
La Formación y Destrucción de Cordilleras

Evolución de una zona de subducción, el empuje de las dorsales y la fuerza que tira de la losa. Zonas de subducción asociadas a montañas y zonas asociadas a extensión detrás del arco. Levantamiento de cordilleras, crecimiento lateral de una cordillera y las cuencas de antepaís. Cordilleras altas y cordilleras enanas. Relación clima vs desarrollo montañoso, Zonas de subducción horizontales. Raíces de una montaña, delaminación.

Apertura

Un capítulo aparte merecen las montañas. Las montañas son el producto de un problema de espacio. A raíz de que existe un flujo calórico variable a través de los fondos de los océanos y a raíz de que éste produce la inclinación de la isoterma de 1.250°C, los fondos oceánicos, inexorablemente, resbalan alejándose de las dorsales. Este hecho obliga a los continentes a desplazarse lateralmente y, así, a colisionar entre sí. Inexorablemente se levantan, entonces, las montañas y consigo desentierran lagos, ríos y océanos entrampados en antiguas zonas de colisión.

Primer Acto

1.- ¿Quién empuja las placas?

A esta altura del partido suponemos debiera haber una confusión importante acerca del motor de la tectónica de placas. Las placas se desplazan empujadas por una fuerza que, hasta ahora, es invisible denominada “el empuje de las dorsales”, pero hemos aprendido que no son las dorsales las que empujan a las placas sino que se trata de una fuerza gravitacional. El fondo oceánico por gravedad, y no porque una dorsal la empuje, resbala a través de un plano inclinado. La tectónica de placas es el resultado de un cuadro inhomogéneo de distribución del flujo calórico y

éste es función de la forma en la cual el manto experimenta convección en profundidad. Cuando el flujo del manto asciende arrastrando consigo las altas temperaturas del fondo del manto, define un alto flujo térmico en superficie y esos serán los sitios en los cuales la isoterma de 1.250°C se levantará y a partir de ello dos placas se formarán divergiendo a partir de una dorsal. El patrón de convección del manto definirá los sitios en los cuales se desarrollará una dorsal centrooceánica y, por lo tanto, los sitios en los cuales dos placas se individualizarán. No parece ser como el huevo y la gallina, sino que es la astenósfera quien a través de su patrón de circulación define un flujo calórico variable en superficie que definirá la forma en la cual empiezan a moverse las placas. Tampoco son las celdas de convección, como solía asumirse, las que arrastran a las placas en superficie (Figura 5.1). Es como ya se dijo cien veces, un problema de cómo el calor se emite desde la superficie, siendo este mecanismo definido por la manera en la cual el manto circula en profundidad. La fuerza de “empuje de las dorsales” se encuentra entonces erróneamente enunciada, pero como en muchos otros casos de mala definición mejor seguir usando la vieja y errónea, pero ya ampliamente usada, denominación.

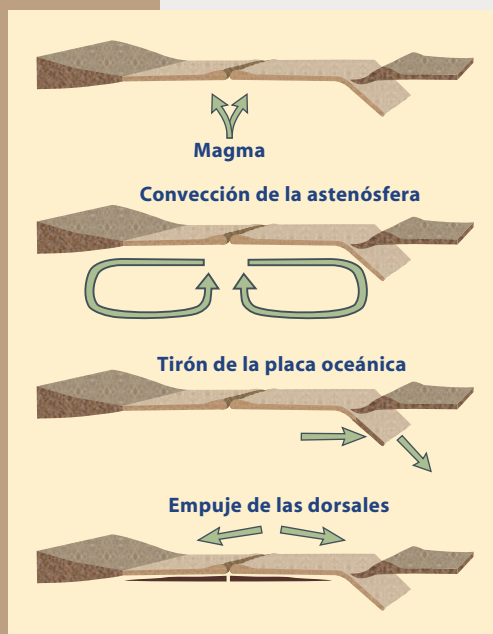


Figura 5.1. Fuerzas que se han considerado que provocan el desplazamiento de las placas en la Tierra: a) desde la simple presión que ejercen los magmas en el eje de una dorsal, b) el arrastre que teóricamente ejercen las celdas de convección de la astenósfera, c) el tirón que sufren los fondos oceánicos subducidos en sus extremos, hasta d) la denominada fuerza del empuje de las dorsales.

Sin embargo, aún no hemos hecho referencia a la principal fuerza que provoca el desplazamiento de las placas sobre la Tierra. La fuerza del empuje de las dorsales puede ser considerada la fuerza inicial que desplaza a los continentes, pero constituye, tan sólo, la tercera parte de otro tipo de interacción. Cuando un fondo oceánico se sumerge en el manto transporta rocas que se han formado a condiciones de presión y temperatura propias del fondo marino. Estas rocas se componen de minerales que son estables a aquellas condiciones superficiales, pero que al ser transportados a condiciones distintas se tornan inestables. De esta manera sus estructuras atómicas cambian, reempaquetándose y aumentando su densidad. En definitiva los minerales, y por lo tanto las rocas que componen el fondo oceánico, se transforman en otras especies más densas y estables en las nuevas condiciones.

