ESTUDIO ESTADÍSTICO DE ALTURAS MÍNIMAS DE NIEVE EN CANTABRIA. APLICACIÓN A LA PREDICCIÓN

F. J. Ortiz Berenguer
E. Arasti Barca
J. L. Arteche García
P. Sanz Moral

(G.P.V. de Santander, -INM-)

RESUMEN

Se han recopilado y estudiado datos de días de nieve de las noventa y cuatro estaciones pluviométricas de Cantabria, relacionando la altitud de la estación más baja que haya registrado nieve con los datos del radiosondeo de Santander. Con todos estos datos se ha elaborado la estadística básica (incluyendo la distribución de frecuencias relativas acumuladas de los días de precipitación) y obteniéndose una correlación entre la altura H y la isocero I, relacionando ambas variables mediante curvas de regresión, obteniendo un método objetivo para la predicción de la altura mínima a la que se espera nieve.

1. Introducción.

La nieve es precipitación de agua en estado sólido, principalmente en forma de estrellas o cristales hexagonales rameados. Incluso a temperaturas muy inferiores a la de congelación, los cristales están rodeados de una capa de gotitas de agua subfundidas, y cuando chocan entre sí, quedan soldados constituyendo los copos de nieve. A temperaturas muy bajas, los cristales están secos y los copos no se presentan.

Los parámetros o predictores más usuales que nos determinan la probabilidad de presencia de precipitación en forma de nieve son:

- *Isocero:* Isoterma de los 0ºC o nivel de fusión, referida al nivel del mar. Es el parámetro más preciso, ya que nos da la altura teórica de la nieve. Veremos que esta altura no coincide con la real, así como un método estadístico para conocer la altura real.
- *Espesor 850-1.000:* $Z_{850} - Z_{1000}$
- T_{850}
- T_{2m} o T en superficie
- T_{920}

La finalidad de este trabajo es relacionar, mediante curvas de regresión, la altura mínima a la que la precipitación cae en forma de nieve y estos parámetros o predictores, para la provincia de Cantabria, de forma que sea útil para la

predicción operativa de este G.P.V. Es decir, obtener la ecuación:

$$H = f(X) \qquad [1]$$

siendo H la altura mínima a la que cae la nieve (predictando), X el parámetro (predictor) que nos determina dicha altura y [1] la ecuación que nos relaciona ambas variables.

Los principales problemas que nos encontramos al intentar relacionar dichas variables son:

1. Mientras X tiene una distribución continua, la altura H tiene una distribución discreta, ya que dichos valores son los correspondientes a las estaciones pluviométricas de Cantabria, encontrándose discontinuidades superiores a los 100 m entre dos estaciones consecutivas en altura.

2. Los valores de X son los correspondientes a los sondeos de 00Z y 122 realizados en Santander, mientras que los valores de H corresponden a la altitud de la estación más baja en la que se ha registrado nieve, habiendo diferencias en la estructura de las capas bajas en ainbas localidades, así como los debidos a efectos locales (enfriamientos catabáticos, efectos orográficos, estancamiento de la nubosidad, etc...).

3. El valor de H se obtiene de las tarjetas pluviométricas en las que se indica si el fenómeno ocurre por la mañana, por la tarde o por la noche. Al relacionarlas con X se han elegido los datos del sondeo más próximo a la ocurrencia del fenómeno. Debido a la variabilidad que hay, a veces, entre los datos de las 00Z y de las 12Z, este método nos introduce un error más en nuestro estudio.

Debido a estas dificultades, cabe pensar que la relación entre H y X no será del todo lo estrecha que se desearía, pero sí que será lo suficiente como para darnos un intervalo fiable de H, de unos 200 m, que es el que se utiliza en predicción operativa.

2. Método de trabajo.

El objetivo es deducir algoritmos que nos dan el valor de la altura mínima de precipitación en forma de nieve para una cuenca hidrográfica, en-función de una serie de paráinetros obtenidos de un sondeo aerológico. utilizando el método de las correlaciones. Para ello se ha dividido Cantabria en 3 zonas o regiones geográficamente diferenciables (ver mapa de Cantabria, Fig. 1).

