

SÉPTIMA SESIÓN

**GEOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE
Y CATÁSTROFES**

GEOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y CATÁSTROFES

Por JUAN DE DIOS CENTENO CARRILLO

Introducción

La participación de un geólogo ambiental en esta reunión me pareció desde el primer momento un reto difícil e interesante a la vez. Y parece que no soy el único que así lo ve porque, entre los amigos-asesores a los que he consultado, sólo han surgido dos ideas: la del papel del Ejército en las catástrofes naturales (sugieren los geólogos, *sentido estripto*) y la del papel del Ejército en la gestión y conservación de enormes extensiones de territorio ¿quién hubiera podido conservar Cabañeros mejor? (sugieren los ecologistas y ecólogos). Ideas sugerentes pero difíciles de conciliar y, a mi juicio, poco ambiciosas.

Combinar Defensa y Geología es una de esas tareas difíciles no de resolver sino de empezar. Sólo parece que compartan interés por algunos recursos minerales estratégicos (que es uno de los temas preferidos de la Geología tradicional), el papel del relieve en la estrategia o del agua en la logística. Combinar Defensa, Geología y Medio Ambiente es faena aún más compleja.

Ni los geólogos ni los militares tenemos buena fama en los círculos ambientalistas. Y no es de extrañar. Los geólogos, aun habiendo contribuido a entender el planeta complejo y vivo (Gaia) hemos pasado la mayor parte de nuestra historia prospectando sustancias minerales, extrayéndolas a cualquier precio o asesorando a los ingenieros civiles en la construcción

de grandes obras. Aún hoy, muchos geólogos trabajan en esa línea. Mi maestro, el geomórfolo australiano C. Rowland Twidale afirmó en una ocasión que:

«Por desgracia, para muchos geólogos todo lo que no es muy profundo y antiguo es demasiado "superficial"»

Y, en consecuencia, los geólogos tenemos fama de aceptar cualquier barbaridad para sacar a la superficie unos fósiles del precámbrico. Así se comprende que, a pesar de que el sustrato de todos los ecosistemas sea materia geológica, los geólogos se han mantenido apartados de lo verdaderamente ambiental. En cuanto al malestar de los ambientalistas respecto a las Fuerzas Armadas, adivino que tiene más que ver con las alianzas ideológicas entre el ecologismo y el pacifismo que con un análisis del impacto ambiental del Ejército, pero se trata de un tema en el que no estoy profesionalmente capacitado.

Por eso he optado por centrarme alrededor de las relaciones entre Geología y Medio Ambiente y tocar sólo muy puntualmente las relaciones con el Ejército.

En este trabajo pasaré revista a las grandes ideas ambientalistas en las que la Geología (y el conjunto de la Ciencias de la Tierra) andan metidas. Y luego trataré de centrarme en la explicación de dos tipos de «catástrofes»:

1. La catástrofes, *sentido estripto* en las que un acontecimiento de corta duración (geológicamente hablando) y gran intensidad provoca daños socio-económicos y, muy a menudo, requiere la intervención del Ejército.
2. La «catástrofe» topológica que se refiere a las discontinuidades en el régimen de funcionamiento de un sistema como consecuencia de un cambio continuo en las variables de control. Son éstas las catástrofes a largo plazo, las que ponen en peligro más que los recursos naturales de que dispondremos a medio plazo ya que amenazan a nuestra supervivencia.

Con ellas, y a través del concepto de huella ecológica, quiero llegar a la cuestión de si existe o no una crisis ambiental y, ante la duda, a plantear lo que otro de mis maestros (Arie Issar) llamaba la estrategia de *win or gain* (vencer o ganar).

Geología Ambiental «clásica»

Casi cualquier libro de Geología Ambiental incluye, como principales apartados de su índice, los siguientes temas: recursos naturales, riesgos geológicos e impactos ambientales

Recursos naturales

En el apartado de «recursos naturales», casi todos los textos comienzan con la clasificación de recursos «renovables y no renovables». Aunque esta clasificación fue en su momento de gran utilidad, hay que tener presente los límites de validez.

Hay recursos definitivamente no renovables, como la energía fósil, y la mayor parte de los recursos minerales son no renovables, porque los consumimos a velocidades muy superiores a las que se generan.

En estos recursos no renovables, merece la pena repasar dos términos que se usan frecuentemente y justifican nuestra actitud, figura 1.

«Cantidad de recurso» es la cantidad existente de un recurso natural existente en un momento dado, en todo el Planeta o, por extensión, en todo el universo. Para la mayor parte de los recursos minerales y para los combustibles fósiles, la cantidad de recurso puede considerarse una cantidad fija a escala humana, dada la velocidad de los procesos de formación.

«Las reservas» de un recurso son la cantidad que en un momento dado se ha descubierto y resulta rentable extraer. Evidentemente los dos límites de «las reservas» son variables, porque la economía cambia y la humanidad sueña, desde antes de Julio Verne, con explorar y conocer los confines del universo. Y de ahí deriva la tradicional confianza en la abundancia de los recursos.

Cuando se trata de recursos estratégicos, la conservación de las reservas debe ser un objetivo prioritario, porque al agotamiento se suma la amenaza de los cambios del coste de extracción. Pero entiendo que la buena gestión de los recursos minerales no renovables no es exactamente un asunto ambiental. El agotamiento de todo el wolframio del mundo no parece tener ninguna consecuencia ecológica; si queremos conservarlo es por puro utilitarismo. Sin embargo, compartimos el resto de los recur-

Recursos		Conocidos	Desconocidos	Coste de extracción
Económicos	Reservas		-	
Subeconómicos	Cantidad de recursos		+	
	+ Probabilidad de hallazgo		-	

Figura 1. *Conceptos de cantidad de recurso y reservas en recursos geológicos no renovables.*

Los recursos naturales con toda la biosfera y ésta es el recurso cuya conservación es más urgente.