En pocas palabras, el fondo oceánico una vez subducido ve incrementarse su densidad, y el resultado es que su borde libre en profundidad pasa a constituir una pesa que tira hacia abajo. Si bien los fondos oceánicos comienzan a deslizarse producto de la existencia de un plano inclinado en el límite inferior de la litósfera, no tardan en hacerlo debido a esta nueva fuerza 3 veces mayor a la que se ha denominado “tirón de la placa oceánica” (Figura 5.1).

2.- La óptica japonesa

Sabemos ya el porqué las placas se mueven y sabemos que cuando una placa se subduce por debajo de otra se pueden formar montañas por efecto de esa interacción. Sin embargo, ¿es ésta moneda corriente? Para nada.

Para ejemplificar esta situación necesitamos cambiar de óptica. Sitúese en un aula en Japón. Usted ahora es un estudiante japonés, aprenderá que su óptica ha estado sesgada. Un profesor de geología habla ahora de las zonas de subducción y utiliza como ejemplo aquella que afecta a la zona en la cual viven: la isla de Japón está formada por corteza continental bajo la cual se subduce corteza oceánica correspondiente al fondo oceánico Pacífico (Figuras 5.2 y 5.3). Este proceso lejos de producir una montaña genera una pequeña cuenca oceánica por detrás del arco.

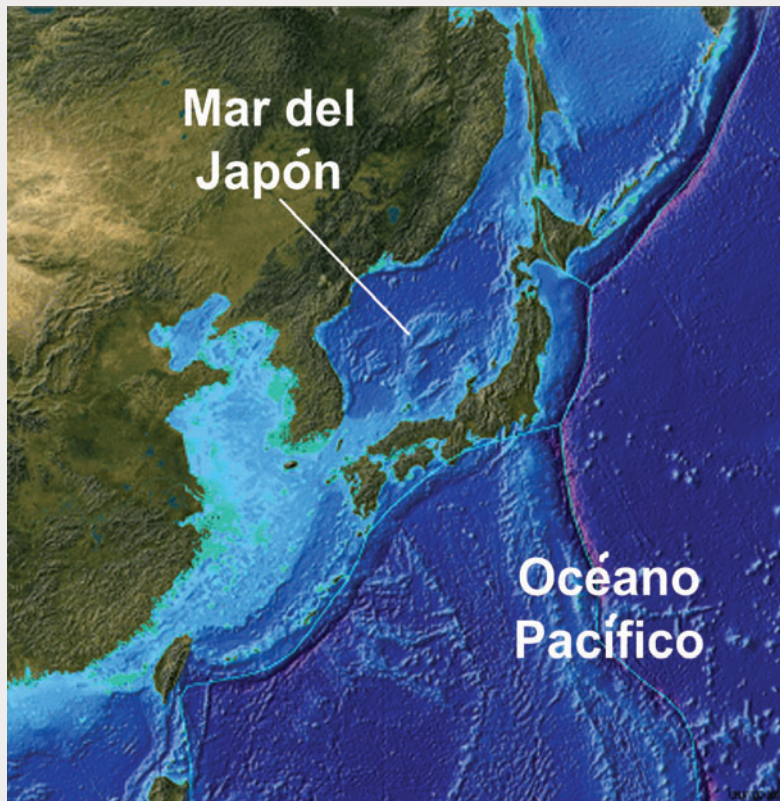


Figura 5.2. Las zonas de subducción en la Tierra se encuentran tan comúnmente asociadas a la producción de montañas como al desarrollo de zonas de extensión por detrás del arco que, eventualmente, evolucionan a cuencas oceánicas. Nótese que hacia el oeste de la isla de Japón se desarrolla un mar (Mar de Japón) que lo separa del continente asiático. Éste se formó contemporáneamente con la subducción del fondo oceánico Pacífico, al este de la isla.

