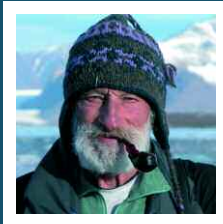


— 13 —

**EL DESHIELO EN EL ÁRTICO
Y LA ANTÁRTIDA.
LAS GLACIACIONES PLEISTOCENAS
Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL ACTUAL.**

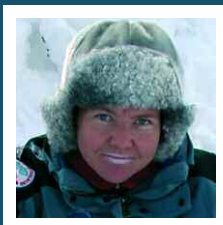
*Por D. Adolfo Eraso Romero.
Químico y Geólogo. Profesor de Hidrogeología de la E.T.S.
de Ingenieros de Minas.*

*Dña. M^a del Carmen Domínguez.
Profesora Titular E.T.S. Ingenieros Industriales.*



*D. Adolfo Eraso Romero.
Químico y Geólogo.
Profesor de Hidrogeología de la E.T.S.
de Ingenieros de Minas.*

Adolfo Eraso, geólogo y químico, es Académico por: “The Russian Academy of Natural Sciences” y “The New York Academy of Sciences”. Es presidente de la Comisión Internacional “Glacier Caves and Karst in Polar Regions”, codirector del Proyecto GLACKMA (Glaciares, CrioKarst y Medio Ambiente). Sus principales áreas de trabajo han sido: perforaciones petrolíferas, geología aplicada y geotecnia, hidrogeología aplicada y medio ambiente, procesos físico-químicos en la naturaleza y geoquímica. Desde 1987 ha ejercido como Profesor Titular de Hidrogeología en la Escuela de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid. En 1985 realiza su primera expedición polar y desde entonces está centrado en la Glaciología, habiendo realizado hasta el momento actual más de 60 expediciones glaciológicas a ambos Círculos Polares.



*Dña. Mª del Carmen Domínguez.
Profesora Titular E.T.S. Ingenieros
Industriales.*

Mª del Carmen Domínguez, matemática, es Profesora Titular de Matemática Aplicada de la Universidad de Salamanca. Secretaria del grupo español de la Comisión Internacional “Glacier Caves and Karst in Polar Regions” y codirectora del Proyecto GLACKMA (Glaciares, CrioKarst y Medio Ambiente). Su principal área de investigación es la modelización de fenómenos naturales y desde 1997 se ha centrado en la Glaciología, habiendo realizado ya una treintena de expediciones tanto al Ártico como a la Antártida.

13 · EL DESHIELO EN EL ÁRTICO Y LA ANTÁRTIDA. LAS GLACIACIONES PLEISTOCENAS Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL ACTUAL.

*Por D. Adolfo Eraso Romero.
Químico y Geólogo. Profesor de Hidrogeología de la E.T.S.
de Ingenieros de Minas.
Dña. Mª del Carmen Domínguez.
Profesora Titular E.T.S. Ingenieros Industriales.*

LOS CÍRCULOS POLARES

Aunque los dos círculos polares de la Tierra –el Ártico y la Antártida– contienen casquetes helados, resulta que éstos son completamente diferentes.

En el Polo Norte geográfico, el casquete helado del ártico está compuesto de hielo marino. Se forma por congelación del agua del mar y por tanto el hielo es flotante, siendo su espesor de tan solo unas decenas de metros.

En el Polo Sur por el contrario, al existir un gran continente –la Antártida–, el hielo es glaciar. Se forma gracias a las sucesivas nevadas caídas, cuyo peso compacta las más antiguas, las cuales acaban siendo hielo. Aquí, la masa helada, de origen continental, es inmensa. Su superficie es del orden de 13,5 millones de kilómetros cuadrados –es decir 27 veces la superficie de España–, y su espesor medio es de casi 2200 metros, llegando en algunos lugares a superar ampliamente la cifra de 4 kilómetros de espesor. ¿Verdad que resulta difícil de imaginar tanta inmensidad...?

Prosigamos. Si se fundieran todos los glaciares de la Antártida, el mar ascendería 62 metros por encima de su actual nivel... ¿Os imagináis cuántas islas y algunos países, cuantas ciudades enteras, cuan-

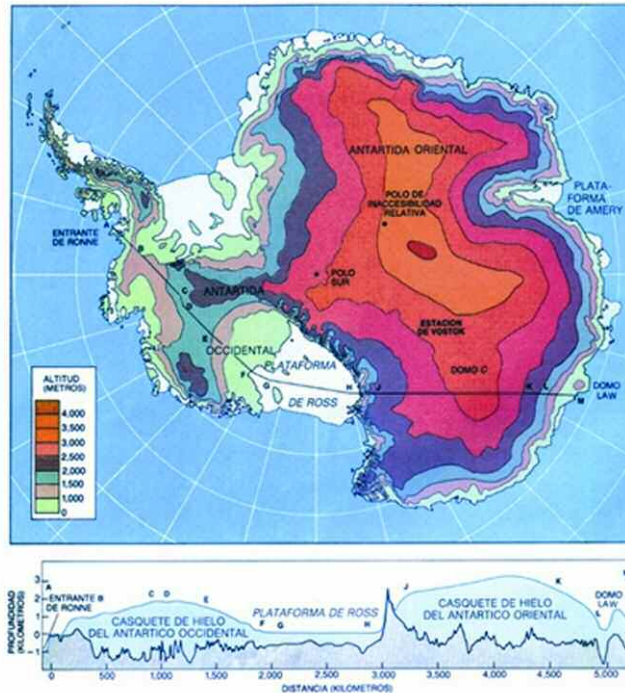


Figura 1: Altitud del hielo en el casquete helado de la Antártida

ta población humana se vería afectada si esto ocurriera? ¡Tranquilos!... hay tiempo. El mar está ahora subiendo, cada vez más deprisa, pero todavía muy despacito.

Los científicos que están al corriente del proceso, han desarrollado un método geofísico que les permite medir con precisión el espesor del casquete antártico y por tanto, seguir sus variaciones en el tiempo.

EL RADAR PARA MEDIR EL ESPESOR DEL HIELO

A partir del Año Geofísico Internacional, al final de la década de los cincuenta del siglo XX, el estudio de la Antártida sufrió un impulso grandísimo, incrementándose en gran manera la instalación de Bases Antárticas que potenciaron gran número de líneas de investigación. Éstas precisaban de la implementación de logísticas especiales, entre ellas la aérea, con avionetas dotadas de esquís para desplazarse sobre el casquete glaciar.

Los accidentes aéreos eran frecuentes... tanto, que en la década de los 80 del siglo XX, algunos científicos se preocuparon y empezaron a investigar las causas.

Prestaron especial atención a los accidentes ocurridos en vuelos con excelente visibilidad y pilotados por expertos pilotos. Encontraron que las catástrofes ocurrían tan solo con algunos tipos de aviones, mientras que con los demás, la incidencia de estrellarse al aterrizar era casi nula. ¿Qué estaba pasando?

La explicación se encontró al comprobar que los aviones siniestrados poseían un radar altimétrico, cuyas bandas de frecuencia eran diferentes de las de aquellos otros aviones que aterrizaban normalmente.

