mismo Cambridge, entre otros, exponen las ideas, todavía incompletas, que separadamente habían empezado a formarse en los distintos grupos de investigación. Cuando los grupos que exploraban los fondos marinos encontraron que las largas cordilleras que se extienden por los fondos oceánicos no eran en realidad líneas continuas, sino que se encontraban "quebradas" en numerosos puntos, los geólogos de esa época dieron la explicación estándar para el caso de que algún rasgo geológico lineal característico presente una discontinuidad: Por ejemplo, si una cadena montañosa se encuentra quebrada. Los geólogos suponen que la cadena ha sido desplazada respecto a la otra por una falla del terreno con un movimiento como el indicado en la figura 1.

Sin embargo, en las cordilleras de los fondos oceánicos, aunque la situación es geoméricamente similar, los mecanismos focales de los temblores (Ver J.M. Espíndola, Naturaleza, abril 1979), que ocurrían a lo largo de la falla, sugerían para tal movimiento un sentido exactamente opuesto como lo indica esta figura:

Esta paradoja fue resuelta por Wilson con la introducción de un concepto simple y elegante: la falla transformada. En ésta, a diferencia de la falla estándar, los trozos de cordillera no se separan más entre ellos a medida que transcurre el tiempo, sino que se mantienen fijos; la actividad sísmica es entonces producida porque la cordillera misma es fuente de material rocoso que, como una gruesa capa, se va extendiendo hacia cada lado de la cordillera (en la dirección indicada por las flechas dobles en la figura 2). Si las cordilleras-fuentes se encuentran desplazadas y llamamos (1) a la placa de material expedido por una de las cordilleras y (2) a la placa emitida por la otra cordillera, entonces la falla transformada marca la frontera donde las placas (1) y (2) se mueven en sentido opuesto, produciendo así, en su rozamiento, la actividad sísmica con el tipo de mecanismo focal observado.

Este concepto encajaba perfectamente con la explicación que Vine y Matthews habían propuesto para explicar las anomalías magnéticas que se observaban en el fondo marino. Ellos concibieron a las cordilleras oceánicas como fuentes alargadas de actividad volcánica donde el material rocoso caliente, proveniente del manto terrestre, se enfría al acercarse a la superficie. En el momento de enfriarse, este material "congela" el



campo magnético presente en esa época y así va generando un patrón de bandas magnéticas, según cambia la polaridad del campo geomagnético. Fue común en ese entonces hacer la analogía de la placa magnetizada con la de una cinta magnética en una grabadora sobre la que se imprimen señales con polaridad directa e invertida.

