

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
VII CONGRESO NACIONAL**

**ESTIMACION DE TASAS DE DERRETIMIENTO
DE NIEVE**

**ING. SR. HUMBERTO PEÑA TORREALBA
ING. SR. FERNANDO ESCOBAR C.
SR. FERNANDO VIDAL J.**



GLA-6
c.2

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VII CONGRESO NACIONAL

ESTIMACION DE TASAS DE DERRETIMIENTO DE NIEVE

Humberto Peña T. (1)

Fernando Vidal J. (2)

Fernando Escobar C. (1)

R E S U M E N

Este estudio tiene por objetivo investigar métodos para la estimación de la tasa de derretimiento diaria de la nieve en los Andes Centrales de Chile. Para ello se utilizan 64 días de mediciones micrometeorológicas y de ablación de la nieve realizadas en los meses de verano entre 3750 y 4600 m.s.n.m. En forma complementaria, se usan datos a nivel de grupos de días con mediciones de ablación de la nieve e información meteorológica de menor calidad, en un amplio rango de elevación y meses.

El estudio concluye que la aplicación de las expresiones deducidas en otras regiones, resultan inadecuadas para las condiciones prevalecientes en esta zona y se proponen expresiones empíricas basadas en la evaluación de los flujos radiativos y la temperatura del aire.

(1) : Ingeniero Civil. Dirección General de Aguas

(2) : Meteorólogo. Dirección General de Aguas

1. INTRODUCCION

En el estudio de la escorrentía originada por fusión en campos de nieve o hielo, una de las mayores dificultades es la determinación de la tasa de derretimiento. En diversas regiones del mundo este problema ha sido resuelto en la práctica mediante el uso de fórmulas semi-empíricas. Sin embargo, las condiciones climáticas y de elevación para las cuales fueron deducidas, difieren notablemente de las prevalecientes en los Andes Chilenos al norte de los 34° de latitud, razón por la cual resulta conveniente verificar su validez para las nuevas condiciones.

En el presente estudio se investiga la posibilidad de estimar la tasa de derretimiento en función de variables meteorológicas y la aplicabilidad de distintas fórmulas propuestas en otros países, en base a mediciones directas de ablación (fusión más evaporación) realizadas por la Dirección General de Aguas en diversos lugares de la cuenca del río Maipo. El estudio que se presenta complementa con nuevos antecedentes y en un contexto más amplio el informe "Análisis de relaciones entre variables meteorológicas y la fusión de la nieve. Alta Cordillera de Santiago" (Peña y Salazar, 1984).

2. EXPRESIONES PROPUESTAS EN DIVERSOS PAISES PARA LA ESTIMACION DE LA TASA DE DERRETIMIENTO.

La fusión en un campo de nieve o hielo depende de los flujos de energía que se desarrollan en la superficie de la nieve, y del estado inicial del manto nival. Las diversas fórmulas que se han desarrollado suponen que el manto nival se encuentra isoterma a 0°C y están concebidas con el propósito de evaluar en forma simplificada los términos de la ecuación del balance de energía. En esas condiciones del manto y en días sin precipitación, la ecuación del balance se puede escribir de la siguiente forma:

$$BNET + QS + QL + QF = 0$$

con $BNET = BROC + BROL = (1 - \alpha) ROCI + ROLA - ROLN$

En la tabla N° 1 se entregan las expresiones para el cálculo del de-
retimiento que han sido evaluadas en este estudio. Mayores antecedentes
acerca de dichas fórmulas se entregan en las referencias.

Algunas de las fórmulas analizadas requieren para su uso de informa-
ción relativa a la radiación solar, albedo de la nieve, nubosidad, temperatu-
ras del aire y de la nieve, viento y presión de vapor (Cuerpo de Ingenieros
USA, Anderson, Derikx, Kuzmin), mientras que otras expresan los flujos radia-
tivos y turbulentos en función de temperaturas y el viento (Popov). La fór-
mula propuesta por UBC, Universidad de British Columbia, está concebida de modo
de utilizar solamente información de temperaturas.

En el presente informe se han incluido también 2 modificaciones a la
fórmula propuesta por el Cuerpo de Ingenieros, que consisten, en un caso, en
reemplazar el término del balance radiativo de onda larga, según lo recomenda-
do por Peña et al (1984), y en otro, en agregar a esta modificación la acumula-
ción de los términos relativos a los flujos turbulentos.

3. ANTECEDENTES UTILIZADOS

En el presente estudio, se ha utilizado información a nivel diario y a
nivel de grupos de días.

A nivel diario se dispone de datos para un total de 64 días obtenidos
en campañas de medición micrometeorológicas para la determinación del balance
de energía sobre la superficie de nieve (hielo), realizadas en los glaciares
Echaurren-Norte, Olivares Beta y Bello. Los datos corresponden a la ablación
(fusión más evaporación) diaria, perfiles de temperatura del aire y de la cubier-
ta de nieve, perfiles de humedad y de viento, datos de radiación de onda corta
incidente, albedo y balance radiativo neto.

La información disponible a nivel de grupos de días es de una menor cali

dad que la anterior y sólo se utiliza en forma complementaria, con el fin de verificar en un contexto más amplio las conclusiones deducidas con los datos diarios. En esta categoría se tiene un total de 70 períodos, de una duración variable entre 4 y 66 días. Para cada período se tiene una medición directa de la ablación total observada, en los puntos que posteriormente se indican, sin embargo no se dispone de información meteorológica medida en el mismo lugar, de modo que se ha debido utilizar los antecedentes de la estación meteorológica del Embalse El Yeso (2450 m.s.n.m.) y de la Plataforma de Colección de Datos del Glaciar Echaurren Norte (3800 m.s.n.m.), las que cubren gran parte del rango de elevaciones de interés para el presente estudio. Los lugares con mediciones de ablación considerados son:

- El glaciar Echaurren-Norte, en el cual se seleccionaron 7 puntos que presentan una superficie aproximadamente horizontal y 3 con una exposición claramente definida y sin efectos importantes de ocultamiento de los rayos solares por las cumbres circundantes.
- 6 puntos de la cuenca que comprende a dicho glaciar, que tienen una exposición aproximadamente horizontal y que se distribuyen en un rango de elevaciones que va desde los 3000 a los 4140 m.s.n.m.
- 10 Rutas de nieve de las cuencas de los ríos Maipo y Aconcagua, en las cuales se seleccionaron controles efectuados durante los períodos de deshielo y correspondientes a períodos sin nevadas de importancia.