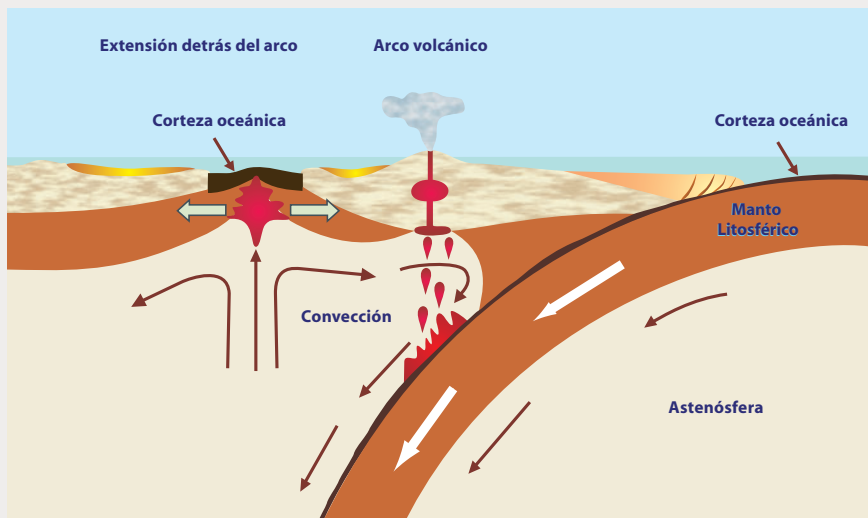


Figura 5.3. Zona de subducción asociada al desarrollo de extensión por detrás del arco. Ésta evoluciona en forma análoga a un rift hasta que puede derivar en la formación de un océano en el cual se desarrolle una dorsal centrooceánica. Nótese que una zona de subducción puede asociarse en forma indistinta a este proceso como desarrollar un sistema de montañas.

Usted, que ahora es un alumno japonés, ligará sistemáticamente el desarrollo de una zona de subducción al desarrollo de un sistema de rift por detrás del arco que evoluciona a una pequeña cuenca oceánica con el tiempo. Nuestra óptica, sin embargo, es contraria. Sabemos que el fondo oceánico Pacífico se hunde a una velocidad de 6,8 centímetros por año bajo el continente sudamericano, quien se desplaza hacia el noroeste a una velocidad de unos dos centímetros por año. El borde occidental de nuestro continente se encuentra flanqueado por una cadena de montañas, los Andes (Figura 5.4). Parece que una zona de subducción no se asocia a un proceso único en la Tierra.

¿De qué dependerá el comportamiento de las mismas?

Lo que se aprende de las múltiples zonas de subducción en la Tierra, es que el mero hecho de que un fondo oceánico se sumerja en el manto parece ser una razón necesaria pero no suficiente para que se levanten montañas. Se han invocado razones muy variables para terminar de despejar este dilema y la verdad es que hasta el día de hoy es motivo de constante debate, sin haberse llegado a un acuerdo razonable. De todas formas entre las múltiples posibilidades, asoma una que cobra fortaleza día a día. Parece ser que cuando la placa superior de un sistema subductivo posee movimiento hacia el océano, la zona de subducción desarrolla montañas, mientras que cuando se mueve en dirección contraria se genera extensión por detrás del arco y, eventualmente, cuencas oceánicas (Figura 5.5). El tiempo dirá

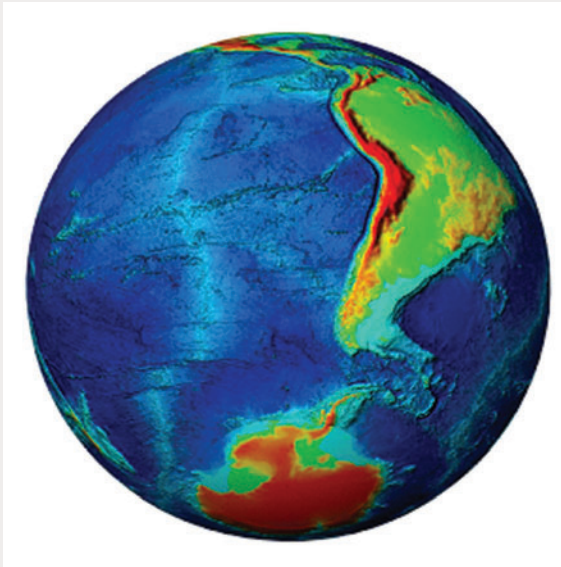
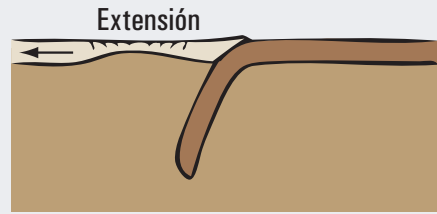
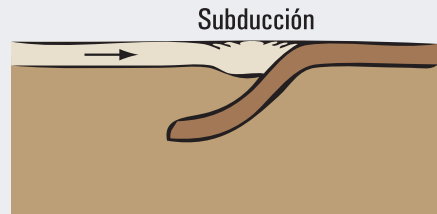


Figura 5.4. Globo terráqueo que muestra la zona en la cual las placas Pacíficas se hunden por debajo del continente sudamericano, formándose los Andes.