Al margen de estos recursos definitivamente no renovables, la renovabilidad de cualquier recurso natural puede medirse por un índice sencillo, pero sometido constantemente a cambios:

$$IR = \frac{VG}{VC}$$

Donde: IR = Índice de Renovabilidad

VG = Velocidad de Génesis en la naturaleza

VC = Velocidad de Consumo

O en una versión algo más sofisticada:

$$IR = \frac{VG + TrU \times VC + TrC \times VC}{VC}$$

Donde: TrU = Tasa de reUtilización

TrC = Tasa de reCiclado

De esta forma, son renovables todos aquellos recursos naturales que se generan en la Naturaleza más rápido de lo que se consumen.

La segunda versión permite entender hasta qué punto el concepto es variable. La renovabilidad, y consecuentemente la sostenibilidad, dependen del ritmo de consumo, reutilización y reciclado, las variables que podemos modificar para cada recurso. En función de estas variables (la conocida como política de las tres erres: reducción, reutilización y reciclado) podemos convertir en recursos renovables muchos de los que ahora no lo son.

Cerca de la utopía, si la tasa de reciclado se acerca al 100% ($TrR \rightarrow 1$) podemos hacer que recursos metálicos, tradicionalmente considerados no renovables, sean en la práctica renovables, haciendo que la cantidad de reservas evolucione tan lentamente que podamos considerarla constante. Pero cerca de la realidad, si la tasa de degradación (una forma de consumo) del suelo o el agua supera su tasa de regeneración, los recursos renovables por excelencia pueden acabar no siéndolo.

La velocidad de génesis de los recursos puede modificarse, pero siempre a expensas del consumo de otro recurso. La producción de biomasa alimentaria es un buen ejemplo: la productividad agrícola (VG) puede incrementarse notablemente, pero siempre a costa del uso añadido de recursos energéticos, hídricos y minerales (nutrientes como los fosfatos).

En este sentido, y ahondando en el enfoque global, resulta muy interesante el concepto de «huella ecológica», acuñado por Wackernagel & Rees (2002), o el de «espacio ecológico», utilizado en España por Amigos de la Tierra. Se definen ambos conceptos como el cociente entre el espacio necesario para producir los recursos y el espacio ocupado por los consumidores de esos recursos. A escala global es el espacio necesario para producir los recursos usados por la humanidad, o la proporción entre superficie necesaria para producir los recursos y superficie del Planeta. Así, la huella ecológica global se mide en número de planetas necesarios para mantener el consumo de recursos, valor que, desde el año 1960 al año 2000, ha pasado de aproximadamente 0,65 a 1,2.

Según los cálculos del WWF (*Planet Living Report*), a mediados de los años setenta la humanidad sobrepasó el límite de la sostenibilidad. Al margen de la dificultad y fiabilidad de los cálculos, el incremento de huella ecológica corre paralelo a la reducción del índice de calidad ambiental, un índice cuantitativo basado en el inventario de especies en todo el mundo, figura 2.

Todo ello sin entrar en los desequilibrios regionales de disponibilidad de bienes y huella ecológica, que sin duda estarán detrás de todos los conflictos internacionales.

Estamos descubriendo que el suelo agrícola o el agua (tradicionalmente clasificados como recursos renovables) son sólo «potencialmente renovables». No sólo los consumimos demasiado deprisa sino que además hemos activado procesos naturales (riesgos inducidos) que están destruyendo recursos muy valiosos. De hecho el campo de los riesgos naturales es el otro gran tema de la Geología Ambiental.

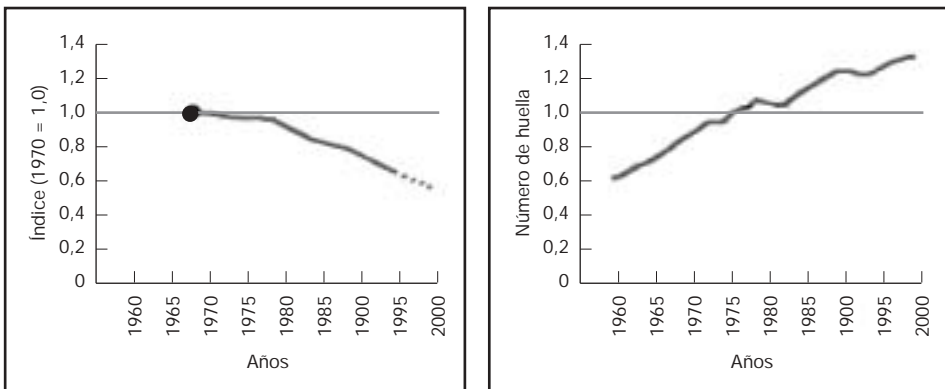


Figura 2. Índice de calidad general ecológica y huella ecológica según el WWF, 2002.

Riesgos y peligros naturales

Cualquier actividad humana corre el riesgo de sufrir daños. Las compañías de seguros tienen muy claro que el riesgo de un suceso que deben asumir puede medirse con una sencilla expresión:

$$\text{Riesgo} = \text{probabilidad} \times \text{coste}$$

El coste es, a su vez una función compleja de la peligrosidad intrínseca del proceso y la vulnerabilidad social.

$$\text{Coste} = f(\text{peligrosidad, vulnerabilidad})$$

Esta sencilla expresión es el elemento fundamental de toda sensata previsión de fondos de catástrofe (nacional, municipal o personal) ante las inundaciones, los terremotos o el naufragio de petroleros.

