

De Pangea, los Andes y Trincheras

Mónica Itzuri Delgado Carrillo*

Nava, Alejandro. *La inquieta superficie terrestre*. México: (SEP; FCE; CONACYT), 1993. (La Ciencia para Todos; 113).

Se preguntarán qué tienen que ver Pangea, los Alpes y las trincheras, qué ha hecho que estén juntos en el título de un ensayo científico. Tal vez a alguien se le ocurra otra cosa, pero para mí, el factor que los relaciona es una teoría llamada Tectónica de Placas (que denotaré por TP) y que es justamente el tema de este ensayo.

La TP da cuenta de un movimiento de la superficie terrestre, uno que rara vez notamos y que es maravilloso. La ciencia que ha visto nacer la teoría de la TP es la geología. Recuerdo que en mi primer acercamiento a la geología, un amigo, que es geólogo, me dijo que “las rocas cuentan la historia” y, viendo las rocas que forman un cerro de la ciudad de Guanajuato, empezó a contarme un montón de cosas increíbles, como que esas rocas se habían formado en el fondo del mar. Pues bien, han sido las rocas en toda su diversidad las que han llevado a los geólogos a resolver, poco a poco, el gran enigma de la historia de la corteza terrestre.

ANTECEDENTES DE UNA GRAN IDEA

El conocimiento nace de las incógnitas y la tectónica de placas no es la excepción. Los geólogos comenzaron por preguntarse qué extraña y poderosísima fuerza provoca la forma del relieve y los sismos, por qué las costas de África y América del Sur embonan como piezas de rompecabezas, por qué se han encontrado restos de seres vivos característicos de zonas tropicales en el Antártico, entre otras interrogantes. Tuvieron que hacer uso de la creatividad que caracteriza a los buenos científicos para que se les ocurrieran las originales ideas que, con el tiempo, conformarían la TP.

Hubo dos grandes teorías que precedieron la TP y, en cierta forma, son parte de ella. Si bien, es de justicia señalar que hay muchísimos más investigadores detrás, cada uno contribuyendo con su granito de arena, aunque no con una teoría como tal.

Alfred Wegener propuso en 1912 la teoría de la Deriva Continental¹, según la cual los continentes están en movimiento. Debido a este movimiento, la posición de los continentes ha variado a lo largo de las eras geológicas, de forma que hace 250 a 200 millones de años (ma), había una sola porción de tierra a la que se llamó Pangea, rodeada por una gran masa de agua denominada Panthalassa.

Los estudios de Wegener y otros posteriores han contribuido al trazo de las trayectorias seguidas por las “piezas continentales” desde la ruptura

* Facultad de Matemáticas. Universidad de Guanajuato.

¹ Wegener mismo reconoció que la idea en sí no es suya, que muchos –como Sir Francis Bacon en el siglo XVII– la habían estudiado antes que él.

de Pangea hasta nuestros días, e incluso se han construido modelos de la deriva en el futuro.

Para sostener su teoría, Wegener contaba con la siguiente evidencia: los continentes parecían embonar como piezas de un rompecabezas (sobre todo la costa oeste de Sudamérica y la costa este de África); y se habían encontrado en lugares geográficos, ahora demasiado alejados, restos fósiles de las mismas especies animales y vegetales.

Algo había de cierto en esta teoría, pero no fue bien recibida por los geólogos ya que tenía muchas deficiencias para explicar las causas de la deriva. Wegener proponía que los continentes habían sido arrojados hacia el Ecuador por efecto centrífugo de la rotación de la Tierra. Según él, la inercia debida a este efecto, así como las mareas y, en general, la influencia de las fuerzas gravitatorias de la Luna y el Sol, eran los causantes de la deriva. Ya de por sí ésta no parecía una idea bien justificada, pero sus deficiencias iban más allá. Y es que los continentes tienen una especie de raíces que penetran más allá de la corteza, en las capas interiores de la Tierra por lo que, si bien los continentes no están totalmente fijos, se requiere de una fuerza mucho mayor para poder arrastrarlos abriendo paso a estas raíces a través del manto, como si lo araran.

