





**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS,  
QUÍMICAS Y NATURALES DE ZARAGOZA**

**INVESTIGAR EN GEOLOGÍA:  
DEBILIDADES Y GRANDEZA DE UNA TAREA HUMANA**

*DISCURSO DE INGRESO LEÍDO POR EL ACADÉMICO ELECTO*

**Ilmo. Sr. D. JOSÉ LUIS SIMÓN GÓMEZ**

*EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN SOLEMNE  
CELEBRADO EL DÍA 13 DE JULIO DEL AÑO 2020*

*Y*

*DISCURSO DE CONTESTACIÓN POR EL*

**Ilmo. Sr. D. ANDRÉS POCOVÍ JUAN**

*ACADÉMICO NUMERARIO*



ZARAGOZA

2020

Depósito legal: Z xxx-2020

*Imprime:*

Servicio de Publicaciones. Universidad de Zaragoza

**INVESTIGAR EN GEOLOGÍA:  
DEBILIDADES Y GRANDEZA DE UNA TAREA HUMANA**

**POR EL**

**Ilmo. Sr. D. JOSÉ LUIS SIMÓN GÓMEZ**



Excelentísimo Señor Presidente,

Excelentísimos e Ilustrísimos señores académicos y autoridades,

Señoras y señores:

*Un discurso que en gran medida va a discurrir –valga la redundancia– por derroteros personales, no podía iniciarse sino dedicando un afectuoso recuerdo a Eustoquio Molina. Me cabe el gran honor de recibir hoy la medalla número 12 de la Academia, de la que él fue anterior titular. Eustoquio fue un gran compañero en la vida universitaria, cuya ausencia ha sido muy difícil de encajar. Reconocido investigador, especialista del más alto nivel en foraminíferos, fue autor de trabajos de referencia en el campo de las extinciones faunísticas (en particular de la extinción en el límite Cretácico-Paleógeno), y creó una sólida escuela en el Área de Paleontología de nuestro Departamento de Ciencias de la Tierra que continúa dignamente su labor. Pero se reveló también como un científico crítico y comprometido, que reivindicó y trabajó activamente por el reconocimiento social de la auténtica ciencia, y desde la asociación Alternativa Racional a las Pseudociencias-Sociedad para el Avance del Pensamiento Crítico combatió los residuos de creacionismo que quedan en algunos ámbitos de pensamiento, las pseudoterapias y otras formas de discurso irracional. Mi disertación, que en lo geológico se detendrá en aspectos muy alejados de los que estudiaba Eustoquio, conectará sin embargo con algunas de las cuestiones que le preocupaban en ese segundo terreno, y quiero creer que lo hubiese escuchado con agrado.*

## 1. *Todo empezó con una lupa*

Tenía yo 10 años cuando mi abuelo Serafín me regaló una lupa de bolsillo (Fig. 1). Acababa de terminar el primer curso del Bachillerato de entonces, en el que había estudiado, por vez primera, Ciencias Naturales. Esa asignatura me había cautivado hasta tal punto que, sin pizca de pudor, declaré públicamente que quería ser ‘investigador científico’. Mi abuelo se encargó de dotarme del primer instrumento para ello: aquella lupa que me permitió ver los pelos de una mosca y los granos de arena como nunca antes los había visto. A través de aquella minúscula ventana comencé a percibir el mundo de otra manera. Eloy Fernández Clemente, la primera persona que me explicó los movimientos de placas en su asignatura de Geografía de 2º de Bachillerato –hablo de 1969–, creo que terminó de afianzar mi vocación.



Figura 1: Mi lupa personal, a través de la cual se observan lineaciones de disolución producidas por indentación de granos de cuarzo en un canto calcáreo (montaje fotográfico).

Mientras estudiaba la carrera yo tenía una vista de linco, tanto para distancias largas como para las muy cercanas. De hecho, usé poco aquella lupa; la llevaba en la mochila más como amuleto que otra cosa, y tuve que comprarme una de menor diámetro y más aumentos para hacer observaciones de detalle en el campo. Al propio tiempo, las largas horas de visionado de fotografías aéreas a través del estereoscopio, sobre todo mientras trabajaba en mi Tesis de Licenciatura, me desataron –o, al menos, así lo interpreté yo– una apreciable miopía que con los años se vio complementada con algo de astigmatismo y una gradual presbicia. Esta última es la que más me viene preocupando últimamente, porque me dificulta practicar una de las actividades que más me ha gustado siempre en el trabajo de campo: amorrarme al afloramiento y ‘escanear’ visualmente, con la máxima resolución posible, todo atisbo de junta estilolítica, crenulaciones superpuestas o intersecciones de estrías de falla.

Desde hace año y medio rastreo en el Prepirineo lineaciones de disolución en cantos de

conglomerados, esto es, marcas lineales producidas por la incisión de granos de la matriz arenosa (Fig. 1) bajo presiones tectónicas. Con ello pretendo reconstruir la dirección o direcciones de compresión registradas en la cadena durante el Cenozoico. Se trata de un reto que me tiene entusiasmado como a un ‘neodoctorando’. Pero desde el comienzo observé con consternación cómo el deterioro de mi vista me impedía distinguir con nitidez a esa distancia (medio palmo contado desde la nariz) en la que otrora me sentía tan cómodo. Confieso haber pensado que era el momento de pedir la jubilación.

Un buen día recordé que aún solía llevar en la mochila la lupa de mi abuelo. Probé con ella y, ¡eureka!, era el instrumento que necesitaba para proseguir con éxito mi rastreo por los conglomerados de Vadiello y el Guarga. Armado con tan poderosa herramienta ya no iba a haber lineación de disolución que se me resistiera. Pueden imaginar la inyección de autoestima que esto supuso para mí. Gracias al regalo de mi abuelo Serafín, a quien conocí ya jubilado, mi propia jubilación podía esperar.

## **2. Declaración de intenciones**

Mi historia con la lupa ilustra algunos de los principales aspectos que quiero exponer en esta disertación. Se refieren a vínculos personales y emocionales que muchos científicos, y en particular muchos geólogos, establecemos tanto con nuestro objeto de estudio –en este caso, el planeta Tierra y la porción del mismo en la que nos sentimos arraigados– como con la actividad científica en sí.

Deseo mostrar cómo la Geología y las demás ciencias de la naturaleza presentan las debilidades de cualquier tarea humana, pero también su grandeza como creación intelectual que contribuye al progreso del individuo y de la sociedad. Quiero recordar las debilidades de carácter epistemológico que se derivan de nuestra limitada capacidad de aprehender la realidad (más aun en el caso de un objeto de estudio complejo como es el de la Geología), y aquellas otras que emanan de la psique de los científicos y hacen que, en palabras de Thomas Kuhn, la ciencia tenga a veces el aspecto de una *estructura desvincijada*.

Intento desmitificar la supuesta asepsia y neutralidad de la ciencia, y mostrar que, en cuanto construcción social, está inevitablemente mediatizada por la historia y el contexto socioeconómico. Defiendo la ciencia como forma racional de ver el mundo y como herramienta para la toma de decisiones en nuestra *sociedad del conocimiento*, pero a la vez crítico el *cientifismo* en cuanto ideología que la encumbra como guía única y la pone al servicio del poder como herramienta de dominación.

A pesar de todo ello, o precisamente por ello, reivindico la imaginación y las emociones en la actividad científica. Quienes investigamos en Geología tenemos la suerte de mantener un canal de comunicación cuasi permanente con esa vieja sabia que es Gaia, fuente de conocimiento antes que fuente de recursos materiales. Sabia, pero también exigente: aprender de ella requiere la puesta en acción de todas nuestras capacidades sensoriales, intelectuales y emocionales. Es una apuesta arriesgada en la que el científico se juega mucho, aun convencido de la eterna provisionalidad de sus logros. Pero es una apuesta que merece la pena.

Aunque centro el discurso en la Geología, la ciencia que ejerzo desde hace más de cuarenta años, mis reflexiones desbordan continuamente esa disciplina. Analizo y discuto problemas concretos, fundamentalmente de carácter epistemológico, que conozco de cerca en el campo de la Geología Estructural, pero los conecto con cuestiones más amplias que conciernen a todas las ciencias de la naturaleza. Y todo ello queda impregnado –o quizá sólo salpicado– con extractos del pensamiento de grandes filósofos: Karl Popper, Thomas Kuhn, Mario Bunge, Imre Lakatos, Robert Merton, Paul Feyerabend. . .

No puedo sino reconocer que mi particular tratamiento de las ideas y las citas de esos pensadores probablemente será, además de somero y simplificado, tan heterodoxo como el planteamiento global de la disertación. He de confesar que en todos esos filósofos he encontrado propuestas iluminadoras: tanto descripciones de la realidad científica con las que me sentía identificado, como asertos críticos que me cuestionaban. Pero asumo el riesgo de que algunas de las ideas que he tomado, y a través de las cuales he creído entender cómo funciona la ciencia, puedan ser contradictorias entre sí. Las controversias entre racionalismo e inductivismo, entre falsacionismo y verificacionismo, y entre todos los ‘-ismos’ que han nutrido la filosofía de la ciencia, han ocupado a muchas mentes brillantes durante siglos, pero no obligan a nadie a involucrarse en ellas. Por mi parte, prefiero tomar una pizca de aquí y otra de allá, con un ánimo ecléctico que probablemente merezca críticas por oportunista, sesgado o errático, pero que es el único por el que me he dejado guiar.

### **3. Pensamiento científico emocional**

Sólo se ama lo que se conoce, y sólo se conoce realmente aquello que se ama. La neurociencia moderna, contra la idea de una separación funcional entre los hemisferios cerebrales, ha demostrado que los circuitos emocionales interactúan fuertemente con los

cognitivos. Aun cuando puedan identificarse focos que se activan cuando sentimos, razonamos o creamos, cualquiera de esas acciones implica una interrelación constante entre hemisferios. No existe ningún proceso de aprendizaje que no esté influenciado o modulado por las emociones (Pessoa, 2017), y no hay inteligencia que no tenga una dimensión creativa más allá de la pura razón.

Las corrientes clásicas en filosofía de la ciencia, como el neopositivismo del Círculo de Viena o el racionalismo crítico de Popper, excluyen la consideración de las emociones dentro del discurso epistemológico: “*La etapa inicial, el acto de concebir o inventar una teoría, no me parece que exija un análisis lógico ni sea susceptible de él. La cuestión acerca de cómo se le ocurre una idea nueva a una persona –ya sea un tema musical, un conflicto dramático o una teoría científica– puede ser de gran interés para la psicología empírica, pero carece de importancia para el análisis lógico del conocimiento científico*” (Popper, 1996<sup>1</sup>, p. 30). Bunge (1965, 1972) admite el papel de la intuición en la ciencia, pero defiende que “*es fértil en la medida en que está refinada y dirigida por la razón. (...) Las intuiciones fructíferas son las que se incorporan a un cuerpo de conocimiento racional y, por esta razón, dejan de ser intuiciones*”. Sin embargo, otros filósofos sí valoran el papel de las emociones en el proceso de creación científica, revelándose cruciales en la deliberación entre teorías en competencia (Flores, 2011). Ya Kuhn (1975, p. 149) señalaba que lo que desencadena las *revoluciones científicas* no es una convicción racional compartida por la comunidad científica, sino “*un sentimiento creciente*” de que el viejo paradigma ha dejado de funcionar. Y lo mismo filósofos críticos como Feyerabend (1974), que aun admitiendo que gran parte de nuestro pensamiento surge de la experiencia, resalta que hay amplias zonas del mismo firmemente basadas en la intuición y la subjetividad.

La inteligencia creativa o emocional genera el interés, incluso el cariño, por ese tema de investigación que uno afronta en su doctorado como si fuese la exploración del Nuevo Mundo. Refresca y dota de capacidad imaginativa a nuestra mente para formular esa arriesgada hipótesis que va a guiar nuestro próximo proyecto. Armoniza nuestra búsqueda de la verdad con el hallazgo de la belleza. También es nuestro cerebro emocional el que sostiene la disciplina interna cuando toca aplicar la parte dura del método hipotético-deductivo: la contrastación empírica; cuando en las largas jornadas de campo

---

<sup>1</sup>En las referencias a obras a las que he tenido acceso a través de ediciones traducidas al español, hago constar siempre la editorial y el año de publicación de estas últimas. Soy consciente de que eso sustrae, de alguna forma, la dimensión temporal que tienen las ideas filosóficas, que como todo conocimiento ha ido construyéndose secuencialmente a lo largo de la historia. No obstante, opto por citar aquellas ediciones en las que, con seguridad, puedo referir páginas concretas para ubicar ideas o frases precisas de sus autores, y hago de esa intemporalidad un ingrediente más de mi planteamiento ecléctico.

o de laboratorio todo el edificio argumental que habíamos diseñado amenaza con desmoronarse tras la irrupción de datos inesperados. Incluso el empirista Ramón y Cajal, quien afirmaba que la ciencia verdaderamente útil y fecunda consiste sólo en observar, describir y clasificar para luego generalizar por inducción, y que desdeñaba el papel de la intuición para formular interpretaciones, tendría que haber admitido el papel de la inteligencia emocional en el sostenimiento de una cualidad que él privilegió en el quehacer científico: la voluntad (Ramón y Cajal, 1897).

#### 4. Visitar y visitar nuestros rincones del conocimiento

Desde el principio, creo que de una forma natural e inconsciente, decidí investigar aquellos temas y aquellas regiones geológicas por los que tuviera una querencia especial. Eso me ha limitado mucho, lo sé. He ignorado o desatendido grandes cuestiones tectónicas de relevancia universal, de interés estratégico o que, simplemente, estaban de moda. Esos temas ‘calientes’ sobre los que trabajan y publican simultánea y prolíficamente muchos investigadores de todos los continentes confieso que nunca me han interesado demasiado.

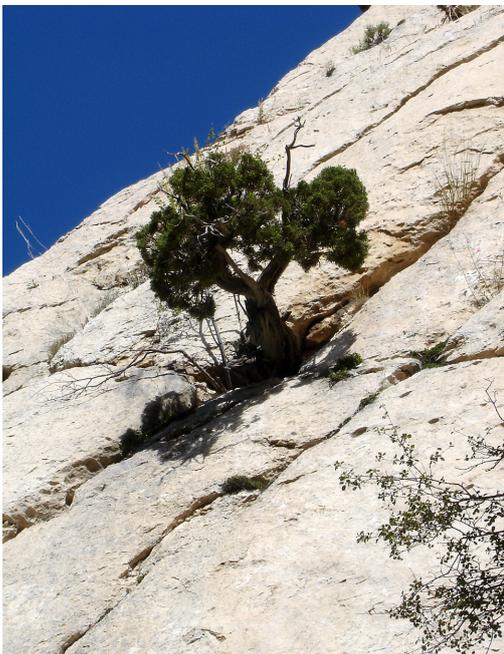


Figura 2: Sabina negra (*Juniperus phoenicea*) en calizas cretácicas de Aliaga. Sus hojas escamosas saben de los cambios atmosféricos globales; sus raíces se aferran a un palmo de roquedo y, a través de él, conectan con la litosfera.

He centrado siempre mi trabajo en la Cordillera Ibérica, una modesta cadena alpina un poco ajena a los grandes circuitos de interés científico. Tuve la ‘desgracia’ de criarme en Teruel, descubrir la Geología en el Cretácico plegado de Aliaga y en los conglomerados miocenos de Cobatillas –mi pueblo–, y vislumbrar que las fallas activas del corredor del Jiloca podían ser casi tan interesantes como la de San Andrés. He tenido que leer en el informe de revisión de uno de mis artículos la apreciación de que el mismo sólo tenía *parochial interest*, y que su publicación no podría alcanzar nunca el impacto deseable. Pero me siento afortunado por haber empezado a amar la Geología incluso antes de conocerla. Una vez que acerté a vislumbrar su colosal complejidad, algo me llevó a conectar emocionalmente a

mi objeto de estudio y, siguiendo la máxima ecologista de “*pensar globalmente, actuar localmente*”, resolví que el roquedo de la Ibérica turolense sería mi vínculo perenne con la Geología (Fig. 2).

Toda investigación comienza con la identificación de un problema conceptual o con el interrogante que nos plantea una observación. Hay dos estilos de comportamiento científico a la hora de afrontar ese primer estadio, que podríamos calificar, respectivamente, de extensivo e intensivo. Uno y otro no se contradicen –antes bien, se complementan–, pero sí activan resortes distintos de nuestra mente.

Hay quien despliega desde el inicio una imaginación desbordante para concebir todo tipo de problemas, tanto a partir de la observación del mundo real como de conjeturas que sólo existen en su mente. Es el tipo de investigador creativo, capaz de abarcar múltiples campos, de darle la vuelta a los problemas y verlos desde ángulos nuevos. En Geología, cuando la investigación se globaliza a todos los niveles, cuando los recursos materiales para llevarla a cabo aumentan, y cuando la colaboración internacional entre equipos de investigación se potencia, esa pulsión permite abordar grandes proyectos sobre la cinemática de placas y la estructura profunda de la litosfera, o sobre las relaciones de interdependencia entre la evolución de los glaciares de la Antártida y el cambio climático.

Hay otros investigadores –u otros momentos en la trayectoria de cualquier investigador– en que la mente funciona de manera distinta, menos imaginativa pero más concienzuda. Cuando se afronta con entusiasmo un enigma geológico, cuando con pasión se formulan y contrastan hipótesis, cuando se experimenta el placer de construir modelos que nos ayudan a comprender mejor la realidad, el investigador no puede rendirse al constatar el carácter parcial y efímero de sus conclusiones. Continuará haciéndose nuevas preguntas, ideará líneas de trabajo alternativas en busca de nuevas evidencias, incluso volviendo una y otra vez sobre los mismos afloramientos o las mismas muestras ante la sospecha de que aún queda en ellos información por escrutar.

A esto le llamamos ahora *revisitar*: revisar los datos, las regiones, los problemas. . . Aquellas medidas que conservamos en el cuaderno de campo y que no cuadraban con los modelos que estaban en vigor cuando las tomamos; aquel afloramiento que nos inquietaba y del que siempre pasábamos de largo, o que habíamos ignorado con la coartada de que no era representativo; aquellas láminas delgadas que llevaban años en el fondo de un cajón y que no se avenían con la descripción litológica estandarizada. . . Todo ello es susceptible de ser revisitado. Un error científico mayúsculo es creer que una zona en la que se ha hecho un estudio geológico, por detallado que sea, queda ya caracterizada para siempre, que no

puede depararnos más sorpresas. La experiencia muestra que existen zonas ricas y fértiles que pueden ser revisitadas múltiples veces sin llegar a agotarse.

En Xert (Castellón), en el año 2018, tuve ocasión de participar en un homenaje que el pueblo ofrecía a Joseph Canérot, uno de aquellos ilustres geólogos franceses que impulsaron hace cinco o seis décadas el moderno conocimiento de la Cordillera Ibérica. En el acto central pudimos reunirnos cuatro generaciones de investigadores que habíamos trabajado en la región del Maestrazgo y que habíamos hecho allí nuestras tesis doctorales en los años 60-70 (el propio Canérot), en los 80 (yo mismo), en los 90 (Ana Rosa Soria) y en el siglo actual (Marina Nebot) (Canérot, 1974; Simón, 1982; Soria, 1997; Nebot, 2016). Constatamos en aquel encuentro que algunos problemas tectónicos y paleogeográficos habían sido abordados por todos nosotros de forma recurrente. La investigación había funcionado en el Maestrazgo como un martillo pilón que, concentrando su energía en un espacio concreto y percutiendo en él de forma repetida, terminaba por derribar un muro de desconocimiento.