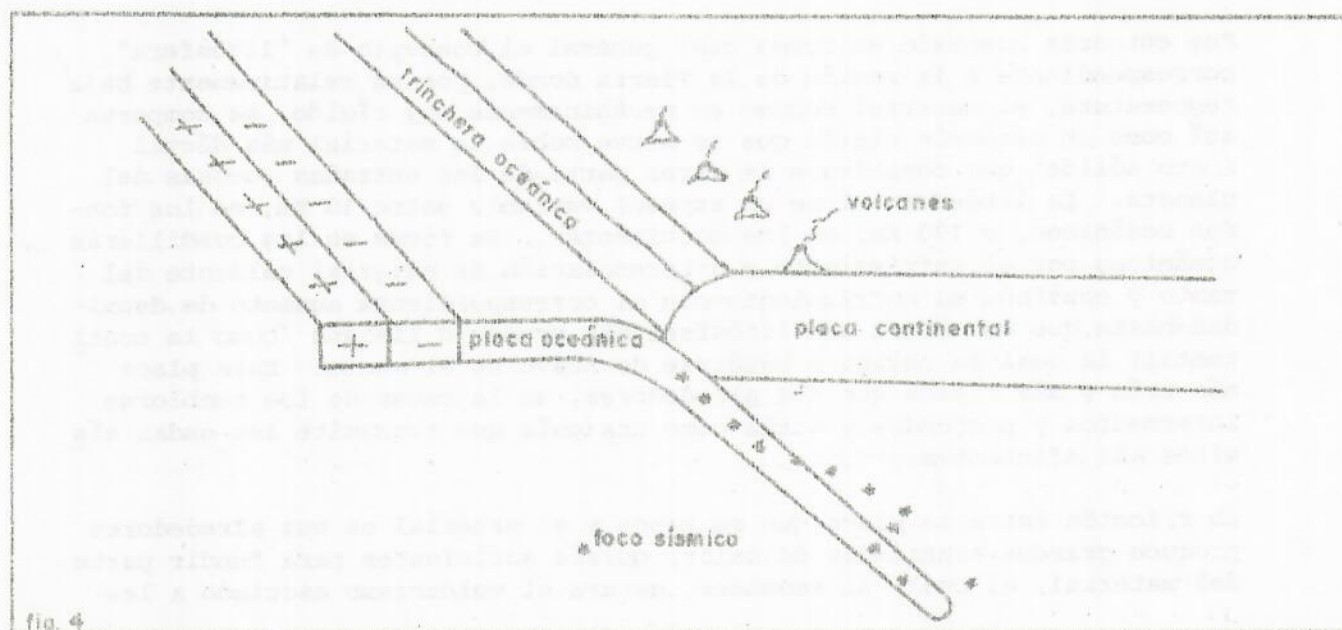
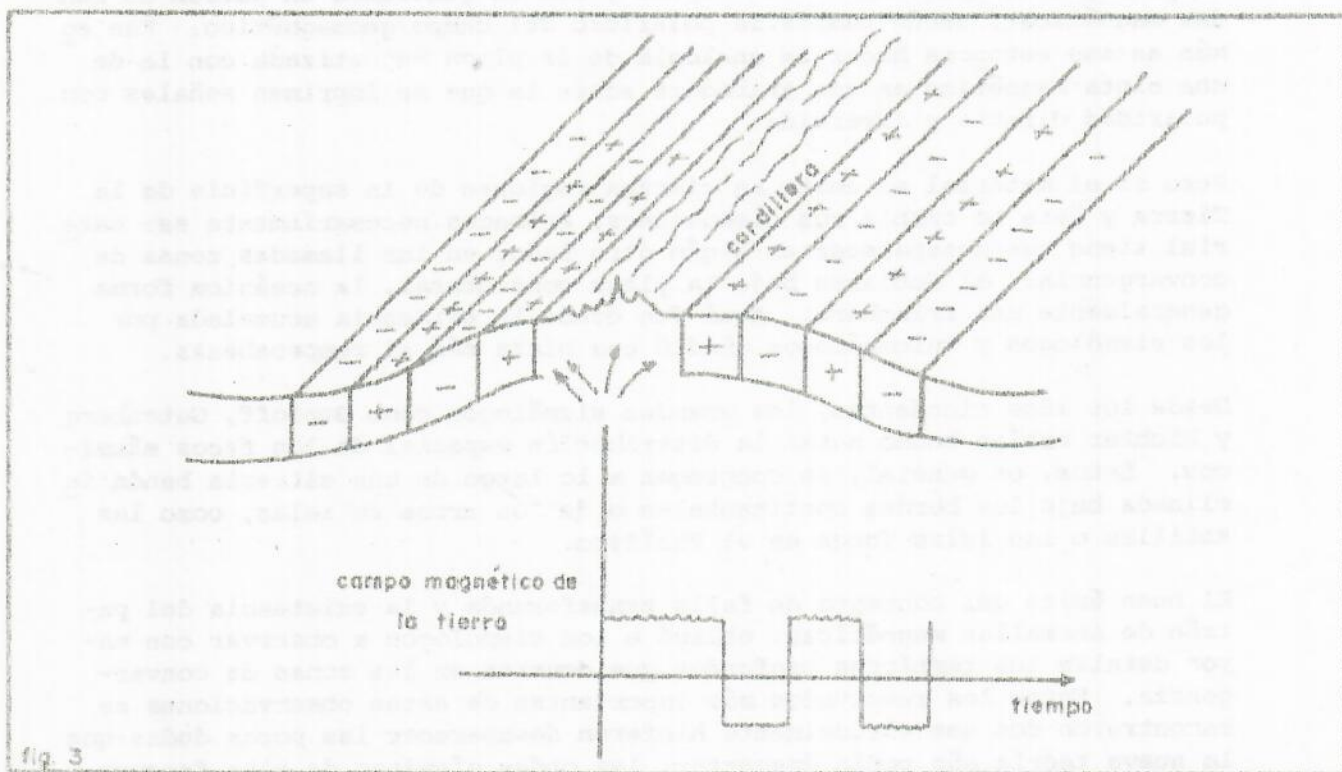
Pero si el material se emite en ciertas regiones de la superficie de la Tierra y ésta no cambia sus dimensiones, entonces necesariamente ese material tiene que desaparecer en algún otro lado, en las llamadas zonas de convergencia. Al doblarse bajo la placa continental, la oceánica forma generalmente una trinchera. Aquí fue donde la evidencia acumulada por los sismólogos y vulcanólogos añadió una pieza más al rompecabezas.