Figura 5.5. Existen múltiples teorías para explicar el porqué a veces las zonas de subducción se asocian a zonas de extensión y el porqué a veces lo hacen a sistemas montañosos. Entre las actualmente aceptadas se encuentra la que considera que el movimiento de la placa superior del sistema subductivo respecto de la placa que se subduce es la variable que determina que se desarrolle uno u otro proceso



Retracción de la placa superior.....extensión



Avance de la placa superior.....subducción

cuál es el efectivo control que este comportamiento tiene en un proceso de subducción para desarrollar o no montañas, a través de la recolección de casos mejor documentados.

3. Zonas de subducción como la gente

Olvidemos, entonces, aquellas zonas de subducción que, por la razón que sea, no desarrollan montañas y quedémonos con aquellas bonitas y saludables que levantan cordilleras tal como nuestros Andes, que al fin y al cabo se trata de un capítulo sobre montañas.

Hemos introducido la forma en la cual una cordillera gana altura y amplitud con el tiempo. El proceso está relacionado con el apilamiento de bloques de corteza con su consecuente acortamiento (Figura 5.6). El crecimiento de una cordillera en una zona de subducción implica más que simplemente el relieve que percibimos en la superficie.

Tomemos como analogía un barco de carga. Este barco sobresale por encima del nivel del mar, mientras que parte del mismo se encuentra sumergido.

¿Qué pasará si comenzamos a cargarlo paulatinamente, en forma análoga a sucesivos bloques de corteza que se apilan sobre la litósfera unos sobre otros?

Efectivamente, el barco y su carga serán cada vez más altos, pero al mismo tiempo su parte inferior se hundirá en las aguas. Una cordillera al desarrollarse con el tiempo verá incrementarse a la misma velocidad las raíces que la sostienen (**Figura 5.7**).

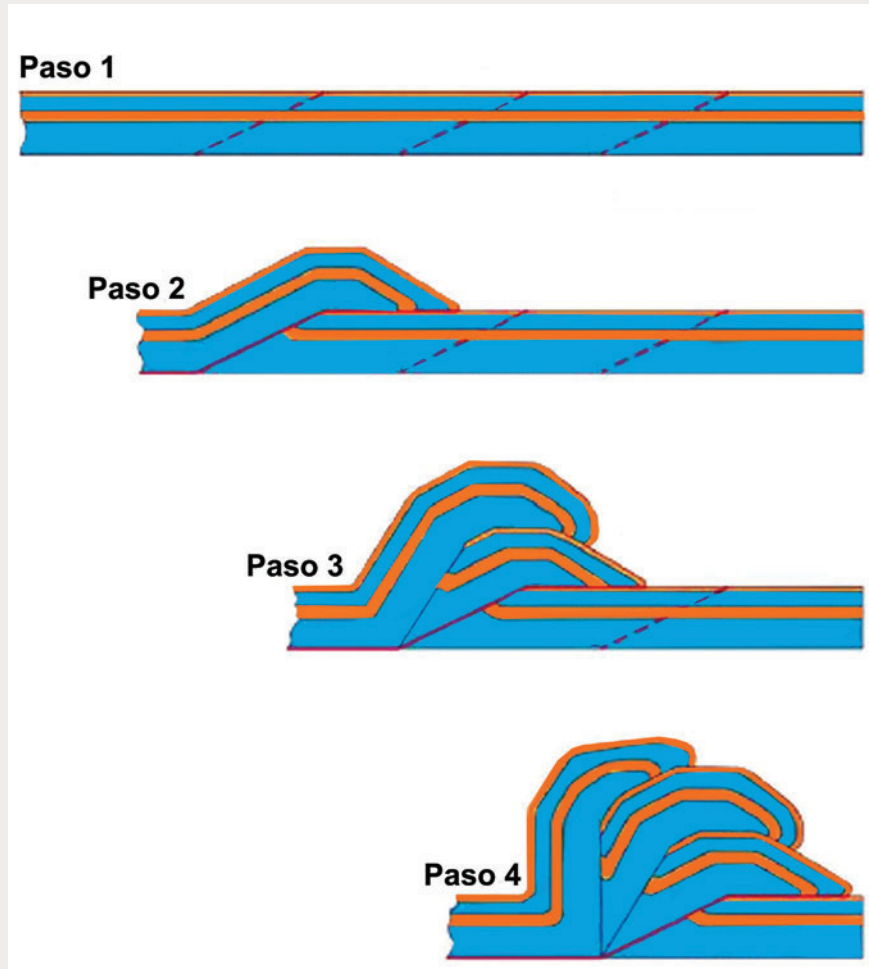


Figura 5.6. Tal como vimos en el capítulo 3, el desplazamiento uno sobre otro de bloques de corteza a través de fallas permite que una cordillera se desarrolle lateralmente así como que gane altura con el tiempo.