Llegados a este punto, puede resultar sensato recordar la definición de peligro geológico (extensible a cualquier peligro natural) del Servicio Geológico de Estados Unidos (www.usgs.gov). Según esta Institución, un «peligro geológico» es cualquier «condición» (falla, llanura aluvial, vertiente metaestable, etc.), «proceso» (deformación cortical, escorrentía superficial, socavación de vertientes, etc.) o «suceso» capaz de causar daños a la salud o los bienes.

La definición es muy útil para entrar en el mundo de la predicción. La «predicción» perfecta es aquella que es precisa y fiable en lo que se refiere al espacio (donde se dan «condiciones» peligrosas), la tipología e intensidad de los «procesos», y el tiempo (sobre todo cuando se trata de «sucesos» de corta duración y alta intensidad, pero también para predecir la «evolución» de procesos más duraderos).

La probabilidad de un suceso es la forma más sencilla de «predicción temporal»; y la más frecuente en lo que se refiere a procesos geológicos. Podemos asignar una probabilidad a la inundación de una zona o a los terremotos, pero muy raramente podemos predecir el lugar, el momento y las dimensiones de este tipo de acontecimientos (1).

(1) Hay unos pocos casos de predicción temporal de catástrofes, de entre los cuales destaca la erupción del St. Helens, en la cordillera de las Cascadas (Washington, Estados Unidos), el día 18 de mayo de 1980. Éste es un caso paradigmático porque, ante la confianza en la predicción, se ordenó la evacuación de una gran región dedicada a la explotación maderera, y tuvo que ser el Ejército quien evacuara a los empleados de las compañías. Las únicas víctimas fueron unos geólogos, a consecuencia de un deslizamiento en las faldas del volcán, y semejante «éxito» debe medirse en el marco de una evacuación forzosa que hubiera sido un desastre económico si la erupción no se hubiese producido.

La «predicción» más frecuente en Geología es la «espacial», esto es, la definición de áreas afectadas por cualquier peligro potencial. Por ello, la ordenación del territorio es, desde el punto de vista de la Geología, el mecanismo más eficaz de prevención.

Delimitar zonas inundables o sísmicas es mucho más útil, al menos en teoría, que adoptar medidas de urgencia ante la predicción temporal de catástrofes. Pero la delimitación de áreas potencialmente afectadas se combina con la probabilidad y la tipología de acontecimientos, definiendo zonas de diferente tiempo de retorno o nivel de peligrosidad. Así la adopción de medidas preventivas depende de la confianza en la predicción y los costes (económicos, humanos y políticos) que se puedan asumir en periodos de tiempo largos, especialmente en el caso de procesos geológicos, figura 3.

La delimitación de áreas con normas de construcción sismorresistentes, o las restricciones a la ocupación de zonas inundables, por ejemplo, son obstáculos al desarrollo muy difíciles de asumir por los dirigentes. Don Jaime Matas, el ministro de Medio Ambiente, dijo en un acto del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, en la Navidad de 2000-2001, que su papel como ministro de Medio Ambiente era:

«Impedir que el Medio Ambiente fuera un obstáculo para el desarrollo.»

La afirmación encierra una evidente confusión de papeles entre Ministerios, pero también el desequilibrio de presión política entre lo puramente ambiental y lo socio-económico, con clara ventaja del último. Al fin y al cabo, como muestra en su trabajo Blaikie y otros (1991) las catástrofes naturales constituyen un mal menor en el balance global de coste humano,

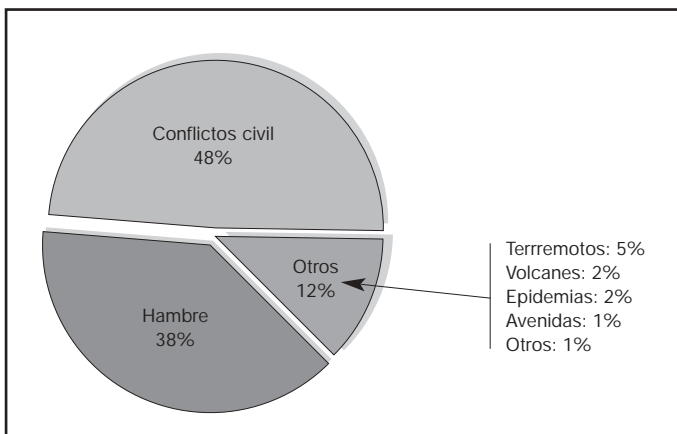


Figura 3. Desastres en 1900-1990 (según Blaikie y otros).

y las limitaciones al desarrollo por causas ambientales tienen una mala prensa, inversamente proporcional al nivel de desarrollo de las naciones.

Esto se relaciona con el tema de la vulnerabilidad social. En España, las pérdidas por inundaciones superaron en el año 1989, en un año, todas las previsiones por desastres naturales para el periodo 1986-2016 (Instituto Geológico y Minero de España, 1988). La ocupación de las llanuras aluviales, en pleno tirón de desarrollo económico, multiplicó los efectos de fenómenos naturales que no tuvieron nada de extraordinario. Los acontecimientos demostraron que una mala gestión del territorio (un incremento de vulnerabilidad) causó más aumento de daño que los cambios en los procesos naturales; pero también que una sociedad bien organizada (que, en este sentido, había reducido su vulnerabilidad) pudo asumir los daños sin modificar su tendencia al desarrollo.