Desde los años cincuentas, los grandes sismólogos como Benioff, Gutenberg y Richter habían hecho notar la distribución espacial de los focos sísmicos. Estos, en general, se congregan a lo largo de una estrecha banda inclinada bajo los bordes continentales o de los arcos de islas, como las Antillas o las islas Tonga en el Pacífico.

El buen éxito del concepto de falla transformada y la existencia del patrón de anomalías magnéticas, obligó a los sismólogos a observar con mayor detalle los temblores profundos que ocurren en las zonas de convergencia. Entre los resultados más importantes de estas observaciones se encontraron dos que virtualmente hicieron desaparecer las pocas dudas que la nueva teoría aún podía despertar: las ondas sísmicas de alta frecuencia viajan más rápida y eficientemente a lo largo de la zona sísmica que perpendicularmente a ella y los mecanismos focales de los temblores que ocurren en la zona de contacto entre las placas oceánicas y continentales, tienen un mecanismo focal característico de zonas donde existen esfuerzos compresionales entre dos cuerpos.

Fue entonces aceptado en forma casi general el concepto de "litósfera", correspondiente a la región de la Tierra donde, por su relativamente baja temperatura, el material rocoso es mecánicamente muy rígido, se comporta así como un cascarón rígido que se mueve sobre un material más dúctil (pero sólido) que constituye la mayor parte de las entrañas rocosas del planeta. La litósfera tiene un espesor variable entre 10 Km, en los fondos oceánicos, y 100 Km, en los continentes. Se forma en las cordilleras oceánicas por el enfriamiento y diferenciación de material caliente del manto y continúa su enfriamiento con el correspondiente aumento de densidad-hasta que encuentra una litósfera más gruesa o liviana (como la continental) la cual la obliga a hundirse de nuevo en el manto. Esta placa más fría y más rígida que sus alrededores, es la causa de los temblores intermedios y profundos y actúa como una guía que transmite las ondas sísmicas más eficientemente.

La fricción entre la placa que se hunde y el material en sus alrededores produce grandes cantidades de calor, quizás suficientes para fundir parte del material, el cual, al ascender, genera el vulcanismo asociado a las



zonas de convergencia.