VERTIENTE NORTE: Agrupa las cuencas de los ríos Asón, Miera. Pas, Pisueña, Besaya, Saja y Nansa, cuyos valles están orientados con fuerte componente del Norte y abiertos a las penetraciones frías invernales en torno a dicha componente. Aquí incluimos toda la costa de Cantabria. Tiene una buena red de estaciones que nos da una distribución casi continua de alturas entre el nivel del mar y los 900 m.

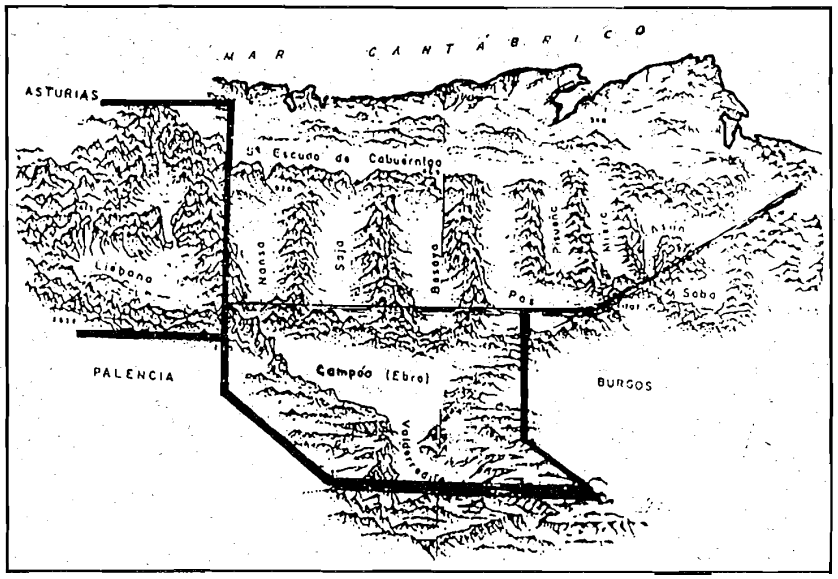

Figura 1.- *Mapa de Cantabria*

LIÉBANA: Constituye un conjunto de valles, en torno al río Deva, con una altitud baja en promedio, rodeada de fuertes escarpados y que está cerrada al Norte y al Oeste por los Picos de Europa. Llueve menos que en el resto de Cantabria. El porcentaje entre los días de lluvia y de nieve es similar a puntos de igual altitud de la vertiente norte. Tiene una mala distribución altitudinal de estaciones.

CAMPÓO: Situada en el extremo centromeridional de Cantabria. Tiene unas características climatológicas mesetarias dentro del clima general de Cantabria. Está influenciada por las entradas del Norte y por las penetraciones cálidas y húmedas de componente sur (S-SW). La proporción de días de nieve y lluvia es superior a las otras dos zonas. Tiene una red de estaciones bien distribuidas entre los 772 m y los 1.020 m. La altitud más alta corresponde a Brañavieja: 1.650 m.

2.1. Creación del fichero de datos.

Se han estudiado los días en que se ha registrado precipitación en forma de nieve, tomando los datos de las tarjetas pluviométricas de las 94 estaciones de Cantabria, teniendo en cuenta la división geográfica anterior. Los días estudiados van desde el 1 de enero de 1989 al 10 de mayo de 1991. Se ha calculado, tanto para cada una de las regiones anteriores como para toda la provincia de Cantabria, la altitud de la estación más baja que haya registrado nieve, así como la parte del día (mañana, tarde o noche) en que se produce, para así poder comparar con los datos del sondeo más próximo en el tiempo. Con estos datos se ha elaborado un fichero de datos (NIEVE) en el cual se introdujeron los siguientes datos.

