

Ponencia 1: ¿Si no se puede medir la frontera con Portugal, es porque no hay Tectónica Intraplaca?

G. de Vicente Muñoz

Dpto. de Geodinámica, Fac. de Ciencias Geológicas, Univ. Complutense de Madrid. gdv@geo.ucm.es

L'imagination se lassera plutôt de concevoir que la nature de fournir.

Blaise Pascal

El final del siglo XX ha asistido al inicio de un cambio de punto de vista sobre el comportamiento de los sistemas macroscópicos que aún no ha concluido. Esta afirmación contiene dos ideas que deberían sorprendernos. Por un lado, el que, mientras la Física no ha dejado de interesarse por escalas cada vez menores, se pueda hablar de revolución en el comportamiento a escalas *cotidianas*. En segundo lugar, la escasa repercusión que ha encontrado en casi todas las materias a las que afecta, debido probablemente a la falta de concreción de métodos de análisis matemáticos rigurosos y bien contrastados. Nos referimos al concepto de *fractal* y a los sistemas dinámicos *caóticos*. El hecho de su lenta aplicación en las ramas científicas que, *a priori*, le deberían ser más afines, no deja de señalar la existencia de una falta de transferencia adecuada entre los conceptos matemáticos implicados y las consecuencias prácticas que conllevan. Tal es el caso de la Geología, en general, y de la Tectónica, en particular

Cuando se estudian los procesos de deformación naturales, lo primero que debería llamarnos la atención es el amplio rango de escalas implicadas, y cómo, injustificadamente en objetos en principio euclídeos, extrapolamos los resultados entre dichas escalas. La justificación es eminentemente práctica. Lo hacemos porque *existen* una serie de propiedades invariantes al cambio de escala en la mayor parte de estas estructuras de deformación natural.

El martillo de los geólogos tiene dos funciones: probar la dureza de las rocas y como escala en las fotografías de campo. Las imágenes de este tipo de estructuras no permiten determinar su tamaño por sí solas.

Esta propiedad de invarianza incide también en los problemas que aparecen a la hora de cartografiarlas o representarlas, ya que permiten un grado de subjetividad muy grande. Dos especialistas distintos pueden realizar cartografías muy diferentes. Lo importante aquí es el "pueden". La naturaleza de estas estructuras *permite* que esto suceda. Es más, un mismo especialista puede cartografiar, en dos momentos diferentes, mapas que, desde un punto de vista estricto, no serán iguales. En este caso, lo que sí se mantendrá será el "estilo" de la cartografía. Esto podría suceder si la cantidad de información a la que nos enfrentamos fuese, en la práctica, infinita. De nuevo nuestra experiencia cotidiana como geólogos nos indica que esto puede ser así. Cuando regresamos a aflo-

ramientos muy conocidos, siempre podremos encontrar algo nuevo, por muchas veces que volvamos.

Otro problema al que nos enfrentamos es el de la "ventana" de observación. Una afirmación muy conocida entre los geólogos dedicados a las fallas es que cuanto más grande es, menos se ve. Se podría pensar en que, una vez que se localiza una falla de gran recorrido, su posición a escalas menores viene determinada de un modo directo. No es el caso. Grandes estructuras, muy evidentes a grandes escalas, resultan difícilmente localizables a escalas menores. Este hecho está en flagrante contradicción con nuestra experiencia diaria en relación a objetos que sí son euclídeos.

Junto a estos problemas que afectan al cambio de escala de buena parte de los objetos geológicos, otra característica intrínseca a los *procesos* geológicos es su componente histórica e irreversible. La evolución geológica es un proceso *histórico*, más allá del intento de comprensión de la profundidad del tiempo geológico. Volviendo de nuevo a las fallas, cuando comienza la deformación en un macizo homogéneo, se nucleará en una cierta posición que, al romper, dominará sobre otras. En tanto en cuanto el sistema se estabilice se convertirá en un objeto histórico, en el sentido de que de esta elección crítica depende la totalidad de su desarrollo posterior, lo que resulta patente por ejemplo, en los numerosos casos documentados de "inversión tectónica".

Otra característica que debería llamarnos la atención es la gran cantidad de fenómenos de realimentación en los procesos tectónicos. En relación a la dinámica global que supone el modelo de la Tectónica de Placas, cuando subduce la corteza oceánica la distribución de isogradas se ve afectada, de modo que a lo largo de la placa que se hunde se localizan temperaturas inferiores a las que son más comunes en el resto del Manto Superior en ese rango de profundidades (hasta 1000 km). Esta situación conlleva que el tránsito olivino-espinela se produzca más cerca de la superficie a lo largo de la subducción, con lo que la mayor densidad de la espinela produce un efecto de succión adicional. La subducción se realimenta. A escalas menores, el peso de los sedimentos en el labio hundido de las fallas puede hacer que éste se hunda más, e incluso que el labio levantado rebote.

Por último, y quizás como hecho más evidente, la diferencia entre el relieve terrestre y el de cualquier otro cuerpo del Sistema Solar, dominado por cráteres de impacto, se debe a la actividad del sistema dinámico global (Tectónica-Isostasia-Atmósfera-Biosfera) que es capaz de borrar los impactos e imponer su estilo propio, no conservando la

memoria de la perturbación. Esta propiedad es característica de sistemas dinámicos disipativos con comportamiento irreversible, que suelen presentar comportamientos caóticos.

