

una tensión que se ejerce en dirección de las flechas de la figura 118. Llega un momento en que la cohesión de las capas de hielo queda vencida, y aparece una separación ó hendidura perpendicularmente á dicha dirección. Estando la línea de tensión inclinada  $45^\circ$  sobre el eje del glaciar en sentido de arriba abajo, la raja ó línea de rotura resulta de abajo arriba á  $45^\circ$  también. Al ver los primeros observadores que las grietas marginales cortaban las orillas oblicuamente en sentido de la corriente, engañados por la apariencia, dedujeron que la marcha de aquéllas es más rápida que la del centro. Las mediciones efectuadas, de acuerdo con el análisis mecánico del fenómeno, han demostrado lo contrario.

La formación de las grietas transversales y longitudinales dimana de las desigualdades del fondo del glaciar. Si estas desigualdades están en un declive, la masa de hielo, después de haber seguido un lecho de cierta inclinación, llega á un punto en que el declive es mayor; obligada entonces á plegarse en el sentido de su espesor para seguir

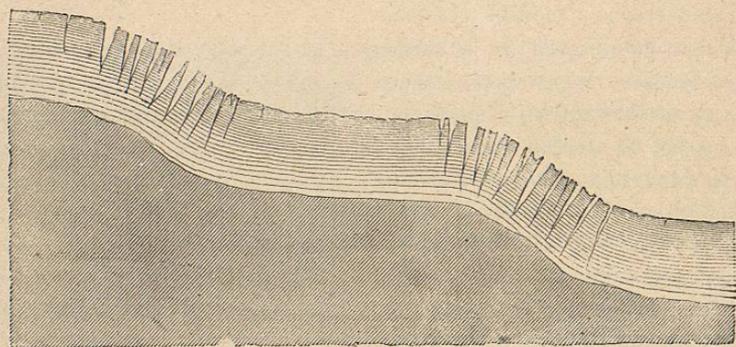


Fig. 119. —Causas de la formación de las grietas transversales (corte longitudinal del glaciar)

el nuevo lecho, se rompe por el esfuerzo que resulta de esta tensión, produciendo cierto número de grietas tanto más anchas cuanto mayor es la nueva inclinación. En un río líquido se formarían *raudales*, y la fluidez del agua haría posible esta aceleración de velocidad que no lo es con el hielo. Las grietas transversales así formadas se cierran un poco más abajo, si el lecho del glaciar recobra su inclinación primitiva, conforme lo muestra claramente la figura 119. La explicación de las grietas longitudinales es muy parecida; sólo que éstas suponen desigualdades del fondo del glaciar en el sentido de su anchura. Estas últimas grietas se forman también en los puntos en que el lecho del glaciar se ensancha de pronto, al salir de un desfiladero angosto y escarpado. Pudiendo entonces el hielo extenderse lateralmente, se ejerce la tensión en sentido transversal, y se producen las rajaduras perpendicularmente á esta dirección, es decir, en sentido longitudinal.

Tyndall ha hecho observar que las grietas marginales son más numerosas en el lado convexo que en el otro, en las partes curvas de los glaciares, y da la razón de ello diciendo que, según sus medidas, la velocidad es mayor en la primera orilla que en la otra, y por consiguiente también lo es la tensión que produce las roturas. Toma por ejemplo el Mar de Hielo, á la altura del Montanvert, en la orilla occidental ó cóncava del glaciar, y hace observar que las grietas son en ella menos numerosas que en la orilla oriental ó del Sombrero, que es el lado convexo del Mar de Hielo en esa región.

