

Continentes en colisión, creación de montañas

Colliding Continents, Making Mountains

MICHAEL P. SEARLE

Department of Earth Sciences, Oxford University, Parks Road, Oxford OX1 3PR, UK. E-mail: mikes@earth.ox.ac.uk

Resumen Las diferentes disciplinas de las Ciencias Geológicas permiten conocer cómo funciona la Tierra mediante la teoría de la Tectónica de Placas. A través de trabajo de campo, modelizaciones numéricas y otro tipo de investigaciones, la geología actual ofrece una explicación coherente a la formación de las montañas. Para el caso concreto del Himalaya, esta gran cordillera es el fruto de la colisión continental que tuvo lugar hace alrededor de 50 millones de años. La particular disposición de la cadena montañosa, inclinada hacia el norte debido a que la placa india intenta subducir bajo Asia, permite cartografiar estructuras y tomar muestras de su estructura profunda y, por lo tanto, descifrar su origen y evolución a lo largo del tiempo. En concreto, cuatro grandes estructuras (en forma de fallas y cabalgamientos) permiten definir otras tantas unidades estructurales incluidas tanto en la placa litosférica india como en la asiática. Los frecuentes terremotos aportan información acerca de la actividad de estas estructuras. Por otro lado, el acortamiento y engrosamiento cortical provocan el levantamiento de la cordillera, pero el ascenso topográfico incrementa también la intensidad de la erosión, provocando un efecto retroalimentado y el continuo rejuvenecimiento del relieve.

Palabras clave: Tectónica de Placas, Himalaya, formación de montañas.

Abstract The different disciplines of the Geological Sciences allow to know how the Earth works through the theory of plate tectonics. Through fieldwork, numerical modeling and other research, geology provides a coherent explanation for the formation of mountains. For the specific case of the Himalayas, this great mountain range is the result of the continental collision that took place about 50 million years ago. The particular arrangement of the mountain range, inclined northwards because the Indian plate attempts to subduct under Asia, allows mapping structures and taking samples of their deep structure and, therefore, deciphering their origin and evolution over time. In particular, four structures (in the form of faults and thrusts) allow to define structural units included in the Indian and Asian lithospheric plates. Frequent earthquakes provide information about the activity of these structures. On the other hand, cortical shortening and thickening cause the rise of mountains, but the topographic ascent also increases the erosion intensity, causing a feedback effect and continuous rejuvenation of the relief.

Keywords: *Plate tectonics, Himalaya, mountain building.*

INTRODUCCIÓN

El registro geológico muestra cuatro mil millones de años de historia de la Tierra. Durante este enorme período de tiempo, los continentes y los océanos han estado evolucionando dirigidos por la energía de la convección del manto terrestre. Desde el advenimiento de la teoría de la Tectónica de Placas en los años 70 del siglo XX, se sabe que, al menos desde hace dos mil millones de años (2000 Ma), los océanos del planeta se han formado en los márgenes constructivos a partir de las dorsales mediooceánicas, y se han destruido en los márgenes destructivos en las zonas de subducción. Los conti-

nentes, al estar compuestos por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, son más ligeros que la corteza oceánica y flotan sobre el manto, compuesto fundamentalmente por olivino y piroxenos. Se ha comprobado que los continentes pueden crecer mediante colisiones continente-océano en márgenes de tipo andino, donde se genera nueva corteza por intrusiones ígneas formando rocas graníticas (como el batolito de la cordillera de California o de los Andes) y rocas volcánicas calcoalcalinas, o a lo largo de márgenes tipo Himalaya donde se ha producido colisión continental. Es también posible crear montañas en arcos-isla como el del Caribe o las de Pacífico occidental. Incluso podría afirmarse que la

montaña más alta de la Tierra es una de las pequeñas islas del archipiélago de las Marianas, situadas inmediatamente sobre la fosa homónima, de más de 12 kilómetros de profundidad.