- Fecha y mes
- Región o zona
- Situación sinóptica
- Altura mínima
- Isocero
- Temperatura en 850 mb
- Espesor 850-1.000
- Espesor 500-1.000

En cuanto a la región o zona, son cuatro: Cantabria, Campóo, Liébana, vertiente norte. De los 476 días estudiados se ha registrado nieve en alguna de las estaciones pluviométricas en 152 días, de la siguiente forma:

- En Cantabria: 152 días
- En Campóo: 149 días (98%)
- En Liébana: 78 días (51%)
- En la vertiente norte: 69 días (45%)

Como puede observarse, en el 98% de los días que nieva en Cantabria, nieva en Campóo (independientemente de que nieve también en las otras zonas), en parte debido a la mayor altitud de sus estaciones y en parte a la entrada de los vientos del Sur, que dejan precipitaciones en la ladera sur de la cordillera.

Además, todos los días que nieva en la vertiente norte, nieva también en Campóo (generalmente en Reinosa). No ocurre así con Liébana.

En cuanto a las situaciones sinópticas, se han clasificado los días de nieve según el flujo sinóptico en niveles bajos (con los análisis de superficie del INM) en NORTE, OESTE, SUR y ESTE (Ver Figura 2).

En cuanto a los parámetros o predictores se ha hecho un estudio preliminar para determinar cuál de ellos es más significativo para determinar la altura mínima de la nieve. Se ha elegido la isocero debido a:

1. La buena correlación que existe entre la altura mínima H de nieve y el isocero, que se pone de manifiesto en la matriz de correlación correspondiente (ver tabla I) elaborada en un trabajo previo con datos de cinco años. Llama la atención en esta tabla la baja correlación existente entre H y el espesor 850-1.000 mb, que es de sólo 0,32, frente a 0,61 del isocero, siendo esta correlación la más alta de H con un predictor.

Tabla I:
correlación entre H y X

	H	I	T_{850}	Z_{51}	Z_{81}
H	1	0,61	0,56	0,51	0,32
I	0,61	1	0,95	0,82	0,51
T_{850}	0,56	0,95	1	0,76	0,44
Z_{51}	0,51	0,82	0,76	1	0,75
Z_{81}	0,32	0,51	0,44	0,75	1

2. Además de esta razón, está el hecho de que la isocero es un parámetro muy preciso y con significado físico, ya que da el nivel teórico de fusión.

3. Por último, la utilización del isocero como predictor supone una continuidad en el trabajo operativo diario del G.P.V. de Santander