Las grietas siguen naturalmente el movimiento de los glaciares (1); sólo que, conforme acabamos de ver, sufren durante su movimiento los cambios que traen consigo las variaciones en las causas que los han engendrado; las unas se cierran al paso que las otras se ensanchan. Además, la acción del agua que circula por las mil anfractuosidades de la superficie del glaciar contribuye á modificar la forma de las grietas. Así es como resultan los molinos ó pozos de los glaciares, de que hemos hablado antes. Los arroyos de la superficie se reúnen formando torrentes, corren con impetuosidad por los lechos que se abren hasta que, encontrando una grieta, se precipitan en ella con violencia y socavan á modo de embudo la pared contra la cual viene á dar el agua. El continuo remolino del agua en estos abismos produce un estruendo atronador que ha sido causa de que se dé el nombre de *molinos* á los pozos de los glaciares.

Como el molino sigue á la hendidura en su movimiento descendente, llega un momento en que, hallando el torrente que le formaba otra salida en la grieta que ha sucedido á la primera, abandona ésta y empieza á formar un nuevo pozo. Tyndall ha sondado muchos de estos pozos abandonados que tenían hasta 27 metros de profundidad; un plomo de sonda echado en el Gran Molino (en actividad) dió  $49^m,55$ , pero sin llegar al fondo. “Uno de estos pozos, dice C. Martins, medido por Dollfus, Otz y yo en el glaciar del Aar, tenía 58 metros de profundidad. Desor sondó otro en el Finsteraar, y no encontró el fondo hasta 232 metros de la superficie., Atribúyese á antiguos molinos del glaciar la formación de esas cavidades singulares conocidas con el nombre de *marmitas de gigantes*. Al engolfarse en los pozos el agua cargada de arena, de piedrecillas y de guijarros, abrió en otro tiempo, en el seno de las rocas sobre las cuales resbalaba el glaciar, los hoyos redondeados que hoy se ven en varios sitios. “El *Jardín glaciar* de Lucerna, dice M. Gourdault, adornado al estilo alpestre y cuyas diferentes eminencias se han reunido con puentes y escaleras, contiene la obra entera y auténtica de un glaciar de la época cuaternaria. Consiste ésta en diez y seis excavaciones ó *marmitas de gigantes*, la principal de las cuales tiene unos 14 metros de diámetro por otros tantos de profundidad. Las perforaciones bruñidas y en forma de embudo, hechas por las aguas de fusión arremolinadas del glaciar, continuaron en seguida y avanzaron cada vez más en el suelo peñoso por los cantos erráticos que el glaciar llevaba consigo. Este glaciar era el del Reuss y sus afluentes., Encuéntranse cavidades semejantes en muchas regiones que en remotísimas épocas estaban cubiertas de glaciares, y especialmente en los fiordos de Escandinavia, donde adquirieron dimensiones enormes.

Una de las curiosidades de los glaciares, cuyo interés científico es inmenso, sobre todo desde el punto de vista geológico, la constituyen los *canchales*, esas acumulaciones de rocas, guijarros y escombros de toda clase, caídos de las montañas vecinas ó

(1) Las grietas se suceden en un mismo punto de un glaciar, de modo que, transcurrido cierto espacio de tiempo parece que no han cambiado de sitio. A esta ilusión hace referencia Tyndall en el párrafo siguiente que entresacamos de su obra *Los Glaciares*. “En la cumbre de la Gran Meseta, dice, y al pie de la última cuesta del Monte Blanco, os enseñaré una gran grieta en la cual un alud precipitó á tres guías en 1820. ¿No es este un error? Una grieta, que sería difícil distinguir de la grieta actual, existía seguramente allí en 1820. Pero ¿era efectivamente la misma que hoy se ve? El hielo hendido que se ve hoy en aquel punto ¿es el mismo que cincuenta y un años atrás? Ciertamente que no. ¿Y qué lo prueba? El hecho de que más de cincuenta años después de su desaparición, se encontraron los cadáveres de los tres guías cerca del extremo del glaciar de los Bossons, muchas millas más allá de la grieta actual.,

Esta observación prueba además, como más adelante veremos, que el hielo del fondo acaba por aparecer á la superficie al cabo de cierto tiempo, resultado necesario del fenómeno de la ablación.