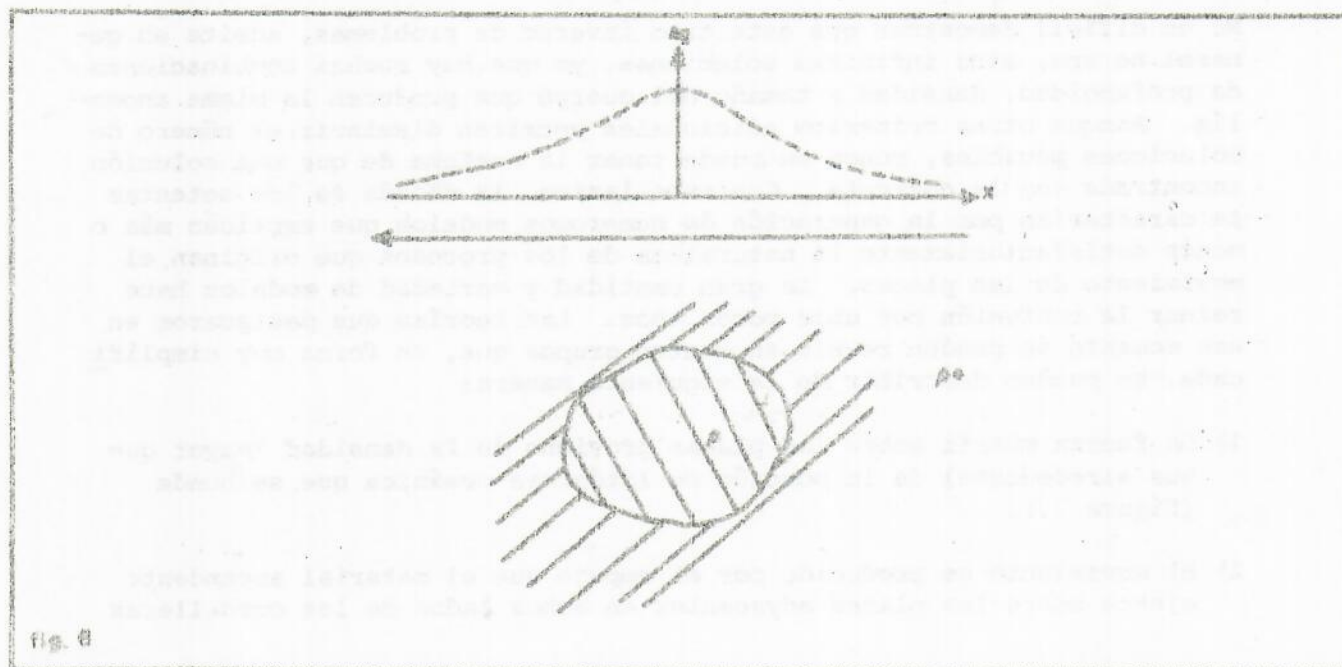
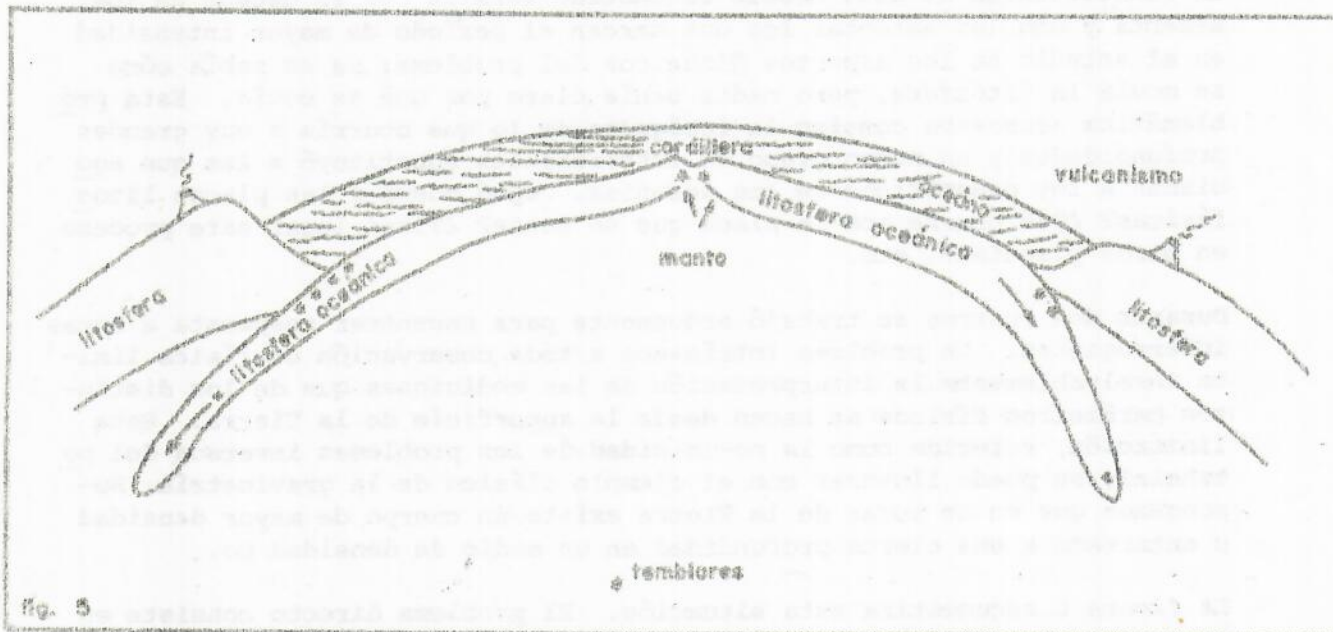
La consolidación de este modelo cinemático termina con la década de los sesenta y son los setentas los que marcan el período de mayor intensidad en el estudio de los aspectos dinámicos del problema; ya se sabía cómo se movía la litósfera, pero nadie tenía claro por qué se movía. Esta problemática acarrea consigo la incógnita de lo que ocurría a muy grandes profundidades y un nuevo grupo de interrogantes substituyó a las que agobiaban a los científicos de los sesentas. ¿Qué mueve a las placas litosféricas? ¿Qué ocurre con la placa que se hunde? ¿Tiene lugar este proceso en otros planetas?, etc.

Durante dos lustros se trabajó arduamente para encontrar respuesta a estas interrogantes. Un problema intrínseco a toda observación geofísica limita insalvablemente la interpretación de las mediciones que de los distintos parámetros físicos se hacen desde la superficie de la Tierra. Esta limitación, referida como la no-unicidad de los problemas inversos del potencial, se puede ilustrar con el ejemplo clásico de la gravimetría: Supongamos que en un lugar de la Tierra existe un cuerpo de mayor densidad que el enterrado a una cierta profundidad en un medio de densidad ρ_0 .

La figura 6 esquematiza esta situación. El problema directo consiste en encontrar el valor de la anomalía del campo gravitatorio de la Tierra, anomalía producida por el exceso de masa del cuerpo (línea punteada en la figura). Si la geometría y las densidades están bien especificadas, este problema directo tiene solución única. El problema inverso (característico de la geofísica) consiste en que, conocido el valor de la anomalía gravimétrica en la superficie, hay que encontrar la geometría y densidad del cuerpo que la produce.