En la Figura N° 1 y en la Tabla N° 2, se entregan los lugares y períodos de medición.

En las rutas de nieve, la ablación se determinó a través del control del equivalente en agua del manto de nieve mediante procedimientos estándar, mientras que en los otros puntos, tanto a nivel diario como para períodos más prolongados, se calculó midiendo el descenso de la superficie de nieve y su densidad. A nivel diario el descenso se controló mediante reglillas de plástico introducidas en el manto de nieve o midiendo las distancias verticales a puntos fijos de un hilo horizontal. Para períodos de varios días se controlaron balizas introducidas en la nieve. La densidad se determinó mediante el equipo estándar 59080 USA-CRREL o

con un muestreador tipo monte-rosa.

El tipo de control de la ablación que se ha usado presenta numerosas dificultades, como el aumento de fusión de la nieve en contacto con las reglillas o balizas, la no verticalidad en las medidas y otras, de modo que se estima que el error cometido en las mediciones a nivel diario es del orden de 3 mm. En las referencias se entrega un análisis detallado de los procedimientos seguidos en la medición de la ablación y del resto de las variables meteorológicas.

En la Tabla N° 3 se entregan los valores estadísticos de la muestra de datos utilizados tanto a nivel diario como por períodos.

4. ANALISIS A NIVEL DIARIO

4.1 Análisis de correlaciones

Con la información disponible a nivel diario (64 días), se realizó un análisis de correlaciones con el propósito de determinar el grado de asociación existente entre las distintas variables meteorológicas o combinaciones de ellas, y la ablación (fusión más evaporación) del manto nival. Conviene advertir que en adelante se identificará la ablación con el derretimiento diario, ya que solo difieren muy levemente.

En la Tabla N° 4 se presentan los mejores resultados con 1, 2 y 3 variables independientes, incluyendo los correspondientes coeficientes de correlación y el error estándar de la estimación. En dicho cuadro se ha agregado como referencia, cuando ha sido posible, los coeficientes de correlación deducidos en el Laboratorio de Nieves de Sierra Central USA, (CSSL) y en los meses de primavera en el Laboratorio de Nieves de Farellones (LNF) (U.Ch.). En todo caso, cabe señalar que esas mediciones se desarrollaron en lisímetros especialmente diseñados y en forma continua durante el período de deshielo.

Los resultados de la Tabla N° 4 muestran que la mejor correlación se obtiene con el balance neto de los flujos radiativos y con el balance de radiación

de onda corta. Las variables relativas a la temperatura presentan coeficientes de correlación menores, mientras que el resto de las variables muestran una influencia insignificante en el fenómeno. Estos resultados son concordantes, en líneas generales, con los obtenidos en el CSSL y en el LNF, aunque la investigación del CSSL entrega un grado de asociación mucho mayor con el balance neto y uno menor con la temperatura. Estas diferencias pueden originarse en los procedimientos de medición y en la menor varianza de la muestra usada en el presente trabajo, ya que se dispone solamente de mediciones de verano.

Las mejores relaciones con 2 variables independientes resultan agregando a los flujos radiativos la temperatura media del aire. Las relaciones con 3 variables entregan un mejoramiento prácticamente nulo. En la Tabla N° 5 se entregan las ecuaciones de regresión de las mejores correlaciones.

Considerando que con frecuencia se dispone solamente de antecedentes de temperaturas, en la Tabla N° 5 se han incluido además las ecuaciones basadas en la temperatura media y máxima diaria, expresadas en la forma tradicional de un factor grado-día referido a: la temperatura base resultante de la ecuación de regresión y a la temperatura base de 0° C. En este último caso, dicho factor, tanto trabajando con temperaturas medias como máximas, resulta prácticamente coincidente con los deducidos como promedio en el CSSL.

4.2 Evaluación de fórmulas empíricas

Con la información disponible a nivel diario, se han evaluado las expresiones de la Tabla N° 1. Se incluyó además en este análisis la ecuación de regresión lineal obtenida con el balance neto y la temperatura del aire, pero reemplazando el valor medido del balance de onda larga por su estimación en función de la temperatura del aire y de la nieve, según la siguiente expresión propuesta por Peña et al (1984):

$$BROL = 0,59 \sigma T_a^4 - \sigma T_n^4$$

Este reemplazo resulta conveniente para realizar comparaciones sobre bases comunes, ya que en el resto de las expresiones evaluadas el balance de onda larga

también es calculado en forma indirecta, con la información de temperaturas.

De los resultados de la evaluación, que se entregan en la Tabla N° 6, se deducen las siguientes conclusiones:

- Las fórmulas que no han sido especialmente ajustadas a las condiciones locales se muestran inadecuadas, con errores estándar mayores a 1 cm/día. Se aprecia que varias de ellas (Cuerpo de Ingenieros USA, UBC, Derikx, Kuzmin, Konalov) entregan consistentemente errores por exceso, lo que pudiera deberse a una so brevaloración de la radiación de onda larga emitida por la atmósfera (Peña et al 1984).
- La ecuación basada en el balance radiativo neto y la temperatura del aire entrega un error estándar considerablemente menor al del resto de las fórmulas. Después de ésa, la que entrega menor error, es la que considera exclusivamente los flujos radiativos, adaptados a las condiciones locales (Cuerpo de Ingenieros, USA (3)).

5. ANALISIS AL NIVEL DE GRUPO DE DIAS

Considerando la disponibilidad de datos normalmente existentes en el país y de acuerdo al análisis realizado a nivel diario, se seleccionaron 6 relaciones para ser verificadas a nivel de grupos de días, las cuales se incluyen en la Tabla N° 5.