Resulta que a ciertas frecuencias de radar, el hielo es transparente... y los aviones que los usaban, iban a aterrizar en las rocas situadas bajo el hielo. ¡¡Como si el hielo no estuviera allí!!

El problema aéreo se solucionó en seguida, disminuyendo drásticamente los accidentes aéreos, pero... ¡lo más importante!, desde entonces las bandas de frecuencia de radar a las que el hielo es transparente, se usan para medir los espesores del hielo. Envían señales desde la superficie helada, que son devueltas por la roca de fondo sobre la que el casquete glaciar se apoya y desliza.

Esta técnica geofísica, denominada radioecosonda, es la mejor y más sencilla para estudiar las masas de hielo y su evolución. Su empleo, hace muchos años que ya es habitual. Menos mal que el ingenio humano algunas veces logra descubrimientos que resultan útiles a su especie.

EL CALENDARIO GLACIAR

Ya hemos comentado antes que el hielo continental, es decir los glaciares, se forman por sucesivas nevadas, cuyo peso acaba compactando las nieves anteriores, que terminan al final del proceso creando el verdadero hielo glaciar.

La nieve recién caída es muy floja, su densidad es de 0,10 a 0,15 gr/cm³ (el agua dulce a 4°C es de 1,0 gr/cm³). Las sucesivas nevadas caídas compactan las nevadas anteriores. Su densidad va aumentando gradualmente a base de expulsar el aire que está entre la nieve caída. A mayor cantidad de aire expulsado, mayor densidad alcanzan las capas de nieve. Llega un momento en el que las capas que soportan más peso –las inferiores– se colapsan, iniciándose un proceso denominado diagénesis, por el cual la nieve termina siendo hielo –se endurece– y la mayor parte del aire contenido en la nieve se expulsa al exterior... ¡pero no todo!

Cuando el hielo se ha formado, las últimas porciones de aire ya no pueden salir al exterior, quedando retenidas en el hielo duro en forma de burbujas de aire. Éstas diferencian el hielo glaciario así formado, del hielo marino que no contiene burbujas de aire.

Este proceso característico del hielo glaciario es importantísimo desde el punto de vista científico, pues las burbujas retenidas en el hielo contienen aire, cuya composición y características corresponden al de la atmósfera existente en el momento de la nevada en cuestión. Si supiéramos la edad en la que cayó esa nevada, sabríamos cual era la composición de la atmósfera en ese momento.

Pero todavía hay más: las precipitaciones (lluvias en nuestras latitudes y nevadas en los círculos polares) provienen de las nubes, las cuales se forman por evaporación de las aguas del mar.

Las aguas evaporadas contienen moléculas de H₂O (compuestos de la combinación de átomos de Hidrógeno y de Oxígeno), cuya masa atómica es de 1 para el Hidrógeno y 16 para el Oxígeno (¹H y ¹⁶O). Pero resulta que ambos átomos tienen también isótopos menos abundantes pero más pesados (Deuterio ²H y Oxígeno dieciocho ¹⁸O). ¿Qué pasa con ellos?

Al formarse las nubes por evaporación de las aguas marinas, los vientos las transportan a los continentes. En ese trayecto las aguas compuestas por moléculas más pesadas tienden a condensarse y precipitar (lluvia o nieve) en la atmósfera, con más facilidad que las

moléculas más ligeras. Este proceso es tanto más importante cuanto más fría es la temperatura existente. Al final, las nieves caídas en los casquetes helados están más concentradas de los citados isótopos pesados, al ser más fría la temperatura reinante.

Esto significa que conociendo con respecto al valor medio del mar –SMOW (Standard Mean Ocean Water)– la variación de esos isótopos pesados que medimos en nuestra nevada, nos permite conocer cual era la temperatura reinante entonces.

Bien, ya sabemos la composición de la atmósfera y la temperatura atmosférica del momento en el que ocurrió nuestra nevada..., pero, ¿cuándo fue?

¡¡Pues sí!! Podemos saber cuando fue, ya que podemos medir la antigüedad del hielo. Veamos cómo.

En las regiones polares, a latitudes más elevadas que su correspondiente círculo polar, los ciclos de luz y sombra duran 6 meses cada uno, en vez de 24 horas como en nuestras latitudes. Por lo tanto el día corresponde al verano y la noche al invierno. El hielo recoge esa impronta y de manera similar, aunque no visible a los anillos de crecimiento de un árbol, permite detectar la alternancia de invierno y verano. Además el hielo contiene isótopos radiactivos, cuya desintegración específica, a modo de relojes naturales, permite que sepamos también la edad del hielo en el que se convirtió nuestra nevada. Nos referimos concretamente al isótopo radiactivo Berilio 10 (¹⁰Be), que se forma en la alta atmósfera y posee un periodo de semi-desintegración de 1.500.000 años.

Esto quiere decir que ya tenemos los ingredientes necesarios para construir un calendario paleoclimático que nos informe de las variaciones climáticas que la Tierra ha ido sufriendo año tras año, al menos en el último millón de años.

Para ello se han realizado sondeos con recuperación de testigo continuo de hielo en diferentes lugares de los casquetes glaciares de la Antártida y de Groenlandia, desde la década del 80 en el programa

PIGA (Programa Internacional de Glaciología Antártica) (Figura 2). El registro paleoclimático alcanzó entonces una antigüedad de 160.000 años.

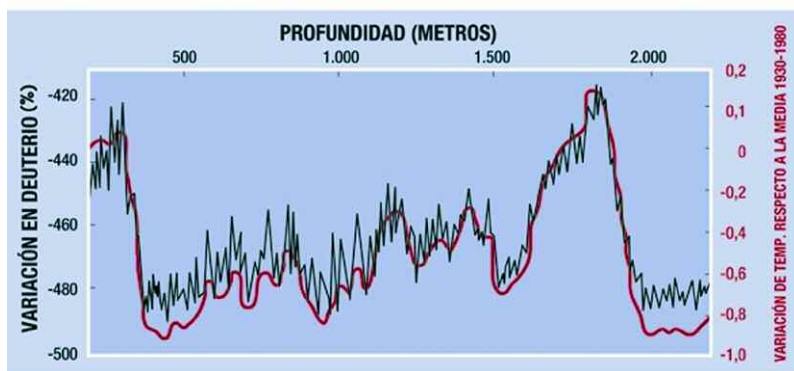


Figura 2: Variación de deuterio y temperatura en un registro de hielo (Proyecto PIGA).