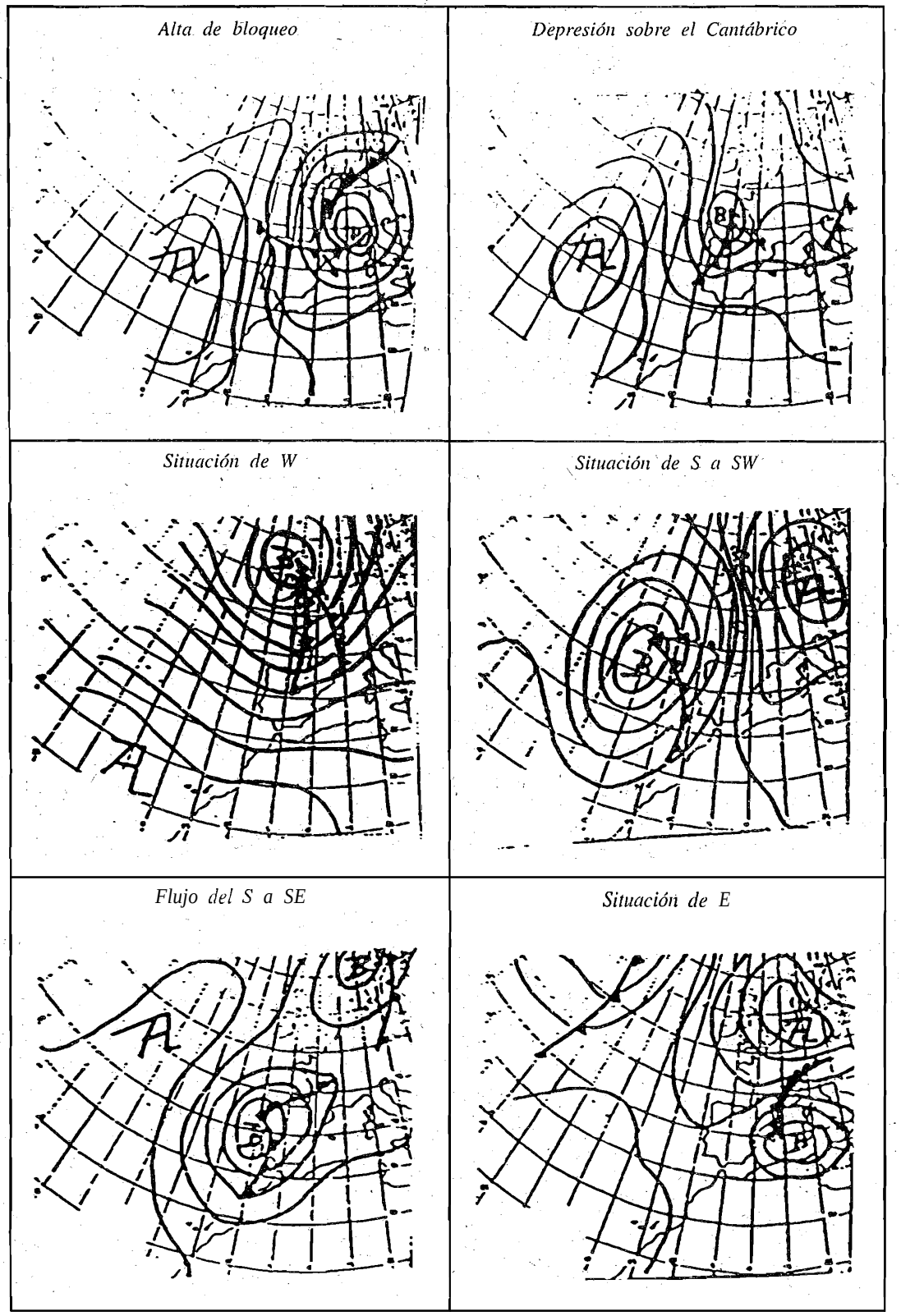

Figura 2.- *Clasificación de situaciones sinópticas en superficie*

en el que ya se viene utilizando un programa ISOCERO en McIDAS, desde el invierno 1990-91. Este programa da valores de ISOCERO en puntos de rejilla. Según algunos autores, el mayor problema es la predicción de la isocero por parte de los modelos. Esta isocero sería menos precisa que los espesores. En este sentido, se está haciendo un seguimiento de cómo funciona el INM y CEP en la determinación de ISOCEROS, dando mejores resultados el CEP.

Con todos los datos se ha elaborado una serie de estadísticas básicas y obtenido una correlación entre la altura H y la isocero I, relacionando ambas variables mediante curvas de regresión.

Para ver la significación estadística de la regresión lineal, se recurre al análisis de varianza, ideado por Fisher en 1925. Se refiere a un procedimiento analítico, donde la variabilidad total de un conjunto de datos se subdivide en una serie de componentes cuya causa es conocida (en nuestro caso, debido a la regresión) frente a un componente de variabilidad cuya causa es desconocida y que será denominado residual o debido al azar,

El contraste consiste en comparar la variabilidad debida a la regresión y la residual. Si la primera es significativamente mayor que la segunda, diremos que la correlación es estadísticamente significativa ($p < 0,05$ ó $p < 0,01$). El parámetro utilizado es el cociente entre la varianza debida a la regresión y la varianza residual, que sigue la distribución F de Fisher.

