

# EL HIELO DE LAGO: OBSERVACIONES Y MODELIZACIÓN (LAC DELAGE, QUÉBEC)

André HUFTY  
*Profesor Titular Jubilado*  
*Département de Géographie, Université de Laval (Québec, Canadá)*

## RESUMEN

Durante seis inviernos consecutivos, entre 1998 y 2004, se ha realizado un análisis temporal de la nieve y del hielo presentes sobre el Lago Delage. Las observaciones permiten la estimación de la capa de nieve mediante un modelo de su compactación diaria a partir de la densidad del hielo. La modelización de ambos tipos de hielo, de origen diferente, demuestra que la sucesión de tipos de tiempo, de periodos de nieve o de grandes fríos, es el factor más importante para comprender su cantidad pero que no existe una buena relación con la temperatura media invernal. De ahí que el estudio de los cambios climáticos basado en las fechas de deshielo o en las condiciones observadas a partir de imágenes de satélite resulte muy difícil. Se puede añadir que las fechas de deshielo del Lago Delage no presentan ningún cambio durante las dos décadas pasadas (1982-2004).

**Palabras clave:** Modelización, hielo de lago, fechas de congelación, tipos de hielo, cambio climático, nieve, Québec.

## ABSTRACT

*During six winters, the evolution of spatial patterns in the snow and ice cover of a lake are observed and simulated. An original model made possible the satisfactory simulation of the formation and melting of white and black ice as related to the temperature of air and snowfalls. The ice-on and ice-off dates are sensitive to climatic variations but not the mean depth of ice :model and observations reveal more the importance of the rhythm and intensity of winter precipitations for forecasting lake freezing.*

**Key words:** *Modelling, lake ice, freeze-up, break-up, ice thickness, black ice, white ice, snow, Québec.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La formación del hielo tiene un efecto sobre el balance térmico del suelo; el incremento del albedo y los elevados calores latentes en los cambios de estado del agua desempeñan un papel importante en el clima; sin contar con la esperanza de que permitan un seguimiento de los cambios climáticos a partir de imágenes de satélite: pero vamos a ver que las relaciones entre ambos -los cambios de la temperatura y el aspecto de los lagos o las fechas de congelación y fusión del hielo- no son fáciles de establecer y es necesario construir un modelo para comprender estas relaciones. Este es el principal objetivo de nuestro trabajo.

## 2. EL MODELO

### 2.1. El principio

Los mecanismos físicos de la congelación del agua lacustre están relacionados con la temperatura del agua, del aire, y la penetración en profundidad del frío a través de una capa de nieve o de hielo. Dos procesos pueden dar origen a la formación de hielos que tienen características diferentes: en primer lugar, cuando el agua del lago se hiela, se forma el hielo “negro”, muy compacto. Pero otro mecanismo actúa para dar lugar al hielo “blanco”: capa granulada con hoyos: si el peso conjunto del hielo y de la nieve por encima sobrepasa el espesor de una capa de agua igual a la del hielo (principio de Arquímedes), el agua del lago invade la base de la nieve; esta “papilla” (*slush* o *bouillie*) se hiela y entonces se llama hielo “blanco”. Es importante diferenciar las dos capas porque no tienen la misma densidad, ni tampoco la misma capacidad de conducir calor... y los tipos de tiempo que intervienen en su formación varían mucho.

La ecuación del incremento del hielo con el frío puede formularse del siguiente modo:

$$dz/dt=(T/L).(1/A)$$

$$A=Zn/Kn+ZN/KN+ZB/KB$$

Donde:

dz/dt: incremento, n: nieve

T: temperatura (negativa)

L: calor latente

N: hielo negro

B: hielo blanco

K: capacidad de conducir calor

Z: espesor

### 2.2. Descripción

El estudio físico-matemático supone el planteamiento de ecuaciones complejas que requieren la utilización de la informática. Nuestro modelo (Fig. 1) se aproxima lo más posible a la realidad y simula paso a paso y día a día el inicio, el desarrollo y la desaparición de las dos capas de hielo. Las entradas son la temperatura del aire, la lluvia y la nieve mientras que las salidas son las capas de hielo y de nieve sobre el lago. Al final del invierno el balance térmico y las lluvias se suman al calor requerido para fundir el hielo. Otros parámetros se pueden estimar a partir de ecuaciones empíricas que proceden de observaciones o de medidas in situ. Así, han sido calculados la conducción de calor en hielos y nieve con medidas de los perfiles de la temperatura, la densidad de las capas, el umbral de la lluvia diaria que queda encima del hielo y lo inunda, el movimiento de convección de las aguas subyacentes que hacen fundir el hielo “negro”, etc.