Estas dificultades de adecuación a los riesgos «catastróficos» es aún mayor ante los riesgos derivados de procesos de larga duración y menor intensidad; la erosión del suelo o el cambio climático son sucesos de alta probabilidad y grandes costes pero, todo hay que decirlo, de poca audiencia en los medios de comunicación si no producen grandes catástrofes.

La erosión de los suelos, que incluye tanto la erosión superficial como el lavado de nutrientes hacia las aguas subterráneas, tiene (en presente, renunciando a valorar su potencialidad) costes a través de la pérdida de productividad o de las inversiones para mantenerla, la degradación del paisaje (en un país donde el turismo es nuestro mayor recurso económico), la contaminación de las aguas subterráneas (por esos nutrientes que la escasa cubierta vegetal no consigue mantener en el ciclo edáfico), el entarquinado de los embalses, etc. Pero se trata de un proceso lento cuyas consecuencias se asumen poco a poco, a diferencia de la asimilación social de las grandes tragedias.

La cuestión es saber si estos procesos «lentos» no pueden convertirse en catástrofes de dimensiones planetarias. Aquí es donde parece sensato adentrarse en los conceptos de la palabra catástrofe.

Procesos naturales *versus* catástrofes sociales

Los procesos naturales más relacionados con catástrofes sociales son las inundaciones —que ocupan un destacado primer lugar en España— los terremotos, los movimientos gravitacionales de ladera y los volcanes (2). En

todos los casos, hay procesos de todas las velocidades e intensidades y siempre son los procesos rápidos y pasajeros los que más daños causan.

Los territorios periódica o estacionalmente inundados se destinan a usos compatibles con la inundación, y raramente producen pérdidas; son las avenidas instantáneas (*flash floods*), como las ocurridas en Badajoz en noviembre del año 1997, las que destruyen infraestructuras mal ubicadas y producen víctimas. Los volcanes de erupción constante y poco explosiva (3), como los volcanes de Hawai, producen pocos daños, aunque restringen el uso del territorio; en cambio las erupciones explosivas, como la del St. Helens, producen daños en territorios extensos donde el peligro existe pero no es tan evidente como para renunciar a su ocupación. Los flujos de vertiente lentos y constantes también restringen el uso del territorio; y los deslizamientos instantáneos son los causantes de algunas de las peores catástrofes (4). En cuanto a los terremotos, afortunadamente, los fenómenos de gran magnitud no tienen nunca gran duración, pero la planificación más frecuente —la norma sismorresistente de construcción— no evita las grandes desgracias; sólo recientemente se está iniciando una clasificación detallada del territorio en función de su peligrosidad.

Todo esto es válido para los riesgos geológicos y el resto de los riesgos naturales. Estamos preparados para las epidemias cíclicas como la gripe (salvo cuando una de sus mutaciones anuales la convierte en un acontecimiento excepcional), pero una nueva epidemia (sida) o una plaga inesperada siempre causan daños importantes.

Un caso interesante es el de los riesgos cósmicos. La llegada de un asteroide, la transformación del Sol en gigante roja o la atenuación del campo magnético terrestre constituyen riesgos reales. En concreto, los asteroides

(2) A estos habría que añadir la sequía, como refirió el profesor Llamas Madurga en su discurso de ingreso a la Academia de Ciencias. Pero raramente se habla de la sequía como catástrofe porque los daños a las cosechas, al empleo e incluso a la salud se producen gradualmente. Sólo las grandes hambrunas (como las que sufre buena parte de África desde hace años) se mencionan en los catálogos de catástrofes. En todo caso, volveremos a las sequías más adelante.

(3) La viscosidad y explosividad del magma depende de su contenido en sílice. Éste depende del grado de evolución del magma, que a su vez se relaciona con la profundidad y el entorno geodinámico en el que se originan los magmas.

(4) De hecho, buena parte de los daños causados por terremotos e inundaciones se producen cuando el proceso primario produce inestabilidad en las laderas, sea por modificación de su geometría (por ejemplo, por socavación fluvial) o por añadir energía cinética (mediante las vibraciones) a vertientes metaestables.

tienen una extensa filmografía en el que el Ejército juega siempre un importante papel. Pero, desde el punto de vista de las Ciencias Ambientales casi carecen de interés.

Los riesgos cósmicos presentan pautas temporales con las que definir el factor probabilidad —los teóricos hablan de transformación del Sol en gigante roja dentro de unos 7.000 millones de años. y hay un cierto ritmo, del orden de los miles de años para los cambios de polaridad magnética. Incluso siendo indudable el coste altísimo que producirían, no podemos hacer predicciones espaciales, que regulen la ordenación del territorio, esto sin considerar la escala temporal de que se trata.

Las principales catástrofes naturales comparten algunas características que hacen siempre difícil cualquier predicción que no sea la espacial:

- Acontecimientos de corta duración y gran intensidad.
- Pautas temporales irregulares y periodos de recurrencia altos (en términos humanos).

Todos estos acontecimientos se producen como respuesta a procesos geológicos «continuos» que, sin embargo, dan lugar a acontecimientos de una brusquedad extraordinaria. Aunque, en todos los casos hay fenómenos que anteceden a la catástrofe, «precursores», éstos son difíciles de detectar y siempre dan una información ambigua sobre el momento y la intensidad del suceso. En general, una acumulación en la intensidad de precursores detectados indica una mayor inminencia e intensidad del suceso, porque el proceso continuo que está en la raíz del suceso también va acumulando causas.