Las limitaciones de los datos existentes, señalados en el punto 3, y la necesidad de extrapolar o estimar antecedentes que se requieren para la aplicación de las fórmulas, implican que se debe esperar que el presente análisis entregue so lamente una idea general acerca de la posibilidad de aplicar esas expresiones en condiciones distintas a las que fueron deducidas. Al respecto conviene recordar que el análisis a nivel diario consideró solamente información correspondientes a los meses de verano, y a elevaciones próximas a los 4.000 m.s.n.m.

De acuerdo a lo recomendado en las referencias (Corps of Engineers, 1956; Espíldora y Stowhas, 1968; Peña et al, 1984), en la evaluación de las fórmulas se asumió que el albedo de la nieve disminuía desde 0,60 en octubre, a 0,55 en diciembre y a 0,50 en febrero. Además en los días posteriores a una nevada se corrigieron estos valores para considerar el efecto de la nieve fresca, mediante una relación albedo vs edad de la nieve. El albedo de la nieve de años anteriores se estimó en 0,45 y considerando que las rutas de nieve se ubican a menor elevación y en los períodos estudiados se encuentran en pleno período de fusión, se usó un albedo de 0,55. La temperatura superficial media diaria de la nieve se estimó en $- 2.0^{\circ}$ C.

Para calcular la temperatura y la radiación solar en los lugares de interés se estableció una correlación lineal entre los datos de la estación de El Yeso y del Glaciar Echaurren, la cual debidamente interpolada para las distintas elevaciones permitió generar la información requerida.

Los resultados obtenidos de la evaluación de las fórmulas se entregan en la Tabla N° 7. De estos resultados se destacan los siguientes hechos:

- El análisis de los valores correspondientes al glaciar Echaurren Norte y a su cuenca adyacente, que reflejan los meses finales de primavera y de verano, muestran que los promedios medidos y calculados por las fórmulas no producen un desplazamiento sistemático de importancia. Sin embargo, de acuerdo al análisis de los datos de las rutas de nieve, a principios de primavera se observan errores por exceso, los cuales en el caso de las fórmulas que usan el factor grado-día son muy significativos, del orden de 1 cm/día. Esto era previsible, debido a la reconocida variación estacional de dicho factor. En las ecuaciones que utilizan los flujos radiativos se observa el mismo efecto, pero considerablemente disminuido.
- Los resultados obtenidos con los datos del glaciar Echaurren-Norte y con los de la cuenca adyacente, entregan un error estándar que varía en general entre 0,4 y 0,6 cm/día.

Sin embargo, si se considera que la dispersión de la muestra es pequeña, esos valores sólo representan un porcentaje explicado de la varianza que fluctúa aproximadamente entre 20 y 70%.

- El efecto de altitud se refleja principalmente en los resultados obtenidos en la cuenca adyacente al glaciar Echaurren. Un análisis detallado de estos resultados muestra que la aplicación de las fórmulas que usan el factor grado-día y una temperatura base distinta de 0°C , presenta para las elevaciones menores errores por defecto y por exceso para las mayores, razón por la cual resultan inapropiadas para su empleo a distintas elevaciones. Un efecto de la misma naturaleza pero de menor significación, se observa en las ecuaciones que trabajan con flujos radiativos, pero él pudiera estar vinculado más bien a una deficiente estimación del albedo de la nieve.
- Coincidentemente con los resultados obtenidos a nivel diario, la expresión que representa en diversas condiciones más consistentemente la realidad observada, es la que se basa en el balance radiativo neto y la temperatura del aire. Para el conjunto de la muestra entrega un error estándar de $0,47\text{ cm/día}$, lo que significa una explicación del 65% de la varianza total. En segundo lugar está la expresión que considera el balance radiativo de onda corta y la temperatura del aire.

Para analizar el comportamiento de las fórmulas frente a diferentes condiciones de exposición de la superficie nival, se compararon, para el glaciar Echaurren, los valores medidos y los estimados por las fórmulas, del cociente entre la ablación sobre una superficie aproximadamente horizontal y sobre una superficie orientada hacia el sur de pendiente igual a 15° . En el caso de las fórmulas que usan solamente temperaturas, este efecto necesariamente debería incorporarse como un factor externo, aspecto que en este estudio no ha sido considerado. En aquellas que utilizan los flujos radiativos se corrigió el valor de la radiación de onda corta incidente, aceptándose que el resto de las variables no sufren modificación.

El cálculo de la radiación incidente sobre una superficie con una exposición cualquiera, es un problema fundamentalmente geométrico, y depende de la latitud, declinación solar, ángulo horario, orientación e inclinación de la superficie

y de la proporción de radiación difusa. En las referencias (Lliboutry, 1965; Caviedes, 1979; Sarmiento, 1980) se presentan las ecuaciones y procedimientos de cálculo.

De acuerdo a los resultados de la Tabla N° 7 y Figura N° 3 se puede apreciar que en promedio los valores medidos y calculados sólo difieren levemente, en especial cuando se trabaja con el balance radiativo neto. Sin embargo los valores medidos entregan una mayor variabilidad que los estimados, hecho que en el caso de la expresión con el balance radiativo de onda corta resulta muy evidente para valores pequeños del cociente, los que corresponden a períodos de baja ablación. Con la excepción de dichos períodos, y considerando las múltiples aproximaciones que están incorporadas en los cálculos, se puede aceptar, para la determinación de la ablación en una superficie cualquiera, el uso de las fórmulas anteriores con la sola corrección del término de radiación de onda corta incidente.

6. CONCLUSIONES

De los análisis anteriores, las principales conclusiones que se deducen son las siguientes:

- De acuerdo a antecedentes medidos entre los 3750 y 4600 msnm, las expresiones para el cálculo del derretimiento deducidas en otras regiones, y que han sido incluidas en el presente estudio, resultan inadecuadas en las condiciones prevalecientes en la alta cordillera de los Andes en la zona central.
- En comparación con las relaciones deducidas para otras regiones, resulta ventajoso para las condiciones de clima y elevación, imperantes en la zona de estudio, el uso de expresiones empíricas como las propuestas en el punto 3, basadas en la estimación del balance radiativo neto y la temperatura del aire, o en el balance radiativo de onda corta y la temperatura del aire. Con información diaria de los meses de verano estas expresiones entregaron un error estándar de 0,46 y 0,50cm, y un coeficiente de correlación de 0,85 y 0,81 respectivamente.
- En un primer análisis, a nivel de grupos de días, las mismas 2 expresiones empí

ricas deducidas resultan aplicables durante los meses de finales de primavera y de verano, y en elevaciones superiores a 3000 msnm. Asimismo, con la sola corrección del término de la radiación de onda corta incidente, se podrían utilizar en una primera aproximación y con algunas precauciones, para superficies no horizontales.