No es difícil demostrar que este tipo inverso de problemas, admite en general no una, sino infinitas soluciones, ya que hay muchas combinaciones de profundidad, densidad y tamaño del cuerpo que producen la misma anomalía. Aunque otros criterios adicionales permiten disminuir el número de soluciones posibles, nunca se puede tener la certeza de que una solución encontrada sea la correcta. Con este lastre, la década de los setentas se caracteriza por la generación de numerosos modelos que explican más o menos satisfactoriamente la naturaleza de los procesos que originan el movimiento de las placas. La gran cantidad y variedad de modelos hace reinar la confusión por unos pocos años. Las teorías que destacaron en ese momento se pueden reunir en cuatro grupos que, en forma muy simplificada, se pueden describir de la siguiente manera:

- 1) La fuerza motriz sobre las placas proviene de la densidad (mayor que sus alrededores) de la porción de litósfera oceánica que se hunde (figura 7.).
- 2) El movimiento es producido por el empuje que el material ascendente ejerce sobre las placas adyacentes en ambos lados de las cordilleras



oceánicas (figura 8).

- 3.- El movimiento es producido por el deslizamiento "cuesta abajo" de las placas sobre el manto, ya que las cordilleras son más "altas" que la trinchera (figura 9).
- 4.- La causa del movimiento de las placas reside en el manto que, al moverse, arrastra a las placas con él (figura 10).

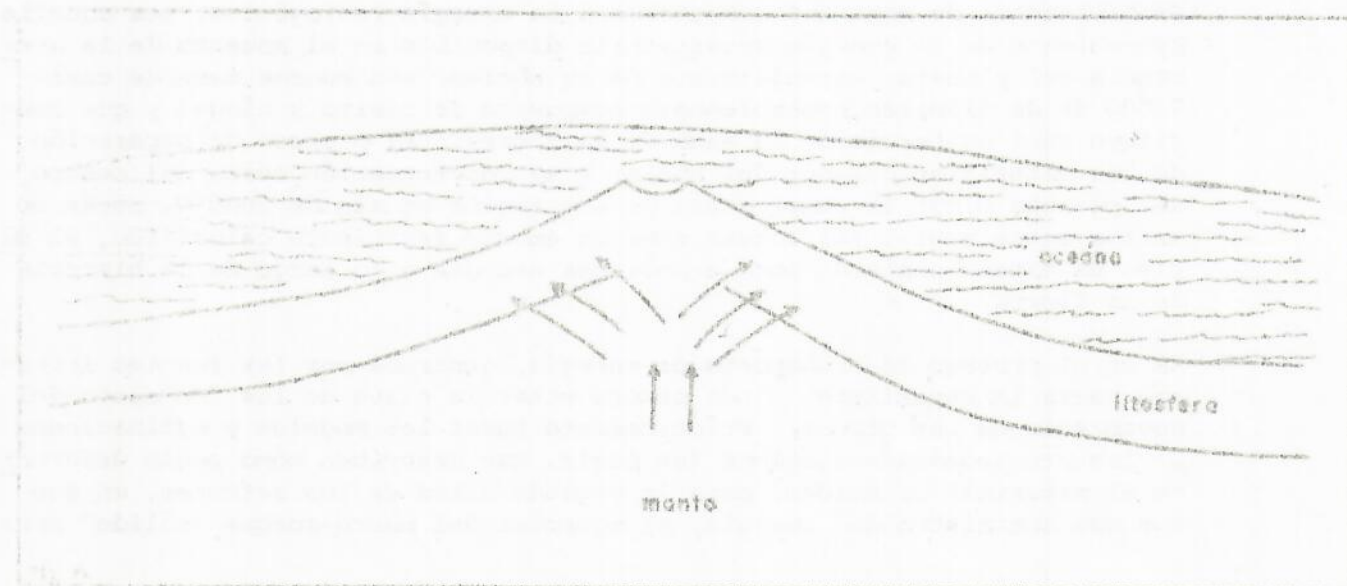
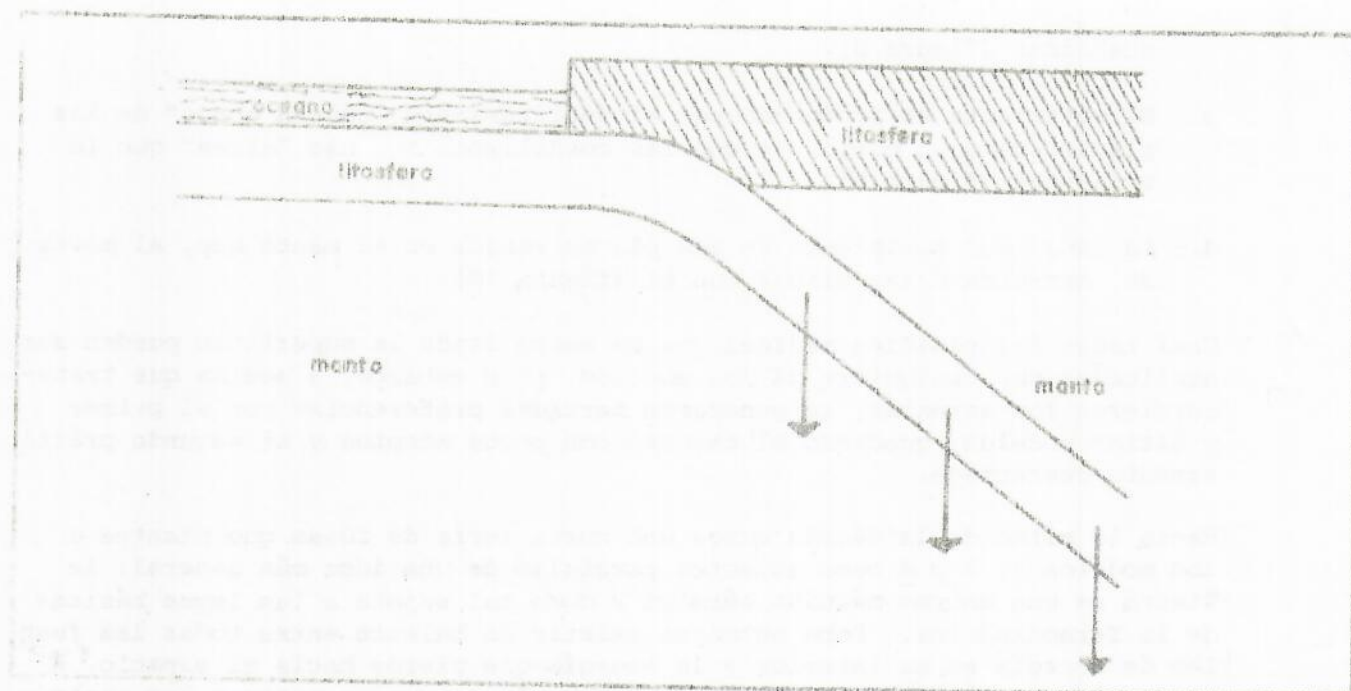
Casi todas las posibles medidas que se hacen desde la superficie pueden ser explicadas por cualquiera de los modelos. Sin embargo, a medida que transcurrieron los setentas, se generaron marcadas preferencias por el primer y último modelos, quedando el tercero con pocos adeptos y el segundo prácticamente descartado.