## 5. Mis rincones

En mi vida de investigador he practicado ampliamente la táctica de visitar; he ido y regresado de forma recurrente a unos pocos temas y zonas que siempre me han cautivado. Señalo los más notables:

- (1) La superposición de pliegues flexurales (Fig. 3a). En 1977, en mi trabajo de campo de tercer curso de la Licenciatura, abordé la descripción e interpretación de los magníficos ejemplos de pliegues flexurales superpuestos que hay en la cobertera mesozoica de la zona de Aliaga. Incluí esos ejemplos y otros del norte de la Cordillera Ibérica en mi Tesis de Licenciatura (Simón, 1979). En 1998 rehíce y mejoré su cartografía para la guía del Parque Geológico de Aliaga (Simón *et al.*, 1998). Tiempo después los revisité y, pasados casi treinta años desde que con esas estructuras me iniciase en la investigación, decidí por fin publicarlos en revistas internacionales (Simón, 2004, 2005). Tuve incluso la osadía de proponer una clasificación exhaustiva y sistemática que añadía los tipos de estructuras de superposición propias de los pliegues flexurales a la clasificación diseñada por Ramsay (1967) para pliegues pasivos.
- (2) La reconstrucción de campos de esfuerzos tectónicos a partir del análisis de estructuras frágiles (Fig. 3b,c,d). Es una línea de trabajo en la que me inicié de forma

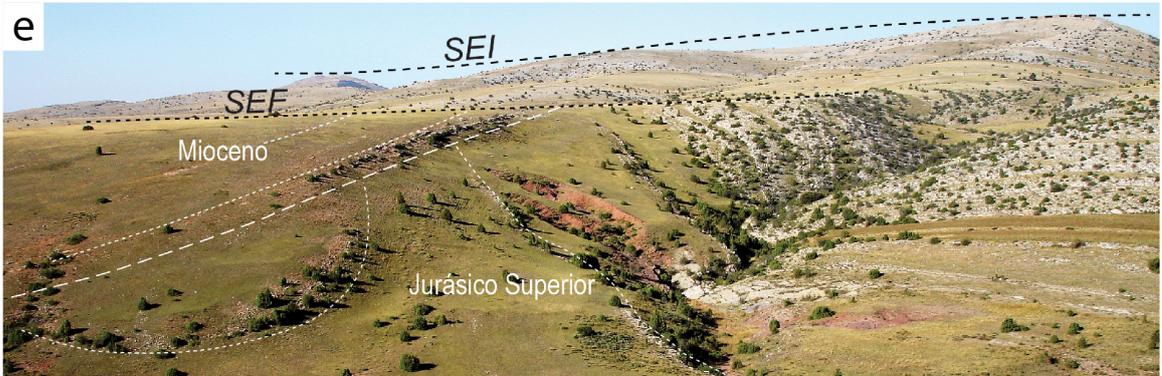
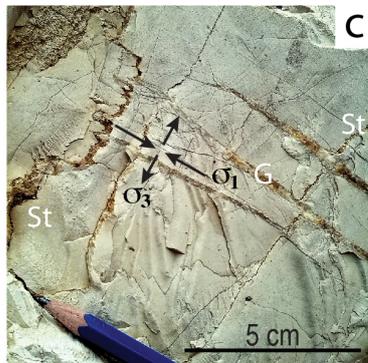
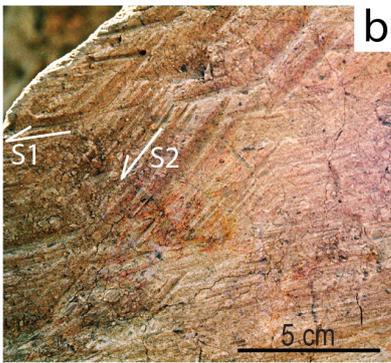
totalmente autodidacta durante mi Tesis Doctoral (Simón, 1982), sobre las bases metodológicas del análisis estructural frágil elaboradas por la escuela francesa (Mattaueu, Arthaud...), y que aprendí de la mano de Ramón Capote (Capote, 1975). Lo desarrollé a partir de los años 80, con algunas aportaciones conceptuales y metodológicas al análisis tanto de fallas con estrías como de diaclasas (Simón, 1986; Simón *et al.*, 1999; Arlegui y Simón, 2001), así como extensas contribuciones regionales (Arlegui *et al.*, 2005; Liesa y Simón, 2009). En la primera década de este siglo descubrí las nuevas posibilidades que ofrece el análisis de paleoesfuerzos a partir de lineaciones de disolución en cantos de conglomerados (Simón, 2007), un aspecto, como he avanzado antes, que he decidido retomar y aplicar ahora a la reconstrucción de los campos compresivos del Pirineo.

- (3) Las superficies de erosión neógenas de la Cordillera Ibérica (Fig. 3e). Mi concepción de estas superficies de aplanamiento ha estado condicionada durante décadas por la idea de una llamada *Superficie de Erosión Fundamental* que eclipsaba a todas las demás. Esa noción se enmarcaba en la herencia del modelo *davisiano* de evolución cíclica del relieve, y la adquirí durante mi época de estudiante leyendo a algunos padres de la geomorfología española (*e.g.* Solé Sabarís, 1978). Apliqué ese modelo en mi Tesis Doctoral y en trabajos posteriores (Simón, 1982; Peña *et al.*, 1984), elaborando mapas que hoy sé que eran simplificados, pero que resultaban extraordinariamente útiles para caracterizar la tectónica reciente de la región. Retuve mucho tiempo ese modelo, contra evidencias que otros autores exhibían en favor de un mayor número de superficies de aplanamiento, hasta que hace tres años revisité el problema con una perspectiva más abierta y con la determinación de afrontar el estudio foto-geológico con mayor meticulosidad. Honestamente, he tenido que reconocer que he permanecido varias décadas muy despistado: hay en la Cordillera Ibérica una asombrosa multiplicidad de superficies de erosión que se escalonan durante el Neógeno. Los resultados parciales van mostrando que la hasta ahora ‘exclusiva’ *Superficie de Erosión Fundamental* se desdobra al menos en tres subniveles (Simón-Porcar *et al.*, 2019). Los resultados regionales globales probablemente revelarán que las edades y el contexto genético de esos niveles de aplanamiento no son tan dispares como otros autores han sugerido (*e.g.* Casas y Cortés, 2002; Gracia *et al.*, 2003), pero no me cabe ninguna duda de que su número es bastante mayor de lo que yo sospechaba hace años.

- (4) Las fallas activas de la Cordillera Ibérica (Fig. 3f,g). El caso más paradigmático es la

falla de Concud, una falla que, como explicaré más adelante, ‘no existía’ en los años 70, cuando yo era alumno de Licenciatura en el Colegio Universitario de Teruel. La estudié por vez primera en los 80 en un trabajo extenso y bien documentado, pero que sólo acerté a publicar en la revista *Teruel*, del Instituto de Estudios Turolenses (Simón, 1983). La redescubrí en 1989 en su afloramiento más expresivo, al que también me referiré más adelante, y sobre el que preparé una comunicación para la II Reunión del Cuaternario Ibérico (Simón y Soriano, 1993). La revisitó en 2005 (Simón *et al.*, 2005), cuando comencé a dirigir la Tesis Doctoral de Paloma Lafuente, dando comienzo así a un fértil periodo de investigaciones paleosismológicas. Esa falla que discurre a las puertas de Teruel, y que en la década de 1970 era totalmente inédita, ha resultado ser una de las fallas cuaternarias con un registro paleosísmico documentado más amplio de la Península Ibérica (Lafuente *et al.*, 2010, 2014; Simón *et al.*, 2016). Aunque no estén a la altura de la de Concud, otras fallas de la región (Teruel, Valdecebro, Sierra Palomera, Calamocha, Daroca) han evidenciado asimismo su notable actividad cuaternaria.

Figura 3: Mis rincones de investigar. (a) Anticlinal E-W superpuesto al anticlinal N-S de la Hoz Mala, en el Cretácico superior de Aliaga (Teruel). Observaciones a escala de afloramiento para la interpretación de paleoesfuerzos (modificado de Simón, 2019); (b) Estrías de falla superpuestas (S1, S2) en el Cretácico de Benicàssim (Castellón), registro de dos estados de esfuerzos sucesivos; (c) Sistema de juntas estilolíticas (St) y juntas de extensión (G) en Mozota (Zaragoza), coetáneas y coherentes con un mismo estado de esfuerzos compresivo ( $\sigma_1$ : eje de esfuerzo máximo;  $\sigma_3$ : eje de esfuerzo mínimo); (d): Dos familias de diaclasas ortogonales en el Barranco de Tudela (Navarra), que reflejan un intercambio de los ejes de esfuerzos  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . (e) Superficies de erosión en la vertiente oriental de la Sierra de El Pobo (Teruel); *SEI*: Superficie de Erosión Intramiocena; *SEF*: Superficie de Erosión Fundamental (según Simón-Porcar *et al.*, 2019). (f) Una de las superficies de ruptura de la falla de Concud (Teruel), que desplaza con componente normal una terraza fluvial de unos 15.000 años de edad –la apariencia de falla inversa es un efecto de la perspectiva del afloramiento– (Lafuente *et al.*, 2010). (g) Trabajos de paleosismología en una trinchera excavada en la falla de Valdecebro (Teruel).



## 6. El análisis de paleoesfuerzos: la madurez que no llega

El balance de todos los casos que he narrado no es homogéneo en cuanto al alcance y profundidad de los logros alcanzados. La historia de descubrimiento y redescubrimiento de las fallas activas ha sido una novela por entregas con final feliz. La de las superficies de erosión podría serlo también, adornada con la épica de la ‘caída del caballo’, del cambio de esquema mental al que, no sin dificultad, he aceptado someterme. La de los pliegues flexurales superpuestos es una historia truncada: tras sentirme muy ufano con mi propuesta de nueva clasificación y con la notoriedad de los ejemplos estudiados en la Cordillera Ibérica, he comprobado que ha recibido de la comunidad científica una atención meramente discreta –el trabajo de Simón (2004) tiene computadas 65 citas en *Google Scholar*, abril de 2020–. Apenas se han descrito ejemplos de este tipo de macroestructuras en el mundo –una veintena de publicaciones específicas recogidas por *Google Scholar* en las tres últimas décadas; *e.g.* Crespo-Blanc, 2007; Tian *et al.*, 2013–, y ningún caso comparable a los espectaculares pliegues de eje vertical (*pliegues serpenteantes*) de Aliaga. Suena paradójico que uno de los pocos en que ha querido verse una similitud con las estructuras de Aliaga haya sido descubierto ¡en Marte! (Anguita *et al.*, 2006). En definitiva: un tema ‘frío’ en el panorama investigador sobre los orógenos del planeta.

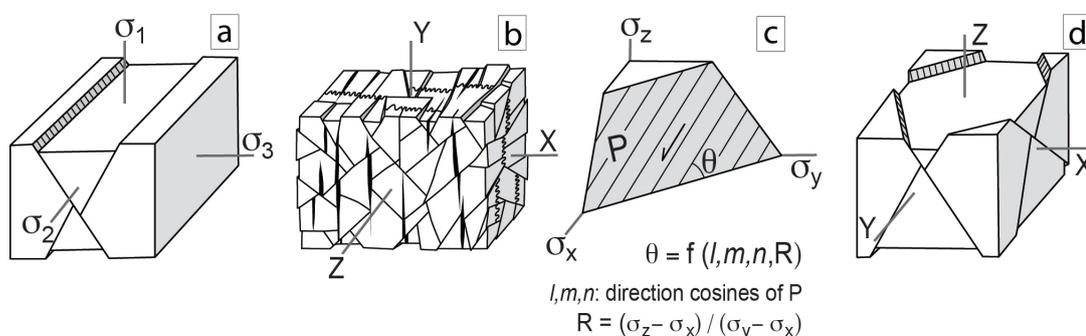


Figura 4: Bases teóricas para la interpretación de los ejes de esfuerzos ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) o de deformación ( $X, Y, Z$ ) a partir de datos de planos y estrías de falla. (a) Modelo de fallas conjugadas de Anderson (1951). (b) Modelo de *deformación global discontinua* (Arthaud, 1969; Mattauer, 1973). (c) Principio de Bott (1959). (d) Patrón de fallas ortorrómbico o *biconjugado* de Reches (1978). Según Simón (2019).

Pero más decepcionante ha sido mi experiencia con el análisis de paleoesfuerzos. Es ésta una rama de la Geología Estructural que no califico como abortada; puede considerarse que goza de buena salud a tenor del volumen de publicaciones que genera. Pero me produce pesadumbre constatar cómo se ha convertido en un campo de investigación en el que la innovación metodológica parece un fin en sí mismo. Proliferan un sinfín de

variantes que a veces son simplemente ‘cosméticas’, con impresionantes aparatos matemáticos detrás (*e.g.* Sato y Yamahi, 2006) pero sin ninguna ventaja manifiesta sobre otros métodos bien asentados y contrastados desde hace décadas, como los de Angelier (1979, 1984) o Etchecopar *et al.* (1981). Peor aún, en algunos casos los procedimientos que se aplican entran en contradicción con las bases conceptuales de la inversión de esfuerzos (Fig. 4). Se vulnera, por ejemplo, el principio de Bott (1959), que determina la dirección de movimiento en una falla a partir del estado de esfuerzos y de la orientación del plano. Un ejemplo es la confusión del eje  $P$  del mecanismo focal de un terremoto con el eje de esfuerzo máximo  $\sigma_1$ , que lleva a creer erróneamente que puede inferirse un estado tensional local a partir de un único mecanismo focal y, por tanto, de una sola falla (Fig. 5). Esta falacia alienta la reconstrucción, rápida y eficiente, de trayectorias de campos de esfuerzos actuales que son aparentemente precisas, pero ficticias (*e.g.* Olaiz *et al.*, 2009).

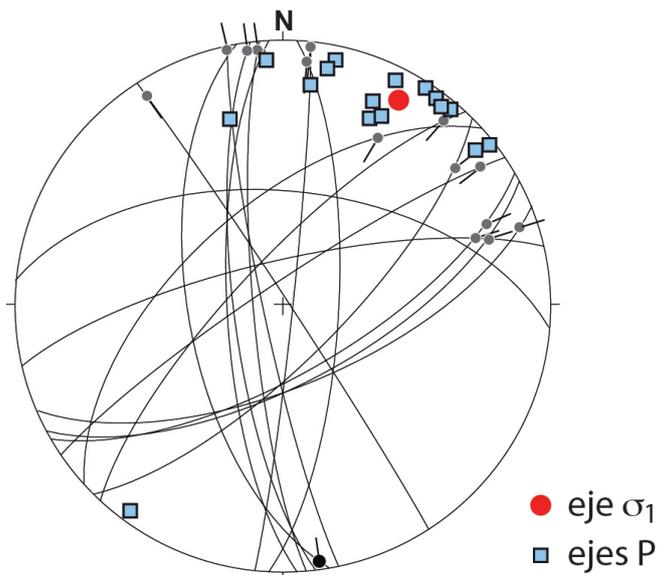


Figura 5: Diferencia entre el eje  $P$  que podría definirse para cada movimiento de falla individual (a  $45^\circ$  de la estría de falla) y el eje de máximo esfuerzo  $\sigma_1$  que se infiere de una muestra de fallas tomada en el Mioceno inferior de Ubierna (Burgos). Si aplicando un método robusto como el de Etchecopar *et al.* (1981), basado en el principio de Bott (1959), se obtiene un eje  $\sigma_1$  consistente para el conjunto de fallas significa que todas se movieron muy probablemente bajo ese único estado de esfuerzos, lo que hace espurio cualquier otro resultado obtenido de cada falla individual.

resultado publicado pudiera ser considerado fiable por el conjunto de la comunidad científica. Nada de esto se ha alcanzado. De la última media docena de artículos sobre el tema

Este frenesí –y desenfoque, en ocasiones– metodológico ha tenido dos consecuencias negativas. En primer lugar, se ha descuidado el desarrollo y la aplicación concienzuda del análisis de paleoesfuerzos a problemas tectónicos regionales. En segundo lugar, no se han llegado a consolidar entre la comunidad científica procedimientos consensuados y estandarizados para acometer el análisis de paleoesfuerzos y para evaluar la calidad de los resultados. A estas alturas, cabría esperar que los investigadores utilizarasen sólo dos o tres métodos bien fundamentados en el cuerpo teórico, que los requisitos y limitaciones para su aplicación fuesen conocidos y respetados por todos, y que cualquier

en los que he intervenido como revisor, la mayoría no cumplían los requisitos metodológicos exigibles; en alguno de ellos se expresaba incluso una especie de adanismo científico consistente en ignorar los principios teóricos más básicos y las referencias bibliográficas obligadas, y plantear así la investigación como si no hubiese un pasado.

Todo ello indica que estamos ante una disciplina científica que no ha alcanzado aún el deseable grado de madurez (Simón, 2019). La maduración de una ciencia, a juicio de Bunge (1972), es un proceso de crecimiento en volumen de su cuerpo de conocimiento, que exige un desarrollo tanto en extensión como en profundidad. “*El crecimiento en superficie es ciego y tiende a la parálisis por falta de ideas, mientras que el crecimiento exclusivamente en profundidad corre el riesgo de dar en una especulación incontrolada*”, sobre todo si no va acompañada de una estructuración lógica (Bunge, 1972, pp. 89-90). En el campo de estudio de los paleoesfuerzos, mi percepción es que no se ha producido el crecimiento deseable en extensión, esto es, un desarrollo suficiente de los trabajos regionales que pueda poner a prueba los métodos de análisis y contribuir a refinarlos desde la realidad de cada contexto tectónico. Por el contrario, se ha puesto mucha más energía en la proliferación de las propuestas metodológicas y en una artificiosa profundización en detalles conceptuales. Todo ello, sin una verdadera estructuración lógica, ha ido configurando un cuerpo teórico contradictorio y poco sólido.

No obstante, no quisiera caer en el derrotismo. Hay que reivindicar que el análisis de paleoesfuerzos no es una moda pasajera, sino una potente herramienta que ha contribuido a conocer mejor la dinámica de la litosfera; a vincular, con una perspectiva actualista, la cinemática de placas y los datos de mecanismos focales con los campos de esfuerzos antiguos registrados en las rocas; también, a establecer relaciones genéticas entre estructuras distanciadas entre sí centenares de kilómetros, que el análisis exclusivamente geométrico y cinemático nunca hubiera evidenciado.

## **7. Geología: on l'appelle ‘révolution permanente’?**

La trayectoria histórica del análisis de paleoesfuerzos y su aparente estancamiento antes de llegar al estadio de madurez revelan un problema común a muchos campos de estudio en Geología. Uno esperaría que la aplicación rigurosa del método hipotético-deductivo, asumiendo el criterio de falsación y el carácter provisional de toda ciencia (Popper, 1996), hiciera que los conceptos, los modelos y las teorías fueran sucediéndose unos a otros conforme van siendo sustituidos o afinados en una suerte de árbol filogenético.

En él podría haber ramas abortadas, caminos fallidos, es cierto. Pero también un tronco central que va creciendo y diversificándose de una forma jerarquizada y coherente. Uno esperaría que una interpretación fuese sustituida sólo tras un análisis crítico y un cierto consenso en la comunidad científica acerca de sus deficiencias frente a otra nueva.

Por supuesto, esa evolución no tiene por qué ser lineal y tranquila: de ahí que, de tanto en cuanto, se produzcan las *revoluciones científicas* que define Thomas Kuhn y que dan fin a los periodos de *ciencia normal*. Si el conocimiento científico fuese genuinamente acumulativo, las nuevas teorías serían simplemente de un nivel más elevado que las establecidas previamente, agrupando varias de éstas sin modificarlas en lo sustancial. Sin embargo, la mayoría de las teorías y modelos no son asimilados por otros que representan un nivel mayor de generalización, sino sustituidas tras conflictos más o menos traumáticos entre distintas escuelas y grupos científicos (Kuhn, 1975). Pero, si la ciencia consigue ser eficaz y fértil en sus aportaciones al conocimiento puro y aplicado, es en la medida en que avanza con sensatez en los periodos de ciencia normal. Son las épocas en que los científicos “*seleccionan regularmente problemas que pueden resolverse con técnicas conceptuales e instrumentales vecinas a las ya existentes*” (Kuhn, 1975, p. 155), en que los modelos y teorías se suceden sin sobresaltos porque los investigadores asumen tanto la aceptación como la refutación con deportividad.

Lakatos (1974, 1993) ve la historia de la ciencia con un perfil menos quebrado; más que una alternancia de periodos de ciencia normal y crisis revolucionarias, la caracterizaría una competencia constante entre *programas de investigación* rivales. Cada uno de éstos representa un conjunto de teorías sistematizado formalmente, con un núcleo duro estable en torno al cual se va construyendo un cinturón protector de teorías e hipótesis auxiliares. Alguno de esos programas puede ser dominante durante un cierto tiempo, pero su cinturón de hipótesis periféricas se halla en constante contrastación y reformulación –algo así como la *revolución permanente* que reivindicaban los trotskistas y cantaba Georges Moustaki en *Sans la nommer*–.

La Geología muestra una especial propensión a vivir en esa revolución permanente, en una agitación que la hace avanzar impulsada a veces por ocurrencias. Por supuesto, no se trata de menospreciar las hipótesis intuitivas, perfectamente lícitas incluso si han nacido por *generación espontánea* (Bunge, 1985, p. 272), y preferibles a las que, como propone algún autor (Bardsley, 1991), podrían generarse automáticamente mediante algoritmos de inteligencia artificial. El problema aparece cuando esas hipótesis tratan de sustraerse a la dialéctica de corroboración/refutación que caracteriza el método hipotético-deductivo, o

cuando la contrastación es débil y sesgada. La interpretación de un proceso o la simple identificación y clasificación de un hecho geológico se hacen a veces sin aplicar criterios diagnósticos transparentes. Se opta por una explicación u otra sin un balance ponderado de las evidencias a favor y en contra; muchas veces se hace por preferencias personales o de grupo, por fidelidad a una escuela de pensamiento, por estética o por moda. Ello propicia que, durante demasiado tiempo, un determinado campo científico mantenga una serie de divergencias y contradicciones conceptuales, terminológicas y metodológicas que impiden que se consoliden modelos y teorías consensuadas; en definitiva, que se alcance la madurez propia de los periodos de ciencia normal.