arrancados de los flancos escarpados que bordean el río de hielo. Hemos dicho ya que se los distingue en canchales *laterales*, que son los mayores, por cuanto van aumentando con todos los fragmentos que caen en ellos durante el período de avance del glaciar; en canchales *centrales*, que proceden de la reunión del glaciar principal con sus afluentes, y que por lo tanto son tan numerosos como éstos (por esta razón el Mar de Hielo está surcado por cuatro canchales centrales que proceden del glaciar del Gigante, del del Lechaud y de los dos glaciares que constituyen el Talefre). Al llegar á la parte inferior, al frente del glaciar, todos estos canchales se reúnen en uno solo, el *terminal* ó *frontal*, que la masa de hielo empuja hacia delante cuando el glaciar crece en longitud, y que, por el contrario, deja aislado cuando por un fenómeno inverso el glaciar retrocede y disminuye. El canchal central difiere de los otros dos en que, en lugar de descansar sobre el hielo, sus pedruscos se apoyan en el suelo del fondo del valle. Aparte de estos canchales, que pudiéramos llamar *artificiales*, por cuanto todos los restos de que se forman proceden de la superficie exterior del glaciar, conviene tener en consideración la capa de casquijo, guijarros

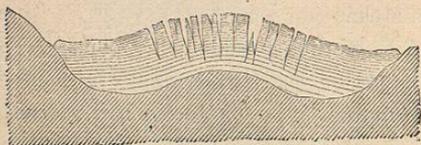


Fig. 120. — Causas de la formación de grietas longitudinales

y cieno arenoso interpuesto entre la superficie inferior y el terreno subyacente, y que constituye el *canchal profundo*. Al llegar al frente terminal, sus escombros se acumulan con los otros en el canchal frontal.

Los fragmentos de rocas que forman los canchales tienen á veces dimensiones colosales, no siendo raro encontrar en los glaciares de los Alpes algunos de ocho á diez metros en todos sentidos. La roca de Bláustein, en el valle de Saas, tiene un volumen de 8.000 metros cúbicos.

Entre los peñascos que sustenta la superficie de los glaciares se ven algunos que presentan una particularidad curiosa; tienen el aspecto de masas sostenidas por un pie ó zócalo de hielo, casi como están los antiguos dolmens en sus pedestales de granito. La explicación de estas *mesas de glaciar* es muy sencilla. Más arriba hemos hablado del fenómeno de la ablación, es decir, del descenso continuo de la superficie del glaciar por efecto de la temperatura y especialmente de la radiación solar. La fusión del hielo, ocurrida así durante el verano, compensa el aumento del mismo que resultaría de las nevadas del invierno. "Mientras sólo se derriten las nieves caídas en invierno en la superficie del hielo, dice M. Grad, los glaciares no disminuyen; pero cuando empieza á fundirse el hielo mismo, aquéllos disminuyen de altura, y tanto más cuanto más excede la ablación del crecimiento causado por la filtración y la regelación del agua en el interior de la masa (1)."

La ablación no tiene lugar donde la superficie del hielo está resguardada de la radiación solar, y como una roca aislada en el glaciar impide la fusión de la parte de la

(1) M. Grad ha medido en 1869 la altura de la ablación á diferentes altitudes en el glaciar de Aletsch. A los 1.250 observó un promedio diario de 32 milímetros; á 2.000, este promedio llegaba á 50 milímetros; á 1.800 metros de altitud era de 52 milímetros. Por lo demás, era bastante desigual en una misma línea transversal, á causa del abrigo que proporcionan los canchales, ó por la reverberación del calor en las paredes peñascosas de las orillas. Aquí tratamos de observaciones hechas durante los meses de agosto y septiembre; en los días despejados y calurosos del verano la ablación es bastante grande, y M. Grad la ha visto llegar á 15 milímetros por hora en el glaciar del Aar. Desor estima en 5 metros por término medio la pérdida de altura ocasionada por la ablación durante todo el año en los glaciares de Suiza.