La Geología es la ciencia que trata del conocimiento acerca de cómo funciona la Tierra, y para ello se apoya en muchas disciplinas científicas. La geofísica nos permite entender cómo funciona la convección en el manto terrestre, que es el motor de las placas tectónicas. El paleomagnetismo nos permite reconstruir los fondos marinos a lo largo del tiempo, y utiliza los cambios de polaridad magnética para realizar mapas de la edad del lecho oceánico. La sismología nos ayuda a entender cómo funcionan los terremotos, a qué profundidad se generan y si su origen está relacionado con un contexto distensivo, compresional o transcurrente. Podemos usar los terremotos para predecir dónde es más probable que vuelvan a ocurrir identificando zonas activas tectónicamente en cordilleras pero, por desgracia, no podemos predecir dónde será exactamente el próximo ni la intensidad que tendrá. La geocronología nos permite utilizar los isótopos radiométricos como relojes para datar el momento de formación de ciertos minerales, sobre todo los que contengan uranio y torio, como los circones o monacitas.

La Geología agrupa toda esta información pero requiere un minucioso trabajo de campo. La estratigrafía y sedimentología son la piedra angular para desvelar la evolución geológica del planeta a lo largo del tiempo. Diferentes tipos de rocas se forman en diferentes tipos de ambientes, por ejemplo las calizas de los márgenes pasivos marinos poco profundos, las facies turbidíticas en el talud submarino, los cherts de los fondos oceánicos o contextos fluviales y lacustres. Del mismo modo, la petrología y geoquímica de las rocas graníticas y volcánicas pueden ser utilizadas para determinar diferentes contextos tectónicos. Así, los granitos de tipo andino, formados sobre zonas de subducción a lo largo de un margen continental, contienen minerales como la hornblenda y la biotita, mientras que las rocas formadas en márgenes tipo Himalaya contienen moscovitas, biotitas, granates y turmalinas. Los granitos de tipo andino albergan depósitos masivos de cobre, oro, plata y otros metales preciosos, mientras que el estaño y el tungsteno son comunes en rocas graníticas de zonas de colisión. Las rocas metamórficas son particularmente interesantes porque fueron originalmente rocas sedimentarias o ígneas que han sido metamorfizadas, y han cambiado como resultado del incremento de la presión y temperatura. Es de sobra conocido que las zonas metamórficas características de rocas de alta presión y baja temperatura, como los esquistos azules o las eclogitas, indican antiguas zonas de subducción, mientras que las cordilleras tipo Himalaya muestran cinturones de las clásicas series de metamorfismo regional, con gneises del grado de la cianita y sillimanita, y el metamorfismo de contacto con presencia de facies de baja presión y alta temperatura se desarrolla alrededor de las intrusiones ígneas.

Aunque los geofísicos nos explican qué tipo de rocas forman la corteza oceánica y el manto, los complejos ofiolíticos también pueden ser análogos tremendamente útiles. Las ofiolitas son láminas de

rocas oceánicas emplazadas sobre márgenes continentales con anterioridad a la colisión. El complejo ofiolítico mejor conservado y más grande está en las montañas de Omán, donde pueden ser cartografiados con precisión más de 20 kilómetros de espesor de lavas almohadilladas, diques tabulares, gabros de la corteza inferior y peridotitas del manto (Searle, 2013). Los niveles profundos de los arcos-isla rara vez están expuestos, pero en las montañas de Kohistan en Pakistán afloran rocas perteneciente a uno formado en el océano de Tethys durante el Cretácico y que se extendía entre India y Asia. Durante la colisión continental fue basculado e inclinado hacia el norte y ha obducido sobre el margen continental indio, preservando alrededor de 15 kilómetros de sección del arco-isla. Del mismo modo, podemos usar antiguas cordilleras erosionadas como la cordillera Caledónica-Apalachense, o la Varisca (antiguamente llamada Hercínica) para interpretar cómo son los niveles profundos de los cinturones orogénicos. En cualquier caso, es en las cadenas alpino-himaláicas de Europa y Asia donde se sitúan las cordilleras más altas, activas y completas de la Tierra, que son, a su vez, las más útiles para interpretar los procesos geológicos que operan en los cinturones de colisión entre continentes.