Posteriormente, a finales de 1999 con el proyecto EPICA (European Programme on Ice Core in the Antarctic) (Figura 3) se lograron los 420.000 años en el sondeo de 3,5 km de profundidad realizado junto a la Base Rusa Vostok, no lejos del Polo Sur magnético en el centro de la Antártida Oriental. En el mismo proyecto y en el momento presente, el referido calendario paleoclimático está alcanzando los 800.000 años de antigüedad, ¡con intervalos de año

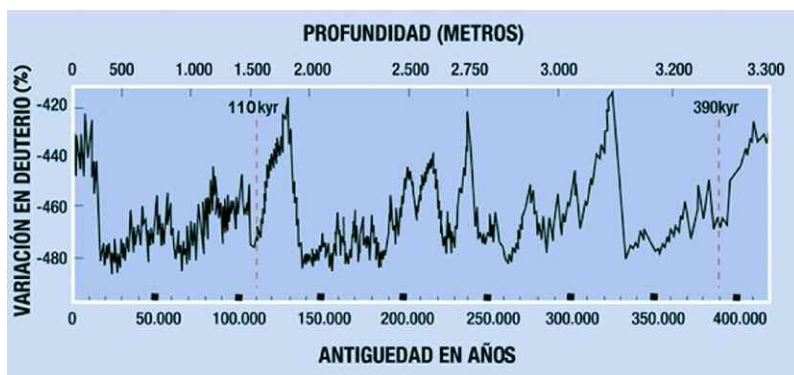


Figura 3: Registro de deuterio de 420.000 años en el sondeo de la base Vostok. (Proyecto EPICA).

en año! Esto se está llevando a cabo en el sondeo de 3 km de profundidad realizado en el Domo C de la Antártida Oriental, frente a la banquisa helada del Océano Pacífico.

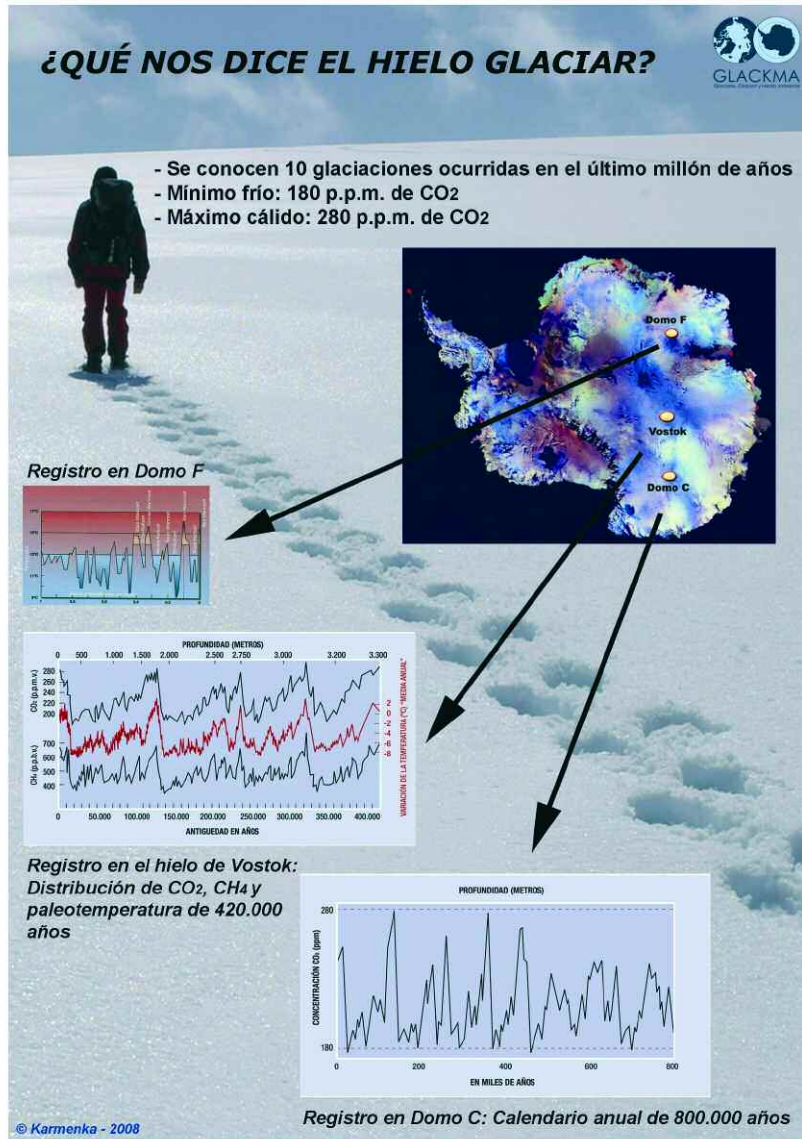
Hace unos 20 años, alguien denominó a la Antártida como la caja negra de los sucesos climáticos de La Tierra. ¡No iba desencaminado!

Perfecto, ya tenemos ese calendario paleoclimático, y ahora ¿qué?, ¿qué nos indica ese calendario?

- En primer lugar, que desde hace 800.000 años hasta el presente, el número de periodos fríos o glaciaciones es de al menos 8. Hoy día, en los libros de texto de las facultades de geología y geografía, se habla de 4 glaciaciones. Habrá que actualizar cuanto antes esta información, pues ya es obsoleta.
- A cada periodo frío le corresponde un intervalo de periodo cálido, intercalado.
- Cada periodo frío se corresponde con un mayor contenido de isótopos pesados (deuterio y oxígeno 18) en el hielo glaciar, y viceversa en los periodos cálidos.
- Los contenidos de anhídrido carbónico (CO₂) y metano (CH₄) de la atmósfera son menores en las épocas frías que en las cálidas.
- Dentro de los periodos glaciares, cuando el frío alcanza su mayor intensidad, la temperatura media de la tierra es unos 10°C más baja que la correspondiente a los valores máximos de los periodos cálidos.
- El análisis espectral de los registros del hielo antártico (proyecto EPICA) demuestra que están sujetos a ciclos climáticos superpuestos, cuya frecuencia de aparición es de 100.000, 41.000, 23.000 y 19.000 años. La actividad solar tiene mucho que decir en la evolución pasada reciente de nuestro clima.
- Los últimos periodos cálidos antes del momento presente –que también lo es– fueron hace 128.000, 238.000, 324.000 y 400.000 años. Este último fue el de mayor duración.
- Los periodos cálidos más antiguos, intercalados en sendos periodos fríos, que han sido detectados, corresponden a 465.000,

510.000, 610.000, 700.000 y 780.000 años, y su información paleoclimática está en este momento en vías de interpretación.

EL REGISTRO DE CO₂ EN LA HISTORIA RECIENTE DE LA TIERRA



Con el registro glaciario elaborado tras la extracción de testigos continuos de hielo en las perforaciones efectuadas, se observa que la concentración de CO₂ en la atmósfera terrestre durante los pasados 800.000 años hasta el periodo cálido actual (hace unos dos siglos), ha oscilado desde 180 ppm (partes por millón en volumen) en los momentos más fríos, hasta 290 ppm en los momentos más cálidos.

Esta variación en el contenido en CO₂ de la atmósfera responde a causas naturales, cuyos mecanismos –antagónicos y por lo tanto reguladores– que las causan, son principalmente dos:

- la producción de CO₂ por las erupciones volcánicas que aumentan su contenido en la atmósfera
- la digestión de CO₂ atmosférico por la formación de arrecifes en los mares cálidos y poco profundos, que disminuyen su contenido.