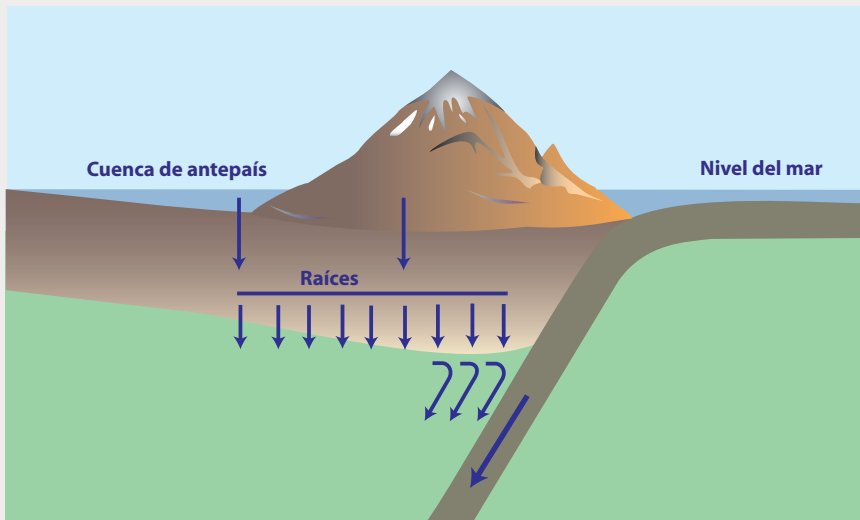


Figura 5.7. Comportamiento de una cordillera.

Una cordillera se comporta hasta cierto punto como un témpano: existe parte de la misma que sobresale sobre la superficie, mientras que otro sector se encuentra sumergido. Al crecer una montaña, también lo hacen sus raíces que se encuentran sumergidas en el manto. Además el peso de las montañas y sus raíces inflexiona la corteza tal como si fuera una balsa que es presionada desde uno de sus extremos. El espacio que se forma en el frente montañoso debido a la inflexión es rellenado por los productos del desgaste de la montaña formándose una cuenca de antepaís.

Una cordillera, conjuntamente con sus raíces, representa un peso extra sobre la litósfera continental (o lo que es lo mismo sobre una placa), que no existía en forma previa a su formación. Este peso causa una inflexión de la placa en cercanías al frente montañoso, que genera una depresión (Figura 5.7). La misma suele llenarse de los productos de desgaste de los sectores montañosos que son acarreados por ríos, glaciares y vientos hacia los sectores bajos. De esta manera acumulaciones de varios miles de metros de arena y cantos rodados a los pies de las cordilleras, atestiguan el proceso de progresivo desgaste de una montaña durante su alzamiento.

Los relieves montañosos ascendidos, así como sus raíces infrayacentes, deprimen también, debido a su peso, a la corteza oceánica en proceso de subducción (Figura 5.8). Esta inflexión produce surcos en el fondo marino de miles de kilómetros de extensión que se denominan trincheras.