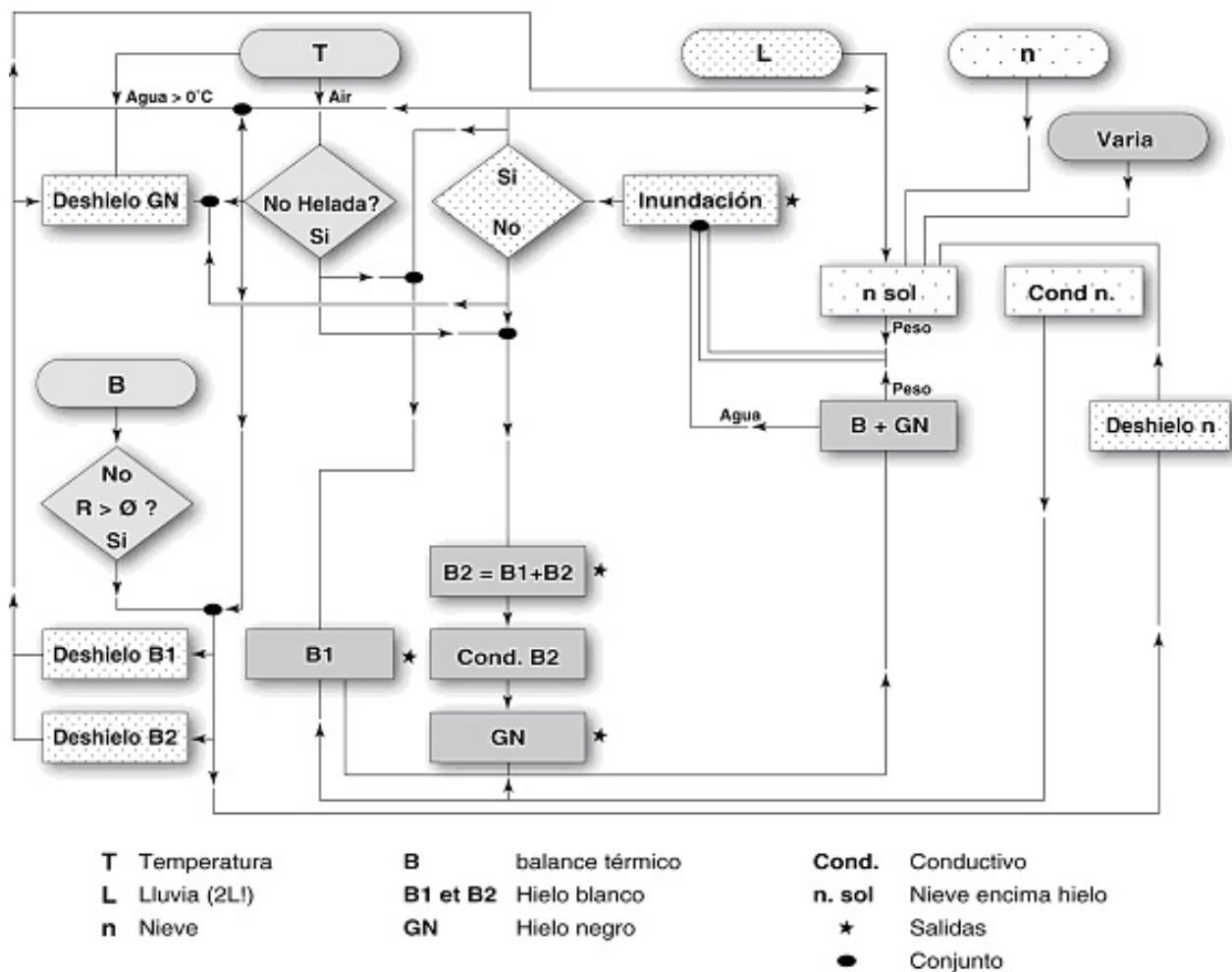


Fig. 1. El modelo de simulación del hielo

### 2.3. Problemática de las medidas o de los datos

Citemos algunos problemas de difícil resolución:

- El viento empuja la nieve hacia el perímetro del lago en donde se va a formar más hielo “blanco” a causa de las inundaciones. ¿Quizás haría falta construir varios modelos en otros lugares?
- Se conoce mal el aporte vertical de calor por el agua bajo el hielo, pequeño en el invierno pero que cobra más importancia con la llegada de la primavera y el nacimiento de corrientes de agua más caliente.
- No sabemos cómo calcular el efecto de las rupturas del hielo que controlan la circulación vertical del agua, ni tampoco su incremento lateral.
- Para este análisis se ha utilizado la serie temporal de temperatura recogida en la estación “Aéroport de Québec” y los datos de precipitación nivosa de la estación “Charlesbourg”, ubicadas a quince kilómetros del Lago Delage. Medidas complementarias nos mostraron que los valores térmicos son parecidos, aunque las noches son más frías en torno al lago. No

obstante, se han de hacer medidas de la nieve *in situ*, simular la capa mediante un modelo de su compactación diaria calculada a partir de su densidad (Fig. 2), para reconstruir una serie de datos.