MONTAÑAS DEL HIMALAYA: GEOLOGÍA Y TECTÓNICA

La cordillera del Himalaya se originó como resultado de la colisión entre las placas litosféricas asiática e india. Esta última estuvo originalmente adosada a Madagascar, este de África y Antártida, de las que se separó hace alrededor de 140 millones de años durante la rotura del supercontinente Gondwana. De este modo, la India se convirtió en una isla que se desplazó rápidamente hacia el norte (entre 15 y 20 cm/año) a lo largo del océano Índico, impulsada por el crecimiento cortical propiciado a lo largo de las dorsales medio-oceánicas índicas (Searle, 2013). Aproximadamente hace 50 millones de años la placa india colisionó con la asiática en algún lugar situado a latitudes ecuatoriales. Desde entonces, ha penetrado hacia el norte indentándose en el continente asiático. Incluso hoy en día la India continúa su movimiento hacia el norte respecto a la estable Eurasia a una velocidad de unos 5 cm/año.

La zona de colisión está marcada por la zona de sutura del Indo-Tsangpo, una estrecha zona que contiene remanentes de ofiolitas, rocas sedimentarias de fondos oceánicos profundos correspondientes a Tethys, un océano que previamente separó ambas placas litosféricas. La cartografía geológica a lo largo del margen continental indio en las montañas de Zaskar, Ladakh, Spiti y norte de Nepal muestra el acortamiento y engrosamiento cortical resultado del inmensamente complejo plegamiento y cabalgamiento (Searle, 2013). En los niveles estructurales más profundos las rocas fueron metamorfizadas y transformadas en granitos y esquistos. Las altas temperaturas provocaron que la corteza media llegara a fundirse, produciendo migmatitas (gneises parcialmente fundidos) y, finalmente, rocas graníticas, como los famosos leucogranitos del Himalaya

(Fig. 1) que contienen abundantes turmalina, moscovita, granate y ocasionalmente, cordierita (Searle, 2006). Mediante la cartografía de las isogradas metamórficas ha sido posible tener una idea de la estructura de la corteza profunda, rara vez expuesta. Toda la cordillera del Himalaya está inclinada hacia el norte debido a que la placa india intenta subducir bajo Asia, y así es posible cartografiar y tomar muestras de su estructura profunda.

Muchas de las más altas montañas del Himalaya están compuestas por esos granitos y gneises, que originalmente se formaron a temperaturas por encima de los 700 °C y presiones superiores a los 5-7 kbar, equivalentes a enterramientos de más de 25-35 km. Los picos Manaslu, Makalu o Kangchenjunga son ejemplos de montañas de más de 8000 metros de altitud formados por esos recientes granitos (Fig. 1) (Searle, 2006). Las técnicas radiométricas de uranio-plomo en minerales como el circón o la monacita reflejan que esas rocas graníticas se formaron hace 20 millones de años en la corteza media. Otras montañas, como el Everest, tienen esas mismas rocas graníticas y gnéissicas en las inmediaciones del campo base en el glaciar del Khumbu, pero las de la cumbre son rocas sedimentarias del Ordovícico sin metamorfizar. Esas calizas de la cumbre del techo del mundo contienen fósiles como artejos de crinoideos. Es muy significativo que esas rocas, hoy en día situadas a 8850 m de altitud, se formaran en una zona litoral poco profunda de hace 470 millones de años. ¿Cómo se elevaron hasta convertirse en la cumbre de la montaña más alta de la Tierra?

A gran escala, en el Everest se observa una falla normal de bajo ángulo inclinada hacia el norte, que muestra las rocas sedimentarias de la pirámide somital ubicadas sobre rocas metamórficas que se formaron por procesos debidos al enterramiento profundo de los materiales (Fig. 2). Es irónico pensar que la montaña más alta de la Tierra esté cortada por una falla normal, generalmente asociadas a zo-