- Sería recomendable profundizar el análisis realizado, validando las expresiones propuestas con información a nivel diario obtenida durante los meses de primavera y en un rango de elevaciones entre 2500 y 3500 msnm.

SIMBOLOGIA	
M	: Derretimiento (ablación) (cm/dfa)
BNET	: Balance radiativo neto (Ly/dfa)
BROC	: Balance de radiación de onda corta (Ly/día)
BROL	: Balance de radiación de onda larga
ROCI	: Radiación de onda corta incidente (Ly/dfa)
ROLA	: Radiación de onda larga de la atmósfera
ROLN	: Radiación de onda larga de la nieve
α	: Albedo (tanto por uno)
N	: Nubosidad (tanto por uno)
Ta	: Temperatura media del aire (° C)
Tx	: Temperatura máxima del aire (° C)
Tm	: Temperatura mínima del aire (° C)
Ts	: Temperatura superficial de la nieve (° C)
Tr	: Temperatura del punto de rocío (° F)
Tc	: Temperatura de la base de la nube (° C)
es	: Presión de vapor saturado a la temperatura de la superficie de la nieve (mb)
e	: Presión de vapor del aire (mb)
V	: Velocidad media del viento (m/s)
QS	: Flujo de calor sensible
QL	: Flujo de calor latente
QF	: Flujo de calor de fusión
σ	: Constante de Stefan-Boltzman (Ly/min/°K ⁴)
Ta'	: Ta - Ts (°F) con Ta a 10 pies sobre la superficie
Tc'	: Tc - Ts (°F)
Tr'	: Tr - Ts (°F) con Tr a 10 pies sobre la superficie
C _p	: Calor específico del aire seco (cal/g/°C)
L _s	: Calor latente de sublimación (cal/g)
P	: Presión atmosférica (mb)
d, n	: Subíndice para promedios diurnos y nocturnos, respectivamente
100, 200, 1000	: Subíndice que indica la altura de la medición expresada en centímetros, las variables sin este subíndice están referidas a mediciones a 150 centímetros sobre la superficie.

B I B L I O G R A F I A

- ANDERSON E. Snow accumulation and ablation model. National Weather Service, U.S.A.
- CAVIEDES J. Inventario de glaciares en la hoya del río Cachapoal y predicción de la escorrentía del deshielo. Andes Centrales. Tesis de grado para optar al título de Geólogo. U. de Chile, 1979
- CLIMDATA. Mediciones micrometeorológicas para determinar el balance de energía del glaciar Echaurren Norte. MOP-DGA, 1978
- CORPS OF ENGINEERS, U.S. Army: Snow hydrology. Portland, Oregon, 1956
- DERIKX L. Glacier discharge simulation by ground-water analogue. Publ. IHS N° 95, 1973
- KONOVALOV V.G. On methods of regional computation of glacier melting intensity in Central Asia. Publ. IAHS N° 138, 1982
- CARDEAU J-P. Evaluation et comparaison de modèles mathématiques hydrologiques de bassins versants en haute montagne, Grenoble, Francia, 1977
- PEÑA H. y C. SALAZAR. Análisis de relaciones entre variables meteorológicas y la fusión de la nieve. Alta Cordillera de Santiago, Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur, 1984
- PEÑA H., F. VIDAL Y C. SALAZAR. Balance radiativo del manto de nieve en la alta cordillera de Santiago. Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur, 1984
- PEÑA H., F. VIDAL y F. ESCOBAR. Caracterización del manto nival y mediciones de ablación y balance de masa en glaciar Echaurren Norte. Jornadas de Hidrología de Nieves y Hielos en América del Sur, 1984
- PIPES A. y M. QUICK. UBC Watershed model, Users manual. Vancouver, Canada, 1977
- SALAZAR C. Determinación del derretimiento nival en un punto de la alta cordillera. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil (en revisión). U. de Chile, 1985
- STOWHAS L. y B. ESPILDORA. Instalación y operación de un laboratorio de hidrología de nieves. U. de Chile, 1968.
- World Meteorological Organization. Hydrological forecasting practices. Operational hydrology report N° 6. Ginebra. WMO N° 425, 1975
- SARMIENTO P. : Energía solar, aplicaciones e ingeniería. Valparaíso, Chile, 1980
- LLIBOUTRY L.: Traité de glaciologie. Masson et Cía. Editeurs Parfs, 1965.