3. Ecuaciones de regresión.

Se calculan,las ecuaciones de regresión que relacionan H e I, tanto para Cantabria como para las regiones. Se estudian las siguientes:

LINEAL (RECTA) $H = A + B \cdot I$

EXPONENCIAL $H = A \cdot \exp(B \cdot I)$

HIPERBÓLICA $H = A + B/I$

obteniéndose las ecuaciones de la tabla II.

En la Figura 3 se haii representado las curvas más significativas ($r^2 > O$), así como la

Tabla II
Ecuaciones de regresión

REGIÓN	ECUACIÓN	ERROR A	ERROR B	R	R^2	F	NIVEL SIG.
Cantabria	$H = -107 + 0,676 \cdot I$	65	0,042	0,79	0,63	255	$P < 0,01$
	$H = 184 \cdot e^{0,000955 \cdot I}$	0,2	0,000084	0,68	0,46	128	$P < 0,01$
	$H = 1862 - 1279000/I$	68	82711	0,78	0,61	235	$P < 0,01$
Campóo	$H = 302,3 + 0,487 \cdot I$	65,6	0,043	0,73	0,53	168	$P < 0,01$
	$H = 527 \cdot e^{0,000418 \cdot I}$	0,05	0,000036	0,74	0,55	180	$P < 0,01$
	$H = 1580 - 751717/I$	72	89549	0,61	0,37	86	$P < 0,01$
Liébana	$H = 166,2 + 0,499 \cdot I$	101,1	0,082	0,58	0,34	39	$P < 0,01$
	$H = 225 \cdot e^{0,000953 \cdot I}$	0,2	0,000161	0,57	0,32	36	$P < 0,01$
	$H = 1330 - 639910/I$	82	90289	0,64	0,41	53	$P < 0,01$
vertiente norte	$H = -261,8 + 0,763 \cdot I$	113,8	0,102	0,72	0,52	72	$P < 0,01$
	$H = 38,8 \cdot e^{0,00229 \cdot I}$	0,35	0,00032	0,70	0,49	64	$P < 0,01$
	$H = 1342 - 800869/I$	93	93730	0,77	0,59	96	$P < 0,01$

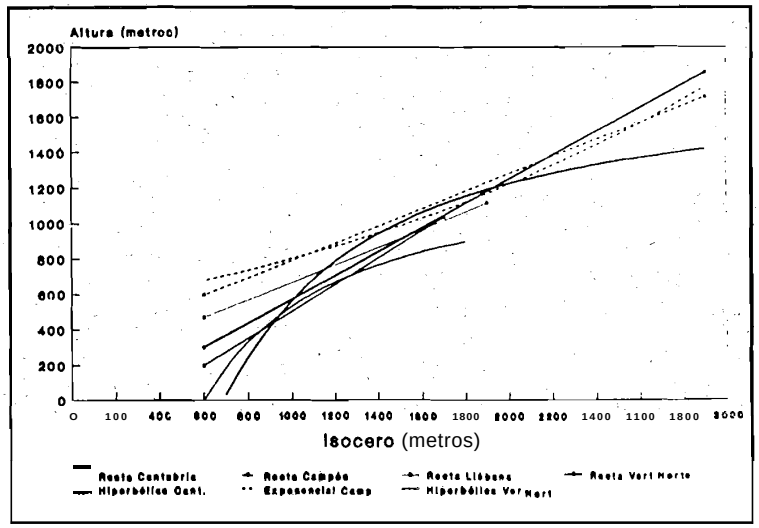

***Figura* 3.-** *Curvas de regresión*

recta de regresión en Liébana, acotándolas según el dominio de definición de I (Ver Figura 3).

En la Figura 3 puede observarse que:

- En Liébana, la correlación entre H e I, en todas las ecuaciones, es muy pequeña, debido a la escasez de estaciones y a la poca uniformidad del dato de altura, pasándose de los 280 m a los 877 m. No se estudiará detenidamente esta región, siendo suficiente una idea general de la relación entre H e I.