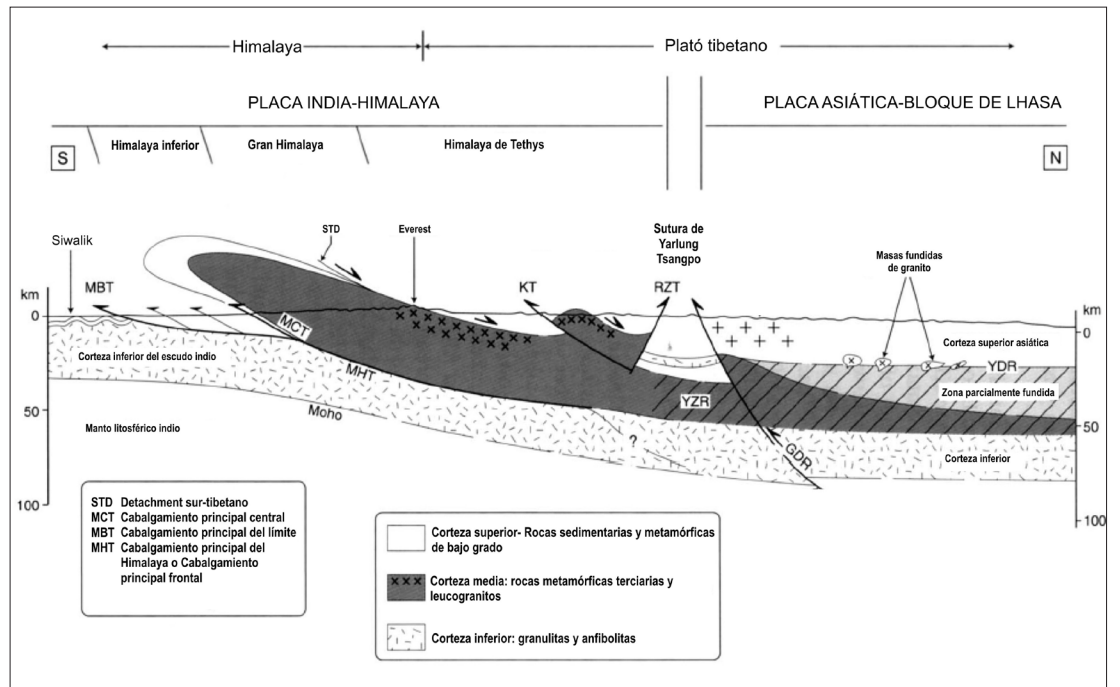
Fig. 1. Ama Dablam, un espectacular montaña formada por leucogranitos del Gran Himalaya. (Foto: L. Carcavilla).

nas distensivas. Escalando la cara sur del Everest se pasa a través de rocas que progresivamente corresponden a niveles cada vez más profundos. Esta falla normal de bajo ángulo, denominada *Qomolangma Detachment* es parte de la misma estructura que ha sido cartografiada a lo largo de todo el Himalaya, desde Zanskar en el Oeste hasta Buthan al Este. Es denominada *Detachment Sur-tibetano* (en inglés *South Tibetan Detachment*, STD) y delimita un marcado salto de condiciones de presión y temperatura a ambos lados de la fractura (Fig. 3) (Searle *et al.*, 2003). A lo largo de muchos picos del Himalaya como Shisha Pangma, Cho Oyu, Everest y Kangchenjunga el STD corta las cumbres y desciende hacia el plató tibetano situado al norte. Por el contrario, en el oeste de Nepal, el Dhaulagiri y el Annapurna, ambos picos de más de ocho mil metros de altitud, son de los pocos que se sitúan enteramente sobre el STD y están formados por calizas cámbricas y ordovícicas ubicadas sobre esa gran falla normal.



Fig. 2. Pirámide somital del Everest y posición del STD (línea roja discontinua) (fotografía L. Carcavilla).

Fig. 3. Unidades estructurales de la cordillera del Himalaya (Searle et al., 2003).