El CO₂ actúa como un gas de efecto invernadero. Cuanto mayor es su proporción en la atmósfera, la radiación térmica reflejada al espacio por la tierra –albedo– es tanto menor. Su efecto térmico se queda en la atmósfera, la cual en consecuencia, aumenta su temperatura.

Para ese aumento natural de CO₂, entre 180 y 290 ppm se corresponde un aumento de temperatura ambiente media anual de diez grados centígrados (10°C) y viceversa.

EL HOMBRE Y EL CALENTAMIENTO GLOBAL

El calentamiento global por efecto invernadero generado por causas naturales que acabamos de describir, es válido hasta la mitad del siglo XIX, ya que desde entonces viene ocurriendo algo en nuestro planeta que está interfiriendo la evolución natural del clima.

A partir de entonces, la concentración de CO₂ en el aire ha venido aumentando de manera exagerada, gradual pero creciente de manera acelerada:

- en 1910 alcanzó la cifra de 300 ppm
- en 1950 rebasó las 310 ppm

- en 1975 ya estaba en 330 ppm
- en 2000 rozaba las 370 ppm
- y sigue aumentando

¿Qué ocurrió hace siglo y medio?, ¿qué ha seguido sucediendo desde entonces?

La respuesta a las dos preguntas anteriores la tiene el hombre como responsable. Desde el inicio de la era industrial, el consumo de carbón y otros combustibles fósiles como el petróleo, generan nuevas fuentes de producción de CO₂.

Este nuevo aporte de CO₂ es antrópico, es decir generado por el hombre... y su evolución es cuando menos alarmante, pues aumenta con la población –que es exponencialmente creciente– y con el nivel de vida. La llamamos sociedad de bienestar y es también creciente.

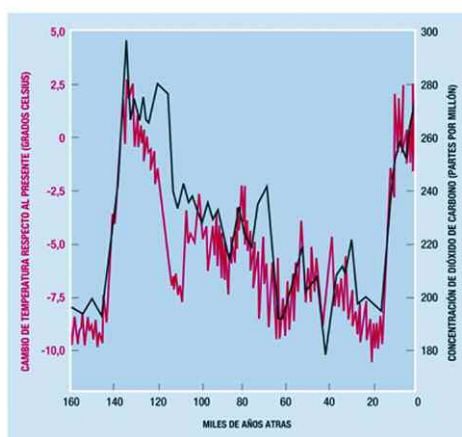


Figura 5: CO₂ y paleotemperatura en los últimos 160.000 años. Vostok. (Fuente AARI).

Comparando los registros paleoclimáticos de los hielos glaciares con los registros actuales de aumento de CO₂ en las estaciones del Polo Sur (Antártida), del centro del Pacífico (Mauna Loa, Hawaii) y del Ártico noruego (Zeppelin, Ny-Ålesund) –los cuales tienen la misma tendencia aunque diferente varianza–, debemos señalar que los valores de CO₂ mayores de 290 ppm se deben ahora al hombre. Nosotros somos los causantes.

Si además, como hemos visto, a los aumentos de CO₂ corresponden aumentos de temperatura ambiente, resulta que ahora la temperatura debería ser algunos grados más alta de la que tenemos en estos momentos. Si todavía esto no se ve, es por el efecto regulador de las

EL CO₂ SE DISPARA

- En los 150 últimos años, el CO₂ ha subido de 280 a 380 p.p.m.

La tendencia del incremento del CO₂ en estaciones de diferentes latitudes es la misma para todas ellas

Aumento del CO₂ desde el inicio de la era industrial

Carbon dioxide (CO₂) measurements at the Zeppelin station, Svalbard

- De seguir así, alcanzaremos 400 p.p.m. de CO₂ en 2020. ¿Cuánto subirá la temperatura?

© Karmenka - 2008

aguas marinas, cuya inercia térmica es muy grande. Pero tengamos presente que el calentamiento global, en su componente antrópica, hace siglo y medio que está en marcha.

Así como la naturaleza posee un efecto regulador para paliar el aumento de CO₂ producido por causas naturales, el hombre debie-

ra estar obligado –a nuestro juicio– a establecer su correspondiente efecto regulador del incremento de CO₂ que produce por causas antrópicas. ¿Será suficiente un estricto cumplimiento por todos los países del Protocolo de Kioto?

CONSECUENCIAS MEDIOAMBIENTALES

El aumento general de la temperatura ambiente provoca un aumento inmediato de la descarga líquida glaciaria. Al aumentar la descarga glaciaria –hielo continental– el nivel del mar asciende por llenado del mismo, pudiendo llegar –si toda la masa glaciaria se fundiera– hasta una cota de 70 mts más elevada que la actual. Tenemos que señalar aquí que en episodios de máximo glaciario, cuando la masa helada continental ocupaba tres veces la extensión actual, el nivel del mar estaba 120-130 mts más bajo que en la actualidad.

Prosigamos. Al aumentar el nivel del mar, aumenta la superficie evaporante del mismo. Tanto el incremento de la evaporación como su causa, el aumento de temperatura, provocan un aumento de la entalpía en la atmósfera. Esto significa sencillamente que el motor responsable de los eventos meteorológicos será cada vez más potente. Digamos que tendrá más caballos, según progrese el calentamiento global.

Al responder la atmósfera mediante procesos propios de un sistema de radiación-turbulencia, los eventos meteorológicos tendrán mayor violencia y mayor aleatoriedad, dificultando por tanto su predicción. Dibujemos el escenario:

- Habrá mayor frecuencia de olas de calor y de frío con carácter alternativo.
- En general, la precipitación aumentará al haber mayor cantidad de vapor de agua en la atmósfera, pero su distribución será más errática y torrencial. Lo cual dará lugar tanto a sequías como a episodios de lluvias de intensidad elevada (de origen convectivo en barreras orográficas, de gotas frías y así como la aparición de vórtices huracanados en el mar, cerca de nuestras costas). Su efecto general será más catastrófico.
- Al ser más elevada la temperatura, la evapotranspiración será bas-

tante mayor, disminuyendo por este sólo concepto el recurso hidráulico.

- La escorrentía, recurso hidráulico superficial de la lluvia útil, será menor. Además tendrá el problema añadido de que en los eventos torrenciales habrá mayor arrastre sólido en ríos y ramblas, lo que disminuirá –por aterramiento– la capacidad reguladora de los embalses (España tiene más de 1200).
- Con respecto a la recarga de los acuíferos por infiltración... esperemos que los eventos de lluvia torrencial sean suficientes para cubrir la recarga necesaria. Por ejemplo, las lluvias del invierno 1997-98 recargaron todos los acuíferos importantes españoles excepto las Tablas de Daimiel, cuyo acuífero estaba sometido a una gran sobreexplotación.
- La tasa de erosión en las cuencas fluviales aumentará, incrementando la desaparición de suelos. Como ésto disminuirá el tiempo de concentración de la riada, el efecto se retroalimentará aumentando el carácter catastrófico de las futuras riadas. No olvidemos que se necesitan décadas para reconstruir un suelo. Por tanto se incrementará la desertización.
- Los ecosistemas y biocenosis se desplazarán de su hábitat natural hacia latitudes y cotas más elevadas. Esto implica tanto la desaparición de algunas especies alpinas y montañosas como la aparición de especies exóticas provenientes de latitudes más bajas, propias de climas tropicales. Pudiéndose entonces favorecer la aclimatación en nuestras latitudes de plagas anteriormente inexistentes e incluso la aparición de enfermedades nuevas.
- Las olas de calor incrementarán los incendios forestales; provocarán floraciones más tempranas que estarán indefensas ante una eventual ola de frío, pudiendo comprometer las cosechas de nuestro agro.