- Se comprueba que las rectas de regresión lineal se ajustan menos a la realidad que las curvas exponenciales e hiperbólicas, sobre todo en los valores extremos de la isocero. (Véase, como prueba, que se necesitarían valores muy pequeños de I, inferiores a los 400 m, para obtener nieve en la costa, fenómeno que sucede en la realidad con I alrededor de los 600-700 m).

- En Campóo, la altitud mínima es de 772 m, por lo que las curvas de regresión en dicha región nos dan valores altos, no realistas, de alturas para isoceros pequeñas. Sólo debe tenerse en cuenta la ecuación de regresión para isoceros superiores a los 1.200-1.300 m entendiendo que por debajo de estos valores nieva en todo Campóo, y en alturas inferiores sí lo hace en Liébana o en la vertiente norte.

- La curva hiperbólica para Cantabria se ajusta, con discrepancias inferiores a los 100 m de altura, a la de la vertiente norte para isoceros bajos (I ≤ 1.200 m) y a la de Campóo para isoceros superiores, alejándose a partir de los 2.200-2.300 m. Esto es lógico debido a la presencia de nieve en la vertiente norte para isoceros bajas (I media = 1.103 m) y sólo en Campóo con isoceros altas (I media = 1.454 m). Hay que tener en cuenta que los datos de los días en que sólo nieva en Campóo con isoceros bajas (situaciones frías del E y alguna del N) nos dan un valor alto de altura (superior a los 772 m) mientras que el valor estimado para la regresión es inferior. Parece pues, más lógico tratar por separado la nieve en la vertiente norte y en Campóo, teniendo siempre en cuenta que, cuando nieva en la vertiente norte también lo hace en Campóo.

En las Figuras 4 y 5 se han representado las curvas de regresión para la vertiente norte y Campóo, con un intervalo de confianza dado por los errores estándar de los coeficientes A y B (e_a y $e_,$), así como la distribución real dé los datos de los días de nieve. En la vertiente norte (Figurad), se observa que el 88% de los datos reales están entre las curvas de confianza ±e. Debido a que este intervalo es superior a los 200 m se han elegido también las curvas ±e/2, obteniendo un 60% de los datos reales de dichas curvas. Se observa que la distribución de los datos

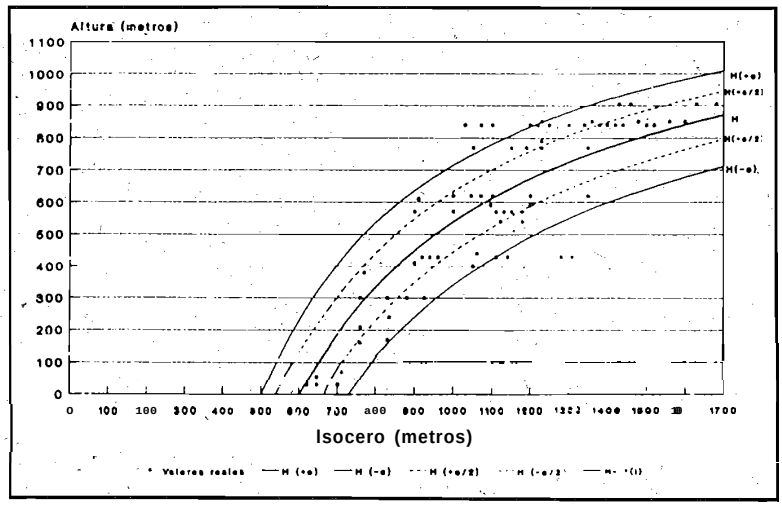

***Figura 4.**- Curvas de regresión vertiente norte*

a ambos lados de la curva de regresión depende del valor de la isocero (tabla III).

Tabla III
Criterios de selección para la vertiente norte

I ≤ 900 m	El 79% de los datos entre H_{-e} y H
900 < I ≤ 1.200 m	El 58% de los datos entre $H_{-e/2}$ y $H_{+e/2}$
I > 1.200 m	El 88% de los datos entre H y H_{+e}

En total, el 72% de los datos están entre las curvas de confianza antes indicadas.