A la unidad que forma el núcleo de la cordillera se la denomina Gran Himalaya (*Greater Himalaya*, GH). Muchas de las montañas de esta unidad están formadas por migmatitas, leucogranitos y gneises que continenen cianita o sillimanita. Estas rocas reflejan el máximo grado metamórfico, con equivalentes a enterramientos de 20-30 kilómetros y temperaturas lo suficientemente altas como para fundir parcialmente los gneises. Desde el núcleo de la cordillera hacia el sur las condiciones de metamorfismo vuelven a decrecer de nuevo. La cartografía de las isogradas metamórficas refleja cada vez menores presiones y temperaturas en las rocas que siguen buzando hacia el norte. A lo largo de la base de las rocas metamórficas del Cenozoico, una gran zona de cizalla dúctil y un cabalgamiento, denominados Cabalgamiento Principal Central (*Main Central Thrust*, MCT) sitúan estas rocas metamorizadas en la oro-

genia alpina sobre las no metamorizadas del Himalaya Menor (*Lesser Himalaya* en inglés, LH) (Fig. 4) (Searle et al., 2003). Por lo tanto, toda la parte sur del GH muestra un metamorfismo invertido donde las rocas de alto grado se sitúan sobre rocas de bajo grado, mientras que al norte las isogradas están en sentido correcto por debajo del STD (Fig. 4). Estas estructuras claramente reflejan que las rocas metamórficas del GH, delimitadas en su parte inferior por un cabalgamiento (MCT) y en su parte superior por una falla normal (STD), extruyeron hacia el sur durante el clímax de la orogenia himaláica hace entre 30 y 16 millones de años. Como gran parte de las rocas del GH son migmatitas o granitos, parece que la fusión fue la primera causa de este flujo hacia el sur de las rocas de la corteza media, en un proceso llamado “channel flow” (Searle et al., 2003). Se asume que en aquella época las montañas del Himalaya

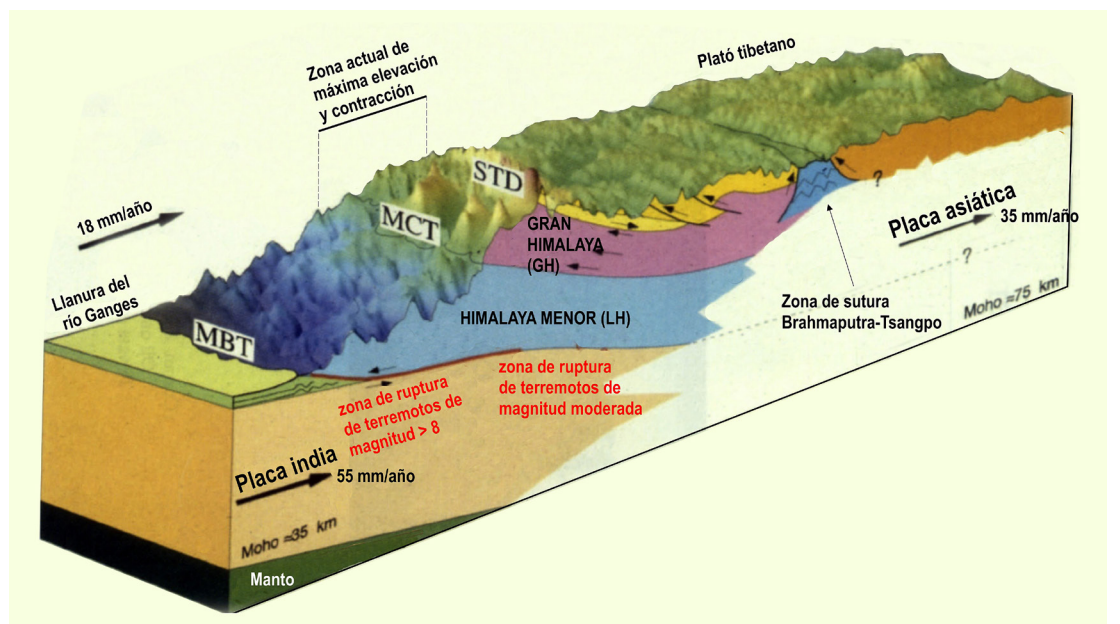


Fig. 4. Unidades estructurales del Himalaya reflejando la convergencia de las placas india y asiática y zonas de desarrollo de terremotos (Searle, 2006; Searle 2013).