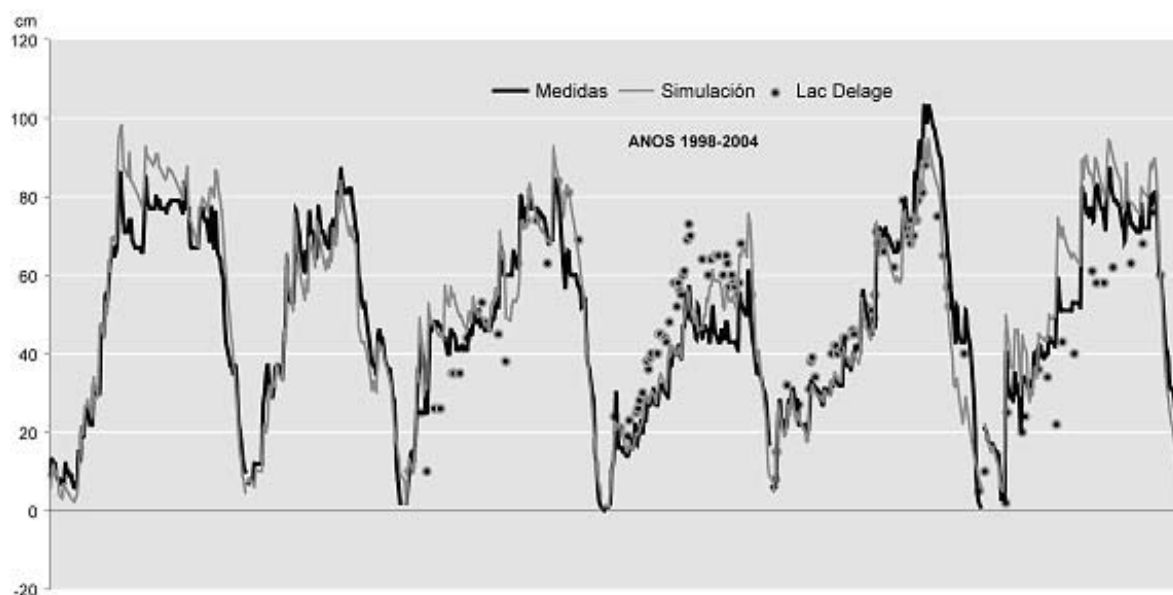


Fig. 2. Simulación de la nieve (Charlesbourg, Québec)

A pesar de estos esfuerzos, es muy difícil prever cuándo se inicia la congelación y aunque existen muchos indicios, no hay nunca una verdadera certeza. Esta situación se produce cada vez que se forma una capa de nieve permanente sobre él, que la temperatura del agua desciende por debajo del umbral de dos grados, que la suma de los grados-día inferiores al punto de congelación sobrepasa cuarenta grados aproximadamente... en tales casos, es el momento de iniciar los cálculos del modelo.

Los Servicios Meteorológicos Canadienses utilizan el perfil térmico en los lagos aunque obtienen datos precisos en un plazo de tiempo superior a una semana, demasiado largo para nuestro modelo. Añadamos que las fechas dependen de la extensión y de la profundidad de cada lago y de la silueta de su perímetro. No obstante, y de manera práctica, han podido ser observados varios signos precursores inmediatamente anteriores al momento clave: hay dos o tres periodos de frío que congelan el perímetro del lago, mientras que el centro queda libre de hielo; la capa helada progresa también lateralmente cada vez más deprisa a condición de que no haga viento que forme ondulaciones sobre el agua.

### 3. RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los resultados de seis años de medidas y de simulaciones. La nieve aparece a finales de noviembre o a principios de diciembre y dura hasta mediados de abril lo que implica una permanencia de unos cuatro meses. El hielo dura algo más mostrando un desfase final

de quince días. Se ha registrado un total de 250 cm de nieve, con una capa máxima de 80-100 cm, y 60-75 cm de hielo. El espesor medio de éste permanece estable en torno a los 41-42 cm.