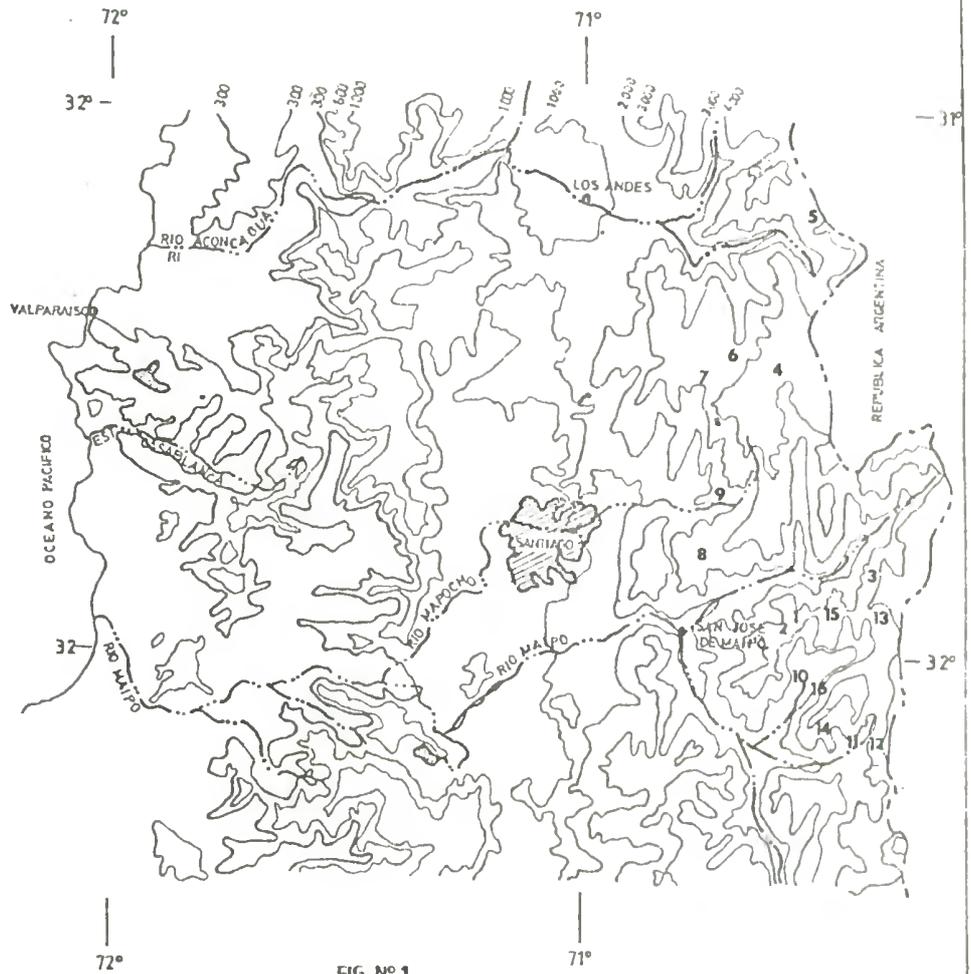
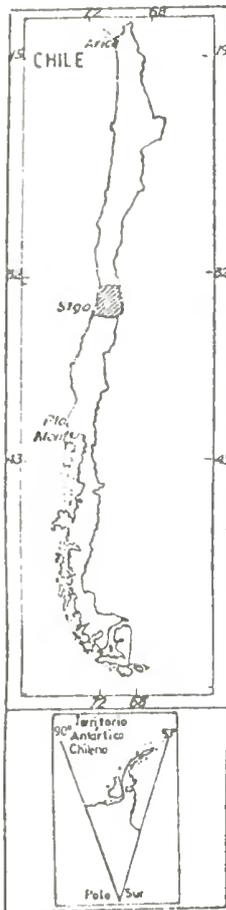


FIG N°1
MAPA DE UBICACION

GLACIAR

- | | | | |
|---|-------------------|----|------------|
| 1 | Echaurren - Norte | 11 | Q. Morales |
| 2 | Echaurren - Sur | 12 | Las Arenas |
| 3 | Bello | 13 | Piuquenes |
| 4 | Olivares | 14 | El Zorro |

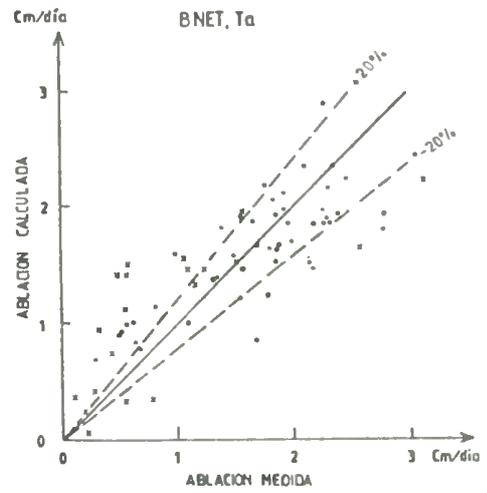
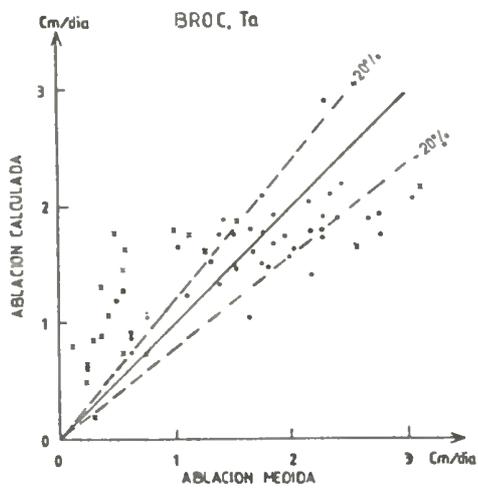
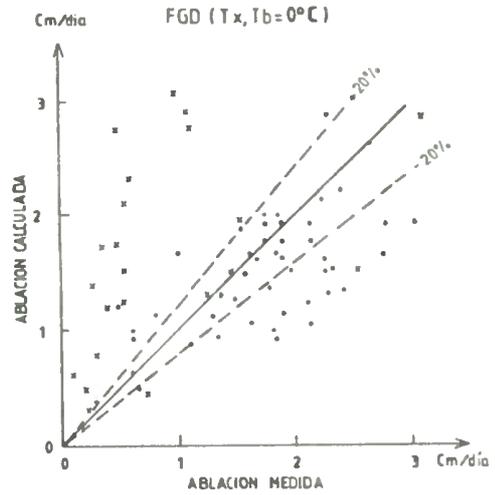
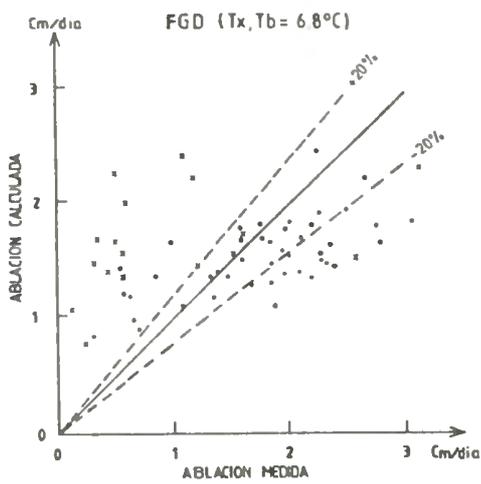
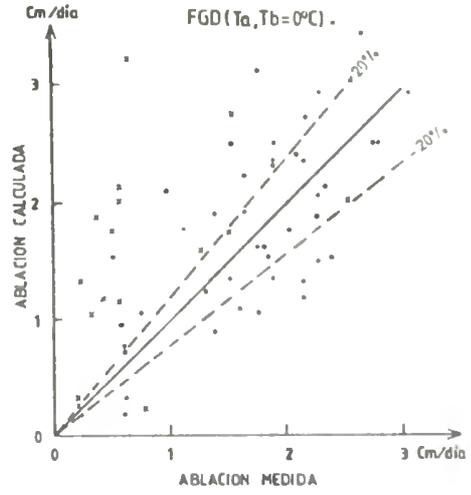
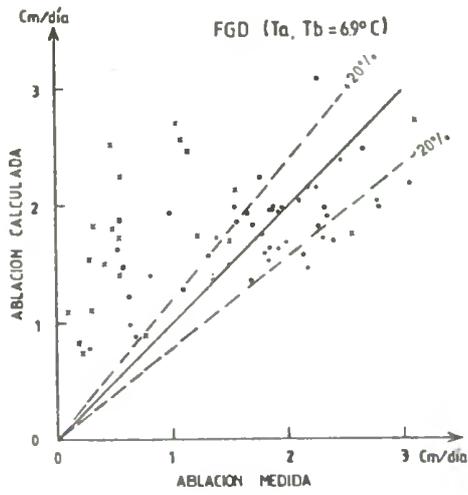
RUTA DE NIEVE