La segunda teoría fue propuesta en 1962 por Harry Hess: el Deslizamiento de Fondo Marino, según la cual nuevo suelo marino se está creando en algunos lugares de la corteza, las dorsales. Además, Hess propuso una idea para sustentar la deriva continental: que los continentes no se movían sobre o a través sino con el manto, pues las corrientes de convección² generadas en él acarrearían los continentes. Dichas corrientes provocarían el desgarramiento de la corteza, permitiendo la salida de material del manto que, al enfriarse, se convierte en el nuevo suelo marino. Este surgimiento es el que empuja la corteza.

Aparentemente, un descubrimiento que impulsó a Hess a plantear su teoría fue el de Mason y Raff, en 1959. Ellos describieron una serie de anomalías magnéticas en el suelo del Pacífico Noreste. En 1963, después de la publicación de Hess, F. Vine y D. Matthews explicaron esas anomalías como resultado de variaciones en el campo magnético de la Tierra. Éste fue un descubrimiento de mucha trascendencia, independientemente de la TP. Entender y explicar el campo magnético de la Tierra y sus variaciones no es sencillo y es aún objeto de mucho análisis. Sólo para

tener una idea diré que este campo magnético es el responsable de que las brújulas, cuyo mecanismo incluye una aguja imantada, funcionen, y que el descubrimiento en cuestión implica que hace 1 ma las brújulas hubieran apuntado al sur, en vez del norte, pero hace 2.5 ma hubieran funcionado como ahora. Pues bien, debido a los cambios de temperatura que sufre el material emergente del manto cuando llega a la superficie, el campo magnético presente en ese momento queda grabado en él. Este hecho constituyó evidencia contundente del deslizamiento de fondo marino porque, una vez que se hubo escrito toda la historia magnética de la Tierra, fue posible leer la edad del suelo marino y resultó ser más joven en las dorsales y más viejo conforme se aleja de ellas, cerca de los continentes.

Los huecos se iban llenando y una teoría más completa se vislumbraba en el horizonte, pero a la teoría de Hess aún le faltaba algo. Si nuevo suelo marino se estaba formando: ¿A dónde iba el suelo viejo? ¿Qué sucedía con el “excedente” de corteza, dado que el área y volumen de la Tierra es, para todo fin práctico, constante?

En la misma década de los sesenta, el geólogo canadiense John Tuzo Wilson formuló la revolucionaria teoría de la TP, completando los modelos de Wegener y Hess.

Antes de entrar de lleno a presentar la TP será necesario dar un vistazo al interior de la Tierra.

La corteza es la parte más superficial de la Tierra y es de dos tipos: continental –constituida de granito- y oceánica –constituida de basalto-. La corteza oceánica es más densa y es considerablemente más delgada que la continental (7 km la primera en oposición a los 30 km a 40 km de la segunda). Inmediatamente abajo de la corteza se encuentra el manto, que se divide en superior (~ 40 km a 700 km de profundidad) e inferior (~ 700 km a 2 950 km de profundidad). Parte del manto es una zona conocida como astenósfera (~ 100 km a 250 km de profundidad), que es de suma importancia para la TP. Flotando sobre la astenósfera, comprendiendo la corteza y la parte somera del manto, se halla la litósfera (0 km a 100 km). El núcleo, debajo del manto, también se divide en dos: el núcleo externo (~ 2 950 km a 5 150 km de profundidad) que es líquido, y el núcleo interno (desde donde termina el núcleo externo hasta el centro de la Tierra) que es sólido.

El análisis de la estructura interna de la Tierra ha sido posible gracias a las variaciones que esta estruc-

² Las corrientes de convección se originan en un fluido por la diferencia de densidades causada por la variación de temperatura. Un ejemplo común se da al hervir agua: la parte de abajo se calienta por efecto de la lumbre; cuando su temperatura ha aumentado lo suficiente, su densidad disminuye provocando su ascenso, mientras que el agua de arriba, menos caliente, desciende; y así sucesivamente, creándose una corriente.

tura ocasiona en la transmisión de ondas sísmicas. Así, la astenósfera es una capa de baja velocidad donde el material está en estado de semifusión: técnicamente sólido, pero que se comporta como un líquido extremadamente viscoso ante la presencia prolongada de una fuerza intensa. Por esta razón³, es posible que la litósfera flote sobre la astenósfera y que se creen las raíces de los continentes, debido a su volumen mucho mayor que el de la corteza oceánica.