Volvamos de nuevo al caso del análisis de paleoesfuerzos. En terminología de Lakatos (1993, p. 146), ese campo no representaría un programa de investigación en progreso, puesto que su crecimiento teórico no se anticipa al crecimiento empírico ni trata de predecir hechos nuevos. Tampoco se encuentra en estado regresivo porque su crecimiento teórico se retrasa con respecto al crecimiento empírico. En realidad, (i) los estudios regionales siguen avanzando de forma muy limitada y no progresan en profundidad, ya que muchos de ellos se sirven de métodos que parten de bases protohistóricas (Simón, 2019), y (ii) los modelos teóricos y los métodos de análisis se recrean sobre sí mismos sin buscar ningún tipo de éxito empírico. Creo que Lakatos no catalogó este tipo de escenario; yo lo consideraría como un programa de investigación en el *limbo de la adolescencia*.

La Geología es reacia a la sistematización y a la adopción de estándares conceptuales y terminológicos. Sería comparable a la resistencia a la normalización que con frecuencia oponen las hablas locales dentro de un sistema lingüístico. En los apartados siguientes pondré algunos ejemplos en los campos de la sedimentología y la tectónica. En una y otra especialidad, no es infrecuente que uno o más eslabones de la cadena hipotético-deductiva desaparezcan en el discurso, y la balanza se desequilibre hacia el lado de la formulación de hipótesis. Una suerte de recreación imaginativa de las mismas florece en detrimento de la disciplina requerida para su contrastación y, en su caso, refutación. “*Audacia en el conjeturar, rigurosa prudencia al someter a contrastación las conjeturas*” es, para Bunge (1985, p. 29), la regla de oro del trabajo científico. Idear y formular hipótesis es grato y gratuito; es una actividad fuertemente vinculada a nuestro cerebro emocional y muchas veces surge de la inspiración de un instante. Definir de forma serena y clarividente inferencias contrastables vinculadas a esas hipótesis, diseñar un procedimiento de contrastación, ejecutarlo con rigor, y resolver honestamente si las evidencias la refuerzan o la refutan, requiere una disciplina y un trabajo más arduos. Además, exige al investigador el talante

y la humildad necesarios para aceptar, en su caso, la derrota de la hipótesis con la que ya se había encariñado.



Figura 6: Antonio Casas y Carlos Liesa (agachados), junto a José Luis Simón (en la horizontal), estudian un afloramiento de diaclasas en el Cenozoico de Fabara (Zaragoza), hacia 1993. Fotografía: Pedro Alfaro.

empírico necesario que las haga creíbles (recuérdese aquello del 10% de inspiración y 90% de transpiración; Fig. 6).

En la medida en que todo el proceso de aplicación del método hipotético-deductivo no sea completo y equilibrado, se corre el peligro de que determinados modelos e interpretaciones no se consoliden, y de que algunas controversias científicas se cierren en falso. Hay problemas de Geología Estructural que no se han resuelto ni superado: simplemente han quedado en una zona fría del panorama investigador, han perdido interés y se publica ya poco sobre ellos. Por el contrario, otros irrumpen de repente; se pone de actualidad un determinado modelo, éste empieza a funcionar como un nuevo pequeño paradigma y la mayoría de los investigadores sigue sus pasos, a menudo con la actitud acrítica propia de los neoconvertidos. Algunos problemas salen del foco de la investigación, no porque queden resueltos, sino porque se olvidan.

Estas peripecias no quedan recogidas a la postre en los manuales y libros de texto, en los que tienden a consolidarse cuerpos de conocimiento de apariencia compacta y robusta. Las controversias científicas se narran sólo en las obras de historia de la ciencia y, en versiones forzosamente muy simplificadas, en algunos textos divulgativos. Los conflictos, desde las grandes revoluciones científicas hasta los meros cambios de perspectiva, que-

En el campo de la estratigrafía y la sedimentología, las grandes interpretaciones paleogeográficas nacen de hipótesis más o menos ingeniosas, pero necesitan de un metódico trabajo de campo y laboratorio para ser contrastadas. Del mismo modo, los grandiosos e intangibles modelos tectónicos pueden nacer de simples conjeturas o intuiciones, pero necesitan recolectar cientos o miles de medidas de campo y laboratorio, de su tratamiento, análisis e interpretación, para obtener el soporte em-

dan así encubiertos. En las breves referencias que los libros de texto suelen hacer a los antecedentes de un tema, los científicos anteriores aparecen como si hubiesen trabajado sobre el mismo tipo de problemas y con los mismos conceptos y herramientas que se han consolidado tras la última revolución. Los libros de texto son “*vehículos pedagógicos para la perpetuación de la ciencia normal*”, que cuando cambian las normas y el lenguaje han de ser reescritos (Kuhn, 1975, p. 214).

## **8. Sedimentología: reinterpretando los paleoambientes**

Los manuales de Reineck y Singh (1975) y Selley (1976), entre otros, nos enseñaron una nueva forma de abordar la interpretación de los procesos y medios sedimentarios. Siendo estudiante de tercer curso de la Licenciatura, descubrí aquellas obras y las percibí como un soplo de aire fresco: por fin una ‘sedimentología de campo’, frente a la de Krumbein y Sloss (1969) basada casi exclusivamente en los tamices y la lupa binocular; por fin una sedimentología construida sobre la base del actualismo más genuino. Interpretar un point bar a partir de la geometría de los cuerpos de gravas y arenas y de su secuencia de estructuras sedimentarias era sin duda mucho más visual, e iba mucho más allá, que concluir simplemente que esos sedimentos eran fluviales por el redondeo de los cantos. Discernir, sopesar evidencias, descartar hipótesis, activar la mente a partir de las observaciones de campo –como mis profesores Pep Gisbert, en Teruel, y luego Alfredo Arche y Lorenzo Vilas, en la Universidad Complutense, me inculcaron– era mucho más apasionante que darle vueltas a las curvas granulométricas. Estas últimas representaban un loable intento de cuantificación, síntoma quizá del complejo de inferioridad de la Geología en ese terreno frente a otras ciencias. Sin embargo, el tiempo ha demostrado cómo la aproximación cualitativa y genuinamente geológica que caracteriza la moderna sedimentología es mucho más eficaz para la reconstrucción de paleoambientes.

Si se hubiese progresado en esa línea, cuatro décadas de perfeccionamiento de los modelos sedimentarios habrían conseguido que, a día de hoy, los manuales de sedimentología ofrecieran, si no claves dicotómicas análogas a las de la Botánica, sí al menos criterios diagnósticos que de una forma racional permitiesen a distintos investigadores llegar a interpretaciones similares a partir de los mismos datos. Pero esto no es así: a pesar del esfuerzo de muchos autores por construir un cuerpo teórico sistematizado, la divergencia de las interpretaciones sugiere que estamos ante otra disciplina menos madura también de lo que podría parecer. Los apartados de interpretación y discusión de muchos trabajos de sedimentología modernos parecen utilizar el argumento de autoridad como principal

criterio de certeza. El patrón suele ser: (i) descripción del sedimento; (ii) interpretación de facies y procesos sobre la base de su similitud con casos interpretados por otros autores, introduciendo las correspondientes citas bibliográficas como único argumento; (iii) reconstrucción del medio sedimentario a partir de las relaciones verticales y laterales entre las distintas facies. Era frecuente hasta hace poco que ese tipo de reconstrucción no llegase a integrar realmente datos 3D, si bien es cierto que los trabajos recientes sí se preocupan cada vez más por ello (*e.g.* Navarrete *et al.*, 2014; Sequero *et al.*, 2019). En cualquier caso, prevalece un formato de razonamiento de apariencia deductiva que conduce a identificar más que propiamente a interpretar la génesis de cada litofacies. Si a esto añadimos el afán de innovación que anima la investigación actual, su obligada conexión con ‘temas calientes’, se puede llegar a entender el carácter voluble de algunos modelos sedimentológicos.

Esta forma de discurso ha llevado, por ejemplo, a sorprendentes cambios en la interpretación paleoambiental de la Formación Utrillas. De un origen fluvial genérico (Aguilar *et al.*, 1971; Crespo *et al.*, 1979) se pasó a reconstruir un sistema fluvial con cursos entrelazados al NW y meandriiformes con amplias cuencas de inundación al SE (Pardo, 1979), que más tarde evolucionaría a medios de transición con influencia mareal (Pardo *et al.*, 1991). Rodríguez-López *et al.* (2008, 2009) afirmaron no haber podido “*reconocer en el campo las unidades litoestratigráficas expuestas por autores previos, los ambientes de sedimentación atribuidos y las relaciones espaciales establecidas por los mismos*”, lo que les obligó a abordar un nuevo estudio sedimentológico detallado en una zona cercana pero no coincidente con el estratotipo original. Ese estudio llevó a los autores a interpretar que los potentes tramos de areniscas de la Fm. Utrillas están formados por facies eólicas depositadas en un sistema desértico arenoso de tipo *erg*, que se extendía en un área de al menos 16.000 km<sup>2</sup>. Este radical cambio interpretativo no fue apremiado por una situación ineludible de falsación, ni el trabajo publicado recoge una ponderación crítica de distintas hipótesis en conflicto. La nueva interpretación que sustituye a la antigua se basa, es cierto, en una descripción detallada, una documentación gráfica sugestiva y unas citas bibliográficas convenientemente seleccionadas. Pero en las publicaciones no se considera necesario hacer un balance explícito de evidencias que permita comparar críticamente los posibles modelos. Por el contrario, dunas, interdunas y el resto de submedios son tratados de forma similar a como lo haría un texto de Geografía Física que describiese un desierto actual.

## 9. Tectónica: enfocando y reenfocando las estructuras

Las modas han existido también en el campo de la tectónica. Los años 60 y 70 del siglo pasado fueron tiempos convulsos: la Tectónica de Placas emerge y se consolida como nuevo paradigma, no sólo en Geodinámica, sino en todo el ámbito de las Ciencias de la Tierra. La teoría del Geosinclinal decae, y los distintos tipos de cuencas y orógenos pasan a ocupar su sitio dentro del nuevo marco conceptual. Ciñéndonos al campo de la Geología Estructural, se despliega una mirada múltiple sobre todos y cada uno de los contextos y estilos estructurales extensionales y contractivos. Se analizan e interpretan los diferentes tipos de deformaciones dúctiles y frágiles a todas las escalas y sus relaciones genéticas con otros hechos geológicos, desde la petrofábrica de las rocas metamórficas hasta la morfotectónica de los *rifts*.

En las décadas siguientes se van sucediendo etapas en que se presta una atención preferente a ciertos temas, algunos de los cuales más tarde declinan<sup>2</sup>. En los 60 y 70 tiene mucho tirón el estudio de las estructuras dúctiles, incluido el desarrollo de múltiples métodos de cuantificación de la elipse de deformación (Wellman, 1962; Lisle, 1977; Fry, 1979) y la reconstrucción de las sucesivas fases de plegamiento y foliaciones en zonas profundas de los orógenos (*e.g.*, en la Península Ibérica, Zwart, 1964; Santanach, 1972). Fueron fundamentales para ello las bases teóricas y metodológicas sentadas por Ramsay (1967) en aquel libro de cabecera que marcó el inicio de una época.

En la segunda mitad de los 70 se pone de moda la tectónica de desgarre: muchos sistemas de deformación se interpretan como cortejos de fallas secundarias asociados a fallas y zonas de cizalla transcurrentes de escala litosférica (*e.g.* Arthaud y Matte, 1975; Bousquet, 1979). Se recupera para ello el modelo de fracturación de Riedel (1929) en zonas de cizalla semifrágil, y se completa con una larga sucesión de modelos experimentales que desarrollan distintos aspectos del mismo (Tchalenko, 1970; Wilcox *et al.*, 1973; Fabre y Robert, 1975; Logan *et al.*, 1979).

En los 80 emerge, imparable, el interés por los cabalgamientos, su geometría, niveles

---

<sup>2</sup>Siento no haber podido cuantificar de alguna manera esa evolución. En principio, no debería de ser difícil hacer un análisis bibliométrico a partir de las bases de datos actuales. Sin embargo, he desistido desde el momento en que cualquier contabilidad comparativa que quiera hacerse de las publicaciones aparecidas cada año sobre un determinado tema choca contra una realidad incuestionable: el incremento exponencial de la producción científica global, en tectónica como en cualquier otra rama de la geología. Tal incremento exponencial se observa en casi cualquier subespecialidad o tema concreto que se analice, y frente a él las diferencias entre unos y otros acaba siendo poco significativas. La cronología esbozada en los párrafos anteriores refleja someramente etapas en las que determinados aspectos cobran interés y brío investigador, pero se constata cómo sobre cualquiera de ellos se continúa trabajando y el volumen anual de publicaciones crece de forma ininterrumpida.

de despegue, secuencias de desarrollo y pliegues asociados, con la valiosísima contribución de la modelización analógica. Las obras recopilatorias de McClay y Price (1981) y McClay (1992) recogen, respectivamente, el inicio y la consolidación de ese cuerpo de conocimiento. En medio, trabajos de referencia como los de Suppe (1983), Davis *et al.* (1983) o Butler (1987) van construyendo las bases conceptuales y metodológicas de este trascendental campo de estudio.

En los 80 y 90 aumenta el interés por la tectónica extensional, hasta entonces relegada a un segundo plano. El estudio de las cuencas extensionales, al igual que de los cabalgamientos y en menor medida de los desgarres, es incentivado por nuevas estrategias en la exploración de hidrocarburos y tiene de nuevo en la modelización analógica una valiosa herramienta de contrastación. Así, se definen patrones geométricos y cinemáticos de las cuencas que han tenido gran repercusión tanto en el plano teórico como en el aplicado (*e.g.* Gibbs, 1984; Coward *et al.*, 1987; Jackson y White, 1989; Genik, 1993). En las cordilleras alpinas se caracterizan con precisión las estructuras extensionales mesozoicas, y se destaca el papel de la inversión positiva de las mismas en la estructuración cenozoica (*e.g.*, en los Alpes: Coward *et al.*, 1991; en la Cordillera Ibérica: Casas, 1993; Guimerà *et al.*, 1995; Salas *et al.*, 2001; Liesa *et al.*, 2006). En los Alpes o las Béticas, muchos mantos de corrimiento son revisitados y reinterpretados como despegues extensionales (*e.g.* Froitzheim y Eberli, 1990; Aldaya *et al.*, 1991).

En el siglo actual surgen focos de atención que, aun no siendo estrictamente novedosos, sí experimentan un nuevo vigor. Yendo más allá de sus logros de mediados del siglo XX, son destacables las contribuciones del paleomagnetismo y la anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM) a la resolución de nuevos problemas tectónicos de muy diversas escalas, desde la cinemática de las macroestructuras hasta los mecanismos de desarrollo de las petrofábricas (*e.g.*, en la Península Ibérica: Platt *et al.*, 2003; Larrasoña *et al.*, 2004; Marcén *et al.*, 2018). Se recupera el interés por la tectónica salina, también vinculada desde hace décadas a la exploración de hidrocarburos, y últimamente convertida en llave maestra para reinterpretar la macroestructura de ciertas regiones (*e.g.* Santolaria *et al.*, 2014; Saura *et al.*, 2016; Martín-Martín *et al.*, 2017). Las evaporitas han sido siempre cabeza de turco para explicar ciertas anomalías estructurales. Pero, como bien advierte Carlos Liesa (comunicación personal), “*la sal condimenta perfectamente el plato de la tectónica, pero en muchos casos su exceso lo arruina y lo hace incomedible*”.

Se atribuye a Max Planck la afirmación de que una nueva verdad científica no triunfa por el convencimiento de sus oponentes, sino porque estos acaban muriendo y crece una

nueva generación que se familiariza con ella. Los científicos, como seres humanos que somos, nos resistimos a reconocer los errores. La resistencia al cambio, especialmente de quienes llevan toda una vida de *ciencia normal* comprometidos con un paradigma, es comprensible desde esa perspectiva psicológica y forma parte de la naturaleza misma de la investigación científica (Kuhn, 1975, p. 235). Sin embargo, esa inercia natural es superada en ocasiones por la atracción que produce la novedad; así lo sugiere, al menos, el panorama científico mudable que acabo de dibujar.

## **10. *Los cabalgamientos siempre se ponen de perfil***

¿Significan esos cambios periódicos en los temas ‘calientes’ que aquellos otros cuya investigación se abandona o ralentiza quedan ya resueltos? Ciertamente no; más bien se dan por amortizados, dejan de interesar. Hay que tener en cuenta que, tal como argumenta Kuhn (1975, p. 71), “*una de las cosas que adquiere una comunidad científica con un paradigma es un criterio para seleccionar problemas (...) que animará a sus miembros a tratar de resolver. Otras cuestiones, incluyendo algunas que han sido corrientes con anterioridad, se rechazan como metafísicas, como correspondientes a la competencia de otra disciplina o, a veces, como demasiado problemáticas para justificar el tiempo empleado en ellas*”.

El estudio de los sistemas de cabalgamientos es un buen ejemplo de esta atención selectiva a los problemas. Durante décadas, dicho estudio se ha centrado en la reconstrucción de la geometría y la evolución cinemática en secciones verticales. La visión 2D que proporciona un corte geológico es sin duda muy expresiva de la estructura, pero no constituye una descripción completa. El estudio integral de los cabalgamientos exigiría inicialmente una reconstrucción 3D –mediante mapas, cortes seriados, sísmica tridimensional–, luego ‘4D’ –incluyendo la dimensión temporal, la reconstrucción evolutiva de la estructura–, y finalmente ‘5D’ –añadiendo la interpretación dinámica, la relación entre su actividad y los campos de esfuerzos–. Estamos lejos de alcanzar ese desiderátum: se avanza cada vez más en reconstrucción 3D, pero aún no es una rutina; se construyen modelos cinemáticos o evolutivos, pero casi exclusivamente en corte (aproximación 2D+1D); se dedica muchísima menos atención a la cinemática en 3D (aproximación 3D+1D), que requiere la reconstrucción de las direcciones de transporte, algo que muy pocos trabajos abordaron en detalle en décadas pasadas (*e.g.* Platt *et al.*, 1988), y son casi inexistentes los trabajos que relacionan cabalgamientos con campos de esfuerzos regionales (*e.g.* Casas y Simón, 1992). Como botón de muestra, en una obra de referencia como es la recopilación de McClay

(1992) se contabilizan 243 figuras independientes que muestran estructuras en sección vertical –87 cortes reales, 9 cortes de modelos analógicos y 147 cortes esquemáticos, incluidos los que aparecen en el glosario final–, frente a 80 mapas –45 reales, 5 de modelos analógicos y 30 esquemáticos; ninguno en el glosario final– y sólo 26 bloques diagrama –7, 2 y 17; 11 en el glosario final–. Sólo 13 del total de 349 figuras muestran o se relacionan de alguna forma con las direcciones de desplazamiento de los cabalgamientos, y sólo dos de los 36 artículos recopilados tiene relación indirecta con los esfuerzos –ninguno con campos de esfuerzos regionales, sino con aspectos mecánicos de carácter teórico: Jamison (1992); Willet (1992)–.