- | | |
|----|-------------|
| 5 | Portillo |
| 6 | Cerro Negro |
| 7 | Los Bronces |
| 8 | R. Alfaro |
| 9 | B. Negros |
| 10 | Lag. Negra |

INF. METEOROLOGICA

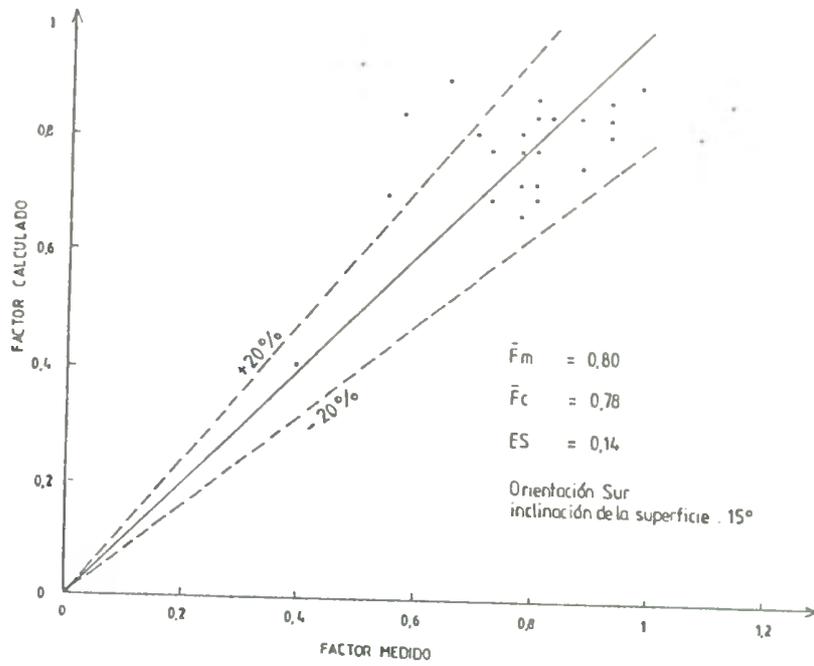
- | | |
|----|------------------------|
| 15 | D.C.P. Echaurren Norte |
| 16 | Emb. El Yeso |