El escenario así descrito, realmente inquietante, no es tan improbable como parece. Veamos algunos datos y tendencias en España:

- La temperatura media, en el periodo comprendido entre 1971 y 2000, ha ascendido 1,53°C, siendo mayor en el interior –más continental– 1,6°C y menor en la costa, 1,4°C.
- La precipitación invernal en el periodo comprendido entre 1947-1999 ha descendido un 10% en la totalidad de la superfi-

cie de España, siendo superior este descenso al 33,3% en las cuencas hidrográficas de la mitad sur española.

- En el observatorio de Navacerrada y en el periodo entre 1971 y 2000 también destacan algunas tendencias:
 - La precipitación ha disminuido un 27%.
 - El número de días de nieve anuales ha disminuido un 40%.
 - El número de días al año con temperatura máxima superior a 25°C ha aumentado de 3 a 26.
- El ascenso del nivel del mar registrado en Alicante ha sido:
 - En la década 1981-1990: 1,34 mm/año.
 - En la década 1991-2000: 3,87 mm/año.

Con todo ello, conviene al menos preventivamente, concienciarnos de que el clima puede estar cambiando.

CAVIDADES EN HIELO: CRIOKARST

Convergencia de formas

En determinados terrenos, parte de las aguas provenientes de lluvia y de los ríos se infiltra en el subsuelo a través de fisuras y huecos interconectados, ampliándolos por disolución y formando redes de conductos, galerías y cavernas por donde circulan ríos subterráneos.

Este drenaje subterráneo se organiza de manera direccional, en función de la anisotropía del macizo rocoso, y la jerarquía de la red de drenaje mantiene notables semejanzas en las formas y en los resultados, aunque se implante en rocas de diferentes litologías.

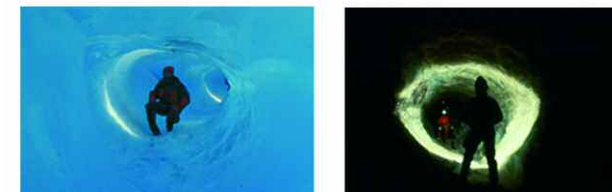
A esta semejanza de formas de disolución, que aparecen en las diversas rocas karstificables, y a la similar disposición de las redes de drenaje subterráneo, se le denomina convergencia de formas.

En la naturaleza esta convergencia es tan frecuente como evidente. Obedece a una impronta geodinámica que hace pensar, ante la similitud de efectos, en una semejanza de causas. En realidad se trata de un modelo natural, del que sólo vemos los resultados, que conlleva la existencia de una autosemejanza en los procesos actuantes.

Todos estos fenómenos de convergencia de formas, aunque las apariencias los enmascaren, están relacionadas por un conjunto de circunstancias que los hace dinámicamente semejantes.

La convergencia de formas aparece en rocas evaporíticas (yesos y sales), carbonatadas (calizas, dolomías, mármoles, conglomerados y areniscas) y a veces, cuando su edad geológica es muy antigua, en rocas en principio muy poco solubles (cuarcitas y granitos) y con gran profusión en el hielo glaciar.

En el caso de roca, la disolución representa el mecanismo que condiciona el paso de las moléculas constitutivas de la roca de la fase sólida a la líquida. En el caso del hielo, el paso de una a otra fase se realiza mediante el mecanismo de la fusión friccional, semejante al de disolución tanto en sus efectos (establecimiento del karst) como en la formulación matemática que los rige. La temperatura del agua de los ríos intraglaciares se mantiene a 0°C, ya que el calor generado por el flujo del agua se consume en fundir parte del hielo de las paredes del conducto, mientras aumenta a la vez, tanto el tamaño del conducto como el caudal circulante. Por tanto, cuanto mayor sea la longitud de un conducto endoglaciar (es decir, sus paredes –suelo y techo son hielo–), tanto más se incrementará el caudal que circula por su interior, sin necesidad de recibir otros aportes o afluentes.



Figuras 7: Convergencia de formas.

Cuevas en hielo: criokarst

Como consecuencia de todo ello, el conocimiento del mundo subterráneo glaciar, en vías de desarrollo, presenta ya resultados notables. Las exploraciones de simas en hielo han alcanzado profundidades de 200 m en Groenlandia, reconociendo redes de cavernas supe-

riores a 6 km en Svalbard, e inventariando ríos subterráneos de más de 25 m³/seg en Patagonia (conductos endoglaciares superiores a 3 km de longitud, etc).

La existencia del karst en hielo, denominada criokarst, es abundantemente abundante. Su evolución es tan rápida que resulta observable a la escala humana de tiempos, y su estudio permite cuantificar la recesión glacial.



Figuras 8: Moulins en glaciares árticos.

¿Dónde se desarrolla el criokarst?

El karst en hielo se desarrolla en glaciares de cierta entidad, ubicados en ambas regiones polares y en las principales cadenas montañosas del planeta.

Todo glaciar consta de dos zonas bien diferenciadas: la de acumulación (ZACC) situada en su parte superior, y la de ablación (ZABL) en su parte inferior, donde el desarrollo del criokarst es dominante, especialmente en los lugares donde la temperatura del hielo es de 0°C.

En base a la tabla que sintetiza las diversas clasificaciones de tipos de glaciar, podemos destacar que:

- en glaciares fríos de tipo 1 o polar, con temperatura del hielo siempre bajo cero, no aparece el criokarst
- en glaciares transicionales del tipo 2 o subpolar, con temperatura del hielo en algunos lugares inferior a cero grados y en otros igual a la de fusión del hielo, aparece en cuatro de los cinco subtipos existentes, y
- en glaciares del tipo 3 o templado, con temperatura de toda la masa glacial a 0°C aparece el criokarst.