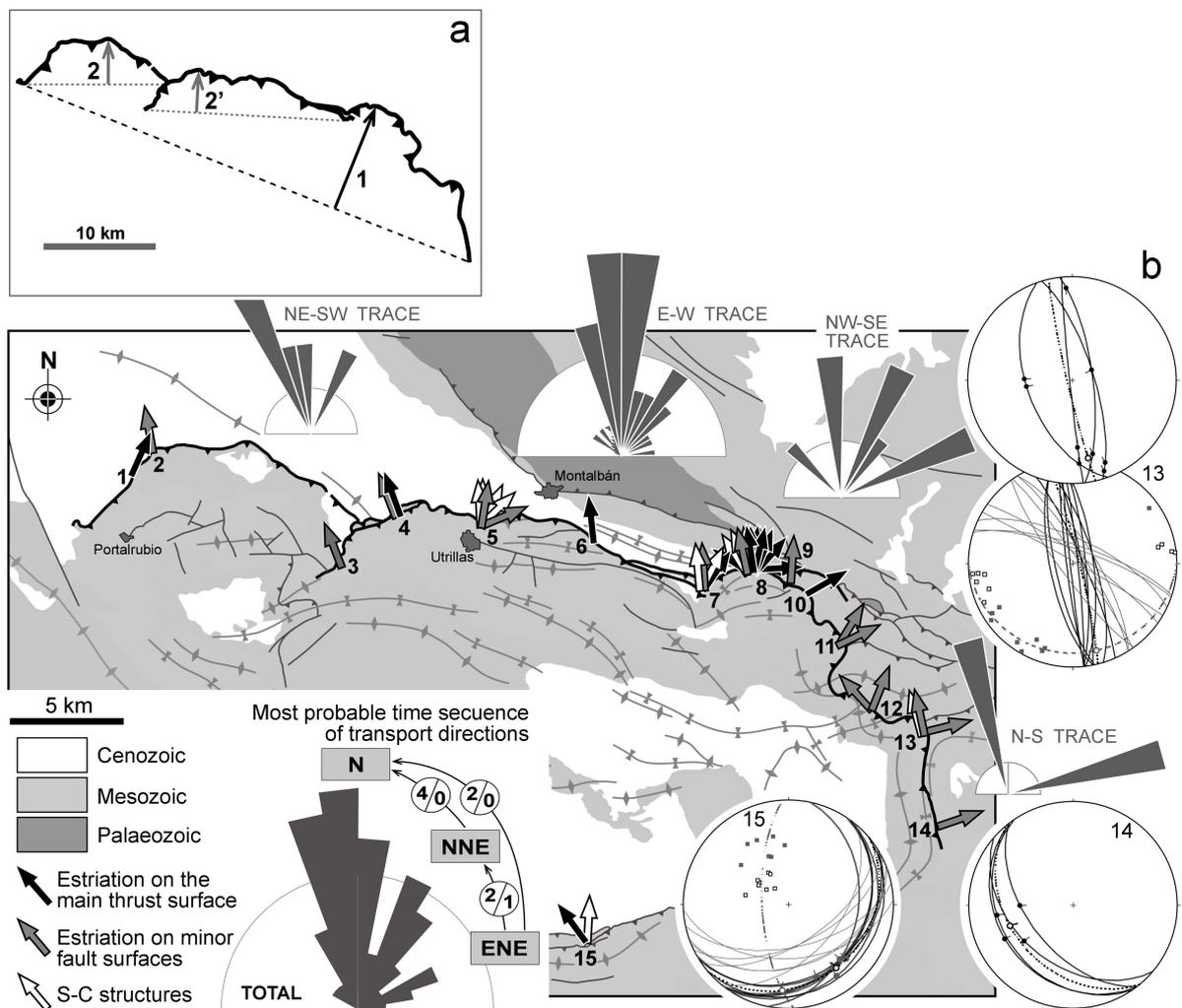


Figura 7: Reconstrucción cinemática ('4D') del cabalgamiento de Utrillas. (a) Procedimiento simplificado utilizando la *regla del arco y la flecha*, con indicación de las posibles opciones de aplicación y la consiguiente incertidumbre. (b) Direcciones de transporte obtenidas a partir de la medición de indicadores cinemáticos (fundamentalmente, estructuras *S - C* y estrías), tratamiento estadístico y análisis de las relaciones cronológicas entre ellas (modificada de Simón y Liesa, 2011).

Resulta curioso, en particular, que se haya puesto tan poco empeño en precisar la dirección de transporte de los cabalgamientos, cuyo conocimiento es clave para elegir la orientación adecuada de aquellos cortes estructurales que han de ser compensados y restituidos. Un tratado meticuloso como el de Marshak y Mitra (1988, p. 312) afirma que en tal caso “*es crítico que la dirección del corte esté a menos de 5° de la dirección de transporte*”. Sin embargo, para obtener ese dato tan crucial los autores se limitan a indicar que “*en general, la dirección de transporte es perpendicular a la dirección de los cabalgamientos mayores*”, una aproximación tan simplista como la que proporciona la denominada *regla del arco y la flecha* (Elliott, 1976) (Fig. 7a). Ninguna de las dos reglas tiene en cuenta la evidencia de que muchos cabalgamientos son resultado de la inversión positiva de fallas normales previas, y que los esfuerzos compresivos responsables de la reactivación habrán impuesto, de acuerdo con el principio de Bott (1959), direcciones de movimiento que no guardan una relación fija con la orientación de las superficies de rotura. A la vez que se adoptan acríticamente procedimientos tan incautos, las evidencias directas del vector de movimiento que aportan los indicadores cinemáticos sobre el propio plano de falla o en sus inmediaciones (estrías de fricción, estructuras  $S - C$ ) son minusvaloradas porque “*a menudo tales direcciones están dispersas y pueden ser engañosas*” (Marshak y Mitra, 1988, p. 312). Pegas metodológicas tan poco justificadas recuerdan la observación apuntada por Kuhn (1975) acerca de los investigadores que consideran no justificado el tiempo empleado en la recogida y análisis de datos complejos y prefieren desviar la atención a otros problemas. Afortunadamente, la situación descrita respecto al estudio de los cabalgamientos tiende a cambiar, particularmente en la Península Ibérica: (i) los movimientos *out-of-plane* y las rotaciones de eje vertical comienzan a ser tenidos en cuenta (*e.g.* Pueyo-Anchuela *et al.*, 2012); (ii) algunos trabajos bien documentados, con un volumen importante de datos mesoestructurales, han empezado a descifrar la cinemática de grandes cabalgamientos del Pirineo, como el de Gavarnie (Marcén *et al.*, 2018), o de la Cordillera Ibérica, como los de Utrillas (Simón y Liesa, 2011; Fig. 7) y Daroca (Casas *et al.*, 2018).

## **11. La terminología gremial de las zonas de cizalla**

Argumenta Thomas Kuhn que los paradigmas, y las revoluciones que los desmontan, existen no sólo a escala de toda una ciencia, sino también a escala de cualquiera de sus especialidades y subespecialidades. Es por ello que algunas de esas revoluciones son experimentadas por grupos científicos relativamente pequeños; para ellos representan cambios copernicanos, mientras que para otros pasan completamente desapercibidas. Ello es con-

secuencia de que la ciencia “*parece más bien una estructura desvincijada con muy poca coherencia entre sus diversas partes*” (Kuhn, 1975, pp. 88-89).

Quienes nos dedicamos a la Geología Estructural tenemos ocasión de vivir esa realidad desde dentro. La forma en que se usan muchos términos y muchos conceptos relativos a las estructuras tectónicas sugiere que el análisis estructural es un campo separado de la tectónica; que, dentro del primero, el análisis a escala mesoestructural es una ciencia diferente del análisis a escala microestructural, y que el análisis de la deformación dúctil es un mundo ajeno al de la deformación frágil.

Voy a poner un ejemplo que creo significativo: la terminología de las estructuras menores dentro de las zonas de cizalla. En la literatura se citan una serie de anisotropías planares, empezando por la foliación *S* que se desarrolla oblicua a una banda de cizalla dúctil, y que es fácilmente explicable de acuerdo con el modelo cinemático de la cizalla simple –planos paralelos al plano de aplastamiento, perpendiculares al eje *Z* del elipsoide de deformación; *e.g.* Ramsay (1967)–. En muchas zonas de cizalla aparecen también: planos *C*, paralelos a la cizalla y que se combinan con la foliación *S* para dar las estructuras *S – C*; planos *C'*, sintéticos con los *C* y que forman un cierto ángulo con éstos en sentido opuesto a los planos *S*; planos *P*, oblicuos a los *C* en el mismo sentido que lo están los *S*, pero generalmente a un ángulo menor; planos *Y*, *D*... (Fig. 8). Todos ellos son citados con naturalidad en trabajos recientes de análisis meso- y microestructural de zonas de cizalla dúctil (*e.g.* Marcén *et al.*, 2017, 2018), pero no siempre se identifican con rigor ni se citan las referencias a los trabajos originales en que se definió cada uno. El origen y significado cinemático o mecánico de algunos de esos planos se conoce sólo a medias; en otros casos, la terminología que se emplea para ellos no crea sino confusión. Veámoslo caso a caso:

- Las estructuras *S – C* fueron definidas por vez primera por Berthé *et al.* (1979b) y posteriormente puntualizadas por Simpson y Schmid (1983) y por Lister y Snoke (1984), todo ello en el ámbito estricto de las zonas de cizalla dúctil (Fig. 8a,b). Posteriormente se han descrito estructuras con la misma geometría y significado cinemático, pero desarrolladas a mayor escala, en niveles estructurales someros y por mecanismos menos dúctiles: por presión-disolución, las superficies *S*, y por rotura frágil, los planos *C* (Fig. 8c).
- Los planos *P*, en cambio, fueron identificados inicialmente en zonas de cizalla semi-frágil por Skempton (1966), a partir de modelos experimentales que desarrollaban los clásicos experimentos en los que Riedel (1929) definió las fracturas *R* y *R'* (Fig. 8d).

Skempton describió las fracturas  $P$  como planos que aparecían en estadios avanzados de la cizalla simple, vinculadas a los extremos de fracturas  $R$  y sirviendo de conexión entre estas últimas (Fig. 8e). Esa relación sugiere que las  $P$  serían, de alguna manera, subsidiarias respecto a las  $R$ , como demuestran: (i) sus relaciones geométricas con las fracturas  $R$ , y (ii) su desarrollo posterior a éstas y posterior, también, al momento en que el experimento alcanza la resistencia de pico del material (Tchalenko, 1968, 1970; Bartlett *et al.*, 1981). Para ser explicadas en el marco del mismo proceso de cizalla simple sería necesario considerar las perturbaciones de esfuerzos que se producirían a pequeña escala en los relevos entre fracturas  $R$ . Estos son relevos compresivos en los que las trayectorias de  $\sigma_1$  tienden a hacerse paralelas a las fracturas y harían que cualquier rotura de cizalla secundaria apareciese desviada respecto a ellas, al modo de las *splay faults* de Anderson (1951).

- Más adelante, planos  $P$ , con ese mismo nombre, son identificados en otros contextos diferentes e interpretados de modo muy dispar:

- (i) Rutter *et al.* (1986) los asimilan en la práctica a planos de aplastamiento  $S$ . Aunque reconocen que originalmente los  $P$  fueron definidos como planos de fractura, su orientación y el hecho de que en rocas deformadas dúctilmente contengan orientaciones preferentes de filosilicatos llevan a los autores a asimilarlos explícitamente a los planos  $S$  de Berthé *et al.* (1979b). De ahí pasan a ser llamados ‘foliación  $P$ ’ (*P foliation*; Fig. 8f), un término híbrido y equívoco que comienza a ser utilizado en la literatura posterior.
- (ii) Swanson (1988) redefine los planos de cizalla  $P$  en un contexto de zonas de relevo compresivo entre fallas, en el que la cizalla simple se combina con una componente de acortamiento paralela a la cizalla y una extensión perpendicular a la misma (*cizalla supersimple*). Asociadas a ellas estarían sus correspondientes fracturas conjugadas  $P'$ , formando un sistema que mecánicamente ya no tendría nada que ver con las fracturas  $P$  definidas originalmente. Swanson (1988) sugiere que el sistema  $P-P'$  se inspira en los experimentos de Tchalenko (1968), pero lo cierto es que este último autor, que muestra de forma detallada y coherente las fracturas  $P$ , no menciona en absoluto las  $P'$ . Del mismo modo, en un régimen de *cizalla subsimple* (cizalla simple + acortamiento perpendicular al plano de cizalla), Swanson (1988) señala que podrían aparecer fracturas conjugadas  $X$  y  $X'$  a ángulos mayores respecto a la dirección de cizalla. El autor indica que las  $X$  fueron ya definidas en un trabajo anterior (Logan *et al.*,

1979), lo cual es cierto (Fig. 8g). No obstante, los planos  $X$  están pobremente documentados en los casos reales y los autores reconocen que no han podido identificar en ellos el sentido de movimiento. Sobre esa escueta base, la hipótesis de que esas fracturas hayan de tener, además, su correspondiente familia conjugada resulta totalmente gratuita.

- Un uso igual de equívoco es el de los llamados planos  $Y$ . Swanson (1988) da a entender que fueron definidos también por Logan *et al.* (1979) (Fig. 8g), si bien estos autores los atribuyen a Mandl *et al.* (1977). Consisten básicamente en planos paralelos a la cizalla principal a través de los cuales se canaliza la totalidad del desplazamiento. Esto ocurre en estadios avanzados de la deformación en los que ya ha dejado de ser una zona de cizalla semifrágil y ha pasado a constituir una cizalla frágil *s.s.*, es decir, una falla.
- Los planos  $C'$  son descritos inicialmente por Berthé *et al.* (1979a) en la zona de cizallamiento sur-armoricana (Bretaña), y por Iglesias y Choukroune (1980) en zonas de cizalla de desgarre en los granitos de Galicia. En uno y otro caso, los autores dan noticia de esos planos en términos literalmente idénticos: en un cierto estadio de la cizalla “*aparece una tercera familia de planos ( $C'$ ) que forman un ángulo de  $30^\circ$  con los planos  $C$* ” (Fig. 8h). Con esta frase lacónica se sustanciaba la definición de una estructura que luego reconocerán y citarán multitud de investigadores en todo el mundo, sin que los autores sospechasen ni de lejos en ese momento la repercusión de su propuesta –las  $C'$  no son citadas ni en el título, ni en el resumen, ni en las conclusiones de ninguno de los dos trabajos–. Son Passchier y Trouw (1998, pp. 112-115) quienes hacen una descripción y una discusión más pormenorizadas. Aunque reconocen que su génesis “*es comprendida sólo parcialmente*”, los autores atribuyen los planos  $C'$  a estadios tardíos de la cizalla, una vez se pasa a condiciones más frágiles. Los hacen equivaler a los planos de *crenulación extensional* de Platt y Vissers (1980), pero al mismo tiempo sugieren una explicación mecánica –implícita en su fig. 5.17– que las asimilaría a fracturas  $R$  de Riedel –con el matiz de que podrían formar un ángulo algo mayor respecto a la cizalla si existe una componente de acortamiento perpendicular a ésta que incrementa por encima de  $45^\circ$  el ángulo del eje  $\sigma_1$  local–. Rutter *et al.* (1986) habían apuntado la misma respuesta, al asimilar también la *crenulación extensional* a “*cizallas  $R1$  de Riedel en la terminología de Logan et al. (1979)*”, en suma, a fracturas  $R$ .

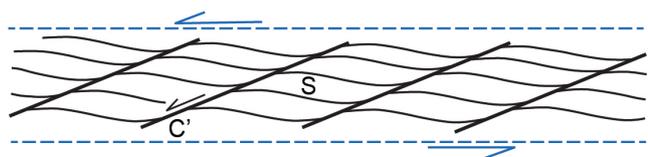
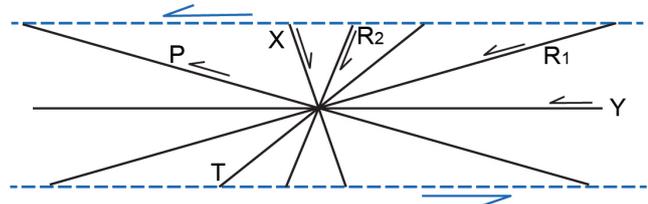
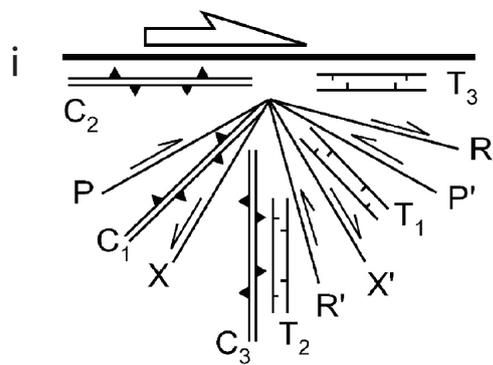
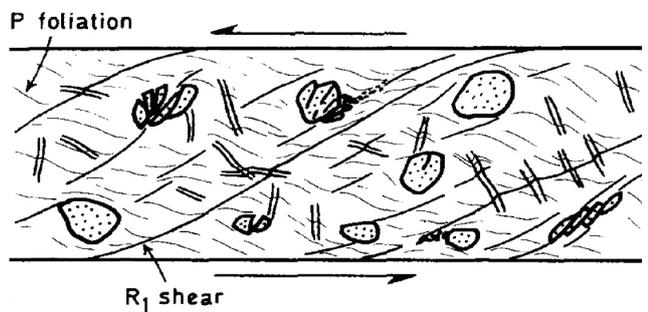
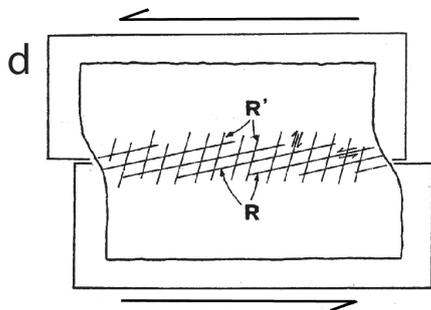
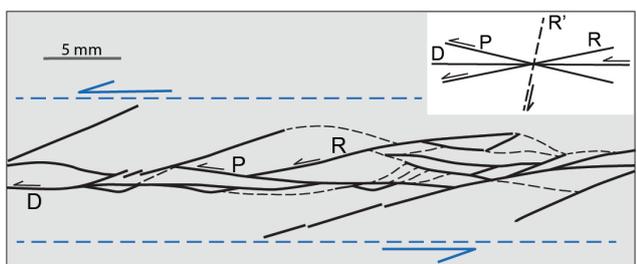
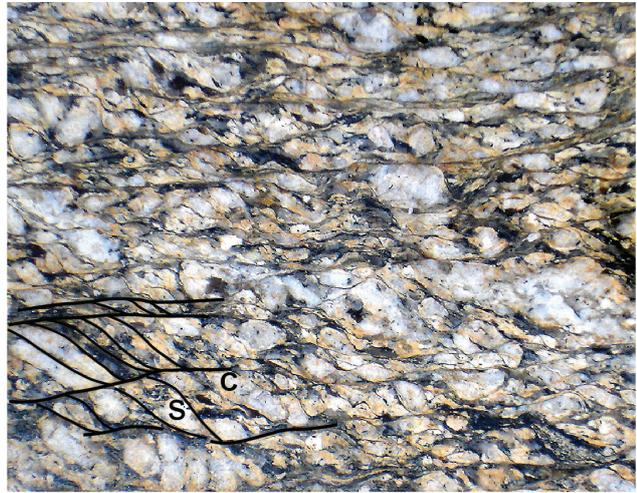
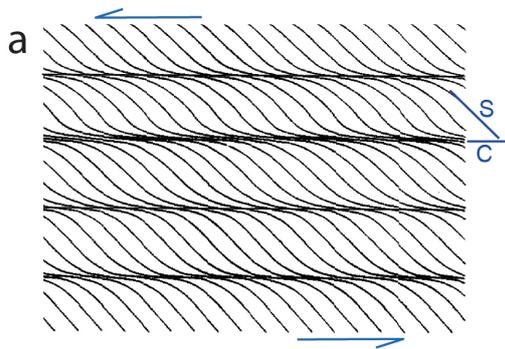


Figura 8: La dispar terminología de las estructuras secundarias en zonas de cizalla dúctiles y semifrágiles. (a) Modelo geométrico de las estructuras  $S - C$  (según Lister y Snoke, 1984). (b) Estructura  $S - C$  en un gneiss varisco de Bretaña (Francia). (c) Estructura  $S - C$  en calizas cretácicas contiguas al cabalgamiento de la Cantera, en Camarillas (Teruel). (d) Esquema del clásico experimento de Riedel (1929). (e) Esquema de la fracturación experimental obtenida por Tchalenko (1968), incluidas las fracturas  $P$ . (f) Esquema geométrico-conceptual de la foliación  $P$ , según Rutter *et al.* (1986). (g) Terminología de fracturas propuesta por Logan *et al.* (1979). (h) Modelo geométrico de una estructura  $C' - S$ , equivalente a la *crenulación extensional* (modificado de Passchier y Trouw, 1998). (i) Despliegue de estructuras, reales e hipotéticas, resultantes de la mezcla confusa de modelos de cizalla simple, *cizalla subsimple* y *cizalla supersimple* (según Storti *et al.*, 2006).

El uso de términos propios de las discontinuidades en zonas de cizalla semifrágil por parte de los especialistas en zonas de cizalla dúctil supone admitir implícitamente que el comportamiento de la roca ha pasado –generalmente en estadios tardíos de la deformación– a ser menos dúctil. Este hecho debería aproximar ambos campos de análisis y obligar a establecer una terminología unificada para conceptos que son comunes, de manera que resulte inequívoca e inteligible para todo el mundo. Lejos de ello, la herencia que representa el modelo clásico de Riedel –estrictamente hablando, el sistema formado sólo por las fracturas  $R$  y  $R'$ – es manejada con poca fortuna. Unos autores (Logan *et al.*, 1979) mutan sus siglas a  $R1$  y  $R2$  (Fig. 8g). Otros insertan erróneamente en el mismo modelo los planos  $P$  e  $Y$ , atribuyéndolos a una “*cizalla simple de tipo Riedel*” o a las “*zonas de cizalla de Riedel*” (Storti *et al.*, 2006), y acaban componiendo un *totum revolutum* (Fig. 8i) que poco tiene que ver con el modelo original. Al propio tiempo, y paradójicamente, planos que geométrica y cinemáticamente sí pueden considerarse planos  $R$  de Riedel (1929) reciben nombres diversos, como planos  $C'$  (Berthé *et al.*, 1979a) o *crenulación extensional* (Platt y Vissers, 1980). Con la misma incongruencia terminológica, se designan como planos  $Y$  a los que Tchalenko (1968) había denominado  $D$ , y que en realidad son los mismos planos  $C$ . Ignorando su incongruencia cinemática y dinámica, se postula la existencia de unos supuestos planos  $P'$  (Swanson, 1988) que tendrían una orientación similar a los  $R$  y sentido de movimiento contrario (!) (Fig. 8i). En definitiva, cada especialidad, e incluso cada autor o cada grupo, acaba con frecuencia utilizando su propia jerga, sin preocuparse por conservar y potenciar el acervo común con otras especialidades y abriendo en ocasiones brechas léxicas y conceptuales que hacen difícil el diálogo, no sólo interdisciplinar, sino incluso intradisciplinar. Estamos lejos de la economía del lenguaje científico que es propia las disciplinas maduras y operativas.