superficie sobre la cual descansa, al paso que alrededor de su base el hielo se derrite y baja su nivel, resulta que poco á poco la roca queda suspendida sobre una masa de hielo que sólo puede derretirse lateralmente: con mucha frecuencia esta especie de meseta está inclinada, habiéndose notado que la dirección de esta inclinación es de Norte á Sur. Esta particularidad se explica fácilmente atribuyéndola á la acción más enérgica de los rayos solares sobre la parte meridional de la masa, al paso que la sombra proyectada al Norte hace el abrigo más completo. Obsérvase un fenómeno parecido en los rastros que forman los canchales centrales. Los regueros de fragmentos de rocas que los constituyen se elevan á veces 8 ó 10 metros sobre el nivel del glaciar. Examinando estas crestas, se echa de ver que la capa de piedras es superficial y que descansa en realidad sobre una larga arista de hielo protegida de la fusión por el canchal, al paso que la ablación ha reducido en todas partes el nivel del glaciar.

Así se explica otra circunstancia muy conocida de los montañeses; la de que los objetos que desaparecen en las profundidades de las grietas acaban por salir á la superficie al cabo de más ó menos tiempo, como si el glaciar arrojara todo cuerpo extraño, como si "no tolerase nada impuro," según la frase admitida.

## IV

## TEORÍA FÍSICA DEL MOVIMIENTO DE LOS GLACIARES

Todos los fenómenos que acabamos de describir tienen su interés particular: las *curiosidades de los glaciares*, como se las llama, merecen estudiarse cuidadosamente en sus menores detalles, pues hasta los más insignificantes pueden tener gran importancia, desde el punto de vista científico consideradas. Pero el hecho capital, dominante, es el movimiento de progresión ó avance de los glaciares, y sobre él debe basarse toda la teoría glaciar.

En el siglo pasado, cuando sólo se conocía el movimiento de conjunto de descenso de la masa, lo primero que naturalmente se ocurrió fué atribuir su causa á la gravedad. El glaciar resbala por su pendiente arrastrado por su propio peso, del mismo modo que cualquier cuerpo sólido por un plano inclinado. Altman y Grúner formularon de 1751 á 1760 esta hipótesis que adoptó Saussure á fines del siglo y á la cual prestó algún tiempo el peso de su gran autoridad. El ilustre físico y naturalista suponía que el descenso tenía un auxiliar en la interposición del agua que corre por debajo del glaciar entre las capas inferiores y el fondo pedregoso sobre el cual reposa. Esta explicación, admisible en cuanto á las partes más bajas, no lo es por lo que respecta á las más elevadas, dado que entonces el hielo del fondo se adhiere al terreno subyacente por efecto de una temperatura inferior á cero, á pesar de lo cual se ha notado el movimiento de progresión, lo mismo en las alturas del glaciar que en su parte más baja. Se ha opuesto otra objeción, que es la siguiente: la velocidad del descenso debería crecer con la inclinación, y sin embargo hemos visto glaciares tributarios de pendientes muy rápidas moviéndose con más lentitud que el principal. Además, la teoría del descenso supone que toda la masa se mueve en una pieza, y no explica el movimiento desigual de sus partes, de las orillas al centro y de la superficie al fondo.

La comparación de los glaciares á los ríos, cuya velocidad de curso varía del mismo modo que la de las diferentes partes del glaciar, ha inducido á los sabios á extremar todavía más la analogía entre las dos corrientes, fluida y sólida. La gravedad es la que