CLASIFICACIÓN DE GLACIARES							
CLASE		CRITERIO			FORMA		EJEMPLOS
TIPO	SUBT.	GEOGRÁFICO	TÉRMICO	AGUA	SECCIÓN TRANS.	PERFIL LONG.	
1	A	POLAR CONTINENTAL	FRÍO	SECO	100 km		ANTÁRTIDA CENTRAL
	B	POLAR CONT. EN BAJA LATITUD (POLAR)	FRÍO EXCEPTO VERANO: ZAcc	LIGERAMENTE HÚMEDO	100 km		GROENLANDIA NORTE ANTÁRTIDA INTERIOR
2	A	SUB POLAR (PLATAFORMAS Y CASQUETES GLACIALES)	TRANSICIONAL FRÍO: ZAcc EN EL FONDO	LIGERAMENTE HÚMEDO	500 km		GROENLANDIA CENTRAL/ ANTÁRTIDA
	B	SUB POLAR (ALTAS MONTAÑAS)	TRANSICIONAL FRÍO: ZAcc CALIENTE: ZAcc	HÚMEDO EXCEPTO: ZAcc CRIOKARST	50 km		ALPES/ HIMALAYA/ ANDES
	C	SUB POLAR MARÍTIMO	TRANSICIONAL FRÍO: ZAcc CALIENTE: ZAcc	HÚMEDO CRIOKARST	10 km		SPITSBERGEN/ PERIFERIA ANTÁRTIDA
	D	SUB POLAR LIGERAMENTE CONTINENTAL	TRANSICIONAL	HÚMEDO CRIOKARST	20 km		ARCHIPIÉLAGOS ÁRTICOS Y ANTÁRTICOS
	E	SUB POLAR CONTINENTAL	TRANSICIONAL FRÍO EN EL FONDO	HÚMEDO EXCEPTO FONDO CRIOKARST	10 km		SIBERIA CANADA
3	-	TEMPLADO	CALIENTE	HÚMEDO CRIOKARST	5 km		GLACIALES DE MONTAÑAS NO MUY ALTAS

Figura 9a: Clasificación de glaciares (Fuente Eraso & Pulina).

Esto significa que el karst en hielo se desarrolla en glaciares situados en:

- periferia de la Antártida y Groenlandia,
- grandes islas del Artico canadiense
- archipiélagos árticos y antárticos, y sus áreas de influencia (por ejemplo, Islandia)
- grandes cordilleras del planeta, y
- algunas montañas no muy altas (por ejemplo: Patagonia).

Hidrogeología glaciar

La hidrogeología glaciar es muy compleja, sin embargo revisemos a modo de pinceladas las siguientes generalidades. En primer lugar, ¿dónde puede ocurrir el flujo de agua en un glaciar?

- en su superficie o supraglaciar
- en el contacto entre la roca de fondo y base del hielo o subglaciar
- dentro de la masa de hielo o endoglaciar

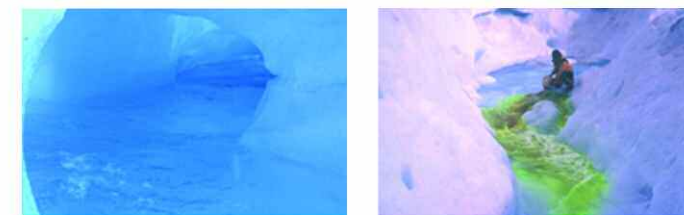
Conviene destacar en este último punto que las exploraciones realizadas en el interior de los glaciares, demuestran que la longitud de

Región helada	Superficie helada en km ²	
Antártida:	13.979.000	
Hielo continental (casquete)		13.779.000
Hielo en montañas y nunataks		196.000
Islas circundantes		4.000
Ártico	2.044.000	
Groenlandia:	1.802.600	
Hielo continental		1.726.400
Otros glaciares		76.200
Archipiélago canadiense	149.990	
Ellesmere		78.350
Tierra de Baffin		36.830
Devon		16.575
Alex Heiberg		12.560
Otras islas		5.675
Islas del Ártico ruso	56.125	
Archipiélago Svalbard y Jhan Mayen	35.245	
Región del Ártico continental	290	
Norteamericano		260
Asiático		30
Europa:	19.180	
Islandia		11.785
Escandinavia		3.060
Alpes y Pirineos		2.880
Cáucaso y Ural		1.455
Asia:	118.355	
Himalaya		33.055
Tien-Shan		17.875
Karakorum		16.265
Nan-San		13.000
Pamir-Altaj		12.070
Kunlun		11.640
Hindukusz		6.200
Otras regiones de Asia Central		5.420
Otras regiones de Siberia y norte de Asia		1.620
Norteamérica:	123.700	
Alaska		103.700
Montañas de las cordilleras costeras		15.410
Montañas Rocosas		4.580
Montañas de México		10
América del Sur	32.300	
África y Oceanía:	845	
Nueva Zelanda		810
África		20
Nueva Guinea		15
TOTAL	16.317.630	

Figura 9b: Superficie de glaciación actual según Kotljakov
(Fuente Eraso & Pulina)



Figuras 10: Río supraglaciario (a) y salida de uno endoglaciario (b) del glaciar ártico Austrelovenbreen en Svalbard.



Figuras 11: Coloración en un conducto endoglaciario.
Características: distancia GPS 2,8 km; tiempo de llegada 5 horas y 30 minutos; velocidad 500 metros por hora.

los conductos endoglaciares suele ser de varios kilómetros en los glaciares templados y de varios hectómetros en los subpolares. Hecho éste que contrasta con la aceptación tácita en la glaciología clásica, que presupone que cuando la circulación supraglaciario generada por radiación solar se sume en un moulin o pozo sumidero, enseguida atraviesa el hielo glaciar llegando a circular entre el lecho de roca y el hielo glaciar como techo. Es decir, de modo subglaciario. Queremos remarcar que la realidad no es necesariamente así.

Y a su vez, la organización del drenaje se realiza según dos sistemas principales (los marginales y los centrales).

- Los sistemas marginales cuentan con aportes tanto desde las laderas exteriores al glaciar como del drenaje supraglaciario, los

cuales alimentan directamente el flujo subterráneo.

- Los sistemas centrales son alimentados por flujos supraglaciares, y generan una red organizada endoglaciaria que termina alimentando flujos subglaciares hasta evacuar en el frente del glaciar, tras recorridos bastante más largos de los supuestos teóricamente.

Sin embargo la interrelación entre estos tipos de drenaje es compleja, afectando de diversas formas a su hidroquímica, hábito de hidrogramas, carácter y tipo de drenaje, y duración en el tiempo, dependiendo del medio drenante. Estableciendo todo ello una gran influencia en la descarga integrada del glaciar, cuyo estudio es necesario para estimar la recesión glaciaria, al conocer la pérdida de masa helada en forma de agua.

La descarga glaciaria se provoca por radiación solar –como causa primera–, pero también influye la temperatura ambiente y el deslizamiento glaciario. De la transformación de esta energía en calor proviene la fusión de parte del hielo, responsable del establecimiento del drenaje.

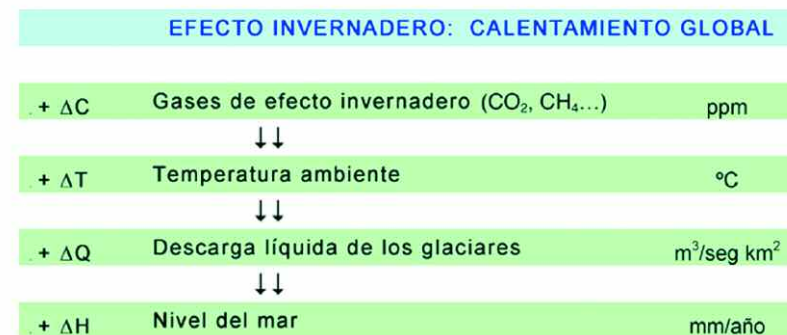
No consideramos aquí los efectos geotérmicos locales, los cuales siendo singulares, suelen provocar catástrofes tremendas. Adoptada ya por el léxico glaciológico internacional la palabra jokulhlaup –jalea o mermelada glaciaria– en islandés, las refleja.