INTERACCIÓN ENTRE PLACAS

John Tuzo Wilson, creador de la teoría de la TP, propuso que los arcos de islas o de montañas, las cordilleras oceánicas y las zonas de fractura marcan las fronteras entre una serie de “losas” rígidas (en cuanto a que interactúan sin deformarse mayormente entre sí, excepto en los bordes) que forman casquetes esféricos de litósfera y encajan entre sí sin hendiduras, como un mosaico global de placas. En 1967, D.P. McKenzie y R.L. Parker publicaron un artículo donde argumentaban que “áreas individuales asísmicas se mueven como placas rígidas en la superficie de una esfera”⁴. La interacción entre las placas es, de hecho, la principal causa de sismos (mas no la única).

Los márgenes de las placas pueden estar situados en alguna frontera océano-continente pero también dentro de un océano o dentro de un continente. Una sola placa puede contener porciones de continente y de océano.

Según Dewey, el argumento central de la TP es que el movimiento relativo de una placa con respecto a otra, puesto que sucede en la superficie de una esfera, puede ser descrito por una rotación sobre un eje que pasa por el centro de la Tierra⁵.

Los bordes de las placas pueden ser de tres tipos: 1) centros de expansión o cordilleras (dorsales) oceánicas, 2) zonas de subducción y 3) fallas transformantes. Esto es lo que hace más interesante a la TP, las interacciones entre las placas son lo que ha permitido explicar la forma de la superficie terrestre.

1) Ya hemos hablado un poco de los centros de expansión, en la teoría de Hess. A continuación se explica más explícitamente el proceso de formación de nuevo suelo marino.

En el manto profundo se originan columnas de magma (plumas mantélicas) que ascienden atravesando

la litósfera debido a su baja densidad. Al acumularse debajo de ésta, provocan su abombamiento y adelgazamiento. La tensión que se produce en la superficie permite la aparición de fracturas que dan lugar al hundimiento de la bóveda que se había formado. Se origina un valle central llamado *rift* y a través de las fracturas sale el magma, que lo cubre. El ascenso continuo de magma al rift empuja los materiales hacia ambos lados separando los bloques. El magma se solidifica formando corteza oceánica y también, debido a su densidad, una depresión central que es invadida por el agua de los océanos creando un mar estrecho. Con la continua formación de nuevo fondo, el mar se ensancha hasta convertirse en océano. Debido al abultamiento causado por las plumas mantélicas, la dorsal es como una montaña alta que ocasiona que las placas también sean empujadas debido al deslizamiento por gravedad de la corteza oceánica desde la dorsal.

2) Subducción es el proceso mediante el cual se responde a la pregunta antes planteada: ¿a dónde va el suelo viejo? Lo que sucede es que una placa que crece en una dorsal se está acercando a una segunda placa, y si ésta no se aleja a mayor velocidad que la primera se acerca, se originará una competencia por la superficie que ocupan. En un borde de subducción una de las placas es “tragada” por hundimiento en el manto por debajo del borde anterior de la otra placa. La subducción presenta variados y muy interesantes escenarios dependiendo de los tipos de corteza involucrados.

Cuando los bordes que chocan son de diferente tipo de corteza, la placa subducida (tragada) es la oceánica, por ser más densa. Conforme el extremo de la placa oceánica se hunde más profundamente, va encontrando temperaturas cada vez mayores (debidas tanto al aumento de fricción entre las placas como a las propiedades del interior de la Tierra), y al llegar a profundidades del orden de 110 km comienza a fundirse, formando corrientes de magma. Algunos magmas alcanzarán la superficie produciendo un abultamiento de la corteza que se convierte en volcán y estará en actividad siempre que siga habiendo una fuente de magma.

El hueco entre la placa subducida y la subducente, a lo largo del borde de convergencia, forma una trinchera o fosa oceánica. Las trincheras son depresiones del fondo marino, angostas y alargadas, usualmente en forma de arco, donde se encuentran las mayores profundidades de la superficie terrestre. La fosa de las Marianas, el punto más profundo sobre la faz de la Tierra, mide aproximadamente 11 km.

³ Según Arquímedes, un cuerpo colocado “sobre un fluido estático (e incomprensible) se hundirá hasta desplazar un volumen equivalente a su peso. Como la astenósfera no es precisamente un fluido, el principio aquí aplicado, *isostasia*, es una adaptación del principio de Arquímedes.