Esta relación entre procesos continuos y discontinuos es uno de los asuntos más difíciles e intrigantes. El glaciar Perito Moreno (en Argentina) es un buen ejemplo de estas situaciones. Este glaciar extiende su lengua hasta el lago Argentino, en la Patagonia Occidental. Pero su lengua cierra la estrecha comunicación entre el lago y uno de sus brazos, el brazo o lago Chico, impidiendo que las aguas de toda la cuenca del Chico entren en el lago principal y haciendo que se almacenen en éste brazo, cuyo nivel de aguas crece rápidamente. Este obstáculo produce la acumulación de agua en el Chico, hasta que la presión diferencial del agua provoca la rotura del hielo glacial y una entrada catastrófica de agua en el lago Argentino. El acontecimiento es sólo una respuesta puntual a la acumulación de causas, figura 4.

Este tipo de fenómenos es extraordinariamente común y su cuantificación uno de los asuntos pendientes. De hecho los pocos casos en que la

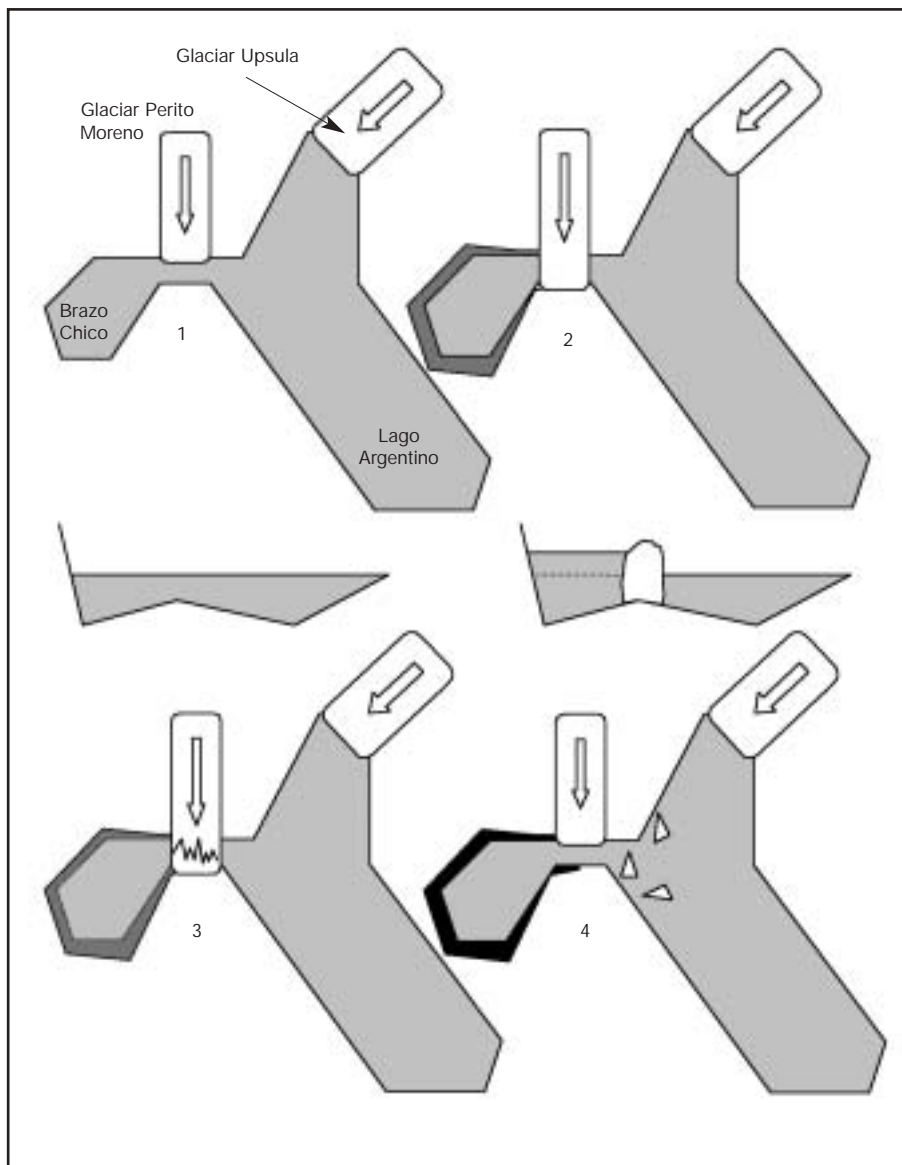


Figura 4. El glaciar Perito Moreno, en la Patagonia, Argentina, desagua en el canal que enlaza el lago Argentino con su brazo Chico (1). El hielo tiende a aumentar su extensión hasta que las laderas de la vertiente opuesta lo impiden, provocando un cierre del brazo y un crecimiento del brazo Chico (2). La presión del agua va creciendo hasta provocar la rotura de la «presa» de hielo (3) y produciendo una entrada masiva de agua y hielo en el sector principal del lago Argentino. La zona de inundación cíclica queda desprovista de vegetación (4).

cuantificación se ha conseguido son de una abstracción tan profunda que la comunicación entre la teoría y la práctica apenas se ha llegado a producir.