arrastra las moléculas líquidas por el lecho inclinado del río, siendo las resistencias que experimentan en las orillas, en el fondo, etc., causa de las diferentes velocidades de que están animadas. Pero el hielo es sólido y las partículas que lo componen no están libres, sino unidas por una fuerza de cohesión que, cuando una fuerza superior llega á vencerla, produce una rotura y no un impulso de salida. Sin embargo, se ha supuesto al hielo dotado de cierta *plasticidad* análoga á la de los cuerpos blandos. Según parece, Bordier de Ginebra fué el primero que emitió esta idea, que en un principio pasó desapercibida, y que Rendu, obispo de Annecy, ha indicado con toda claridad en su *Memoria sobre los glaciares* (1840): "Hay una porción de circunstancias, dice, que parecen exigir que atribuyamos al hielo de los glaciares una especie de ductilidad que le permite amoldarse sobre el lecho que ocupa, adelgazarse, dilatarse y contraerse como si fuese una pasta blanda.", Forbes, cuyas observaciones y experimentos han contribuído tanto á dar á conocer el movimiento de progresión en todos sus detalles, fué quien se ocupó de la teoría de la plasticidad ó viscosidad de los glaciares. He aquí cómo la resumía: "Un glaciar es un fluido imperfecto, un cuerpo viscoso, que se desliza por pendientes de cierta inclinación á causa de la presión natural que ejercen sus partes.", Entre las pruebas que daba en apoyo de su opinión, aparte de las que resultan de las leyes del movimiento diferencial de las orillas y del centro, Forbes aducía el hecho de la aceleración de la velocidad de descenso en verano, pues la temperatura más alta aumenta naturalmente la plasticidad del hielo. La estructura vetosa que se observa en el interior de la masa proviene en su concepto de las líneas de discontinuidad procedentes de los movimientos desiguales de las diferentes partes de esta masa, de sus mutuas dislocaciones. Después nos haremos cargo de las modificaciones que los experimentos de Christie, Faraday y Tyndall han introducido en la teoría de la plasticidad del hielo.

Scheuchzer de Zurich propuso ya en 1705 una teoría del movimiento de los glaciares, basada en la dilatación que experimenta el agua al congelarse. El hielo de los glaciares está surcado interiormente de muchas grietas en las que penetra el agua de fusión de la superficie, agua que se congela y se dilata al ponerse en contacto con la baja temperatura interna de la masa. La fuerza considerable desarrollada entonces por la expansión de la masa entera del glaciar tiende á empujarlo en dirección de la menor resistencia, ó en otros términos, al fondo del valle.

Esta teoría de la dilatación, recordada por Charpentier y adoptada desde luego por Agassiz, fué controvertida por Hopkins, quien entre otras objeciones, opuso la siguiente: "Es tan poderoso el roce de una masa tan enorme como la de un glaciar sobre su fondo, que la dirección vertical sería siempre la de menor resistencia y que, si esta masa llegara á dilatarse de un modo considerable por efecto de las heladas, tendría más propensión á aumentar su espesor que á acelerar su marcha descendente.", Después de haber hecho Agassiz muchos experimentos sobre la temperatura interna del hielo á profundidades de 60 metros, reconoció que rara vez baja esta temperatura á 1 ó 2 grados bajo cero, y que no es probable que el agua de filtración se congele cada noche. En su consecuencia, desechó la teoría de la dilatación.

Al suponer Forbes la plasticidad del hielo para explicar el movimiento diferencial de los glaciares, no había probado prácticamente la existencia de esta propiedad que las investigaciones de Faraday, Christie, Tyndall y Tresca han puesto fuera de duda. En otro lugar de esta obra hemos descrito el fenómeno de la *regelación* y demostrado que una masa de hielo, comprimida en un molde y rota por esta compresión, vuelve á soldarse y acaba por adquirir la forma misma del molde. El hielo resultante es com-