El problema no es sólo la ambigüedad terminológica y conceptual; es más profundo. Aproximaciones desde distintas escuelas proponen modelos que no son sino generalizacio-

nes empíricas sin ninguna sistematicidad –conocimiento aislado, según Bunge (1985, p. 386)–. No buscan conectarse de una forma robusta a teorías de la deformación de mayor nivel (cinemática de la cizalla simple, ley de rotura de Mohr-Coulomb. . . ), sino que ponen el acento precisamente en la especificidad, incluso en la anécdota, que caracteriza cada lote de observaciones en su contexto tectónico particular. Las generalizaciones se formulan con la intención de que sirvan sólo en una parcela geológica concreta, y surgen reticencias cuando se quieren extender fuera de su contexto original. En ese sentido la Geología se comporta muchas veces como una ‘ciencia federal’: las leyes que se aplican en un estado dejan de regir cuando cruzamos la frontera. Por ejemplo, las estructuras  $S - C$  fueron descritas por vez primera en zonas de cizalla desarrolladas en condiciones profundas. Aunque la reología sea bien distinta, su patrón geométrico y cinemático es idéntico cuando se desarrollan en rocas de cobertera en condiciones mucho menos dúctiles –en bandas asociadas, por ejemplo, a superficies de cabalgamiento; *e.g.* Simón y Liesa (2011) (Fig. 8c)–. Todas ellas responden, por tanto, a un modelo más general, independiente del comportamiento reológico y de los mecanismos íntimos de la deformación (Rutter *et al.*, 1986), que tiene su explicación en las leyes cinemáticas de la cizalla simple y en las relaciones, bien fundadas también en leyes petrológicas/termodinámicas y cristalográficas, entre elipsoide de deformación y fábricas tectónicas. Negar la denominación de estructuras  $S - C$  a aquéllas que no son puramente dúctiles –para algunos, que no comportan deformación intracristalina visible al microscopio– supone perder la oportunidad de unificar y formalizar el conocimiento en un nivel de teorización superior. Ese modelo general que aglutinase todos los casos descritos merecería ser considerado, a mi juicio, en la categoría de teoría geológica, o constituir la expresión visible que diera sentido concreto a las formulaciones abstractas de una *teoría de la deformación interna en zonas de cizalla simple*. En él, por supuesto, quedaría unificada (Fig. 9) toda esa terminología actualmente dispersa y contradictoria.

Mario Bunge, quien constata que la Geología es una de las ciencias más escasas en leyes, advierte de que “*cuanto antes empiece el trabajo teórico en un campo, tanto más fácil será el desarrollo del conocimiento en él. (...) En cambio, si se va retrasando la construcción de teorías, por no sentirse su necesidad o por temor a los fracasos, ocupará su lugar un confuso conjunto de creencias y un haz de procedimientos ciegos*” (Bunge, 1985, pp. 358 y 421). La Geología tiene una marcada componente de ciencia histórica, es decir, presta más atención a los rasgos contingentes de la Tierra en momentos concretos –escenarios y eventos singulares; productos finales, en definitiva (Hagner, 1970)– que a procesos inmanentes sujetos a leyes universales. Para algunos pensadores, esa es la genuina condición de la Geología, que le impide (i) elaborar hipótesis falsables, (ii) tener

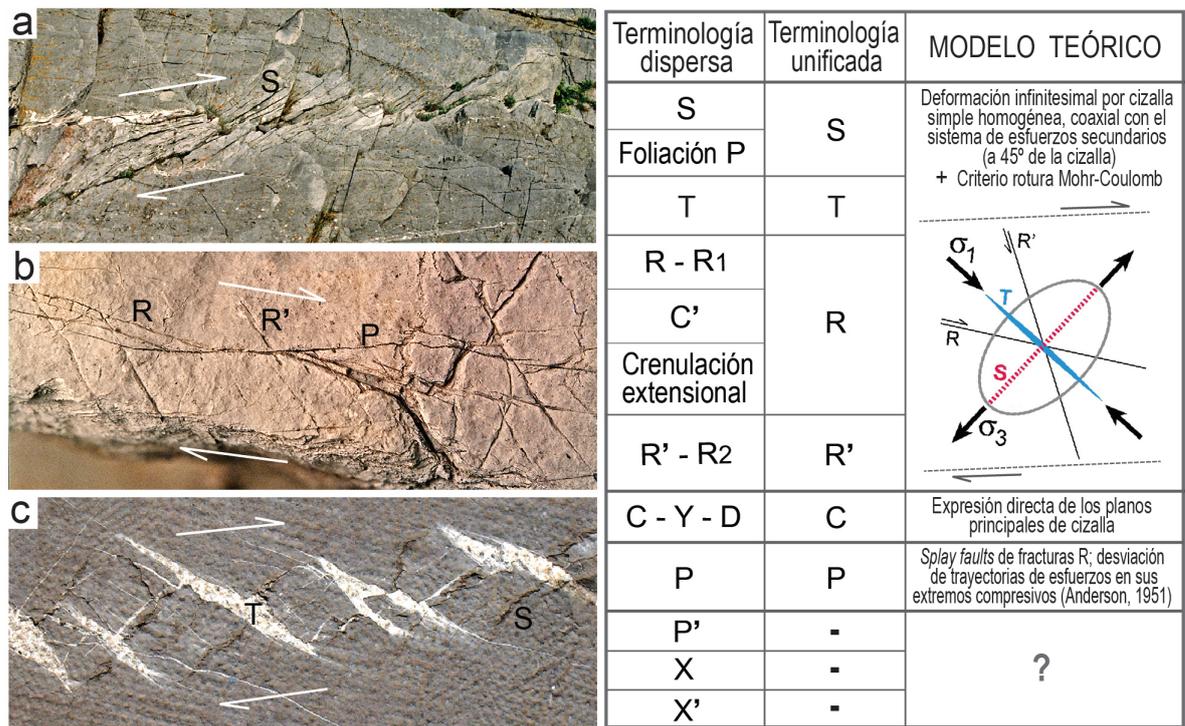


Figura 9: Izquierda: modalidades básicas de zonas de cizalla y principales estructuras secundarias. (a) Zona de cizalla dúctil en calizas carboníferas del sur de Gales (Gran Bretaña). (b) Zona de cizalla semifrágil con fracturas de Riedel en calizas jurásicas de Vistabella del Maestrat (Castellón). (c) Zona de cizalla semifrágil con juntas de extensión y juntas estilolíticas en calizas del muro perimetral del campus universitario de Pza. San Francisco, Zaragoza. Derecha: Propuesta teórica y terminológica unificada que, a la luz de la cinemática de cizalla simple y el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, puede explicar todas las estructuras a excepción de los planos *P*.

teorías propias, más allá de las que aplica tomadas de la Física o la Química, o (iii) formular predicciones en sentido estricto (*e.g.* Krumbein y Sloss, 1969; Simpson, 1970; Pratt, 2016). Es cierto que la eficacia de las ciencias históricas depende menos de su capacidad de confirmación/refutación y de predicción –generalmente vinculada a experimentos donde se testan hipótesis en condiciones de laboratorio controladas y reproducibles– que de su poder explicativo (Cleland, 2013). Pero aunque la Geología tenga ese carácter, su estatus científico no es inferior al de las ciencias puramente experimentales. Ya Karl Popper se encargó de aclararlo a quienes habían interpretado sesgadamente sus ideas: “*Algunas personas piensan que he denegado el carácter científico a las ciencias históricas como la Paleontología o la Evolución. (...) Esto es un error (...) es como pensar que las ciencias históricas son incontrastables puesto que describen eventos únicos. Sin embargo, (...) pueden ser testadas mediante predicciones y retrodicciones derivadas de ellos*” (Popper, 1980). Aunque en la naturaleza hay objetos y hechos que no se pueden manipular ni

controlarse experimentalmente –en todo caso, esperar a que ocurran–, pueden ser objeto igualmente de predicción/retrodicción, algo que en definitiva es una cuestión lógica, no cronológica (Moharir, 1993). Por consiguiente, nada debería impedir que la Geología recuperase su empeño en formular leyes científicas propias, esto es, enunciados universales que expresen regularidades de aquellos fenómenos terrestres que se consideran, al menos desde el punto de vista epistemológico, irreductibles (Watson, 1969). Y digo recuperar porque en su época de nacimiento y consolidación como ciencia (siglos XVII a XIX) sí mostró ese impulso, que luego relajó conforme se acumulaba conocimiento, conforme el retrato del Planeta se iba complicando, y crecía la necesidad de recurrir a la Física y la Química para comprenderlo en toda su profundidad (Bradley, 1970).

Las carencias y disfunciones que acabo de resaltar evidencian cómo la Geología, y la ciencia en general, muestran limitaciones de las que conviene tener conciencia. Cabe distinguir tres tipos de limitaciones, que voy a analizar en los siguientes apartados: (i) limitaciones intrínsecas, puramente epistemológicas, (ii) limitaciones derivadas de su carácter de construcción social e histórica, y (iii) limitaciones extrínsecas, derivadas de su instrumentalización por los poderes políticos y económicos.

## 12. “*Las gafas de ver...*” (una aproximación a la observación y contrastación selectivas)

¿Pueden ser  $2 + 2 = 5$ ? ¿Pueden ser  $2 + 2 = 3$ ? Depende. Si nos movemos en el mundo de los números naturales, ambas sumas son imposibles: todos sabemos que  $2 + 2 = 4$ . Pero en el universo de los números reales, con los que expresamos la mayor parte de las variables físicas –aquellas que son variables continuas–, la cosa cambia. El truco está en el redondeo, ese fenómeno que, según se dice, proporcionó pingües beneficios a comerciantes y a algún contable imaginativo cuando pasamos de la peseta al euro. Si redondeamos a la unidad:  $2,4 \approx 2$ ;  $2,4 + 2,4 = 4,8 \approx 5 \Rightarrow “\approx 2” + “\approx 2” = “\approx 5”$ . Del mismo modo:  $1,7 \approx 2$ ;  $1,7 + 1,7 = 3,4 \approx 3 \Rightarrow “\approx 2” + “\approx 2” = “\approx 3”$ . Es decir,  $2 + 2$  puede ser igual a 3, 4 ó 5, según el caso. Añadamos los decimales que queramos. Siempre que discreticemos una variable continua –algo inevitable cuando usamos cualquier instrumento de medida, que tiene una precisión limitada– nos vamos a encontrar con ese tipo de desajustes.

¿Qué valor de una variable es, pues, significativo en un contexto dado: ¿2? ¿1,7? ¿1,68? ¿1,677?... Las Matemáticas y la Física, santuario de la exactitud y la objetividad del conocimiento científico, tienen ahí una zona de penumbra. Si esto ocurre a la hora de definir los datos sobre los que estas ciencias fundamentan sus razonamientos, qué no podrá

sucedan cuando los datos no son numéricos sino cualitativos, cuando son, por ejemplo, imágenes, y tan complejos y heterogéneos como los que maneja la Geología. Esto nos lleva a una de las grandes cuestiones epistemológicas en nuestra ciencia: la representatividad del dato, la significancia del resultado. La realidad no habla por sí misma, sino a través de los filtros conceptuales, procedimentales y tecnológicos que los científicos hemos ido activando, con gran esfuerzo, a lo largo de siglos. Por ello, no hay una única ecuación posible que relacione observaciones con interpretaciones. Nótese que no se trata de la *fiabilidad* de la observación (que daremos por garantizada), sino de *qué observamos* y qué no, o qué datos disponibles seleccionamos y cuáles no para construir nuestros modelos y teorías.

¿Cuántas veces lo que parecían verdades inmutables sucumben bajo el impacto, no de nuevos datos, sino de nuevas formas de mirar y valorar los datos de siempre, de nexos hallados entre objetos que antes parecían no tener ninguna relación? “*Las evidencias no nacen, se hacen: sólo una teoría puede transformar un dato en una evidencia. (...) Los hechos que se registran y describen normalmente en la ciencia ... se seleccionan de entre una montaña de hechos, y esta selección, no menos que la descripción misma, se realiza con la ayuda de hipótesis y teorías*” (Bunge, 1985, pp. 533 y 615). Boladeras (1982) cita el término geológico ‘falla normal’ como ejemplo de designación de lo que trivialmente podría considerarse un hecho observacional, y que como tal aparece en el apartado descriptivo de muchos trabajos. Sin embargo, el concepto tiene una componente teórica, y su uso una carga interpretativa, que lo dejan fuera del alcance de un observador no experto. El seguimiento de la traza, la reconstrucción visual 3D que permite identificar el bloque superior y el inferior, el reconocimiento de los marcadores desplazados en uno y otro, el filtrado de todos estos elementos respecto a rasgos del relieve que puedan interferir... son operaciones con significado específico dentro del universo conceptual geológico pero, ciertamente, ajenas a las percepciones sensoriales comunes.

Y precisamente de una falla normal trata el caso que voy a narrar, y que ejemplifica esto a la perfección. Desde 2005, nuestro equipo –perteneciente al grupo de investigación Geotrasfer– está estudiando las fallas extensionales activas de la región de Teruel y del Jiloca. Mediante técnicas paleosismológicas (Fig. 3g) hemos llegado a reconstruir con cierto detalle y fiabilidad la historia de movimientos de la falla de Concud en los últimos 75.000 años. Los resultados indican que la falla se ha desplazado en ese tiempo algo más de 20 m, a razón de 0,29 mm/año (Lafuente *et al.*, 2010, 2014; Simón *et al.*, 2016). La evaluación de su potencial sismogénico (Simón *et al.*, 2014) llevó a modificar el

proyecto de construcción del nuevo hospital de Teruel. Aunque la Norma de Construcción Sismorresistente no obligaba en principio, las autoridades tomaron conciencia en 2015 de que debía aplicarse el principio de precaución y consideraron que era oportuno introducir medidas de construcción antisísmica.

En 1975, cuando comencé la carrera de Geología en el Colegio Universitario de Teruel, esta situación hubiera parecido ciencia ficción. Hablar de fallas cuaternarias en esta región de la Cordillera Ibérica era en aquel momento poco menos que anatema. Se dudaba incluso de que en Teruel hubiese fallas post-miocenas, o al menos ese era el mensaje que se nos transmitía a los estudiantes. Los desplazamientos de unidades neógenas eran notorios porque, gracias a las edades que proporcionan los numerosos yacimientos de mamíferos de la zona, se sabía, por ejemplo, que las calizas lacustres que coronan el relieve tabular de Los Mansuetos son las mismas que hay bajo el casco urbano de la capital, a 240 m menos de altitud. Hoy sabemos que la causa es una falla N-S que atraviesa la parte oriental de ese casco urbano (falla de Teruel). En los años 70, para explicar esas deformaciones, se buscaban hipótesis alternativas –deslizamientos, subsidencia kárstica– que evitasen afrontar la evidencia de una tectónica extensional en toda regla.

No fue hasta 1980 cuando tímidamente se apuntó la posibilidad de que la falla de Calamocha tuviese actividad post-pleistocena, o de que el desnivel de una terraza del Alfambra fuese consecuencia de deformaciones cuaternarias (Moissenet, 1980). Y fue al año siguiente cuando se describieron por vez primera afloramientos inequívocos de fallas cuaternarias a las que se atribuía origen tectónico (Rubielos de la Cérida: Capote *et al.*, 1981; Teruel-Alfambra: Peña *et al.*, 1981). A partir de ahí, las referencias a la tectónica cuaternaria en las fosas de Teruel se suceden ya sin interrupción en la literatura regional.

¿Se debió este cambio de ‘paradigma’ al hallazgo de nuevos y sorprendentes datos desconocidos unos pocos años antes? Básicamente, no. Volviendo de nuevo a la falla de Concud, es cierto que parte de la información disponible hoy procede de trincheras de investigación abiertas *ex novo* o de taludes artificiales que no existían años atrás. Pero, curiosamente, el afloramiento que mejor evidencia la actividad cuaternaria de esa falla, con condiciones de observación inmejorables, existe ¡desde 1907! Es una trinchera del antiguo ferrocarril minero de Ojos Negros-Sagunto situada junto a la estación de Los Baños, 3 km al norte de Teruel. En ella queda expuesto de forma espectacular el contacto mecánico entre calizas miocenas y sedimentos aluviales inequívocamente cuaternarios (Fig. 10). Por tanto, que la falla de Concud no fuese considerada ya formalmente como falla cuaternaria en la década de 1970 sólo puede obedecer a prejuicios interpretativos o a la adopción de



**Figura 10:** El espectacular afloramiento de la falla de Concud en la trinchera de la Vía Verde (antiguo ferrocarril minero de Ojos Negros-Sagunto) junto a la estación de Los Baños. A la derecha: margocalizas lacustres del Turoliense (Mioceno superior); a la izquierda: gravas y limos fluviales y aluviales del Pleistoceno medio.

la táctica del avestruz ante un dato palmario que se oponía a las ideas vigentes.

Ese afloramiento de la falla de Concud ‘no existía’ en 1976 y 1977, cuando se visitó la zona de Los Baños en las ediciones X y XI del Curso de Geología Práctica para hacer observaciones sedimentológicas en los materiales de la Terraza Media del Alfambra, desplazada por ese accidente tectónico casi 40 m. Tan invisible permanecía el afloramiento, de tanto oscurantismo se había rodeado, que años más tarde, aun después de que las fallas cuaternarias de la región ‘salieran del armario’, seguía sin hablarse de él. Moissenet (1982) no llega a mencionarlo, a pesar de mostrar evidencias indirectas de la actividad de la falla de Concud. Tampoco lo hago yo mismo por aquel entonces (Simón, 1983), aun cuando exhibo cortes explícitos de la falla en otros puntos de su traza. Me consta, por mis notas de campo, que el 2-3-83 tomé datos del plano de rotura en un escarpe morfológico que hay a sólo 600 m de distancia hacia el NW, y también de fracturas que afectan a la Terraza Media a 150 m hacia el NE. Sin embargo, no vi –al menos, no describí– la trinchera de Los Baños; algún escrúpulo atávico me impedía reconocer la evidencia que encerraba. Portaba en mi mochila una lupa con la que de niño conseguí ver cosas que los demás no veían; también usaba ya gafas para la miopía, pero parece obvio que ni una ni otras servían para ver esa falla. . Poco después, Moissenet (1983, 1985) da la primera noticia explícita sobre el afloramiento en cuestión y estima el desplazamiento que produce la falla en la terraza fluvial, datada ya entonces en el Pleistoceno medio. Por fin, en 1989,

conseguí personalmente aprobar aquella asignatura pendiente cuando Asunción Soriano y yo hicimos un estudio detallado que presentamos a la II Reunión del Cuaternario Ibérico.

¿Es posible que ningún geólogo hubiese visto antes ese espectacular ejemplo de falla extensional? ¿Nadie había reconocido en las arenas de la Fm. Utrillas los rasgos que hace unos pocos años fueron interpretados como evidencias de depósito eólico (Rodríguez-López *et al.*, 2008, 2009)? Demos un salto al Pirineo: ¿a nadie había sorprendido ver calizas marinas someras intercaladas en la serie turbidítica de la cuenca de Jaca-Pamplona antes de que, tímidamente, se apuntara su posible origen resedimentado (Soler y Puigdefàbregas, 1970) y, tiempo después, se interpretasen como *megacapas* desprendidas por gravedad de la plataforma en el seno de una megaturbidita (Johns *et al.*, 1981)? Sí, todo eso había sido ya observado, pero no se consideró significativo. Nadie entendió que fuesen hechos relevantes para construir sobre ellos una interpretación, porque ninguna observación es relevante mientras no se ponga en el contexto de una teoría o un modelo determinados.

Dado que las interpretaciones tienden a estar de acuerdo con el paradigma dominante, cualquier observación que lo contradiga tiende a escamotearse. Como señala Bunge (1985, p. 728), los detalles perceptuales irrelevantes resultan tan molestos en la ciencia como en la vida cotidiana, de lo que se deriva una comprensible tendencia psicológica a pasarlos por alto. En ciencias que tratan de objetos complejos, como es la Geología, resulta relativamente sencillo negar la evidencia sin que la comunidad científica lo penalice: “no es significativo”, “es una anomalía local”, “ni caso. . .”. Es tanta y tan variada la información disponible que no es traumático, no ‘canta’, que se seleccione unas partes en detrimento de otras.