eran como mínimo tan altas como ahora, y la corteza era al menos tan gruesa como lo es hoy en día. Según esas rocas calientes y profundamente metamorfizadas eran exhumadas hacia la superficie, se iban enfriando y las profundas estructuras dúctiles se convirtieron en fallas frágiles someras, de manera que tuvo lugar la formación de cabalgamientos mientras se producía la exhumación. Las edades de enfriamiento registradas en las micas, mediante las técnicas del argón/argón y las trazas de fisión en apatitos y circones, han registrado las temperaturas de enfriamiento asociadas a la exhumación de estas rocas pudiendo datar la edad de actividad del canal de flujo. Así, desde hace entre 16 y 20 millones de años, tuvo lugar el avance de la deformación hacia el sur a través del no metamorfizado Himalaya menor, donde las rocas descansan sobre el MBT.

El cabalgamiento activo en la actualidad es llamado Cabalgamiento Principal Frontal (*Main Frontal Thrust*, MFT) o Cabalgamiento principal del Himalaya (*Main Himalaya Thrust*, MHT), que es el responsable de que el Himalaya progrese hacia el sur sobre la cuenca molásica de Siwalik (Fig. 4). Los sedimentos erosionados desde las altas montañas fueron arrastrados hacia el sur mediante enormes ríos y depositados en una cuenca sedimentaria flexurada por el peso de la cadena del Himalaya ubicada al norte. Estos sedimentos tan recientes están muy plegados y los cabalgamientos siguen activos. Los sedimentos erosionados del Himalaya son transportados por enormes sistemas de ríos tanto al Oeste (Indo y Sutlej, que drenan hacia el Mar Árabe) como al Este (Ganges y Brahmaputra, drenantes al Golfo de Bengala). Los sedimentos en el abanico submarino de Bengala alcanzan espesores de más de 20 kilómetros en las costas situadas frente a Calcuta, y llegan incluso tan lejos como Sri Lanka.

TERREMOTOS EN EL HIMALAYA

El Himalaya es una cordillera tremendamente sísmica y los frecuentes terremotos registran el movimiento de la placa india, que subdujo tanto por debajo del Himalaya como del Tíbet. Los terremotos de más intensidad ocurren cada 100-500 años, y la cartografía de su distribución revela zonas donde los terremotos han liberado el esfuerzo acumulado, y zonas donde se espera una próxima ruptura.

El más reciente de estos terremotos de alta intensidad tuvo lugar el 25 de abril de 2015, con una magnitud de 7,8 y con el epicentro a 80 km al WNW de Kathmandu, denominado terremoto de Gorkha (Fig. 5). El seísmo tuvo un hipocentro a 15 km de profundidad y el mecanismo focal indica un cabalgamiento puro, como resultado de la intensa vibración generada por la compresión a lo largo del MHT, un cabalgamiento de poca profundidad inclinado 10° hacia el norte. La destrucción se extendió por el centro de Nepal y más de 9.000 personas fallecieron y 4 millones perdieron sus viviendas. Las réplicas continuaron durante meses, y como resultado se propiciaron enormes deslizamientos y avalanchas de nieve y rocas. Dos réplicas de 6,6 y 6,7 siguieron al terremoto principal, y una de 7,3 tuvo lugar 17 días más tarde. La localización de las réplicas demuestra



Fig. 5. Efectos del terremoto de abril de 2015 en la ciudad de Kathmandu. (Fotografía: L. Carcavilla).

que un plano de 140 km de largo y 50 de ancho se rompió durante el terremoto. Las rocas situadas por debajo de Kathmandu se desplazaron 7 metros hacia el sur, y las del norte de la capital se elevaron un metro durante el seísmo.

En esencia, son terremotos como el Gorkha los que, a lo largo de 50 Ma han construido la actual cordillera del Himalaya. Mientras la placa india siga penetrando hacia Asia, este proceso continuará activo. El mayor problema es que aunque el terremoto de Gorkha fue muy intenso, no fue lo suficiente como para liberar toda la tensión acumulada en profundidad. La rotura sísmica debería haber penetrado en la superficie terrestre a lo largo del MFT (Fig. 4), pero los estudios combinados de campo y GPS reflejan que no fue así y las fallas de esa región no muestran rotura. Esto significa que este segmento se podría romper en cualquier momento del futuro. Sabemos dónde es previsible que se produzca la ruptura, pero no cuándo.