FIG. N° 2
 ABLACION CALCULADA SEGUN DIFERENTES EXPRESIONES
 GRUPO DE DIAS



○ ECHAURREN NORTE ◊ CUENCA ECHAURREN × RUTA DE NIEVE

FIG. N°3
 FACTOR DE EXPOSICION
 MEDIDO VS CALCULADO SEGUN EXPRESION BNET, T₀



FACTOR DE EXPOSICION
 MEDIDO VS CALCULADO SEGUN EXPRESION BROE, T₀

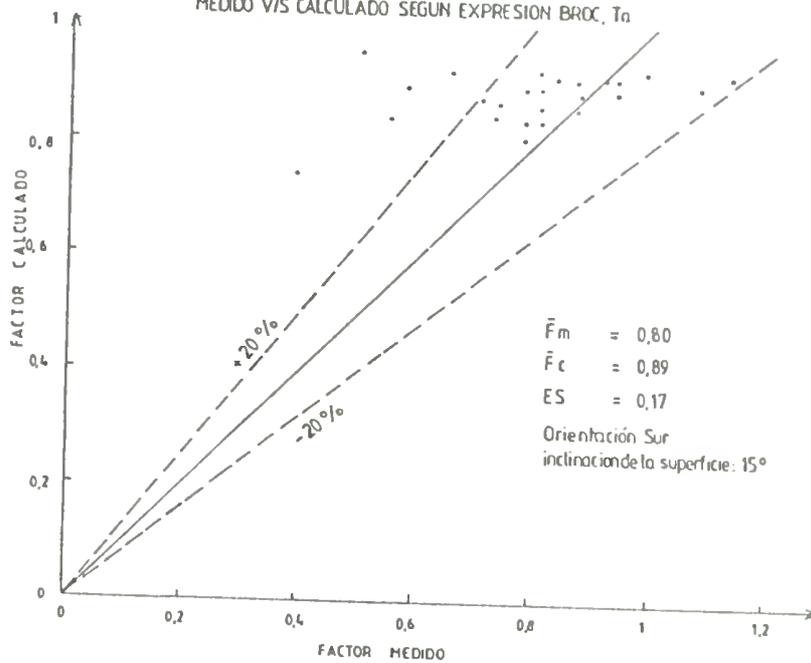


TABLA N° 1 FORMULAS EMPIRICAS UTILIZADAS

NOMBRE	EXPRESION	UNIDADES
Cuerpo de Ingenieros USA (1)	$M = 0,00508 \cdot \text{ROCI} \cdot (1 - \alpha) + (1 - N) \cdot (0,0212 \cdot \text{Ta}' - 0,84) + 0,029 \cdot N \cdot \text{Tc}' + 0,0084 \cdot V \cdot (0,22 \text{Ta}' + 0,78 \cdot \text{Tr}')$	M: pulgadas/día V: millas/hora (a 50 pies de altura)
Cuerpo de Ingenieros USA (2)	$M = 0,00508 \cdot \text{ROCI} \cdot (1 - \alpha) + 7,09 (0,59 \sigma \text{Ta}^4 - \sigma \text{Ts}^4) (1 - 0,68 N) + 0,0084 \cdot V \cdot (0,22 \text{Ta}' + 0,78 \text{Tr}')$	M: pulgadas/día V: millas/hora (a 50 pies de altura Ta, Ts: °K
Cuerpo de Ingenieros USA (3)	$M = 0,0129 \cdot \text{ROCI} \cdot (1 - \alpha) + 18 \cdot (0,59 \sigma \text{Ta}^4 - \sigma \text{Ts}^4) \cdot (1 - 0,68 N)$	Ta, Ts = °K
ANDERSON	$M = 0,125 [\text{ROCI} \cdot (1 - \alpha) + \text{BROL}] - 8,5 (0,002 \cdot V_{100})$ $((e_{200} - e_s) + \frac{C_p \cdot P}{0,622 L_s} (Ta - 273))$ $\text{BROL} = (0,59 \sigma \text{Ta}^4 - \sigma \text{Ts}^4) (1 - 0,68 N)$	M: mm/día Ta, Ts: °K ROCI: Ly/día V: Km/día
UBC	$M = 0,065 (Tx - 32 + \text{TCEADJ} (Tm - 32))$ $\text{TCEADJ} = \frac{Tm - 32 + 0,5 (Tx - Tm)}{24 + 0,5 (Tx - Tm)} \cdot 0,5$	M: pulgadas/día Tx, Tm: °F
DERIKX	$M = 0,0030 \text{ROCI} (1 - \alpha) - 18 (1 - 0,6 N d^2) + 0,0075 (e_{200} - e_s) \cdot V_{200} + 0,0033 \cdot \text{Ta}_{200} \cdot V_{200}$	M: mm/día ROCI: k joules/m2 V: Km/día
KUZMIN	$M = 0,125 [\text{ROCI} (1 - \alpha) - 1440 \sigma \text{Ts}^4 + 1440 \cdot (0,62 + 0,05 \sqrt{e_{200}}) \cdot (1 + 0,24 N) \sigma \text{Ta}^4] + \text{Ac} \cdot \dot{h}_a \cdot V_{1000}$ $\text{Ac} = 0,878 [1 + 0,547 \cdot V_{1000}]$ $\dot{h}_a = (Ta_{200} - Ts) + 1,75 (e_{200} - e_s)$	M: mm/día Ta, Ts: °K
POPOV (1)	$M_d = 6,2 (1 - \alpha) \delta m_{\text{ax}} + 0,65 V_d (T_d - 0,5) - 1,4 \delta m_{\text{in}}$ $M_n = 0,65 V_n (T_n - 0,5) - 1,4 \delta m_{\text{in}}$	M: mm/día $\delta m_{\text{ax}} = Tx - Ta$ $\delta m_{\text{in}} = Tm - Ta$
POPOV (2)	$M = 7,1 [(1 - \alpha) (Tx - Ta - 0,2) - 0,2 (Ta - Tm) + 0,1 \cdot V_{1000} (Td - 0,5)]$	M: mm/día
KONALOV	$M = 0,0094 \text{BROC} + 0,27 \text{Ta} - 0,74$	-
DGA (BNET, Ta)	$M = 0,489 + 0,00768 [\text{ROCI} \cdot (1 - \alpha) + (0,59 \sigma \text{Ta}^4 - \sigma \text{Ts}^4) (1 - 0,68 N)] + 0,110 \text{Ta}$	$\sigma = \text{Ly/día/}^\circ\text{K}^4$

NOTA: Las unidades que no se especifican corresponden a las mencionadas en la simbología.

TABLA N° 2 ANTECEDENTES UTILIZADOS. LUGARES Y PERIODOS DE MEDICION

LUGAR	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION m.s.n.m.	N° DATOS	AÑOS	EPOCA
I. Nivel Diario				Días		
Gl. Echaurren Norte	33° 33'	70° 81'	3750	28	77/78 a 84/85	Ene-Mar
Gl. Olivares Beta	33° 08'	70° 12'	4600	10	79/80	Feb-Mar
Gl. Bello	33° 31'	69° 57'	4200	26	80/81 a 81/82	Ene-Mar
II. Grupos de Días				Grupos de días		
II.1 Glaciar Echaurren	33° 33'	70° 08'	3750	27	76/77 a 84/85	Oct-Mar
II.2 Cuenca Echaurren						
Echaurren Sur	33° 33'	70° 08'	4140	5	83/84 y 84/85	Oct-Mar
Int. Altas	33° 33'	70° 08'	4050	5	83/84 y 84/85	Oct-Mar
Int. Bajas	33° 33'	70° 08'	3970	5	83/84 y 84/85	Oct-Mar
Echaurren Norte	33° 33'	70° 08'	3750	5	83/84 y 84/85	Oct-Mar
Qda. Murciélago	33° 33'	70° 08'	3610	5	83/84 y 84/85	Oct-Mar
Est. Fluviomét.	33° 33'	70° 08'	3000	2	83/84 y 84/85	Oct-Dic
II.3 Rutas de Nieve						
Portillo	32° 50'	70° 07'	2885	1	75	Sep
Cerro Negro	33° 08'	70° 15'	3410	3	75 y 80	Ago-Dic
Los Bronces	33° 09'	70° 18'	3500	2	71	Ago-Sep
Rodeo Alfaro	33° 37'	70° 17'	2200	1	71	Ago-Sep
Barros Negros	33° 18'	70° 16'	3380	5	71 a 84	Ago-Dic
Laguna Negra	33° 36'	70° 18'	2760	5	71 a 82	Ago-Dic
Qda. Morales	33° 48'	70° 05'	2250	1	71	Ago-Sep
Las Arenas	33° 48'	70° 02'	2380	2	79 y 80	Ago-Oct
Piuquenes	33° 37'	69° 58'	2774	2	71	Ago-Sep
El Zorro	33° 51'	70° 08'	2100	1	71	Ago-Sep
III. Información Meteorológica						
DCP Echaurren Norte	33° 33'	70° 08'	3800	-	81/85	Oct-Mar
Emb. El Yeso	33° 40'	70° 07'	2475	-	71/72 y 75/85	Ago-Mar