Hacia la mitad de la década surge una nueva serie de ideas que plantea a los modelos 1, 3 y 4 como aspectos parciales de una idea más general: la Tierra es una enorme máquina térmica y como tal sujeta a las leyes básicas de la Termodinámica. Debe entonces existir un balance entre todas las fuentes de energía en su interior y la energía que pierde hacia el espacio. A partir de argumentos de carácter muy general, se pueden estimar las contribuciones de las principales fuentes de energía. Ellas son:

La energía proveniente de la lenta desintegración de los isótopos naturales de los elementos radioactivos de larga vida más abundantes: Uranio, Torio y Potasio. Aunque las concentraciones de estos isótopos en las rocas son muy pequeñas (apenas de una parte por millón), su contribución es enorme cuando se considera todo el volumen de la Tierra. La producción total de energía originada por estas desintegraciones se estima en unos 10^{28} ergs/año (unos 40 mil millones de kilowatts). En última instancia, esta energía se pierde hacia el espacio en forma de radiación.

Probablemente de magnitud comparable a la energía radiogénica, sea aquella proveniente de la energía gravitatoria disponible en el momento de la acrecencia del planeta, especialmente de su núcleo, esa enorme masa de casi 7,000 Km de diámetro probablemente compuesta de fierro y níquel y que constituye casi un tercio de la masa de la Tierra. El proceso de separación de los materiales pesados del núcleo y su concentración cerca del centro del planeta elevó la temperatura de esa región en más de 2000°C, según se estima actualmente. Al actuar como un enorme recipiente calorífico, el núcleo ha estado cediendo poco a poco esa energía a lo largo de la historia de la Tierra.