Tabla 1. Características de seis inviernos

ELEMENTO	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004
<b>HIELO</b>						
Espesor medio (cm)	46	35	38	44	44	42
Blanco (cm)	29	20	14	32	28	12
Negro (cm)	17	15	24	12	16	30
Max. (cm)	69	53	57	61	72	69
Duración (días)	142	120	149	124	161	148
Inicio (fecha)	10/12	19/12	1/12	17/12	27/11	5/12
desaparición (fecha)	30/04	21/04	28/04	19/04	5/05	1/05
<b>TEMPERATURA</b>						
Del invierno (°C)	-5,2	-7,4	-7,8	-6,6	-8,4	-7,6
Grados-día (*)	46	53	44	29	59	65
<b>NIEVE</b>						
Espesor medio (cm)	51	50	51	34	49	50
Max. (cm)	85	87	84	61	103	87
Caída	292	253	283	215	235	286
Lluvia (mm)	141	73	110	111	63	188
Duración (días)	140	102	132	118	153	126
Principio (fecha)	26/11	16/12	5/12	13/12	17/11	30/11
Final (fecha)	15/04	27/03	15/04	15/04	17/04	14/04

(\*) Antes de la congelación

La serie de medidas es demasiado breve para permitir el cálculo de una tendencia; cuando se estudia la variabilidad del hielo, se obtienen unas correlaciones muy bajas entre las temperaturas medias o la duración del invierno y las capas de hielo. Tal como muestra el modelo, la relación es mucho más compleja. Además dispusimos de la serie de fechas del deshielo de las dos décadas pasadas (1982-2004, Tabla 2) sin que se evidencie ningún cambio.

Tabla 2. Fechas de deshielo

Años	1983	1984	1985	1986	1987	1988
Fecha	127	111	124	118	102	116
	1989	1990	1991	1992	1993	1994
	122	122	118	128	110	131
	1995	1996	1997	1998	1999	2000
	118	122	131	114	120	111
	2001	2002	2003	2004		
	118	109	125	121		

\*119=29 de abril

#### 4. CONCLUSIONES

A pesar de estos problemas, hemos conseguido crear un sistema que reproduce bien el comportamiento de las capas de hielo y de la nieve que lo recubre; pero son necesarios más de los seis años hasta ahora disponibles para encontrar nuevos casos en la naturaleza y así parametrizar más adecuadamente los fenómenos analizados. La Climatología es una escuela de paciencia, una virtud que hoy se vende mal.

Probablemente el factor más importante para comprender la dinámica del hielo en los lagos es el ritmo con que se suceden los tipos de tiempo -los periodos con nieve seguidos de grandes fríos-. No se ha podido establecer una relación sencilla con la temperatura media del invierno. Por eso resulta muy difícil detectar posibles cambios climáticos mediante las fechas de congelación o de deshielo observadas in situ o de las condiciones del hielo deducidas a partir de las imágenes de satélite.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a «Environnement Canada, Bureau de Québec» por los datos de nieve en Charlesbourg, a mi novia Lina Dubé por sus medidas, y a mis colegas Manola Brunet y J. Carlos García Codron por sus consejos.

#### 6. REFERENCIAS

- ADAMS, W.P. and ROULET, N.T. (1980). "Illustration of the role of snow in the evolution of the winter cover of a lake". *Artic*, 33, 1, pp. 100-116.
- BENGTSSON, L. (1986). "Spatial variability of lake ice covers". *Geogr. Ann.*, 68A, pp. 113-121.
- DUGUAY, C.R. *et al.* (2003). "Ice-cover variability on shallow lakes at high latitudes: model simulation and observations". *Hydrological Processes*, 17, pp. 3465-3483.
- HUFTY, A. (1999). L'englacement hivernal du lac Delage (Québec). Dans : *Publications de l'A.I.C.*, 12, pp. 352-358.
- LENORMAND, F.; DUGUAY, C.R. and GAUTHIER, R. (2002). "Development of a historical ice database for the study of climata change in Canada". *Hydrological Processes*, 16, pp. 3709-3724.
- LIVINGSTONE, D.M. (1997). "Break-up dates of alpines lakes as proxy data for local and regional mean surface air temperature". *Climatic Change*, 37, pp. 407-439.
- MENARD, P. *et al.* (2002). "Simulation of ice phrnology on Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada". *Hydrological Processes*, 16, pp. 3691-3706.
- POMEROY, J.W. *et al.* (1998). "An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surface modelling". *Hydrological Processes*, 12, pp. 2339-2367.
- STEPHAN, N.H. and FANG, X. (1997). "Simulated climate change effects on ice and snow covers on lakes in a temperate region". *Cold Regions Science and Technology*, 25, pp. 137-152.
- VARVUS, S.; WYNNE, R. and FOLEY, J. (1996). "Measuring the sensitivity of Southern Wisconsin lake ice to climatic variations and lake depth using a numerical model". *Limnol.Oceanogr.*, 41-5, pp. 822-831.