En Campóo (Figura 5), la distribución es más irregular debido a la falta de datos entre 1.020 y 1.650 m. Si sólo tenemos en cuenta los datos entre 772 y 1.020 m se observa que el 70% de los datos están entre $H_{\pm 2e}$.

Podemos ver que, para I < 900 m nieva en todo Campóo, siempre que haya precipitaciones.

Debido a no tener datos entre los 1.020 m y los 1.650 m de altitud, resulta más difícil acotar las curvas de confianza para I > 1.700 m. Viendo la distribución de Brañavieja se observa que, para I ≤ 2,000 m la precipitación es en forma de nieve entre los 2.000 y 2.300 m y de lluvia entre los 2.300 y 2.800 m.

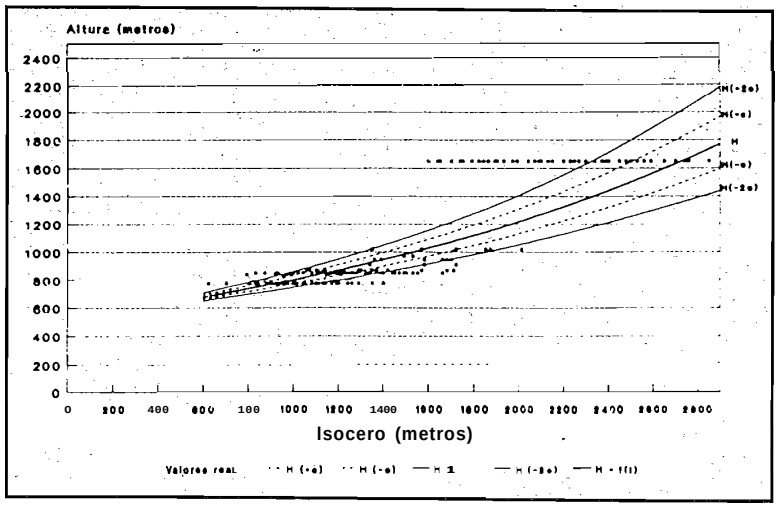

***Figura 5.**- Curvas de regresión Campóo*

Tabla IV
Criterios de selección para Campóo

I ≤ 1.200 m	Nieve en todo Campóo
1.200 < I ≤ 1.700 m	Nieve entre H_{-2e} y H_{-e}
1.700 a I ≤ 2.000 m	Nieve entre H_{-e} y H_{+e}
I > 2.000 m	Nieve entre H y H_{+2e}

Conclusiones.

1. Aplicación a la' predicción.

El verdadero interés de este trabajo es su aplicación a la predicción de la altura mínima a la cual se espera nieve. Dicha predicción se suele dar con un intervalo de confianza de 200 m entendiendo que el límite inferior representa un 10% de probabilidad y el superior un 90%. Obviamente, el primer paso es predecir la presencia de precipitación (predicción rutinaria en cualquier G.P.V.) y después predesir si va a ser en forma de agua o nieve y a qué altura mínima aparecerá la nieve.

Para calcular la altura a partir de la isocero se tiene en cuenta:

- Si se prevé precipitación sólo en una de las regiones, hay que recurrir a las curvas de regresión de dicha región, siguiendo los criterios dados en las tablas III y IV.

En caso de que sólo se espere nieve en Liébana podemos usar sus ecuaciones de regresión, o bien, suponer que su comportamiento es parecido al de la vertiente norte.

- Si se prevé precipitación generalizada en toda Cantabria (o por lo menos en dos regiones) se recurre a combinar las ecuaciones de la vertiente norte y Campóo, obteniendo las curvas de la Figura 6, con sus intervalos de confianza (ver tabla **V)** obtenidos con los criterios expuestos en el apartado 3, modificados sólo para isoceros entre 1.200 y 1.700 m, en que se han tomado como curvas de confianza las curvas de regresión en la vertiente norte y Campóo (sin tener en cuenta los errores de los coeficientes).