Es en el proceso de transporte de energía, generada por las fuentes internas hacia la superficie, donde parece estar la clave de los fenómenos del movimiento de las placas. Prácticamente todos los modelos y estimaciones de las propiedades reológicas (es decir, que describen cómo puede deformarse el material) coinciden, para la segunda mitad de los setentas, en que con ese suministro de energía, el material del manto-aunque "sólido" para

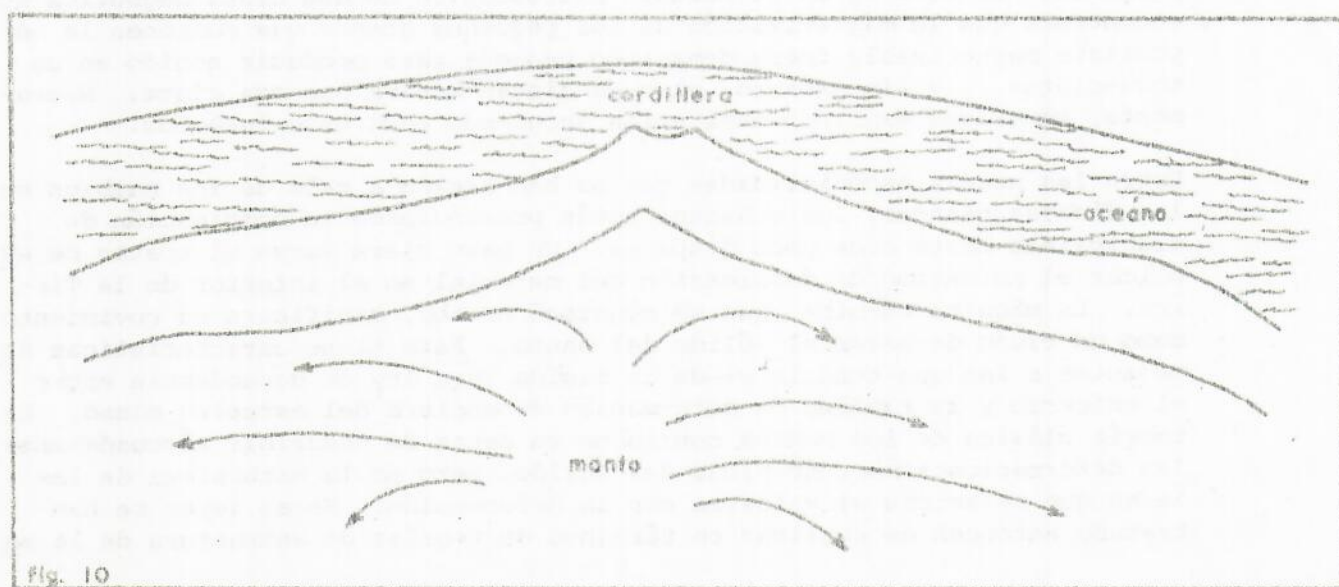
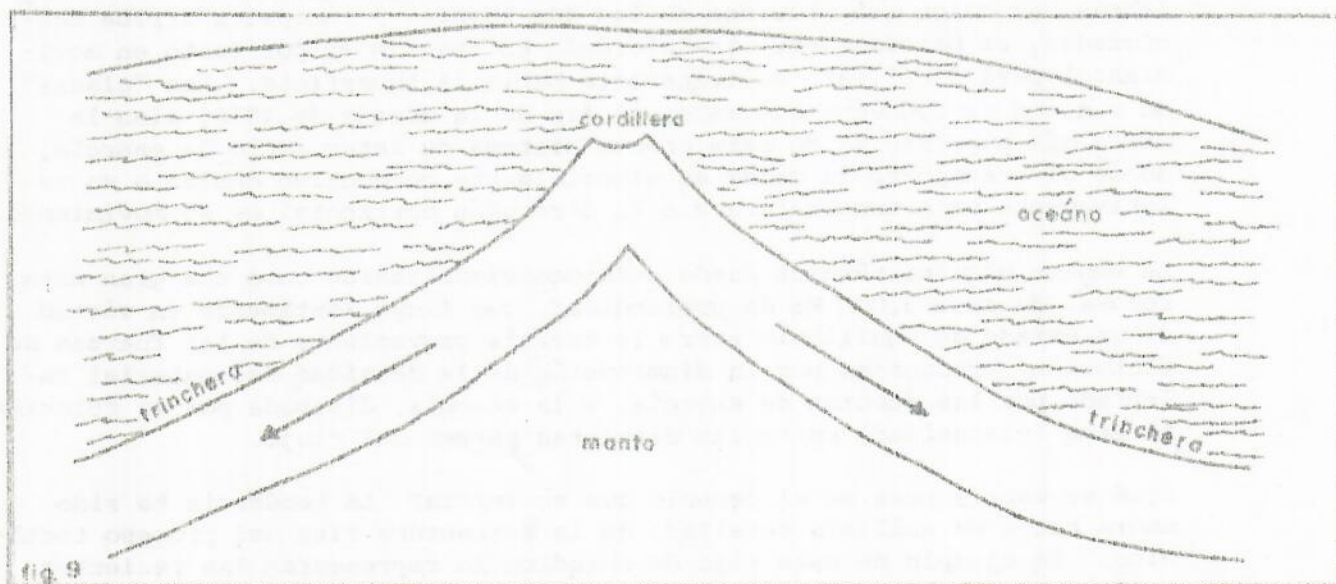