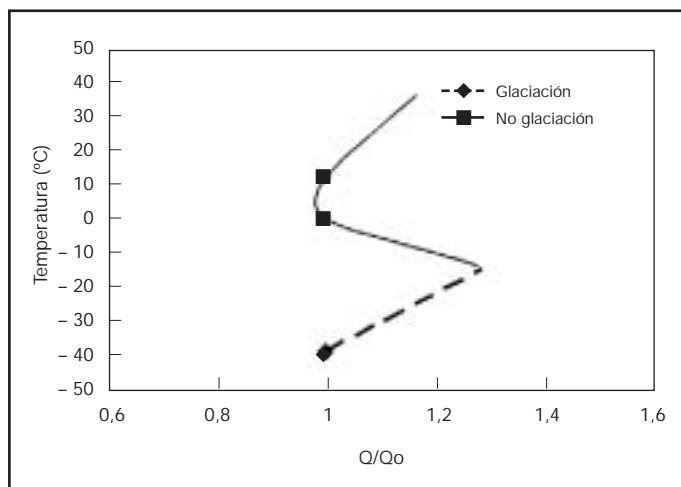
Catástrofes topológicas

Muchos de estos fenómenos discontinuos representan la transición entre dos regímenes de funcionamiento: acumulación de tensión cortical hasta su liberación en un terremoto, acumulación de agua en el brazo Chico frente a escorrentía entre uno y otro lago, acumulación de energía potencial en una vertiente frente a transferencia en forma de energía cinética. Es sólo el tránsito entre regímenes de funcionamiento el que se produce bruscamente.

Hay otro ejemplo interesante, porque afecta a las previsiones de cambio climático. Las ecuaciones que resuelven la relación entre balance atmosférico de radiación y temperatura media global muestran soluciones lineales o no lineales según se considere el efecto de realimentación del modelo por el albedo de las capas de hielo, figura 5.

Los cálculos proceden de North y otros (1983) muestran la lógica relación entre balance de radiación temperatura media global. Sin embargo, cuando se considera el efecto del albedo y la ecuación se resuelve de dos formas, una partiendo de un balance muy superior al actual (en un planeta sin hielo) y otra partiendo de un balance menor que el actual (en

Figura 5.
Temperaturas globales steady state según el modelo de North y otros (1983) en Crowley y North (1991).



un planeta sometido a una glaciación), las dos curvas producen un sector donde tres soluciones son posibles y los cambios de una a otra situación (en la realidad, no en las ecuaciones) aún están mal comprendidos.

El ejemplo es especialmente polémico. Muestra claramente los límites de nuestro conocimiento, ya que prevé en condiciones de no glaciación las actuales temperaturas medias (aunque estemos en plena glaciación). Además, la situación de inestabilidad o indeterminación que los modelos predicen para el balance de radiación actual sólo puede tener un significado: la sensibilidad y fragilidad real del sistema, figura 6.

El modelo anterior se parece tremendamente al modelo de «catástrofe en cúspide» de la teoría de catástrofes, formulada por René Thom (1973) cuando estudiaba discontinuidades desde la perspectiva de la biomatemática y la topología. Aunque la teoría ha caído en desuso, sin haber sido por ello refutada, ya que presenta grandes dificultades para la cuantificación, aún sigue ofreciéndonos un «vocabulario» excelente para entender algunas de estas discontinuidades.

En teoría de catástrofes un sistema de n variables de control y m variables de estado se describe mediante una función $m+n$ dimensiones; los estados estables se sitúan todos dentro de una «superficie» de $m+n-1$ dimensiones cuya configuración depende también del número de variables, y el estado de sistema en un momento dado viene definido por un «punto» de $m+n-2$ dimensiones. Con estos rasgos, la teoría sólo se ha aplicado a sis-

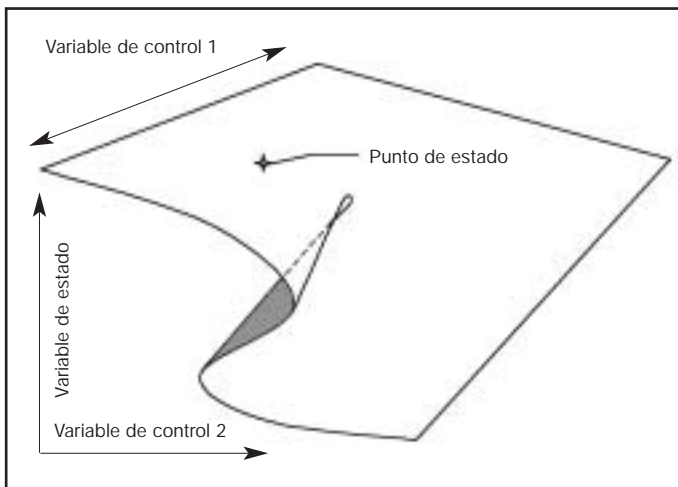


Figura 6. Estructura de la catástrofe en cúspide.

temas que pueden describirse con muy pocas dimensiones y, de hecho, el caso más utilizado es el de la «catástrofe en cúspide» para sistemas de dos variables externas o de control y una interna o de estado. En consecuencia se trata de una función tridimensional, con un superficie bidimensional de estabilidad y con el sistema representado por un punto (unidimensional).

En la «catástrofe en cúspide», la superficie de estados «estables» presenta un pliegue en los valores extremos de una de las variables de control, pliegue que define una región inaccesible y configura la mayoría de las propiedades de estas funciones:

- Bimodalidad, ya que son mucho más abundantes los valores extremos de la variable de estado.
- Divergencia, ya que pequeñísimas diferencias en una de las variables de control (variable 2 en la figura 7) producen cambios radicales, y difíciles de predecir, cuando va cambiando el valor de la otra variable de control (variable 1).
- Saltos bruscos en la variable de estado, en respuesta a cambios progresivos en una de las variables de control.
- Histéresis, ya que los saltos bruscos se producen para valores diferentes de la variable de control cuando el cambio se produce en sentidos opuestos.