Tabla V
Criterios de selección para toda Cantabria

ISOCERO	ALTURA
I ≤ 900 m	Entre L_1 y L_3
900 < I ≤ 1.200 m	Entre L_2 y L,
1.200 < I ≤ 1,700 m	Entre L_3 y C_2
1.700 < I ≤ 2.000 m	Entre C, y C_3
I > 2.000 m	Entre C, y C,

siendo:

$L_1 = H(-e)$ $L_2 = H(-e/2)$ $L_3 = H$ $L_4 = H(+e/2)$
$C_1 = H(-e)$ $C_2 = H$ $C_3 = H(+e)$ $C_4 = H(+2e)$

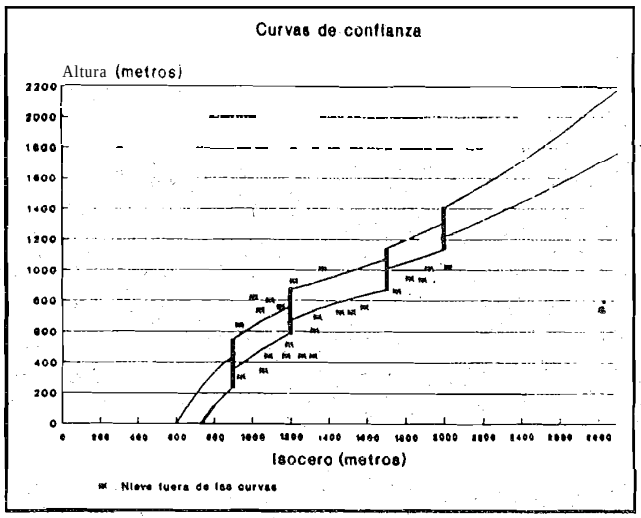

***Figura 6.**- Curvas de regresión para Cantabria*

En la Figura 6 se han representado los días en que la altura mínima de nieve está fuera de las curvas de confianza, siendo **24** de un total de **152** días (16%).

En este sentido hay que tener en cuenta que los días con altura superior a la estimada por las curvas son debidos a la falta de datos de una estación a altitud inferior o a efectos locales. Respecto a los días en que nieva a alturas inferiores a la estimada, éstos corresponden generalmente a flujos del N y del NW después del paso de un frente frío. También hay que tener en cuenta las fluctuaciones de la isocero entre las 0 y las 12Z y el no saber exactamente a qué hora se produce la precipitación de nieve,

Se ha desarrollado un programa (ISOCERO) para la obtención directa de la altitud mínima de nieve. Podemos resumir los datos en la tabla VI (al final de esta página). Estos resultados se irán perfeccionando conforme se introduzcan los datos de futuros episodios de nevadas en Cantabria.

2. Verificación de las predicciones de nieve.

Durante la campaña Previmet-Nevadas 91/92 se ha seguido este método para la predicción de la altura de nieve, usando las isoceros previstas por el CEP, obteniendo en general, muy buenos resultados.

Hubo seis episodios de nevadas en la cornisa cantábrica, emitiéndose los comunicados de alerta correspondientes.

Tabla VI

ISOCERO	ALTURA	ISOCERO	ALTURA
< 600 m	0 m	1.800 m	1.048-1.193 m
700 m	0-198 m	1.900 m	1.089-1.249 m
800 m	120-341 m	2.000 m	1.131-1.307 m
900 m	244-452 m	2.100 m	1.268-1.475 m
1.000 m	448-635 m	2.200 m	1.322-1.549 m
1.100 m	525-704 m	2.300 m	1.378-1.627 m
1.200 m	590-761 m	2.400 m	1.437-1.708 m
1.300 m	726-907 m	2.500 m	1.498-1.794 m
1.400 m	770-946 m	2.600 m	1.562-1.884 m
1.500 m	808-987 m	2.700 m	1.629-1.979 m
1.600 m	841-1.029 m	> 2.700 m	> 1.650 m
1.700 m	871-1.073 m		