No deja de ser frustrante el que los geólogos estructurales tengamos que responder afirmativamente a dos cuestiones aparentemente contradictorias. Por un lado, se nos pregunta: ¿Las estructuras de deformación natural aparecen ordenadas? Y por otro: ¿La deformación natural es compleja? El hecho de tener que satisfacer simultáneamente orden y complejidad ha derivado en clasificar las estructuras tectónicas mediante *estilos de deformación*. Este concepto, que parece acercarnos más a las humanidades que a la ciencia "dura", es absolutamente necesario para la Geología y exige la formulación de conceptos físicos y matemáticos que lo satisfagan (*física estadística*). La postura contraria no será suficiente, en el fondo, para explicar la realidad de los procesos geodinámicos.

Las fallas constituyen sistemas o redes multiescalares de alta complejidad topológica que muestran la ocurrencia de leyes potenciales en la práctica totalidad de los aspectos geométricos (y temporales) que configura: la longitud de las fallas, su área de ruptura, sus desplazamientos (¿velocidades?), la energía emitida, su espaciado y los tamaños de los bloques (y áreas en superficie) que éste origina.

La dinámica no lineal asociada al proceso de fracturación está fuertemente acoplada en un amplio rango de escalas espacio-temporales, mucho mayor que las dimensiones a las que estamos habituados (desde micras a decenas de miles de km y desde segundos a cientos de millones de años). La investigación se debería centrar en comprender los orígenes e implicaciones de las correlaciones espacio-temporales y de las pautas dinámicas de este fenómeno, fundamentalmente multiescalar. No se conoce convenientemente si este acoplamiento depende de la estructura mecánica terrestre (y hasta qué profundidad) y si se refleja en las características multifractales que aparentemente presenta. ¿Existen diferencias entre las pendientes log/log de la distribución de tamaños de las placas principales y de los fragmentos entre fallas que sólo afectan a la corteza superior? La respuesta con una perspectiva matemática dependerá, en cualquier caso, de la información que se pueda aportar desde la cartografía detallada de los patrones de fracturación, y no de meros esquemas tectónicos. Hasta el momento, sólo los estudios sobre diaclasado y, sobre todo, las caracterizaciones hidrogeológicas de medios de baja permeabilidad, aportan datos realistas.

Pero el papel de los estudios tectónicos puede ser justo el contrario. Encontrar las pautas generales de la deformación e intentar cuantificar el rango de escalas al que afectan. Por ejemplo, la diferencia entre tectónica de "piel fina" y de "piel gruesa" parece no encajar con las cartografías que, en realidad, abarcan un continuo entre ambas. Otro ejemplo: el concepto de "partición de la deformación", que refleja el hecho de que existe una mayoría de fallas con movimientos "puros" (normales, inversas y de cizalla) en un muy amplio rango de escalas, se concreta a nivel global en la existencia

de tres tipos de límites de placas (en zonas transpresivas o transtensivas la deformación suele repartirse entre desgarres y fallas normales o inversas). Por último, la presencia de grandes flexiones que afectan a la corteza superior y/o a la litosfera, relacionadas con el campo de esfuerzos regional, ha de hacernos replantear el concepto, tan tradicional en geología estructural, de "orden de plegamiento".

De este modo, y aunque no acaben de establecerse los procedimientos de análisis matemático comunes y bien contrastados, las observaciones geológicas parecen indicar la existencia de un acoplamiento efectivo global del proceso geodinámico desde la escala planetaria hasta los procesos de microfracturación. Desgraciadamente, el reconocimiento de este hecho ha llevado a algunos a adoptar posturas con un excesivo componente "místico", encontrando una teoría "del todo" que no explica nada. Sin embargo, intentando ser algo más prácticos, y superando los problemas mencionados, las consecuencias geológicas que se extraen de la multifractalidad de la deformación son realmente trascendentales. Así, no cabe hablar de cuántas son las Islas Canarias, o de cuánto mide la frontera con Portugal, si la pregunta no viene acompañada de una escala de referencia. No es posible medir el espaciado entre fracturas, o determinar el terremoto característico, o en última instancia, determinar cuantas placas hay. Depende de la escala.

Bajo esta perspectiva, convendría conocer qué conceptos tectónicos son invariantes al cambio de escala para hablar y obrar en consecuencia. Quizá el ejemplo más llamativo sea el de los estudios de segmentación de fallas; claramente no son adecuados para caracterizar el objeto que pretenden estudiar. Ya hemos mencionado otro, el de "piel fina o gruesa", pero parecen más trascendentales los de "placa" e "intraplaca".

Aunque en corteza oceánica los límites activos aparecen mucho mejor definidos que en corteza continental, la sismicidad en ambos sigue pautas temporales potenciales similares, no apreciándose tampoco diferencias en función del elipsoide de esfuerzos actuante. Los procesos de sismicidad inducida se producen tanto en las zonas "activas" como en las "estables", indicando que *toda* la corteza superior se encuentra en estado subcrítico. Así, los conceptos de "límite de placa" e "intraplaca" son buenos candidatos a mostrar también invarianza al cambio de escala (cuanto más detallado es un esquema tectónico más *microplacas* o *bloques*, o *terrenos*, aparecen).

Resulta evidente que no podemos considerar "placas litosféricas" a bloques limitados por fallas con tamaños menores al de la potencia de la propia litosfera. Se nos plantea así una cuestión fundamental. Si el proceso de fracturación refleja un cambio significativo en las leyes potenciales que caracterizan las escalas mayores, respecto a las exclusivamente corticales, el propio concepto de "tectónica de placas" se verá reforzado. En caso contrario, emergería un nuevo concepto, que involucraría la dinámica de todo el planeta (incluidas atmósfera y biosfera), y en el que serían menos relevantes el papel, por ejemplo, de la astenosfera y la propia idea de "placa" (si no va acompañado por una *escala*).