Negar las evidencias que ponen en dificultad los modelos vigentes, actuar como si esos modelos fuesen impecables e inmarcesibles, es un tipo de actitud que alimenta el argumentario de filósofos críticos como Feyerabend (1974), quien, desde su radical anarquismo epistemológico, trata de combatir el núcleo mismo de la credibilidad de la ciencia. Una escuela científica puede seguir defendiendo durante décadas un determinado modelo basado en los hechos A+B, mientras otra lo considera obsoleto y defiende un modelo alternativo basado en C+D. Simplemente, ninguna ha conseguido falsar el modelo de la otra sobre la base de observaciones que todos consideren significativas, y así la pugna entre ellas puede prolongarse *sine die*. Por eso la aplicación del método hipotético-deductivo no resulta tan directa y simple como pudiera parecer: no es tan sencillo como decir “hipótesis refutada y a otra cosa”.

La mayoría de las hipótesis se testan, en realidad, no desde la dicotomía verdade-

ro/falso, sino tras una ponderación de las evidencias a favor y en contra (Kuhn, 1975, p. 226). Tampoco se testan de forma aislada, sino en el contexto de otras teorías y supuestos. Si todos y cada uno de los fracasos en el ajuste entre la teoría y los datos hubieran de abocar al rechazo automático de la primera –actitud que Lakatos califica de *falsacionismo ingenuo*–, no quedaría ninguna. Se perderían, de hecho, teorías con gran poder explicativo que durante un tiempo son capaces de navegar sobre un fondo de instancias refutadoras, hasta que ulteriores desarrollos teóricos o mejoras en los sistemas de observación y medida las ponen a salvo. En realidad, las teorías acaban considerándose por parejas o grupos y sometándose a una comparación probabilista que deja a una en ventaja, al menos temporalmente, respecto a las demás. Una teoría no es simplemente falsada por un contraejemplo de observación, sino sustituida por otra teoría mejor –*falsacionismo sofisticado* de Lakatos (1974, 1993)–.

El problema es que la comparación y elección entre hipótesis o teorías se hace, además de enfrentándolas a los datos empíricos (A+B+C+D), con el concurso de valores y criterios personales que llevan a cada cual a ponderar de modo diferente la simplicidad, la compatibilidad o la plausibilidad de cada alternativa. En este punto hay acuerdo entre la mayoría de los pensadores, tanto si se trata de optar entre modelos aislados o entre paradigmas en conflicto. “*La construcción de modelos es una actividad creadora que pone en juego los conocimientos, las preferencias y aun la pasión intelectual del constructor*” (Bunge, 1972, p. 24). En el momento de comparar teorías “*lo que queda son sólo juicios estéticos, juicios de gusto, y nuestros propios deseos subjetivos*” (Feyerabend, 1974, p. 133). “*La competencia entre paradigmas no es el tipo de batalla que pueda resolverse con pruebas. (...) La transferencia de la aceptación de un paradigma a otro es una experiencia de conversión*” (Kuhn, 1975, pp. 230 y 235).

### **13. La ciencia como construcción social**

El trabajo científico es esencialmente humano y nace en continuidad con nuestra actividad intelectual ordinaria (Wartofsky, 1973, p. 44). Como tarea humana, tiene todas las limitaciones de nuestra condición de humanos. Como construcción colectiva, tiene todas las limitaciones propias de la dinámica social, de los avatares que se derivan de intereses y fuerzas han pugnado en torno a ella a lo largo de la historia.

El funcionamiento del método hipotético-deductivo, tal como académicamente se entiende, puede parecer que garantiza plenamente la adquisición del mejor conocimiento

posible a partir de los datos empíricos de que se dispone en cada momento. Un conocimiento, si no objetivo –esto es una quimera–, sí *intersubjetivo* (Wartofsky, 1973, p. 262), construido con contenidos cosensibles (Ziman, 1981, pp. 18-19). Está basado en el sentido común, en la racionalidad compartida, y es tan eficaz como los avances tecnológicos subsecuentes han demostrado. Ese panorama tan tranquilizador tiene el soporte teórico del modelo social de ciencia acuñado por Robert K. Merton, que no es sino el retrato de cómo la comunidad científica en su conjunto va construyendo el conocimiento de forma amigable y fecunda (Merton, 1977). Se basa para ello en unos principios básicos (universalidad, transparencia, honestidad) y se sirve de unos instrumentos, reglas de juego y mecanismos de control internos (publicaciones, congresos abiertos, revisión por pares) que hacen que toda la colectividad funcione como un organismo vivo, como una maquinaria eficaz y vigorosa.

Pero, si todo operase así, las revoluciones científicas de Thomas Kuhn no habrían existido. ¿Por qué se reconoce en una ciencia determinada un paradigma al que los investigadores se aferran durante décadas o siglos, que sirve de esqueleto a todas sus teorías y modelos, y hasta condiciona qué parcelas de la realidad observamos y cómo lo hacemos? ¿Por qué ese paradigma se resiste a ser demolido y sustituido, y cuando lo hace supone un colapso del que quedan vencedores y vencidos? Seguramente tenga mucho que ver con algunas contradicciones en las que, como humanos, incurrimos: compartimos un sentido común, pero tenemos también nuestro amor propio; nos entregamos a la misión de científicos con generosidad, pero competimos como atletas por reconocimientos y recompensas.

Todo ello lleva a ciertas disfunciones en el proceso de construcción social de la ciencia, que se aparta así de la estructura normativa dibujada por Merton (1977): (a) Tendemos a defender nuestras interpretaciones y nos resistimos con uñas y dientes a su fracaso; las publicaciones necesitan siempre resultados positivos: prácticamente nadie se atreve a publicar aquéllos que acaban en una refutación de la hipótesis. (b) La afinidad y la solidaridad interna del grupo de investigación o de la escuela de pensamiento importan mucho, lo que produce un sesgo en nuestra capacidad de enjuiciar los resultados de la investigación: casi siempre somos más tolerantes y constructivos con las interpretaciones propias o del grupo, y más críticos o quisquillosos con las ajenas. (c) El prestigio individual depende en gran medida de la fortaleza del grupo; los grupos grandes tienden a crecer y captar más recursos, en un proceso retroalimentado (*efecto Mateo*; Merton, 1977, pp. 554-578) que les lleva a ganar el respeto de los editores y de los colegas, y a la larga a imponer sus interpretaciones sobre las de grupos pequeños. (d) Los sistemas de reconocimiento público

hacen que el éxito investigador se mida por indicadores objetivos (número e impacto de las publicaciones) que son susceptibles de ciertas distorsiones; los resultados novedosos y espectaculares puede acabar imponiéndose al rigor y la calidad intrínseca de la investigación; la selección de las citas bibliográficas puede guiarse por afinidades de grupo, cuando no por acuerdos de reciprocidad. (e) La investigación financiada por compañías privadas da lugar muchas veces a resultados sometidos a patente y secreto industrial, que se sustraen por tanto del acervo de conocimiento universalmente compartido.

El grado de sectarismo que impregna en la práctica la ciencia hace que los investigadores más veteranos adeptos al paradigma vigente tengan fuertemente inhibida su capacidad crítica e imaginativa. En ese contexto, las revoluciones suelen ser fruto de la ‘desvergüenza’ de una generación joven de científicos, menos comprometidos con los parámetros establecidos, que se empodera en un momento dado y desencadena el cambio. O de investigadores que atraviesan las fronteras entre disciplinas y observan la realidad desde un punto de vista inédito, sin preconcepciones (Ziman, 1981). Un buen ejemplo es el de los geofísicos que supieron leer el paleomagnetismo de la corteza oceánica, vencer los prejuicios de muchos geólogos hacia la teoría de la Deriva Continental de Wegener, y alumbrar el paradigma de la Tectónica de Placas.

#### **14. La instrumentalización del conocimiento: el cientifismo bajo sospecha**

La eclosión del saber científico en los siglos XVI-XVII llegó asociada a un concepto antropocéntrico del mundo que legitimaba nuestro dominio sobre la naturaleza. La equiparación entre ciencia y poder, presente ya en el pensamiento de Descartes o Bacon, se materializa cuando la máquina de vapor, la revolución industrial del XIX y la revolución tecnológica del XX ensanchan las puertas del conocimiento y del progreso de la Humanidad. También cuando, al amparo del complejo militar-industrial que posibilita la expansión colonial y capitalista de Europa, se inicia la explotación de los recursos del Planeta y un crecimiento económico desenfrenado. Pero el conocimiento y sus aplicaciones no han avanzado de forma homogénea y coherente. La tecnología, en algunos casos, se nos ha ido literalmente de las manos. Hemos creído que todo lo que habíamos aprendido a hacer gracias a los avances científicos era obligatorio aplicarlo; que todo sirve para progresar, para empujar el futuro, y que sólo por ello es necesariamente bueno. Pero asistimos a las consecuencias negativas que esto tiene para la Tierra, para la vida y para nuestra civilización, tal como la conocemos. Avances que en su momento fueron incuestionables, como el uso masivo de combustibles fósiles para alimentar nuestro sistema productivo, la

mejora del rendimiento agrícola mediante fertilizantes químicos, o el descubrimiento de los polímeros sintéticos para empaquetar casi todo lo que comemos y bebemos, son ahora puestos en cuestión.



Figura 11: Proyectos constructivos que ignoran la geología del emplazamiento. (a) Ladera en la que se apoya el estribo derecho de la presa de Yesa, sujeta a una inestabilidad crónica. (b) Dolina en fase de relleno durante las obras de urbanización de Arcosur, en Zaragoza.

En nuestra *sociedad del conocimiento* la ciencia es nominalmente venerada mientras, en la práctica, es manipulada o relegada según interese en cada momento a los poderes políticos y económicos. Con respecto a las catástrofes naturales y al papel de la Geología en su prevención y mitigación, pervive una preocupante ignorancia. Se menosprecia el peligro; se arremete contra la Tierra con obras innecesarias que interfieren en su dinámica; se muestra escasa capacidad para abordar la gestión preventiva, y finalmente se lamentan las

fatales consecuencias de las “fuerzas de la naturaleza”. Casos como la sismicidad inducida por la inyección de gas en el almacén Castor –antiguo yacimiento petrolífero submarino frente a la costa de Vinaroz (Castellón)–, el obstinado proyecto de recrecimiento del embalse de Yesa (Fig. 11a), o las dolinas ignoradas durante la expansión urbanística de Zaragoza (Fig. 11b), evidencian una lastimosa imprevisión y una instrumentalización de los estudios geológicos, propiciada por controles administrativos ineficientes y por la escasa cultura científica de quienes toman las decisiones. Uno se pregunta si la Geología no llega a jugar el rol de ‘tonta útil’ en la que, en realidad, es una *sociedad del des-conocimiento* (Simón, 2015) o del *analfabetismo ilustrado* (Garcés, 2017).

En la arena política, en el debate social, los argumentos científicos son utilizados por unos y por otros según el interés de cada cual. Tanta base científica tiene la idea de que el calentamiento global es causado por el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, derivado de la quema de combustibles fósiles, como la tienen las reconstrucciones paleoclimáticas que describen calentamientos similares acaecidos en el pasado geológico. Y ambos argumentos son esgrimidos desde trincheras opuestas, tanto por quienes sostienen la existencia de un cambio climático de origen antropogénico como por los llamados ‘negacionistas’ del mismo.

La ciencia es una herramienta muy golosa para el poder, y éste no se resiste a manipularla y mediatizarla. Eso es así desde que, en el siglo XVI, no sólo exploramos los confines del mundo y nuestra capacidad para comprenderlo sino, sobre todo, nuestras posibilidades de dominarlo. Señala Harari (2015, pp. 314, 319) que la diferencia entre los imperios antiguos y los imperios europeos modernos estriba en que los primeros buscaban concentrar poder y riqueza, o extender la propia visión del mundo que creían ya definitiva, mientras que los segundos vinculaban la obtención de nuevo conocimiento al sometimiento de nuevos territorios; “*el descubrimiento de América fue el acontecimiento fundacional de la revolución científica*”. El propósito, aparentemente inocente, de calcular la distancia de la Tierra al Sol llevó a la Royal Society de Londres a enviar en 1768 una expedición científica al Pacífico sur, con el fin de tomar mediciones del tránsito de Venus delante de nuestra estrella y, de paso, realizar estudios botánicos, zoológicos, antropológicos y etnográficos de Tahití, Australia y Nueva Zelanda. Bajo el mando del capitán James Cook, aquella expedición sentó las bases de la colonización por Gran Bretaña de esa región del mundo, de la instalación en ella de millones de europeos, de la brutal transformación medioambiental y del cuasi exterminio de las poblaciones nativas (Harari, 2015, pp. 305-308).

También en el campo de la Geología hay ejemplos notables de connivencia entre la

investigación científica y la geopolítica. Las investigaciones de Lotze sobre el Paleozoico de nuestro país –sintetizadas en su conocida propuesta de zonificación del Macizo Ibérico; Lotze (1945)– no pueden desvincularse de los compromisos que Franco había adquirido con Alemania para suministrarle el wolframio que el régimen nazi trataba de acaparar durante la Segunda Guerra Mundial (Schroeder, 2002). Tampoco nos pasan desapercibidos los nexos que existen entre los modernos enfoques de estudio de los paleoambientes sedimentarios o las cuencas extensionales y la geoestrategia del petróleo, o entre el concepto emergente de *almacén geológico* y las necesidades de la industria nuclear, química o energética de deshacerse de sus residuos.

En una visión un tanto cándida, Max Weber enunció los rasgos principales que diferencian al científico del político: el primero busca con imparcialidad las verdades universales, dilata la formulación de conclusiones hasta que cuenta con un soporte empírico suficiente, aplica el método científico con honestidad, y utiliza la palabra para debatir y argumentar; el segundo adopta y defiende verdades parciales o coyunturales, toma decisiones a partir de pocos datos y altas dosis de intuición, y utiliza la palabra como herramienta de propaganda y acoso (Weber, 1967). Pero en el mundo real ambos roles no están tan netamente diferenciados: los caracteres atribuidos al político no son sino rasgos profundamente humanos y, como tales, propios también de quienes nos dedicamos a la ciencia. Y es precisamente esa naturaleza humana del quehacer científico la que aprovecha el poder en su beneficio.

Se produce así una curiosa paradoja. El poder político y económico sabe dónde está el talón de Aquiles de la ciencia para servirse de ella; sabe dónde un modelo probabilista puede ser interpretado de diferentes modos según el contexto, dónde la parte puede ser tomada por el todo para justificar lo que interesa. Pero, al mismo tiempo, debe hacer eso sin menoscabar la imagen límpida de una ciencia racional que ofrece verdades universales sin costuras, porque es ella la que le otorga legitimidad en un mundo moldeado por la tecnología y regido por la tecnocracia. Desde las primeras sociedades organizadas en el Neolítico temprano, el poder supo instrumentalizar el sentimiento religioso para obtener la legitimación divina; la verdad revelada se convertía así en la única verdad; los mitos, los dioses y los códigos éticos que emanaban de ellos sirvieron para vertebrar cada colectividad, para que sus componentes cooperasen de manera efectiva para la mejora social, pero también acabaron sirviendo de justificación para aniquilar a quienes no los compartían (Harari, 2015). Tras las revoluciones sociales y mentales del siglo XVII en Inglaterra y del XVIII en Francia, el positivismo de Comte llama a superar las etapas infantil y adolescen-

te del género humano –religión y filosofía, respectivamente–, para alcanzar el estadio de adulto e instaurar una *Religión de la Humanidad* donde las leyes divinas sean sustituidas por las leyes científicas (Comte, 1852). Quedaban sentadas así las bases ideológicas para que la sociedad industrial y tecnológica –sea en su versión capitalista o comunista– hiciese de la ciencia esa nueva religión, cuya tierra prometida es el progreso sin límite.

Desde el impulso científico-tecnológico que sucedió a la Segunda Guerra Mundial, la instrumentalización de la tecnociencia para someter a las personas, a los pueblos y a la naturaleza ha sido exponencial. Es la infortunada consecuencia de lo que se ha dado en llamar *cientifismo* o *cientificismo*. Como concepto filosófico, éste emerge en el ala radical de la Ilustración Francesa (Bunge, 2017) y cobra impulso en el siglo XIX con el positivismo de Comte: la ciencia es la forma más avanzada del conocimiento humano, la más adecuada para comprender cómo funciona el mundo y, sobre todo, para dominarlo mediante la tecnología. Finalmente, en el XX, el cientifismo acaba convirtiéndose en ideología, al proclamar que los resultados de las ciencias experimentales deben constituir la única guía para nuestras decisiones como individuos y como sociedad, restando legitimidad o valor a otras formas de pensamiento (Sorell, 1991; Haak, 2012).

Como reivindicación del pensamiento científico para encarar cualquier reto del conocimiento humano, el cientifismo tiene indudables connotaciones positivas y un potencial demoleedor frente a las pseudociencias (Bunge, 2017); en particular, frente a mitos precientíficos en el ámbito de las Ciencias de la Naturaleza, como el creacionismo (Molina, 2017). Pero, en su versión maximalista e instrumentalizada, ha incurrido en excesos que le han hecho ser objeto de críticas feroces. El cientifismo fue combatido por filósofos e investigadores críticos, muy especialmente durante la época de la Guerra Fría, en cuanto ideología de poder vinculada a la impúdica manipulación de la ciencia en campos emergentes entonces como el armamento nuclear o la agroquímica (*Survivre*, 1971; Barri y Wahren, 2010). No le fue de gran ayuda la reputación que ganó el secretario de defensa estadounidense Robert McNamara con su obstinada estrategia ‘científica’ en la guerra de Vietnam, en la que el número de muertos que publicaban diariamente los periódicos representaba el parámetro estadístico crítico que medía el progreso de aquella funesta empresa (Cukier y Mayer-Schönberger, 2013). Asimismo, lo que Stenmark (1997) llama *cientifismo redentor* (la idea de que la ciencia es por sí sola capaz de afrontar las cuestiones existenciales que tradicionalmente han abordado la metafísica o las religiones) ha sido también duramente combatido desde el pensamiento teológico. Las hostilidades se profundizaron con motivo de la singular provocación lanzada por Stephen Hawking, un genuino exponente de ese

cientifismo redentor, cuando defendió que algún día una teoría cosmológica unificada sería capaz de responder a nuestras preguntas esenciales (“por qué estamos aquí; de dónde venimos...”) y, en último término, de “*llegar a conocer el pensamiento de Dios*” (Hawking, 1988).

Curiosamente, cuando avanzado el siglo XX se despliega una ciencia comprometida que pone en evidencia las contradicciones entre el crecimiento económico y la sostenibilidad de nuestro planeta, surge una corriente crítica en sentido contrario: la que denuesta el cientifismo de quienes usan argumentos científicos racionales para denunciar decisiones políticas o económicas irracionales guiadas sólo por intereses espurios. Esa tensión dialéctica entre las distintas connotaciones del cientifismo es similar a la que plantea Garcés (2015) con respecto a la propia Ilustración que le dio origen, y que no debe ser confundida con el proceso de modernización que luego alimentó: “*Hemos recibido la herencia ilustrada a través del fracaso del proyecto de modernización con el que Europa colonizó y dio forma al mundo (...). La crítica a ese proyecto (...) nos devuelve a las raíces de la ilustración como actitud y no como proyecto*” (pp. 30-31).

Es notorio que la noción cientifista de que los mejores resultados de la investigación son seguidos por las decisiones políticas más acertadas está muy alejada de la realidad. En relación con el problema del cambio climático, Frodeman (2013) señala la contradicción entre el inmenso caudal de conocimiento que ya existe y la muy escasa acción preventiva desplegada a nivel global. Parecería que toda la investigación sobre cambio climático sólo hubiera servido como excusa para la inacción política: las incertidumbres y la provisionalidad inherentes a los enunciados científicos sirven de coartada perfecta para dilatar la toma de decisiones. Frodeman llama a superar la noción weberiana de una ciencia y una política jugando en campos distintos: los valores políticos deben insertarse en los programas científicos, alumbrando un nuevo tipo de conocimiento inter- y transdisciplinar en cuya producción y uso esté implicada toda la sociedad. Por sus características (vocación holística, manejo fluido de las dimensiones espacio-temporales de la realidad...), la Geología está en condiciones de liderar mejor que otras disciplinas ese nuevo modelo post-disciplinar de relaciones entre ciencia y sociedad.

## **15. *La ciencia como opción personal***

Investigar es una forma de estar en el mundo. La construcción de la ciencia necesita de la parte emocional de nuestra mente; es una tarea plenamente humana y social, suje-

ta a las contingencias del devenir histórico y en peligro permanente de ser mediatizada por intereses políticos y económicos. La Geología, como ciencia que tiene un objeto de estudio complejo y difícil de sistematizar y cuantificar, está sujeta aun a mayores dificultades epistemológicas en su camino hacia la madurez. Por su relevancia como ciencia aplicada a la obtención y gestión de los recursos del territorio, la Geología es también especialmente vulnerable a su instrumentalización en el marco de estrategias geopolíticas y macroeconómicas.