TABLA N° 3 VALORES MEDIOS Y EXTREMOS DE VARIABLES RECOLECTADAS

	VARIABLE	UNIDAD	\bar{X}	X MAX	X MIN	DS
<u>I. Nivel Diario</u>						
Glaciares	M	cm	1,39	3,10	0,0	0,87
Echaurren Norte, Bello y Olivares	BNET	Ly	99	259	-72	75
	BROC	Ly	301	600	60	118
	ROCI	Ly	653	889	289	154
	α		54	82	30	13
	Ta	°C	1,2	7,0	-5,0	3,2
	Tx	°C	5,7	15,7	-3,0	4,2
	Tm	°C	-3,2	4,5	-12,8	3,3
	Ts	°C	-3,6	-0,7	-7,9	1,7
	e	mb	4,33	6,57	1,00	1,27
	V	m/s	3,0	6,1	1,4	1,1
<u>II. Grupos de dfas</u>						
II.1 Glaciar Echaurren	M	cm	1,77	2,80	0,53	0,59
II.2 Cuenca Echaurren	M	cm	1,76	3,06	0,31	0,68
II.3 Rutas de Nieve	M	cm	0,86	3,12	0,13	0,74

\bar{X} , X MAX, X MIN : valores promedios, máximos y mínimos respectivamente
 DS : desviación estándar.

TABLA N° 4 ANALISIS DE CORRELACIONES. ABLACION DIARIA EN FUNCION DE VARIABLES METEOROLOGICAS

VARIABLES INDEPENDIENTES	R	ES	R (LNF)	R (CSSL)
BNET	0,76	0,56	0,83	0,97
BROC	0,69	0,63	0,72	0,81
ROCI	0,21	0,89	-	-
Ta	0,61	0,69	0,38	0,28
Tx	0,51	0,74	0,40	0,48
Ta.V	0,57	0,71	-	-
e.V	0,18	0,86	-	-
Ta.V, e.V	0,57	0,71	-	0,68*
BNET, Ta	0,85	0,46	-	-
BNET, Tx	0,82	0,49	-	-
BNET, Ta.V	0,81	0,51	-	-
BNET, Ta.V, e.V	0,81	0,50	-	-
BNET, Ta.V, e	0,88	0,41	-	-
BROC, Ta	0,81	0,50	-	-
ROCI, Ta	0,64	0,66	-	-

- (*) : cálculo horario
R : coeficiente de correlación ajustado por grados de libertad
ES : error estándar de estimación (cm)
LNF : Laboratorio de Nieves de Farellones (U. Ch).
CSSL : Laboratorio de Nieves en Sierra Central (U.S.A.)

T A B L A N° 5

Fórmulas seleccionadas para la evaluación del derretimiento a nivel de grupos de días

Expresión

- FGD (Ta, Tb= 6,9 °C) : $M = 0.169 (Ta + 6.9)$
FGD (Ta, Tb= 0° C) : $M = 0.486 Ta$
FGD (Tx, Tb= 6.8 °C) : $M = 0.109 (Tx + 6.8)$
FGD (Tx, Tb= 0° C) : $M = 0.204 Tx$
BROC, Ta : $M = -0.063 + 0.0043 BROC + 0.127 Ta$
BNET, Ta : $M = 0.489 + 0.00768 BNET + 0.110 Ta$

FGD : Factor grado-día

Obs : En la simbología se indican el significado y unidades de las variables.

TABLA N° 6 RESULTADOS OBTENIDOS CON DIFERENTES FORMULAS. NIVEL DIARIO

	\bar{X} (cm)	ES (cm)	R -
VALOR MEDIDO	1,39	-	-
CUERPO DE INGENIEROS USA (1)	2,72	1,99	0,35
CUERPO DE INGENIEROS USA (2)	1,40	1,65	0,30
CUERPO DE INGENIEROS USA (3)	1,45	0,82	0,72
ANDERSON	1,36	1,13	0,53
UBC	1,76	1,13	0,50
DERIKX	2,19	1,15	0,75
KUZMIN	3,62	2,57	0,55
POPOV (1)	0,05	1,89	0,54
POPOV (2)	1,27	1,20	0,56
KONALOV	2,42	1,43	0,81
DGA (BNET, Ta)	1,43	0,51	0,83

\bar{X} : Promedio

ES : Error estándar entregado por la fórmula

R : Coeficiente de correlación ajustado por grados de libertad

T A B L A N° 7

Resultados obtenidos con fórmulas propuestas. Nivel grupo de días

	Muestra total		Echaurren-Norte		Cuenca Echaurren		Rutas de Nieve	
	\bar{X}	ES(DS)	\bar{X}	ES(DS)	\bar{X}	ES (DS)	\bar{X}	ES (DS)
Ablación medida	1.47	(0.80)	1.77	(0.59)	1.76	(0.68)	0.86	(0.74)
FGD (Ta, Tb= 6.9° C)	1.77	0.74	1.89	0.49	1.68	0.42	1.75	1.11
FGD (Ta, Tb= 0° C)	1.93	1.08	2.11	0.75	1.71	0.58	1.99	1.62
FGD (Tx, Tb= 6.8° C)	1.55	0.73	1.60	0.52	1.47	0.55	1.59	1.00
FGD (Tx, Tb= 0° C)	1.53	0.80	1.60	0.53	1.37	0.57	1.64	1.14
BROC, Ta	1.53	0.53	1.71	0.41	1.60	0.42	1.28	0.68
BNET, Ta	1.33	0.47	1.70	0.42	1.70	0.38	1.04	0.51

\bar{X} : Promedio

ES : Error estándar entregado por la fórmula

DS : Desviación estándar