LOS GLACIARES COMO SENSORES NATURALES DEL CALENTAMIENTO GLOBAL

Descarga líquida glaciaria para medir la evolución del calentamiento global

El calentamiento global que sufre el planeta generado por el efecto invernadero, se traduce en un aumento gradual de su temperatura ambiente. Como consecuencia de este aumento de la temperatura, la masa de hielo de los grandes casquetes glaciares disminuye por fusión y el nivel del mar aumenta.

El efecto último del calentamiento global –aumento del nivel del mar– ya se está midiendo. La causa primera del calentamiento glo-



Figuras 13: Aumento de la descarga líquida de los glaciares. Frente del Kongsbreen (Svalbard).

bal –el aumento de gases de efecto invernadero– ya se está midiendo. Para medir la evolución del calentamiento se podrían utilizar cualquiera de las dos variables intermedias del proceso: temperatura ambiente y descarga líquida glaciaria.

La evolución de la temperatura ambiente que puede tener una res-



Figura 14a: Ellesmere y Gorenlandia, las tierras más al Norte del Mundo.

puesta rápida ante el calentamiento global a escala local, está regulada por la temperatura de las aguas del mar, proceso que tiene una gran inercia térmica ya que el ciclo de circulación de las corrientes marinas dura varios siglos. Este hecho complica su interpretación a corto plazo. Además es un parámetro que se está midiendo actualmente en la red sinóptica de la OMM (Organización Meteorológica Mundial).

Sin embargo, **la descarga líquida glaciaria** es una variable mucho más estable en este sentido. GLACKMA la ha seleccionado **para**

medir la evolución del calentamiento global, generando series temporales horarias de la misma.



Figura 14a: Ellesmere y Gorenlandia, las tierras más al Norte del Mundo.



Figuras 14b y 14c: El glaciar Sermeq Kujallaq, junto al asentamiento esquimal Ilulissat en Groenlandia. Es, probablemente, el glaciar más rápido del mundo, con una velocidad de desplazamiento de 50 metros por día. Este glaciar, con una anchura de lengua de 7 km y un espesor de hielo de 0,9 a 1 km, aporta el 10% del conjunto de icebergs que se generan en las costas de Groenlandia

Importancia de los glaciares subpolares. Primera hipótesis de trabajo

En las expediciones que hemos realizado se ha observado la existencia de flujos y drenajes endoglaciares y subglaciares, no sólo en glaciares temperados sino también en los subpolares. En estos últimos los drenajes no son tan intensos como en los glaciares temperados y el número de días en los que la descarga hídrica glaciar tiene lugar es también menor. No obstante la extensión de los glaciares subpolares en el planeta es mucho mayor que la correspondiente a los temperados.

Resultando así que **el volumen global de agua drenada, descargada por el conjunto de los glaciares subpolares es equivalente al de los glaciares temperados.**

HIPOTESIS DE TRABAJO			
El volumen drenado por los glaciares subpolares es equivalente al drenado por los temperados			
GLACIARES	SUPERFICIE	DESCARGA ESPECIFICA	ONDA DE DESCARGA
Tipologia	Actual (km ²)	Verano (m ³ /seg km ²)	(días /año)
Temperados	≈ 70.000	0,9 - 1,4	190 - 300
Subpolares	≈ 750.000	0,2 - 0,5	70 - 90
Polares	≈ 15,5 ·10 ⁶	----	----

Figura 15: El volumen drenado por los glaciares subpolares es similar al drenado por los temperados.



Figuras 16: Drenaje y descargas de diferentes glaciares en el Ártico.

Descarga glaciar y temperatura ambiente. Segunda hipótesis de trabajo

En las series temporales de intervalo horario que están generando nuestras estaciones ubicadas en distintos glaciares de ambos círculos polares, hemos observado que la descarga específica glaciar (m³/seg km²) y la temperatura ambiente se correlacionan de manera directa. A pequeños aumentos de temperatura, corresponden pequeños aumentos de caudal y viceversa. La relación es muy estrecha a escala horaria. También a escala plurianual existe una directa correlación entre ambas.

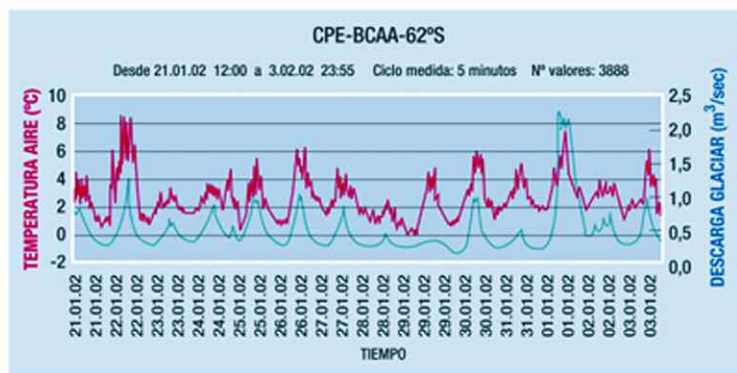


Figura 17: Relación de temperatura ambiente y descarga glaciaria a escala horaria.

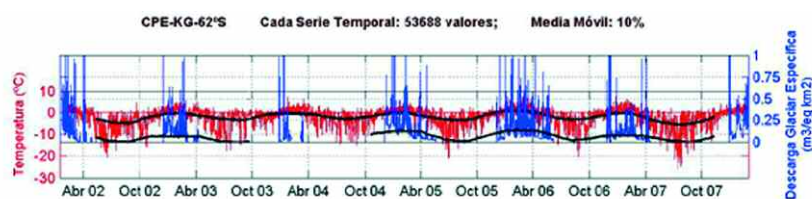


Figura 18: Relación de temperatura ambiente y descarga glaciaria a escala plurianual.

RED DE ESTACIONES DE MEDIDA DE GLACKMA

Cuencas Piloto Experimentales (CPE)

El Proyecto GLACKMA, como tal, se pone en marcha en 2001, con el objetivo de medir desde cuencas glaciarias concretas la evolución del calentamiento global. Tenemos ya implementadas seis Cuencas Piloto Experimentales (CPE) trabajando a tiempo continuo, tres en el Hemisferio Norte y tres en el Sur (8670 datos por año y por parámetro medido en cada estación). Estas seis estaciones registran series temporales con intervalos horarios, entre otros parámetros, de la descarga glaciaria.

En el Hemisferio Norte:

- CPE-TAR-68°N, en el Ártico Sueco
- CPE-KVIA-64°N, en Islandia
- CPE-ALB-79°N, en Svalbard

En el Hemisferio Sur:

- CPE-ZS-51°S, en la Patagonia Chilena
- CPE-KG-62°S, en la Antártida Insular
- CPE-VER-65°S, en la Península Antártica

Se dispone así de una red de observación de glaciares según diferentes latitudes en ambos hemisferios, que permiten un control comparativo de la descarga glaciaria según la evolución del calentamiento global.