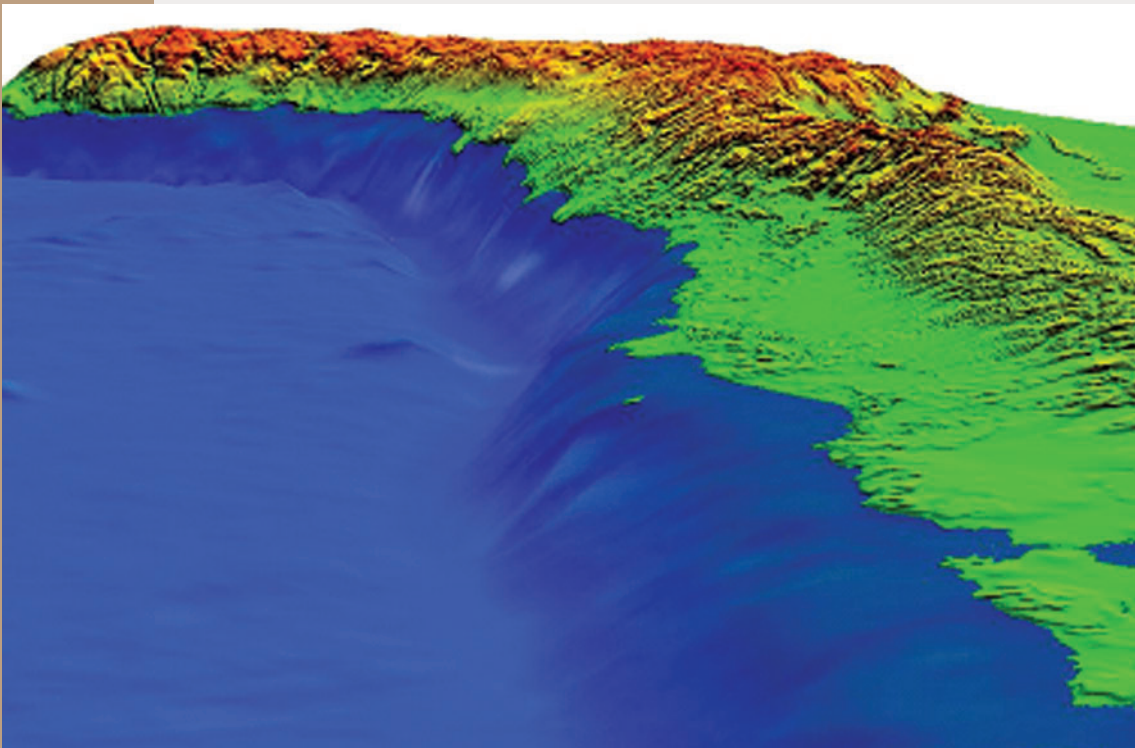


Figura 5.8. Los Andes son una cadena de montañas que posee grandes variaciones de altura y desarrollo lateral. Esas variaciones han sido curiosamente adjudicadas por algunos a la dirección en la cual soplan los vientos en el margen sudamericano produciendo lluvias orográficas. Nótese que en la cordillera patagónica, notoriamente más baja que los Andes del norte, los vientos húmedos provienen del oeste produciendo en la vertiente chilena lluvias, mientras que hacia el norte este esquema se invierte.

Segundo Acto

4.- Cómo regar una zona de subducción

Tomemos como ejemplo puntual una de las cordilleras más espectaculares formadas en una zona de subducción en la Tierra: los Andes. Esta gran cadena de montañas es extremadamente variable en altura y desarrollo lateral. Mientras que los Andes patagónicos son una cadena modesta de tan sólo 2.000 a 3.000 metros de altura que excepcionalmente llegan a los 3.500 metros, los Andes del norte y centro de Argentina y Chile son una notable cordillera con picos que sobrepasan los 5.000 y 6.000 metros de altura.

¿Por qué este dispar desarrollo de una cadena de montañas, si la misma se debe a un proceso único que es la subducción?

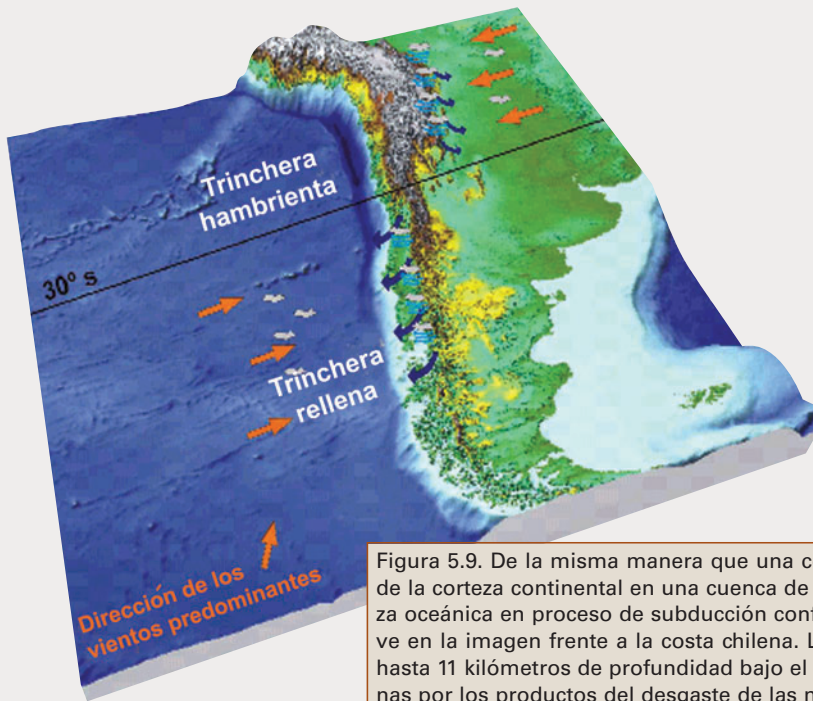


Figura 5.9. De la misma manera que una cordillera y su raíz producen la inflexión de la corteza continental en una cuenca de antepaís, lo hacen respecto de la corteza oceánica en proceso de subducción conformando una trinchera como la que se ve en la imagen frente a la costa chilena. Las trincheras en la Tierra pueden tener hasta 11 kilómetros de profundidad bajo el nivel del mar y pueden o no estar rellenas por los productos del desgaste de las montañas adyacentes.