pacto y únicamente difiere en la forma del que se ha empleado para producirlo. Para que el experimento salga bien, es forzoso llenar una condición: que el hielo con el cual se opera sea hielo fundente; si su temperatura fuese mucho más baja que la de fusión, la presión lo transformaría en un polvo blanco y no en una masa compacta y translúcida. Por otra parte, los experimentos de Thomson han demostrado, que la presión hace que baje el punto de fusión del hielo. Basándose Tyndall en estos datos de la experiencia, ha explicado en qué sentido deberían entenderse las palabras *plasticidad* ó *viscosidad* que Forbes aplicaba al hielo de los glaciares. El hielo no es en modo alguno dúctil como los cuerpos blandos; por efecto de una fuerza de tensión que propende á separar sus moléculas, no cede y se rompe, si la tensión excede de cierto límite. Esta es la causa productora de las grietas de los glaciares. Mas por la influencia de la presión, añadida á la del peso de la misma masa glaciar, el hielo se rompe, se aplasta, y se liquida en parte, gracias al descenso del punto de fusión que es consecuencia de la presión misma. Puede pues ceder, contraerse ó dilatarse, según las desigualdades de su lecho, y luego, en virtud del fenómeno de la *regelación*, los fragmentos vuelven á soldarse, formando de nuevo una masa compacta. En resumen, los glaciares tienen todas las apariencias de un cuerpo viscoso, cuyas diversas partes resbalan unas sobre otras ó al lado de las otras, y están animadas de velocidades desiguales en sus diferentes movimientos.

Hoy se admite generalmente esta teoría del movimiento de los glaciares, aun cuando ha sido objeto de una gran objeción por parte de un compatriota de Tyndall, Enrique Moseley. Según sus cálculos, la fuerza de gravedad, que en definitiva es aquí la fuerza motriz del glaciar por su pendiente, es insuficiente para explicar el movimiento diferencial de sus partes, el hecho de resbalar unas capas sobre otras (1). Por consiguiente, se requiere la intervención de otro agente, y Moseley le encuentra en la fuerza viva de la radiación solar, que penetrando en la masa sólida del glaciar, se transforma en movimientos moleculares, en dilataciones y contracciones sucesivas. Asimila el glaciar á una plancha de plomo colocada sobre un plano inclinado y expuesta de día al calor del Sol y de noche á la radiación y al enfriamiento que es su consecuencia: demuestra que esta plancha se dilata más por abajo que por arriba (á causa de la influencia de la gravedad), se contrae por arriba más que por abajo por la misma razón, y finalmente baja poco á poco por su pendiente. Con la masa del glaciar ocurre

(1) Consideramos tan importante esta objeción, que creemos oportuno dar un resumen más completo de ella, tomándolo del mismo Moseley. "El trabajo total de las fuerzas que producen la dislocación de un cuerpo ó de un sistema de cuerpos solidarios, dice, debe ser cuando menos igual al trabajo total de las resistencias que se oponen á esta dislocación. Estas resistencias son: 1.<sup>a</sup>, la que se opone á que se raje una superficie de hielo sobre otra, dislocación que ocurre continuamente en la masa total, á consecuencia del movimiento diferencial; 2.<sup>a</sup>, el roce de las capas de hielo superpuestas, más considerable para las inferiores que para las superiores; 3.<sup>a</sup>, el arranque del hielo en el fondo y en los lados del lecho del glaciar.

„Si éste baja, obedeciendo únicamente á la acción de la gravedad, el trabajo efectuado por su peso, cuando cambia de lugar á cualquier distancia, debe ser por lo menos igual á la suma de los trabajos de todas estas resistencias. "Habiendo hecho este cálculo con respecto á un glaciar imaginario, de inclinación constantes y de lecho uniforme, M. Moseley ha deducido que la fuerza necesaria para que una pulgada cuadrada de hielo resbale sobre otra pulgada cuadrada no debe pasar de una libra y tercio, para que el glaciar pueda descender por su peso solamente. Pues bien; la experiencia demuestra que esta fuerza (á la que él llama *unidad de repliegue*) es en realidad, por lo menos, 48 y quizás 90 veces mayor.", Luego un glaciar, dice, no puede bajar por su propio peso por una pendiente como la del Mar de Hielo; el hielo no se deforma con bastante facilidad. Se necesitaría que tuviese casi la consistencia de un mastic blando, que se agriete bajo una presión de libra y media á tres libras por metro cuadrado. (*Teoría del descenso de los glaciares.*)