nuestra percepción-es capaz, en tiempo de escala geológica, de deformarse en forma parecida a como lo haría un fluido muy viscoso. En otras palabras, el calor que proviene de las dos fuentes principales arriba mencionadas, es parcialmente transformado en trabajo (y por tanto en movimiento) para facilitar su transporte hacia la superficie. Las "placas" no son, en el concepto que marca el fin de la década de 1970, sino la parte más superficial de este enorme sistema de intercambio de energía, donde el transporte de calor es esencialmente conductivo debido a su relativamente baja temperatura y a la dirección horizontal de su movimiento.

La enorme máquina térmica puede entonces visualizarse como una gran masa rocosa, de casi 3,000 Km de profundidad, que fluye lentamente en virtud de un estado de equilibrio entre la energía proveniente de las fuerzas de flotación, producidas por la disminución de la densidad del material calentado por las fuentes de energía, y la energía, disipada por la fricción interna (viscosidad) entre las distintas partes del flujo.

¿Qué se espera pues en el decenio que se inicia? La tendencia ha sido ahora hacia un análisis detallado de la estructura fina del proceso tectónico. Un ejemplo de este tipo de estudios lo representan las recientes exploraciones del barco oceanográfico Glomar Challenger cerca de la cordillera dorsal del Atlántico. Con la tecnología actual se ha podido perforar y obtener muestras del fondo marino a considerables profundidades bajo el fondo del océano. Ese y otros estudios han revelado la complejidad de un proceso que, hasta hace sólo unos pocos años, se representaba por modelos de relativa simplicidad. Como ilustración pueden citarse los resultados de la magnetización medida en las rocas extraídas de los pozos perforados en el fondo marino. Para sorpresa de los científicos a bordo del barco, la intensidad de magnetización observada era claramente insuficiente para explicar la intensidad de la anomalía magnética observada desde la superficie. Es como si en el estudio microscópico de una cinta magnética se encontrara que la magnetización de los pequeños granos que componen la superficie magnetizable fuera demasiado pequeña para producir sonido en un toca-cintas... y sin embargo, el toca-cintas sonara con esa cinta. Nuevamente, numerosas explicaciones están surgiendo para este fenómeno.

Entre las nuevas especialidades que se han creado a raíz de los cambios en las décadas pasadas, los ochentas están presenciando la combinación de disciplinas hasta hace poco dispares. Un caso claro surge al tratar de explicar el mecanismo de deformación del material en el interior de la Tierra. La máquina térmica, que se mencionó arriba, manifiesta su movimiento como un flujo de material sólido del manto. Este tiene características semejantes a las que tendría el de un fluido cuya ley de dependencia entre el esfuerzo y la rapidez de deformación dependiera del esfuerzo mismo. La teoría clásica de los medios continuos es capaz de describir adecuadamente las deformaciones macroscópicas del sólido, pero no la naturaleza de las leyes que relaciona el esfuerzo con la deformación. Estas leyes se han tratado entonces de explicar en términos de teorías de estructura de la ma



teria, principalmente mediante conceptos como las dislocaciones en cristales o la difusión de vacancias entre las fronteras de los granos cristalinos que componen las rocas. Sin embargo, hasta el momento estas teorías semiclásicas no han tenido éxito en su intento de reproducir las leyes de deformación observadas, especialmente para deformaciones grandes. Parece ser que sólo una curiosa mezcla de mecánica de medios continuos con teoría cuántica del estado sólido podría obtener las respuestas buscadas.

Podemos concluir asegurando que la situación de las ciencias de la Tierra, en esta época de grandes cambios, no es muy diferente a la de cualquier otra rama de la ciencia: mientras más profundizamos en alguno de los procesos de la naturaleza, más nos damos cuenta de su extrema complejidad y mayores son los recursos teóricos y experimentales requeridos para su ulterior comprensión. Pero ésta es la base del avance científico.

* Tomado de la Revista Naturaleza (Febrero-80).

Artículo original escrito por el Dr. Servando de la Cruz, investigador del Instituto de Geofísica de la UNAM.