LEVANTAMIENTO DE LAS MONTAÑAS Y CAMBIO CLIMÁTICO

El levantamiento del Himalaya y del plató tibetano ha tenido un influencia trascendental en el clima del hemisferio norte. Pero el momento exacto del levantamiento del Tíbet esta aún en discusión. Mientras que unos autores opinan que tuvo lugar durante un largo periodo iniciado incluso antes de la colisión entre India y Asia, otros proponen que el levantamiento ha sido tan reciente como hace 7-8 millones de años (Searle, 2013). Fuera cuando fuera, hay claros indicadores de que la cordillera del Himalaya pudo ser tan alta como los actuales Andes a finales del Cretácico y comienzos del Paleógeno, antes de la colisión continental. Un enorme batolito granítico de 2.500 km de largo se sitúa en el sur del Tíbet y Ladakh (India) y es muy similar en dimensiones y forma a los de los Andes que se extienden por Chile, Perú y Ecuador. Hay también claras evidencias de que el máximo levantamiento del extremo meridional del Tíbet tuvo lugar como resultado de la subducción de la placa india durante y después de la colisión continental que tuvo lugar hace 50 millones de años.



Fig. 6. Confluencia glaciar de Concordia, Pakistán, vista desde los 7300 metros de altitud. (Fotografía: L. Carcavilla).

El Himalaya está formado por rocas de la corteza media y superior del Neoproterozoico al Cenozoico, plegadas y cabalgadas (Searle, 2013). Las rocas anteriores se disponen bajo las otras y no afloran en la cordillera, por lo que se supone que han subducido hacia el norte bajo el plató. Como resultado del elevamiento, se desarrolló sobre la India un enorme sistema de baja presión atmosférica, mientras que sobre las partes elevadas del plató tibetano se formó una célula de alta presión. De esta forma, el aire caliente se eleva sobre el plató encontrándose con el aire húmedo procedente del océano Índico. El resultado de estos vientos es el intenso monzón estival que se desploma sobre la India entre junio y septiembre. Los altos picos del Himalaya forman una increíble barrera topográfica a los vientos del monzón. Así, las laderas meridionales de la cordillera son verdes y exuberantes, mientras que las del Tíbet son secas, áridas y estériles.

En resumen, el levantamiento activo, acortamiento cortical y engrosamiento provocan el levantamiento de la cordillera. Y el ascenso de las rocas incrementa la intensidad de la erosión, provocando un efecto retroalimentado.

PRESERVAR EL HIMALAYA

Las montañas del Himalaya son una de las zonas más espectaculares y bellas del mundo (Fig. 6). No

es casualidad que las religiones budistas e hinduistas surgieran allí. Enormes presiones medioambientales amenazan estas bellas montañas debido a una gran variedad de factores que incluyen la polución, la sobrepoblación, la minería, las construcciones de presas, el desarrollo y la deforestación, entre otros. Debe estar entre nuestras prioridades preservar las montañas, bosques y vida salvaje de uno de los ambientes más delicados de nuestro planeta.

BIBLIOGRAFÍA

Searle, M.P. (2013). *Colliding continents*. Oxford University Press, 464 p.

Searle, M.P. (2006). Himalayan granite. *The Alpine Journal*, 237-251.

Searle, M.P. (2003). *Geological map of the Mount Everest massif, Nepal-South Tibet*. Scale 1:100,000. Oxford University.

Searle, M.P., Simpson, R.L., Law, R.D., Parrish, R.R. y Waters, D.J. (2003). The structural geometry, metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif, High Himalaya of Nepal-South Tibet. *Journal of the Geological Society*, 160, 345-366. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 10 de mayo y aceptado definitivamente para su publicación el 24 de diciembre de 2017