El modelo se ha utilizado en varios campos de la Sociología y la Psicología (para explicar por ejemplo los comportamientos agresivos), la Biología de poblaciones (para entender la territorialidad humana y la de varias espe-

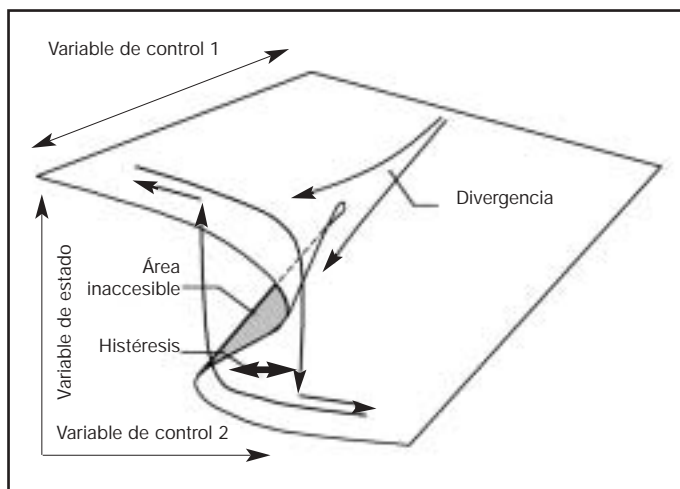


Figura 7.
Propiedades básicas de un sistema según el modelo de catástrofe en cúspide (modificado de Woodcock y Davis).

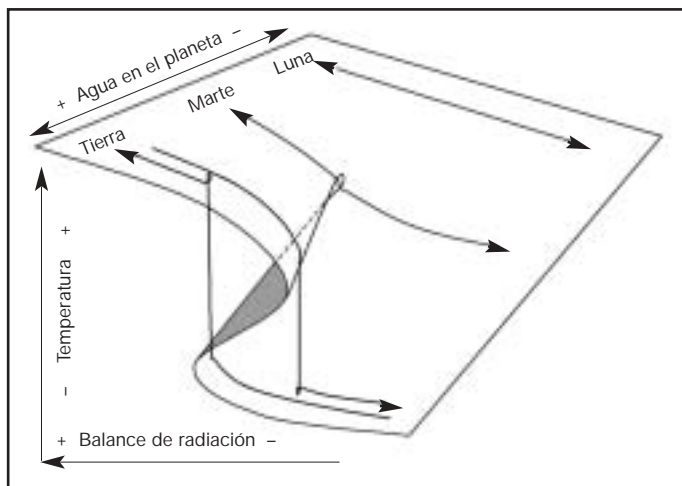


Figura 8. *Un modelo de catástrofe en cúspide para la evolución de la temperatura global planetaria en función del balance de radiación y el contenido en agua del sistema climático.*

cies animales), e incluso en la toma de decisiones militares, aunque aquí no me atreveré a profundizar (véase por ejemplo Arnold, 1980, o Rummel, 1976), figura 8.

Volviendo a la anomalía en la ecuación balance de radiación-temperatura, y si pensamos que lo que da lugar la anomalía es la presencia de agua que puede o no congelarse, resulta fácil proponer un modelo basado en la catástrofe en cúspide para explicar el comportamiento planetario. Se trata de momento de una simple hipótesis cualitativa que, sin embargo, resiste la confrontación con los datos generales y, desde luego, con los modelos numéricos del sistema climático terrestre. El registro geológico muestra que en el último millón de años, la Tierra ha pasado por varios episodios de crecimiento y destrucción masiva, y tremendamente rápida, de casquetes glaciares (5), de modo que la criosfera actúa como un regulador muy importante del sistema climático, retardando los cambios pero haciendo que estos sean más bruscos cuando se producen.

Otro ejemplo interesante, y el único caso que conozco de cuantificación de la teoría de catástrofes en Ciencias de la Tierra, es el modelo que rela-

(5) Especialmente en el hemisferio norte, donde la ausencia de un continente en la zona polar hace más sensibles e inestables a los casquetes. Parece demostrado que la acumulación de hielo es más eficaz, al contrario de los que se pensaba, porque se produce formación de hielo por congelación de agua marina; pero también que la destrucción es más rápida porque el océano sirve más fácilmente de cinta transportadora de icebergs hacia latitudes donde hay mayor radiación solar incidente.