⁴ Alejandro Nava dice que Wilson hizo la mencionada afirmación en 1965. El artículo de McKenzie y Parker citado se publicó en el número 216 de la revista *Nature* (30/12/1967). Parece haber controversia respecto a quién identificó las placas primero: sin embargo, Wilson es ampliamente reconocido como quien acuñó la teoría de TP.

⁵ Teorema de rotación de Euler. El movimiento relativo de dos elementos sobre la superficie de una esfera es siempre una rotación sobre un eje que pasa por el centro, cuya intersección con la superficie de la esfera se llama polo de rotación o de Euler.

Al mismo tiempo que la corteza oceánica se destruye, en una zona de subducción como la anterior, el continente “crece”. Los sedimentos procedentes de la erosión de los continentes se acumulan en el fondo oceánico. Estos sedimentos alcanzan espesores de miles de metros en las fosas oceánicas. Cuando comienza la subducción, los sedimentos, al no estar consolidados, no son arrastrados junto con la placa que subduce sino que se acumulan en el frente de la placa continental formando un prisma de acreción. El continuo empuje de las placas comprime estos materiales junto con las corrientes de magma haciendo que el espesor de la litósfera aumente en altura y profundidad, de modo que las raíces de la cordillera quedan sumergidas en la astenósfera. El reajuste isostático, que empuja la cordillera hacia arriba, también contribuye a su elevación. Se cree que la cordillera de los Andes fue formada mediante este mecanismo.

Si la placa subducida contiene corteza continental y ésta se acerca a la trinchera, eventualmente se producirá un choque. La subducción se detendrá pero continuará el empuje producido por la expansión del océano desde las dorsales. Esta presión provoca la compresión de los dos continentes, que se fracturan, se pliegan y se elevan, dando lugar a una cordillera de colisión. Las placas quedan unidas por una *zona de sutura*. Esto fue lo que sucedió con la India, que no está en la misma placa que el resto del continente asiático. Según la TP, hace menos de 50 ma, la península de la India chocó contra el Tibet, añadiéndose al continente y formando la cordillera del Himalaya.

En caso de que la placa que contiene corteza continental fuera la que subduce, y no la subducida, entonces al momento del choque se revertiría el sentido de la subducción. Sería igualmente posible que una trinchera subdujera completamente una placa hasta “tragarse” el centro de expansión.

A pesar de que no hay diferencia de densidad, también una placa oceánica puede ser subducida bajo otra placa del mismo tipo. En este caso, el extremo de la placa subducente se apoya sobre la placa subducida y su borde se deforma. El magma que alcance la superficie formará una serie de volcanes, a mitad del mar, paralelos a la trinchera. Este grupo de volcanes ha sido nombrado *arcos de islas*, y es el caso de las islas Marianas.

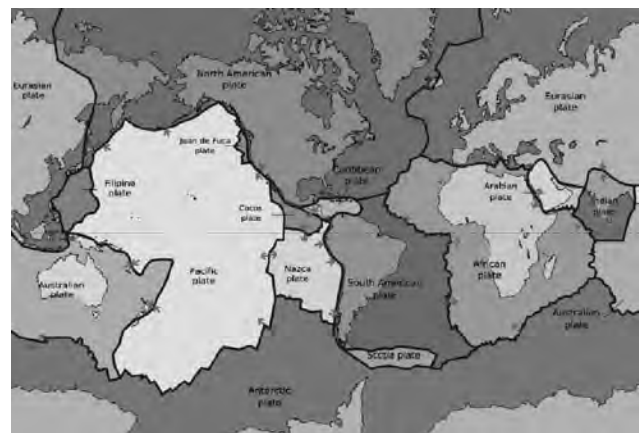
Las zonas de subducción, como todos los bordes de placa en menor o mayor grado, presentan actividad sísmica. Las placas no se deslizan suave y conti-

nuamente una sobre otra. Existe gran fricción en su contacto, misma que las une temporalmente de manera que su movimiento relativo hace que ambas se deformen. Parte de esta deformación, como ya se dijo, contribuye al relieve. Pero otra parte se “almacena”, por así decirlo, hasta que este esfuerzo almacenado es mayor que la fricción. Luego el contacto se rompe y ambos lados de la ruptura se desplazan dando lugar a un sismo y permitiendo el avance de las placas. Al final, el contacto se recupera y vuelve a comenzar el almacenamiento de esfuerzos.