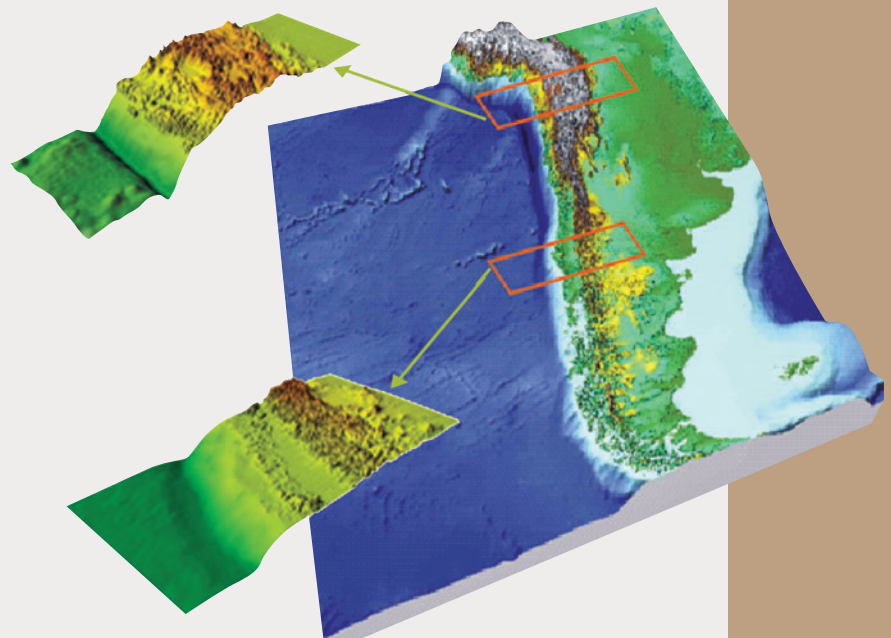


Figura 5.10. Las trincheras oceánicas se colman de los productos de desintegración de las montañas o permanecen vacías según la vertiente en la cual se desarrollan las máximas lluvias, que es función de la dirección en la cual soplan los vientos predominantes (Figura 5.9). La cordillera patagónica concentra sus lluvias en su mitad occidental, por lo que los ríos acarrean los productos de desgaste de las montañas hacia el Océano Pacífico. Los Andes del norte son extremadamente secos en su vertiente chilena y peruana por lo que, prácticamente, no hay desgaste de las montañas y escasos ríos transportan esos productos permaneciendo las trincheras semivacías.

Una de las teorías más audaces que se han formulado al respecto, relaciona el desarrollo que adquiere un sistema montañoso con la dirección con la cual es azotado por los vientos húmedos. Veamos de qué se trata esta idea tan extraña. Los Andes de Argentina y Chile muestran una curiosa simetría: mientras que a la altura de la Patagonia las máximas lluvias se generan en la vertiente chilena, producto de un sistema de vientos que provienen del Océano Pacífico, las lluvias hacia el norte se producen en la vertiente argentina (Figura 5.9). De esta manera tanto la Patagonia argentina, como la zona central y norte chilena representan desiertos en los cuales pocos ríos remueven los productos de desgaste de la cordillera. El resultado es curioso: mientras que la trinchera oceánica adyacente a los Andes patagónicos se encuentra rellena de los productos de desgaste cordilleranos, la trinchera a la altura del centro y norte chileno está vacía a semivacía (Figura 5.10). Los altos Andes del norte han crecido paralelamente a una trinchera oceánica vacía, mientras que los Andes patagónicos lo han hecho frente a una llena. Aparentemente, los productos de desgaste de una cordillera actuarían como un lubricador en una zona de subducción que impediría el desarrollo de presiones necesarias como para levantar un cordón de altas montañas. En cambio, la ausencia de este material en las trincheras permitiría una interacción efectiva entre las placas, generándose presiones suficientes como para que se levanten grandes montañas.

Conclusión. Si lo que se busca es generar grandes cordilleras en una zona de subducción, parece ser conveniente regarlas del lado del océano.