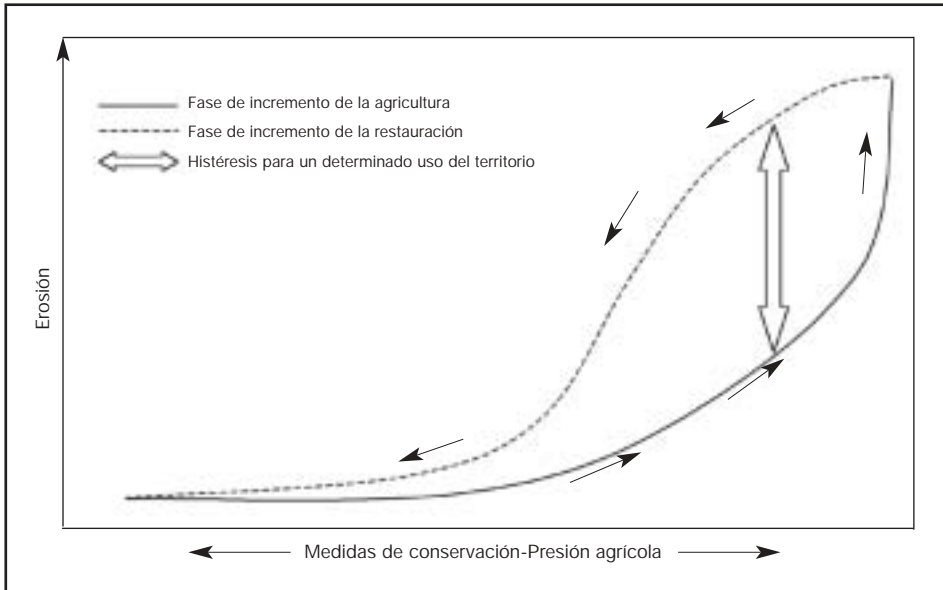


Figura 9. Evolución de las tasas de erosión en una cuenca en función de los cambios en usos de territorio, en particular, la presión agrícola y los esfuerzos de recuperación (según Trimble y Lund, 1982).

cióna biomasa y energía disponible con erosión. Una versión simplificada es la de la figura 9, muestra que la configuración es similar.

De todos estos casos resulta interesante resaltar la importancia de los cambios bruscos en la evolución de los sistemas terrestres (6). Pero si prestamos atención a dos de las propiedades de estas «catástrofes» —divergencia y histéresis— podremos obtener importantes conclusiones ambientales.

La «divergencia» en el comportamiento de estos sistemas, que estamos describiendo con muy pocas variables pero están constituidas por muchas, hace muy difícil la predicción y, desde luego, imposible la precisión.

La «histéresis», en problemas ambientales, se traduce en que cualquier impacto en sistemas que presentan esta propiedad tiene costes de recuperación muy superiores a los que hubiera acarreado su prevención.

(6) Hay de hecho un movimiento neocatastrofista en Geología que ha terminado con el antiguo paradigma del uniformismo.

Si provocamos un aumento de tasas de erosión, o en la frecuencia de las inundaciones en la cuenca de un río (pongamos el Tajo por ejemplo), reduciendo la cubierta vegetal de su cabecera, la repoblación deberá conseguir una cubierta vegetal más densa que la que desencadenó la catástrofe, esto es, los gastos en medidas reales de recuperación superarán al ahorro que supuso la ausencia de medidas de prevención.

Si provocamos un deshielo masivo de los, con un ascenso pequeño de temperatura, la reconstrucción de los casquetes no se producirá hasta que se alcance un descenso de temperatura considerablemente mayor.

Son muchos los ejemplos que demuestran que los costes de protección del medio son menores que los de corrección de impactos; sobre todo en lo que se refiere a impacto sobre el sistema global.

Win or gain

Resulta bastante evidente que, al menos desde el punto de vista de la Ciencias de la Tierra, la adaptación al medio (7) es la más rentable de las medidas, sobre todo ante la imprecisión de las predicciones. En un país como el nuestro, sometido a uno de los mayores riesgos de erosión y desertificación del mundo desarrollado (sólo Australia nos aventaja claramente, pero tiene una densidad de población) la protección de la cubierta vegetal es uno de los objetivos frente a los que no tenemos excusas (8), por el riesgo a la erosión y porque nuestra cubierta vegetal el único sumidero de que disponemos frente a los excesos de emisión de dióxido de carbono y que nos concede el triste privilegio de ser el Estado europeo que más ha aumentado sus emisiones desde el año 1991.

El profesor Arie Issar, un eminente hidrogeólogo israelí, lo plantea así:

«Ante la duda merece la pena prevenir y conservar, para vencer o ganar. Vencer evitando el desastre, si las predicciones "catastrofistas" eran ciertas, o ganar calidad ambiental en cualquiera de los casos.»

(7) La obra clásica de McHarg, *Design with Nature*, publicada en 1967, no ha perdido vigencia.

(8) Y en este sentido los territorios controlados por el Ejército español son una reserva de valor inestimable.

Bibliografía

- ARNOLD, V. I. (1985): *Teoría de catástrofes*, Alianza Editorial. Madrid.
- BLAIKE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. y WINSER, B. (1994): *At Risk. Natural hazards, people's vulnerability and disasters*.
- Intituto Geológico Minero de España (1988): *Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*, Serie: Geología Ambiental.
- ISSAR, A. S. (1995): *From primeval chaos to infinite inteligente*, Avebury.
- MCHARG, I. (1967): *Design with Nature*, John Wiley and Sons, Nueva York, (ed 25th anniversary 1992).
- RUMMEL, R. J. (1976): *Understanding Conflict and War: volumen 2: The Conflict Helix*. Beverly Hills, California: Sage Publications, en:
(<http://www.hawaii.edu/powerkills/CAT.ART.HTM>)
- THOM, R. (1972): *Stabilité structurelle et morphogenese*, Ediscience. París.
- TRIMBLE, S. W. y LUND, S. W. (1982): «Soil Conservation and the Eduction of Erosion and Sedimentation in the Coon Creek basin, Wisconsin», *USGS Professional Paper* número 1.234.
- WACKERNAGEL, M. y REES, W. (2002): *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. The New Catalyst. Bioregional Series.
- WOODCOCK, A. y DAVIS, M. (1985): *Teoría de las catástrofes*. Editorial Cátedra, Colección Teorema. Madrid.