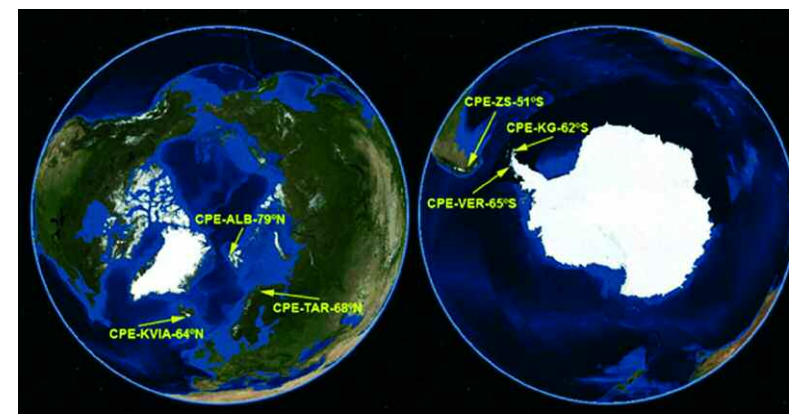


Figura 19: Distribución de las estaciones de GLACKMA en ambos hemisferios. (Fuente World Wind).

CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Hasta el momento con las series de datos generadas (en la totalidad de estaciones de Glackma) se observa el siguiente comportamiento:

- Crecimiento exponencial de la descarga glaciaria en todas las estaciones (las dos más lejanas entre sí están a más de 16.000 km de distancia, lo que confirma el carácter global de este proceso).
- Cualquier variación en la temperatura ambiente conlleva una respuesta inmediata en la descarga glaciaria. Su relación es directa.
- A la misma latitud en ambos hemisferios, la descarga glaciaria es de 3,5 a 4 veces mayor en el Ártico que en la Antártida.

- La estación Ártica de Svalbard a 79°N de latitud y la de la Antártida Insular a 62°S de latitud, presentan prácticamente la misma cuantía en el valor de la descarga glaciaria específica, es decir, hay que subir 17° de latitud en el Ártico, para encontrar valores semejantes a los antárticos.
- En época de verano, la descarga glaciaria en la Antártida se duplicó en 13 años, en el periodo de 1987 a 2000.
- En las series temporales continuas y plurianuales de descarga glaciaria en la Antártida, ésta se ha duplicado entre los veranos de 2002/03 a 2005/06, y el número de días de duración de la onda de descarga también se duplicó en esos tres años (de 76 días en 2002/03 pasaron a ser 142 en 2005/06).

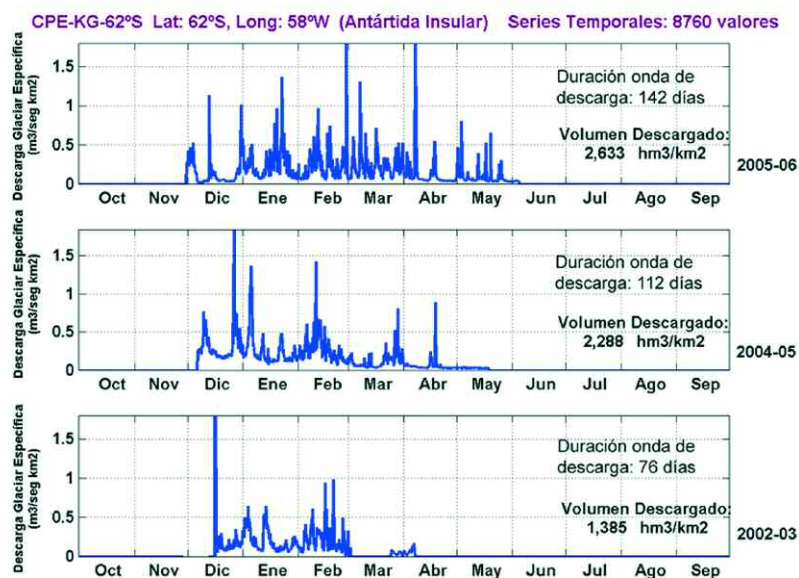


Figura 20: Evolución creciente de la onda de descarga glaciaria en la estación CPE-KG-62°S, tanto en el volumen anual drenado como en el número de días de duración de la onda. Se observa que ambos valores prácticamente se han duplicado entre los veranos de 2002/03 y el de 2005/06.

Como resultado notable se han constatado cambios rápidos ocurridos durante el verano austral de 2005/06 en el glaciar subpolar Collins donde está ubicada la estación CPE-KG-62°S:

- generación de grandes grietas, de evolución rápida, inexistentes anteriormente
- aparición de familias de moulins (pozos glaciares) de considerable magnitud

CPE-KG-62°S - Tabla resumen		2002 / 03	2004 / 05	2005 / 06
Descripción		Año Hidrológico	Año Hidrológico	Año Hidrológico
Fecha	Inicio	01/10/2002 00:00	01/10/2004 00:00	01/10/2005 00:00
	Fin	30/09/2003 23:00	30/09/2005 23:00	30/09/2006 23:00
Números de datos	(0)	8760	8760	8760
Temperatura (°C)	(1) Valores Medios	-2,11	-2,04	-1,44
Radiación Solar (KW/m²)	(2) Valores Acumulados	288,9	275,7	293,4
Precipitación (mm)	(3) Valores Acumulados	456,5	660,3	627,4
Preci. Volumen Cuenca (hm³/km²)	(4) Valores Acumulados	0,466	0,650	0,627
Descarga (m³/seg)	(5) Valores Medios	0,058	0,100	0,109
Descarga Especifica (m³/seg km²)	(6) Medios (1,31 km²)	0,044	0,076	0,083
Volumen (hm³)	(7) Valores Acumulados	1,815	2,997	3,449
Volumen Especifico (hm³/km²)	(8) Acumulados (1,31 km²)	1,385	2,288	2,633
(8) - (4) (hm³/km²)	(9) Acumulados (1,31 km²)	0,930	1,638	2,006
Indice K² que relaciona Descarga espec. y N°datos	[(6) * (0) / 24]	16,06	27,74	30,30

Figura 21: Comparación de valores globales anuales de parámetros meteorológicos e hidráulicos en la CPE-KG-62°S de GLACKMA.



Grieta de nueva aparición en el Domo Bellingshausen cortando el trayecto habitual de comunicación invernal entre bases antárticas de la Isla Rey Jorge (latitud 62°S). Parcialmente cubierta de nieve en Enero de 2006 y sin puentes de nieve un mes después.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados actuales presentados en este trabajo y concernientes al estudio de la descarga glaciaria, se han podido llevar a cabo gracias a la financiación recibida por parte de:

El Ministerio de Medio Ambiente y medio rural y marino a través de la Agencia Estatal de Meteorología con el Proyecto GLACKMA.

El Ministerio de Educación y Ciencia con los proyectos CGL2007-65522-C02-01/ANT y CGL2007-65522-C02-02/ANT.