A pesar de todo ello, ¡merece la pena dedicarse a la investigación científica en Geología, más allá de las compensaciones pecuniarias que pueda darnos! La exploración de los secretos que guarda nuestro planeta, tanto en su longeva historia como en su presente, es un reto científico fascinante. Es una aventura personal capaz de proporcionar a quien la acomete oportunidades sorprendentes. Una vez tomadas en consideración sus debilidades, tanto en el plano epistemológico como en el psicológico y social, sería inteligente asumirlas sin rubor y aprovechar al máximo esas oportunidades.

La ciencia es el mejor camino para crecer en el conocimiento de la realidad, pero será siempre un conocimiento intersubjetivo, no objetivo. La ciencia es la vía más eficaz para resolver los problemas prácticos a los que continuamente nos enfrentamos, pero será siempre una construcción inacabada, abierta continuamente a nuevos interrogantes. Será bueno tener siempre una lupa a mano para observar los componentes minúsculos que conforman la sustancia de lo real, y unos prismáticos de largo alcance para ver más allá del camino que transitamos.

Merece la pena aprovechar las oportunidades que la Geología nos da a las personas que la tenemos como profesión, incorporarla a nuestro universo emocional. Conectemos, pues, con nuestro objeto de estudio con toda la potencialidad de nuestra mente: apasionémonos, mantengamos nuestra capacidad de asombro en la cotidiana tarea de investigadores o docentes. Atrevámonos incluso a fusionar nuestro acercamiento científico al pulso del Planeta con otras aproximaciones de carácter artístico (poesía, música, artes plásticas. . .). Lo hemos experimentado recientemente en el proyecto *Tierra. Poemas y música de las esferas* (Fig. 12; Fraile y Simón, 2015; Ezquerro y Simón, 2019), donde hemos convertido en música varias series sedimentarias cíclicas. Lo reivindicaron ya desde el filósofo y matemático Pitágoras hasta el físico y violinista Einstein: la matemática y la música no son sino dos lenguajes paralelos que expresan la misma armonía del Universo. Es el *sapere vedere* de Leonardo da Vinci, su fusión de ciencia y arte, su aserto de que *ogni nostra cognitioni principia da sentimentis* (Racionero, 2004, p. 70).



Figura 12: Portada del disco-libro *Tierra. Poemas y música de las esferas*, que contiene varios temas musicales compuestos mediante sonificación de series sedimentarias cíclicas.

“No podemos enajenar la ciencia, aislarla de las contradicciones del entorno en el que nace. (...) Una ciencia totalmente aséptica es una quimera y, ante la neutralidad imposible, forzoso es tratar de elegir aquella parcialidad que más acorde esté con nuestros proyectos globales”. Así de vehemente me mostraba en un preámbulo que escribí en 1979 para mi Tesis de Licenciatura, y que con buen criterio mi director censuró antes de que fuese depositada. Quiero recuperar aquí esa idea porque sigue guiándome, y porque una importante corriente de pensamiento ha venido en mi auxilio intelectual re-

frendándola. Se trata de una suerte de ‘epistemología femenina’ que cuestiona ciertas bases del paradigma masculino dominante en la ciencia. Frente al supuesto riesgo de subjetividad que pudiera entrañar, Keller (1985) defiende una *objetividad dinámica* que no niega la carga relacional que se establece entre el sujeto de conocimiento y su objeto. También Harding (1991, 1992) define lo que llama *objetividad fuerte*, que exige colocar al sujeto y al objeto de conocimiento en el mismo plano crítico, impulsando en el investigador la autorreflexión sobre las propias creencias y valores. La *objetividad fuerte* difiere del *objetivismo* en que para éste la excelencia de la investigación requeriría la eliminación de todos los valores e intereses personales y sociales, mientras que aquélla sostiene que la forma de generar un conocimiento menos distorsionado es tenerlos presentes. Las concepciones tradicionales del método científico proporcionan normas para eliminar intereses ajenos a la propia comunidad científica, pero no así para detectar los intereses y supuestos que esa comunidad tiene interiorizados hasta el punto de no sentirlos como factores condicionantes. Todo conocimiento está enmarcado en una situación social e histórica; un conocimiento *situado* llega a ser más objetivo que un conocimiento supuestamente neutral (Magallón, 1998). No estamos obligados, por tanto, a optar entre el cientifismo y el escepticismo; una tercera posibilidad es aceptar que no podemos tener una percepción del mundo ajena a nuestros intereses y valores, y no temer que en nuestro quehacer científico éstos se pongan de manifiesto y se sometan explícitamente a elección (Putnam, 1988; Magallón, 2015).

Sirvamos, pues, de vehículo para que la sociedad toda se beneficie de los resultados positivos del trabajo de la comunidad científica y, si llega el caso, sepa enjuiciar críticamente las posibles derivas negativas. Cada vez es más necesaria una ciencia ética, comprometida no con el poder y con el crecimiento sin límites, sino con el bienestar real del ser humano; una ciencia que sea parte sustancial de la cultura en una sociedad sabia, no instrumento de dominación de una sociedad embrutecida; una ciencia donde la concepción del saber como poder se sustituya por el saber como emancipación (Garcés, 2017). En el caso concreto de la Geología, necesitamos una ciencia al servicio de la conservación y defensa del medio ambiente y del patrimonio natural y cultural, y no de su explotación sin medida. Una ciencia que ayude a comprender la dinámica del planeta que habitamos y con el que debemos convivir en armonía.

Ése es el mensaje central del manifiesto *Geología para una Nueva Cultura de la Tierra*, elaborado en 2011 por un grupo de investigadores y profesionales vinculados a las Ciencias de la Tierra (Villarroya *et al.*, 2012) y suscrito, entre otras entidades, por la Sociedad Geológica de España, la Asociación Española para la Enseñanza de Ciencias de la Tierra y el Colegio de Geólogos de Aragón. Y que, por cierto, presenta un asombroso paralelismo con algunos de los pasajes que el Papa Francisco escribió en 2015 en la encíclica *Laudato si*, en los que enuncia y denuncia los problemas sobre los que muchos científicos vienen alertando en las últimas décadas: el calentamiento global; la contaminación de la atmósfera, los ríos y los océanos; la degradación de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad; el impacto ambiental de la minería desordenada y abusiva; el sinsentido de la carrera para exprimir los últimos recursos del planeta sin importar el impacto que ello produce.

La crisis del coronavirus ha puesto a nuestra sociedad tecnológica ante el espejo de su endeblez, y ante la preocupante prospectiva de que persistir en una delirante intromisión en el equilibrio de Gaia amenaza seriamente nuestro futuro. La pandemia también ha puesto a la ciencia en un escaparate mediático, cuyos focos han alumbrado tanto la confianza que despierta entre los ciudadanos como las vastas incertidumbres que maneja. Hay quien imagina un futuro para nuestra especie donde los avances en biotecnología, genética y neurociencia nos lleven a una comunión mística con los algoritmos, a alcanzar la cuasi amortalidad y, en definitiva, a evolucionar hasta la condición de dioses (Harari, 2015). Pero, mientras tanto, quizá la ciencia y la sociedad deberían dedicar más sinergias a prevenir y mitigar las pandemias de virus que a construir cerebros biónicos; más a combatir las endemias de malaria, pobreza y ecodestrucción que a averiguar la forma de colonizar un Planeta B.

No existe una ciencia neutra. Hay una ciencia servil al poder que actúa como instrumento de explotación, y otra que, comprometida con los ciudadanos, les ofrece el conocimiento que les hace libres. La perspectiva de una Nueva Cultura de la Tierra hace de la Geología en este momento una ciencia crítica en todos los sentidos del término. Ya hace mucho tiempo que Simpson (1970) y Hagner (1963) reivindicaron su papel estratégico como ciencia que sabe mirar al pasado y al futuro, que abrió un túnel en el tiempo por el que pudo entrar la teoría de la evolución y cambiar el concepto mismo de nuestra especie. Frodeman (2013) señala a la Geología como la ciencia capaz de liderar un nuevo modelo de relación entre ciencia y sociedad. Yo no quiero ser menos y, parafraseando a Gabriel Celaya, quiero expresar mi convicción de que la *Geología es un arma cargada de futuro*.

### ***Agradecimientos***

Agradezco a la Real Academia de Ciencias de Zaragoza que me haya otorgado, no sólo el inmenso honor de acogerme entre sus miembros, sino también la oportunidad de elaborar y exponer públicamente estas reflexiones sobre mi quehacer científico. Haberme permitido expresarlas desde un punto de vista tan personal y, en algunos momentos, quizá tan heterodoxo no hace sino demostrar el espíritu abierto y tolerante de esta institución centenaria. Estoy seguro de que mi recurrente reivindicación de una ciencia crítica y ética al servicio del conjunto de la sociedad cuenta con la total complicidad de la Academia, y anhelo que ingresar en ella me permita colaborar con el máximo empeño y lealtad en esa causa.

Agradezco de forma muy especial al Presidente de la Academia, Antonio Elipe, y a la Presidenta de la Sección de Naturales, M<sup>a</sup> Victoria Arruga, el haberme animado y ayudado en este proceso ‘iniciático’ que supone el ingreso y la preparación misma de este discurso. Agradezco a Andrés Pocoví la cercanía, el afecto y las enseñanzas que me ha regalado en los 40 años que llevamos siendo compañeros en la Universidad de Zaragoza, así como su proverbial paciencia, puesta a prueba sin duda en este trance de tener que dar respuesta desde el estrado académico a una disertación –la mía– quizá no del todo académica.

Debo también agradecimiento a una serie de amigos que se han prestado a hacer una lectura atenta y crítica del borrador del texto. De casi todos ellos he recibido interesantísimos comentarios y sugerencias que lo han enriquecido y me han llevado a subsanar alguna que otra inexactitud. Otros han hecho lecturas parciales, me han aclarado alguna

duda concreta y, en todo caso, han animado un fructífero intercambio de puntos de vista. Gracias, por orden alfabético, a Luis Arlegui, Marcos Aurell, Antonio Casas, Justi Casas, Araceli Cereceda, Olga Conde, Riqui Constante, M<sup>a</sup> Carmen Gascón, Andrés Gil, Ivo Ínigo, Chabier de Jaime, Carlos Liesa, Carmen Magallón, Ángel Marco, Mariano Mérida, José Manuel Nicolau, Gonzalo Pardo, Alejandro Pérez, Teresa Román, Guillermo Simón, Violeta Simón, Ana Rosa Soria, Gonzalo Tena y Fermín Villarroya.

## Referencias bibliográficas

- Aguilar, M.J. Ramírez del Pozo, J., Oriol Riba, A. (1971). Algunas precisiones sobre la sedimentación y la paleoecología del Cretácico Inferior de la zona de Utrillas-Villarroya de los Pinares (Teruel). *Estudios Geológicos*, 27, 497-512.
- Aldaya, F., Álvarez, F., Galindo-Zaldívar, J., González-Lodeiro, F., Jabaloy, A., Navarro-Vilá, F. (1991). The Maláguide-Alpujárride contact (Betic cordilleras, Spain): a brittle extensional detachment. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 313 (Série II), 1447-1453.
- Anderson, E.M. (1951). *The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain*. Oliver & Boyd, Edimburgh, 206 pp.
- Angelier, J. (1979). Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 56, T17-T26.
- Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research*, 89, 5835-5848.
- Anguita, F., Fernández, C., Cordero, G., Carrasquilla, S., Anguita, J., Núñez, A., Rodríguez, S., García, J. (2006). Evidences for a Noachian-Hesperian orogeny in Mars. *Icarus*, 185, 331-357.
- Arlegui, L., Simón, J.L. (2001). Geometry and distribution of regional joint sets in a non-homogeneous stress field: case study in the Ebro basin (Spain). *Journal of Structural Geology*, 23, 297-313.
- Arlegui, L.E., Simón, J.L., Lisle, R.J., Orife, T. (2005). Late Pliocene-Pleistocene stress field in the Teruel and Jiloca grabens (eastern Spain): contribution of a new method of stress inversion. *Journal of Structural Geology*, 27, 693-705.
- Arthaud, F. (1969). Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. *Bulletin la Société géologique de France*, 7, 729-737.
- Arthaud, F., Matte, P. (1975). Les décrochements tardi-hercyniens du sud-ouest de l'Europe. Géométrie et essai de reconstitution des conditions de la déformation. *Tectonophysics*, 25, 139-171.
- Bardsley, W. E. (1991). Some thoughts on the automated generation and selection of hypotheses in the earth sciences. *Mathematical geology*, 23, 241-256.
- Barri, F., Wahren, J. (2010). El modelo sojero de desarrollo en la Argentina: tensiones y conflictos en la era del neocolonialismo de los agronegocios y el cientificismo tecnológico. *Realidad económica*, 255, 43-65.
- Bartlett, W.L., Friedman, M., Logan, J.M. (1981). Experimental folding and faulting of rocks under

- confining pressure Part IX. Wrench faults in limestone layers. *Tectonophysics*, 79, 255-277.
- Berthé, D., Choukroune, P., Gapais, D. (1979a). Orientations préférentielles du quartz et orthogneissification progressive en régime cisailant: l'exemple du cisaillement sud-armoricain. *Bulletin de Minéralogie*, 102, 265-272.
- Berthé, D., Choukroune, P., Jégouzo, P. (1979b). Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the South Armorican Shear Zone. *Journal of Structural Geology*, 1, 31-42.
- Boladeras, M. (1982). *Metodologia de la ciència: materials per a una metateoria de la geologia*. Edicions Universitat de Barcelona, ICE-Col.lecció documents, 60, 153 pp.
- Bott, M.H.P. (1959). The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, 96, 109-117.
- Bousquet, J.C. (1979). Quaternary strike-slip faults in southeastern Spain. *Tectonophysics*, 52, 277-286.
- Bradley, W.H. (1970). Leyes geológicas. En: Albritton, C.C. (Ed.), *Filosofía de la Geología*, Compañía Editorial Continental, México, 25-38.
- Bunge, M. (1965). *Intuición y ciencia*. Traducción: Emilio O. Colombo. Eudeba, Buenos Aires.
- Bunge, M. (1972). *Teoría y realidad*. Traducción: J.L. García Molina y J. Sempere. Ariel, Barcelona, 301 pp.
- Bunge, M. (1985). *La investigación científica*. Traducción: M. Sacristán. Ariel, Barcelona, 955 pp.
- Bunge, M. (2017). Elogio del cientificismo. En: G. Andrade (Ed.). *Elogio del cientificismo*, Laetoli, Pamplona, 13-29.
- Butler, R.W.H. (1987). Thrust sequences. *Journal of the Geological Society*, 144, 619-634.
- Canérot, J. (1974). *Recherches géologiques aux confins des Chaînes Ibérique et Catalane (Espagne)*. Tesis Doctoral, Université de Toulouse, 517 pp.
- Capote, R. (1975). Análisis estructural de las series calizas. *IX Curso de Geología Práctica*, Teruel, 18-36.
- Capote, R., Gutiérrez, M., Hernández, A., Olivé A. (1981). Movimientos recientes de la fosa del Jiloca (Cordillera Ibérica). *V Reunión del Grupo Español de Trabajo del Cuaternario*, Sevilla, 245-257.
- Casas, A.M. (1993). Oblique tectonic inversion and basement thrusting in the Cameros Massif (Northern Spain). *Geodinamica Acta*, 6, 202-216.
- Casas, A.M., Cortés, A.L. (2002). Cenozoic landscape development within the Central Iberian Chain, Spain. *Geomorphology*, 44, 19-46
- Casas, A.M., Simón, J.L. (1992). Stress field and thrust kinematics: a model for the tectonic inversion of the Cameros Massif (Spain). *Journal of Structural Geology*, 14, 521-530.
- Casas, A.M., Gil-Imaz, A., Simón, J.L., Izquierdo-Llavall, E., Aldega, L., Román-Berdiel, T., Osácar, M.C., Pueyo-Anchuela, Ó., Ansón, M., García-Lasanta, C., Corrado, S., Invernizzi, C., Caricchi, C. (2018). Strain indicators and magnetic fabric in intraplate fault zones: Case study of Daroca thrust, Iberian Chain, Spain. *Tectonophysics*, 730, 29-47.
- Cleland, C.E. (2013). Common cause explanation and the search for a smoking gun. In: Baker, V.R. (Ed.). *Rethinking the fabric of geology*. Geological Society of America, Special Paper 502, 1-9.
- Comte, A. (1852). *Catéchisme positiviste ou Sommaire exposition de la religion universelle*. Chez l'Auteur - Chez Carilian-Goeury - Vor Dalmont, Paris.

- Coward, M.P., Dewey, J.F., Hancock, P.L. (1987) (Eds.) *Continental Extensional Tectonics*. Geological Society Special Publ., London, 28.
- Coward, M.P., Gillcrist, R., Trudgill, B. (1991). Extensional structures and their tectonic inversion in the Western Alps. En: Roberts, A.M., Yielding, G., Freeman, B. (Eds.) *The geometry of normal faults*, Geological Society. Geological Society Special Publ., London, 56, 93-112.
- Crespo, A., Navarro, D., Canérot, J. (1979). Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 518 (Montalbán). IGME, Madrid.
- Crespo-Blanc, A. (2007). Superimposed folding and oblique structures in the palaeomargin-derived units of the Central Betics (SW Spain). *Journal of the Geological Society*, 164, 621-636.
- Cukier, K., Mayer-Schönberger, V. (2013). La dictadura de los datos. Traducción: F. Reyes. *MIT Technology Review*, <https://www.technologyreview.es/s/3564/la-dictadura-de-los-datos>(consultado el 28 de marzo de 2020).
- Davis, D., Suppe, J., Dahlen, F.A. (1983). Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B2), 1153-1172.
- Elliott, D. (1976). The energy balance and deformation mechanisms of thrust sheets. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A-283, 289-312.
- Etchecopar, A., Vasseur, G., Daignières, M. (1981). An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal of Structural Geology*, 3, 51-65.
- Ezquerro, L., Simón, J.L. (2019). Geomusic as a new pedagogical and outreach resource: Interpreting geoheritage with all the senses. *Geoheritage*, 11, 1187-1198.
- Fabre, D., Robert, J.P. (1975). Analyse expérimentale des ruptures de la couverture liées à un mouvement décrochant du socle et applications. *Ann. Soc. Géol. Nord.*, 95, 175-182.
- Feyerabend, P.K. (1974). *Contra el método*. Traducción: Francisco Hernán. Ariel, Barcelona, 207 pp.
- Flores, M.L. (2011). Las emociones en la filosofía de la ciencia. Astrolabio. *Revista internacional de filosofía*, 12, 37-46
- Fraille, M.A., Simón, J.L. (Coord.) (2015). *Tierra. Poemas y música de las esferas*. Delicias Musicales, Laboratorio Audiovisual de Zaragoza, Zaragoza, 32 pp. + CD.
- Frodeman, R. (2013). The geosciences, climate change, and the virtues of ignorance. In: Baker, V.R. (Ed.). *Rethinking the fabric of geology*. Geological Society of America, Especial Paper 502, 145-152.
- Froitzheim, N., Eberli, G.P. (1990). Extensional detachment faulting in the evolution of a Tethys passive continental margin, Eastern Alps, Switzerland. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 1297-1308.
- Fry, N. (1979). Random point distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics*, 60, 89-105.
- Garcés, M. (2017). *Nueva ilustración radical*. Anagrama, Barcelona, 75 pp.
- Genik, G.J. (1993). Petroleum geology of cretaceous-tertiary rift basins in Niger, Chad, and Central African Republic. *AAPG bulletin*, 77, 1405-1434.
- Gibbs, A.D. (1984). Structural evolution of extensional basin margins. *Journal of the Geological Society*, 141: 609-620.
- Gracia, F.J., Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. (2003). The Jiloca karst polje-tectonic graben (Iberian Range,

- NE Spain). *Geomorphology*, 52, 215-231.
- Guimerà, J., Alonso, Á., Mas, J.R. (1995). Inversion of an extensional-ramp basin by a newly formed thrust: the Cameros basin (N. Spain). *Geological Society Special Publ.*, London, 88, 433-453.
- Haack, S. (2012). Six signs of scientism. *Logos & Episteme*, 3, 75-95.
- Hagner, A.F. (1970) Aspectos filosóficos de ls Ciencias Geológicas. En: Albritton, C.C. (Ed.), *Filosofía de la Geología*, Compañía Editorial Continental, México, 295-305.
- Harari, Y.N. (2015). *Sapiens. De animales a dioses*. Traducción: J. Ros. Debate, Barcelona, 493 pp.
- Harding, S. (1991). *Whose science? Whose knowledge?: Thinking from women's lives*. Cornell University Press, Ithaca, NY, 318 pp.
- Harding, S. (1992). Rethinking standpoint epistemology: What is "strong objectivity?". *The Centennial Review*, 36, 437-470.
- Hawking, S. (1988). *Historia del tiempo. Del big bang a los agujeros negros*. Traducción: M. Ortuño. Crítica, Barcelona, 245 pp.
- Iglesias, M., Choukroune, P. (1980). Shear zones in the Iberian Arc. *Journal of Structural Geology*, 2, 63-68.
- Jackson, J.A., White, N.J. (1989). Normal faulting in the upper continental crust: observations from regions of active extension. *Journal of Structural Geology*, 11, 15-36.
- Jamison, W.R. (1992). Stress controls on fold thrust style. En: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust tectonics*, Chapman & Hall, London, 155-164.
- Johns, D.R., Mutti, E., Rosell, J., Séguret, M. (1981). Origin of a thick, redeposited carbonate bed in the Eocene turbidites of the Hecho Group, South-Central Pyrenees, Spain. *Geology*, 9, 161-164.
- Keller, E.F. (1985). *Reflections on Gender and Science*. Yale University Press, New Haven, 193 pp.
- Krumbein, W.C., Sloss, L.L. (1969). *Estratigrafía y sedimentación*. Traducción: R. García Díaz. Uteha, Mexico, 778 pp.
- Kuhn, T.S. (1975). *La estructura de las revoluciones científicas*. Traducción: A. Contín. Fondo de Cultura Económica, Madrid, 319 pp.
- Lafuente, P., Arlegui, L.E., Liesa, C.L., Simón, J.L. (2010). Paleoseismological analysis of an intraplate extensional structure: the Conclud fault (Iberian Chain, Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 100, 1713-1732.
- Lafuente, P., Arlegui, L. E., Liesa, C. L., Pueyo, Ó., Simón, J. L. (2014). Spatial and temporal variation of palaeoseismic activity at an intraplate, historically quiescent structure: The Conclud fault (Iberian Chain, Spain). *Tectonophysics*, 632, 167-187.
- Lakatos, I. (1974). Metodologías rivales de la ciencia; las construcciones racionales como guía de la Historia. *Teorema: Revista Internacional de Filosofía*, 4, 199-214.
- Lakatos, I. (1993). *La metodología de los Programas de Investigación Científica*. Alianza, Madrid, 315 pp.
- Larrasoana, J.C., Pueyo, E.L., Parés, J.M. (2004). An integrated AMS, structural, palaeo-and rock-magnetic study of Eocene marine marls from the Jaca-Pamplona basin (Pyrenees, N Spain); new insights into the timing of magnetic fabric acquisition in weakly deformed mudrocks. *Geological Society Special Publ.*, London, 238, 127-143.