3) J.T. Wilson acuñó el término de falla transforme⁶. Este tipo de fallas son una especie de ajuste. El movimiento en un borde de este tipo es paralelo al deslizamiento entre las placas adyacentes. La corteza en ambos lados de estas fallas presenta edades muy distintas. Las fallas transformes son muy activas sísmicamente.

Actualmente se reconocen 15 placas, aunque se cree que pueden existir ciertas *microplacas*, ubicadas en fronteras entre placas donde se presenta demasiada actividad deformativa. Demostrar su existencia parece ser bastante complicado.

Y aún hay más con respecto a la TP y el relieve. Mientras viajan por la superficie terrestre, las placas recogen muchos tipos de sedimentos. Se van formando capas según los tipos y, cuando hay un choque, se pliegan para formar montañas. Luego puede ser que la erosión “borre” algunas de esas capas ocasionando que capas de rocas más antiguas queden arriba y las nuevas queden abajo sepultadas (debido al plegamiento). Antes de la TP los geólogos estaban confundidos por este hecho. Estos plegamientos también ayudaron a entender por qué la erosión no ha acabado por completo con el relieve terrestre: resulta que los



⁶ Una nueva clase de fallas y su relación con la deriva continental. J. Tuzo Wilson. Revista Nature no. 207 (24/07/1965).

plegamientos son la forma como las montañas están en constante crecimiento, contrarrestando la erosión.

En cuanto a volcanes, a raíz de la TP se creó el concepto de *puntos calientes*. Estos puntos son plumas mantélicas. Conforme las placas pasan sobre ellas, se originan volcanes cuya actividad dura poco (geológicamente hablando), pues termina cuando la placa ha avanzado lo suficiente para que se pierda la conexión entre el volcán y la pluma. Esto explica la presencia de islas volcánicas lejos de bordes de subducción, como la cadena de Hawai-Emperador.

CONCLUSIONES

No deja de sorprenderme la maravilla del funcionamiento de nuestro planeta en éste y en todos los aspectos, pero al conocer sobre la tectónica de placas me sorprende también la capacidad humana. Creo que se necesita mucha creatividad para que a alguien se le ocurra que la corteza es como un rompecabezas y para que de allí surgieran tantas y tantas otras teorías.

Aún hay mucho por descubrir. La TP es sólo una teoría (que, de hecho, algunos geólogos todavía rechazan⁷). El mecanismo que la mueve tampoco está del todo claro, pero se está avanzando. Intentar desvelar el pasado de la corteza terrestre es un gran reto porque el tiempo de la Tierra va mucho más allá de los límites

humanos. Incluso las rocas más viejas que se han hallado son nuevas en comparación con el planeta.

Finalmente, ¿Para qué sirve la TP? Este tipo de preguntas son hechas con frecuencia a los científicos (y a los que estamos en vías de serlo), sobre todo a los que se dedican a la ciencia pura. Pues bien, para apagar esas dudas, puedo decir que la aplicación más común es la predicción de sismos, tema del cual yo, premeditadamente, me he encargado poco o casi nada en este escrito. Si bien estoy de acuerdo en que el conocimiento tiene valor en cuanto a que le es útil al hombre para mejorar su vida, también me parece que conocer es un placer. Para mí, saber lo que sucede bajo mis pies, en el suelo que piso, ya es más que suficiente. Y después de todo, uno nunca sabe cuándo un conocimiento le va a ser útil para alguna aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Dewey, J. F., Runcorn, S. K., Wilson, J.T. (1982). *El redescubrimiento de la Tierra*. CONACYT.
- Lugo H., J. *La superficie de la Tierra*. Segunda edición. FCE, 1996. (La Ciencia para Todos; 54).
- Nava, A. *La inquieta superficie terrestre*. FCE (1993). (La Ciencia para Todos; 113).
- Thurman, H. V. y Trujillo, A. P. *Introductory Oceanography*. Décima edición. Prentice Hall, 2004.

⁷ Al menos hasta 1982: ver el artículo de Vladimir Belousov en *El redescubrimiento de la Tierra*.