5. Todo lo que sube tiene que caer

Hemos visto que ante ciertas condiciones favorables una zona de subducción puede asociarse al levantamiento de una montaña que inclusive, puede llegar a ser alta según los estándares terrestres. Ahora,

**¿el desgaste paulatino de un cordón montañoso,
por medio de la acción de ríos y glaciares,
es la única forma de entorpecer su desarrollo o incluso
eliminarlo de la faz de la Tierra?**

Realmente no. Existe otro mecanismo que elimina parcial o totalmente una montaña después de haberse formado. Este mecanismo se denomina colapso. Una montaña, tal como un castillo de naipes puede desmoronarse. Las razones por las cuales un sistema de montañas se derrumba, como un edificio viejo, radican en las proporciones que ésta adquiere y en la forma en la cual varían las interacciones entre las placas que le dieron origen. No existe sobre la Tierra ninguna montaña que supere los 8 kilómetros de altura, lo que hace pensar que su estructura no es eficiente para soportar “edificios” de más envergadura. Tal como para

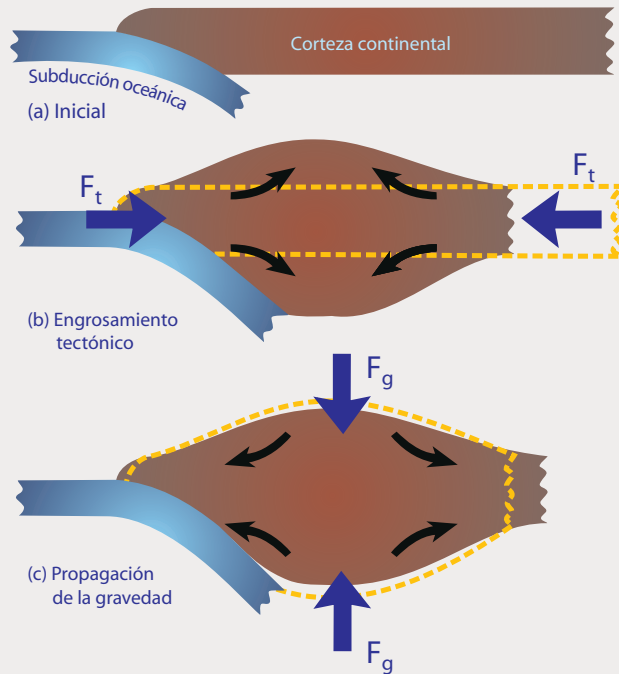


Figura 5.11. Así como una cordillera y su raíz se producen ante ciertas condiciones favorables, el desarrollo de una altura extrema o la caída de la compresión derivada de la interacción entre las dos placas, puede producir su colapso parcial o total.

ciertos materiales de construcción y ciertos diseños ingenieriles, un edificio no puede superar cierta altura, con las montañas parece pasar algo similar. Las montañas colapsan por encima de ciertas envergaduras (Figura 5.11). Un caso por el estilo son los Himalayas, la mayor cadena montañosa de la Tierra. Estos se encuentran en proceso de colapso incipiente en aquellos sectores que han superado los siete kilómetros de altura. Otra forma a través de la cual una cadena de montañas puede experimentar un colapso está relacionada con modificaciones en el régimen de interacción de las placas que se aproximan, sean éstas parte de un sistema de subducción o uno de colisión.

La disminución en la velocidad de convergencia de una placa en proceso de subducción puede provocar una caída en el régimen compresional que le diera origen a un sistema montañoso condenándolo a su colapso (Figura 5.11).

6. La pérdida de los cimientos

Así como las cordilleras pueden derrumbarse ante ciertas condiciones ya analizadas, sus raíces pueden tornarse inestables y arrancarse de la litósfera.

¿Bajo qué condiciones las raíces de una montaña se caen en el manto?

Habíamos visto en este mismo capítulo que, entre las fuerzas que producen el movimiento de las placas, la fuerza que tira del fondo oceánico subducido es la más importante. Esta fuerza surge de las transformaciones mineralógicas que experimentan las rocas que componen el fondo oceánico al ser transportadas éstas hacia las profundidades. Un fenómeno similar ocurre en algunas raíces de algunos cordones montañosos. A medida que una cordillera crece, hemos visto que también lo hacen sus raíces. Éstas, en su proceso de crecimiento, paulatinamente descienden en el manto y de esta forma los materiales que las forman se someten a condiciones de mayor temperatura y presión de las cuales fueron formadas. Así los minerales que componen las rocas alojadas en las raíces de las montañas se transforman hacia especies más densas, lo que puede provocar la inestabilidad de las mismas. Muchos sistemas montañosos pierden sus raíces mediante este proceso, el que técnicamente se conoce con el nombre de delaminación. Las simulaciones con computadora predicen este proceso mostrando que, ante ciertas condiciones, las cordilleras pierden sus raíces, las cuales se sumergen en la astenósfera (Figura 5.12).

¿Qué pasará con las cordilleras al momento en el cual sus raíces se pierden en el manto?

Para contestar esta pregunta volvamos a la analogía del barco carguero. Si súbitamente volcamos la enorme carga de un barco en el mar, éste que se encuentra deprimido en las aguas debido al enorme peso que soportaba tenderá rápidamente a alzarse. Eso exactamente pasa con las cordilleras que pierden sus raíces por delaminación, se alzan al haber perdido el peso que las anclaba al manto.