- Liesa, C.L., Simón, J.L. (2009). Evolution of intraplate stress fields under multiple remote compressions: the case of the Iberian Chain (NE Spain). *Tectonophysics*, 474, 144-159.
- Liesa, C.L., Soria, A.R.; Meléndez, N., Meléndez, A. (2006). Extensional fault control on the sedimentation patterns in a continental rift basin: El Castellar Formation, Galve sub-basin, Spain. *Journal of the Geological Society*, 163, 487-498.
- Lisle, R. J. (1977). Estimation of the tectonic strain ratio from the mean shape of deformed elliptical objects. *Geologie en Mijnbouw*, 56, 140-144. Lister, G.S., Snoke, A.W. (1984). SC mylonites. *Journal of Structural Geology*, 6, 617-638.
- Logan, J.M., Friedman, M., Higgs, N., Dengo, C., Shimamoto, T. (1979). Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault zones. En: *Proceedings Conference VIII-Analysis of Actual Fault Zones in Bedrock*. U.S. Geol. Survey Open-File Report 79-1239, 305-343.
- Lotze, F. (1945). Zur Gliederung der Varisciden der Iberischen Mesetas. *Geo-technische Forschung*, 6, 78-92.
- Magallón, C. (1998). *Pioneras españolas en las ciencias: las mujeres del Instituto Nacional de Física y Química*. CSIC, Madrid, 446 pp.
- Magallón, C. (2015). Del pasado al futuro: anotaciones feministas para una ciencia democrática. *Libre Pensamiento*, 85, 36-43.
- Mandl, G., De Jong, L.N.J., Maltha, A. (1977). Shear zones in granular material. *Rock mechanics*, 9, 95-144.
- Marcén, M., Román-Berdiel, T., Mariani, E. (2017). Registro de la deformación a escala microestructural en el cabalgamiento de Gavarnie (Zona Axial Pirenaica), *Geogaceta*, 61, 109-112.
- Marcén, M., Casas-Sainz, A.M., Román-Berdiel, T., Oliva-Urcia, B., Soto, R., Aldega, L. (2018). Kinematics and strain distribution in an orogen-scale shear zone: Insights from structural analyses and magnetic fabrics in the Gavarnie thrust, Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, 117, 105-123.
- Marshak, S. Mitra, G. (1988). *Basic Methods of Structural Geology*. Prentice Hall, New Jersey, 446 pp.
- Martín-Martín, J. D., Vergés, J., Saura, E., Moragas, M., Messenger, G., Baqués, V., Razin, P., Grélaud, C., Malaval, M., Joussiaume, R., Casciello, E., Cruz-Orosa, I., Hunt, D.W. (2017). Diapiric growth within an Early Jurassic rift basin: The Tazoult salt wall (central High Atlas, Morocco). *Tectonics*, 36, 2-32.
- Mattauer, M. (1973). *Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre*. Hermann, Paris, 493 pp.
- McClay, K.R. (Ed.) (1992). *Thrust tectonics*. Chapman & Hall, London, 447 pp.
- McClay, K.R., Price, N.J. (Eds.) (1981). Thrust and nappe tectonics. *Geological Society Special Publ.*, London, 9, 544 pp.
- Merton, R.K. (1977). *La sociología de la ciencia: investigaciones teóricas y empíricas*. Introducción: N.W. Storer. Traducción: N. Alberto Míguez. Alianza Editorial, Madrid, 717 pp.
- Moharir, P.S. (1993). History syndrome or Popperian credentials of Geology. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Earth and Planetary Sciences*, 102, 283-305.
- Moissenet, É. (1980). Relief et déformations récentes: trois transversales dans les fossés internes des chaînes

- ibéricas orientales. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen*, 51, 315-344.
- Moissenet, É. (1982). Le Villafranchien de la région de Teruel (Espagne). Stratigraphie-deformations-milieux. *Colloque "Le Villafranchien méditerranéen"*, Lille, 229-253.
- Moissenet, E. (1983). Aspectos de la neotectónica en la fosa de Teruel. En: J.A. Comba (Coord.), *Geología de España (Libro Jubilar J.M. Ríos)*, IGME, Madrid, 2, 427-446.
- Moissenet, É. (1985). "Le Quaternaire moyen aluvial du fossé de Teruel (Espagne)", *Physio- Géo*, 14-15, 61-68
- Molina, E. (2017). El cientificismo y la paleontología. En: G. Andrade (Ed.). *Elogio del cientificismo*, Laetoli, Pamplona, 107-121.
- Navarrete, R., Liesa, C.L., Castanera, D., Soria, A.R., Rodríguez-López, J.P., Canudo, J.I. (2014). A thick Tethyan multi-bed tsunami deposit preserving a dinosaur megatracksite within a coastal lagoon (Barremian, eastern Spain). *Sedimentary Geology*, 313, 105-127.
- Nebot, M. (2016). *Mesozoic extension and Cenozoic contraction in the Eastern Iberian Chain (Maestrat Basin)*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, 162 pp.
- Olaiz, A.J., Muñoz-Martín, A., De Vicente, G., Vegas, R., Cloetingh, S. (2009). European continuous active tectonic strain-stress map. *Tectonophysics*, 474, 33-40.
- Pardo, G. (1979). *Estratigrafía y sedimentología de las formaciones detríticas del Cretácico inferior terminal del Bajo Aragón Turolense*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 473 pp.
- Pardo, G., Ardevol, L. Villena, J. (1991). Formación Arenas de Utrillas. Albiense inferior-Cenomaniense inferior. En: Ferreiro, E. (Coord.), *Mapa Geológico de España 1:200.000, hoja nº 40 (Daroca)*. ITGE, Madrid, 107-113.
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J. (1998). *Microtectonics*. Springer, Berlín, 289 pp.
- Peña, J.L., Sánchez, M., Simón, J.L. (1981). Algunos aspectos de la tectónica cuaternaria en el margen oriental de la fosa de Alfambra-Teruel. Teruel, *Instituto de Estudios Turolenses*, 66, 31-46.
- Peña, J.L.; Gutiérrez, M.; Ibáñez, M.; Lozano, M.V.; Rodríguez, J.; Sánchez, M.; Simón, J.L.; Soriano, M.A. y Yetano, L.M. (1984). Geomorfología de la provincia de Teruel. *Instituto de Estudios Turolenses*, Teruel, 149 pp.
- Pessoa, L. (2017). A network model of the emotional brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 21, 357-371.
- Platt, J.P., Vissers, R.L.M. (1980). Extensional structures in anisotropic rocks. *Journal of Structural Geology*, 2, 397-410.
- Platt, J.P., Leggett, J.K., Alam, S. (1988). Slip vectors and fault mechanics in the Makran accretionary wedge, southwest Pakistan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B7), 7955-7973.
- Platt, J. P., Allerton, S., Kirker, A., Mandeville, C., Mayfield, A., Platzman, E. S., Rimi, A. (2003). The ultimate arc: Differential displacement, oroclinal bending, and vertical axis rotation in the External Betic-Rif arc. *Tectonics*, 22 (3), doi:10.1029/2001TC001321.
- Popper, K.R. (1980). Evolution. *New Scientist*, 87, 611.
- Popper, K.R. (1996). *La lógica de la investigación científica*. REI, México.
- Pratt, B.R. (2016). Geology: In All Modesty. *Geoscience Canada*, 43, 97-101.

- Pueyo-Anchuela, Ó., Pueyo, E., Pocoví, A., Gil, A. (2012). Vertical axis rotations in fold and thrust belts: comparison of AMS and paleomagnetic data in the Western External Sierras (Southern Pyrenees). *Tectonophysics*, 532, 119-133.
- Putnam, H. (1988). *La objetividad y la distinción ciencia/ética*. Traducción: L. Murillo. Diánoia, 34, 7-25.
- Racionero, L. (2004). *Leonardo da Vinci*. Folio, Barcelona, 183 pp.
- Ramón y Cajal, S. (1897). *Reglas y consejos sobre investigación científica (Los tónicos de la voluntad)*. Discurso de ingreso en la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Publ. CSIC, Madrid, 1999, 207 pp.
- Ramsay (1967). *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill, New York, 568 pp.
- Reches, Z. (1978). Analysis of faulting in three-dimensional strain fields. *Tectonophysics*, 47, 109-129.
- Reineck, H.E., Singh, I.B. (1975). *Depositional sedimentary environments*. Springer-Verlag, Berlin, 550 pp.
- Riedel, W. (1929). Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen ein Beitrag zum Problem der Fiederspatten. *Zentbl. Miner. Geol. Palaont. Abt.*, 354-368.
- Rodríguez-López, J.P., Meléndez, N., De Boer, P.L., Soria, A.R. (2008). Aeolian sand sea development along the mid-Cretaceous western Tethyan margin (Spain): erg sedimentology and palaeoclimate implications. *Sedimentology*, 55, 1253-1292.
- Rodríguez López, J.P., Meléndez Hevia, N., Soria, A.R., De Boer, P.L. (2009). Reinterpretación estratigráfica y sedimentológica de las formaciones Escucha y Utrillas de la Cordillera Ibérica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22, 163-219.
- Rutter, E.H., Maddock, R.H., Hall, S.H., White, S.H. (1986). Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 3-30.
- Salas, R., Guimerà, J., Mas, R., Martín-Closas, C., Meléndez, A., Alonso, A. (2001). Evolution of the Mesozoic Central Iberian Rift System and its Cenozoic inversion (Iberian Chain). En: Ziegler, P.A., Cavazza, W., Robertson, A.H.F., Crasquin-Soleau, S. (Eds.), *Peri-Tethys Memoir 6: Peri-Tethyan Rift/Wrench Basins and Passive Margins*, Mém. Muséum National d'Histoire Naturelle, 186, 145-185.
- Santanach, P. (1972). Estudio tectónico del Paleozoico inferior del Pirineo entre Cerdeña y el río Ter. *Acta Geológica Hispánica*, 7, 44-49.
- Santolaria, P., Casas-Sainz, A. M., Soto, R., Pinto, V., Casas, A. (2014). The Naval diapir (Southern Pyrenees): Geometry of a salt wall associated with thrusting at an oblique ramp. *Tectonophysics*, 637, 30-44.
- Sato, K., Yamaji, A. (2006). Uniform distribution of points on a hypersphere for improving the resolution of stress tensor inversion. *Journal of Structural Geology*, 28, 972-979.
- Saura, E., Ardèvol, L., Teixell, A., Vergés, J. (2016). Rising and falling diapirs, shifting depocenters, and flap overturning in the Cretaceous Sopeira and Sant Gervàs subbasins (Ribagorça Basin, southern Pyrenees). *Tectonics*, 35, 638-662.
- Schroeder, R. (2002). Homenaje al profesor Franz Lotze (1903-1971), en reconocimiento de sus méritos por la investigación geológica de España. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*,

99, 35-46.

- Selley, R.C. (1976). *Medios sedimentarios antiguos*. Traducción: A. Arche. Blume, Madrid, 251 pp.
- Sequero, C., Aurell, M., Bádenas, B. (2019). Sedimentary evolution of a shallow carbonate ramp (Kimmeridgian, NE Spain): Unravelling controlling factors for facies heterogeneities at reservoir scale. *Marine and Petroleum Geology*, 109, 145-174.
- Simón, J.L. (1979). *Modelo evolutivo de la tectogénesis Alpina en la región del Guadalupe, entre Aliaga y Calanda (Teruel)*. Tesis de Licenciatura, Universidad Complutense Madrid, 180 pp.
- Simón, J.L. (1982). Compresión y distensión alpinas en la Cadena Ibérica oriental. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza. Publ. *Instituto de Estudios Turoleses*, Teruel, 1984, 269 pp.
- Simón, J.L. (1983): Tectónica y neotectónica del sistema de fosas de Teruel. *Teruel*, 69, 21-97.
- Simón, J.L. (1986). Analysis of a gradual change in stress regime (example from the eastern Iberian Chain, Spain). *Tectonophysics*, 124, 37-53.
- Simón, J.L. (2004). Superposed buckle folding in the eastern Iberian Chain, Spain. *Journal of Structural Geology*, 26, 1447-1464.
- Simón, J. L. (2005). Erosion-controlled geometry of buckle fold interference. *Geology*, 33, 561-564.
- Simón, J.L. (2007). Analysis of solution lineations in pebbles: Kinematical vs. dynamical approaches. *Tectonophysics*, 445, 337-352.
- Simón, J.L. (2015). La Geología: ¿ciencia útil para una sociedad del desconocimiento? *Ecologista*, 85, 56-58.
- Simón, J.L. (2019). Forty years of paleostress analysis: has it attained maturity? *Journal of Structural Geology*, 125, 124-133.
- Simón, J.L., Liesa, C.L. (2011). Incremental slip history of a thrust: diverse transport directions and internal folding of the Utrillas thrust sheet (NE Iberian Chain, Spain). En: Poblet, J., Lisle, R.J. (Eds) *Kinematic evolution and structural styles of fold-and-thrust belts*, Geological Society Special Publ., London, 349, 77-97.
- Simón, J.L., Soriano, M.A. (1993) La falla de Concud: etapas de actividad tectónica y régimen de esfuerzos asociado. *El Cuaternario de España y Portugal - Actas II Reunión del Cuaternario Ibérico*, vol. 2, ITGE-AEQUA, Madrid, 729-737.
- Simón, J.L., Arenas, C., Arlegui, L.E., Aurell, M., Gisbert, J., González, A., Liesa, C.L., Marín, C., Meléndez, A., Meléndez, G., Pardo, G., Soria, A.R., Soria, M., Soriano, M.A. (1998). *Guía del Parque Geológico de Aliaga*. Universidad de Zaragoza-Ayuntamiento de Aliaga-Centro para el Desarrollo del Maestrazgo de Teruel, 155 pp.
- Simón, J.L., Arlegui, L.E., Liesa, C.L., Maestro, A. (1999). Stress perturbations registered by jointing near strike-slip, normal, and reverse faults: Examples from the Ebro Basin, Spain. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B7), 15141-15153.
- Simón, J.L., Lafuente, P.; Arlegui, L.E.; Liesa, C.L, Soriano, M.A. (2005). Caracterización paleosísmica preliminar de la falla de Concud (fosa del Jiloca, Teruel). *Geogaceta*, 38, 63-66.
- Simón, J.L., Ezquerro Ruiz, L., Liesa, C.L., Lafuente Tomás, P., Arlegui, L.E. (2014). Aproximación a la peligrosidad sísmica en la ciudad de Teruel asociada a la falla de Concud (NE España), *Geogaceta*,

56, 7-10.

- Simón, J.L., Arlegui, L.E., Ezquerro, L., Lafuente, P., Liesa, C.L., Luzón, A. (2016). Enhanced paleoseismic succession at the Conclud Fault (Iberian Chain, Spain): new insights for seismic hazard assessment. *Natural Hazards*, 80, 1967–1993.
- Simón-Porcar, G., Liesa, C.L., Simón, J.L. (2019). La cuenca neógena extensional de El Pobo (Teruel, Cordillera Ibérica): sedimentología, estructura y relación con la evolución del relieve. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 32, 17-42.
- Simpson, G.G. (1970). La ciencia histórica. En: Albritton, C.C. (Ed.), *Filosofía de la Geología*, Compañía Editorial Continental, México, 39-69.
- Simpson, C., Schmid, S.M. (1983). An evaluation of criteria to deduce the sense of movement in sheared rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 1281-1288.
- Skempton, A.W. (1966). Some observations on tectonic shear zones. In *1st ISRM Congress*, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, Lisboa, 1, 329-335.
- Solé Sabarís, L. (1978). Los rebordes oriental y meridional de la Meseta: Cordillera Ibérica y Sierra Morena. En: M. de Terán *et al.* (Eds.) *Geografía General de España*, Ariel, Madrid, 74-85.
- Soler, M., Puigdefàbregas, C. (1981). Líneas generales de la geología del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 96, 5-20.
- Sorell, T. (1991). *Scientism: Philosophy and the Infatuation with Science*. Routledge, Londres, 205 pp.
- Soria, A.R. (1997). *La sedimentación en las cuencas marginales del Surco Ibérico durante el Cretácico inferior y su control tectónico*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 363 pp.
- Stenmark, M. (1997). What Is Scientism? *Religious Studies*, 33, 15-32.
- Storti, F., Rossetti, F., Läufer, A.L., Salvini, F. (2006). Consistent kinematic architecture in the damage zones of intraplate strike-slip fault systems in North Victoria Land, Antarctica and implications for fault zone evolution. *Journal of Structural Geology*, 28, 50-63.
- Suppe, J. (1983). Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283, 684-721.
- Survivre, redacción de (1975). La nouvelle église universelle. En: Lévy-Leblond, J.M., Jaubert, A. (Eds.) *(Auto)critique de la science*. Éditions du Seuil, Paris, 40-50.
- Swanson, M.T. (1988). Pseudotachylite-bearing strike-slip duplex structures in the Fort Foster Brittle Zone of southernmost Maine. *Journal of Structural Geology*, 10, 813–828.
- Tchalenko, J.S. (1968). The evolution of kink-bands and the development of compression textures in sheared clays. *Tectonophysics*, 6, 159-174.
- Tchalenko, J.S. (1970). Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 1625-1640.
- Tian, Z., Xiao, W., Shan, Y., Windley, B., Han, C., Zhang, J. E., Song, D. (2013). Mega-fold interference patterns in the Beishan orogen (NW China) created by change in plate configuration during Permo-Triassic termination of the Altaiids. *Journal of Structural Geology*, 52, 119-135.
- Villarroya, F., Simón, J.L., Pérez-Cueva, A.J., Beltrán, F., Escorihuela, J., Inigo, I.A., Martínez-Gil, F. J. (2012). Manifiesto: Geología para una nueva cultura de la tierra. *Enseñanza de las Ciencias de*

*la Tierra*, 20, 305-307.

- Wartofsky, M.W. (1973). *Introducción a la filosofía de la ciencia*. Traducción: M. Andreu, F. Cardona y V. Sánchez de Zabala. Alianza Editorial, Madrid, 679 pp.
- Watson, R.A. (1969). Explanation and prediction in Geology. *Journal of Geology*, 77, 488-494.
- Weber, M. (1967). *El político y el científico*. Introducción: R. Aron. Traducción: F. Rubio Llorente. Alianza Editorial, Madrid, 235 pp.
- Wellman, H. W. (1962). A graphical method for analysing fossil distortion caused by tectonic deformation. *Geological Magazine*, 99, 348-352.
- Wilcox, R.E., Harding, T.P., Seely, D.R. (1973). Basic wrench tectonics. AAPG Bulletin, 57, 74-96.
- Willett, S.D. (1992). Dynamic and kinematic growth and change of a Coulomb wedge. En: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust tectonics*, Chapman & Hall, London, pp. 19-31.
- Ziman, J. (1981). *La credibilidad de la ciencia*. Traducción: E. Pérez Sedeño. Alianza Editorial, Madrid, 277 pp.
- Zwart, H.J. (1964). The structural evolution of the Paleozoic of the Pyrenees. *Geologische Rundschau*, 53, 170-205.