

considerablemente grande. Cuando las corrientes ascendentes de aire no pueden mantener flotando los cristales de hielo, entonces se produce la precipitación en forma de nieve.

Los copos de nieve

Los copos de nieve tienen diferentes formas y tamaño, ello depende de la temperatura y humedad de la atmósfera, aunque todos presentan estructuras hexagonales (figura 3.18) debido a la manera en como se agrupan las moléculas de oxígeno e hidrógeno al congelarse el agua.



Figura 3.18 Ejemplos de forma de los copos de nieve

Cuando el agua se congela, las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua (H_2O) son mayores a las térmicas y forman un conjunto rígido con simetría hexagonal, ya que es el estado natural más estable (de menor energía). El crecimiento comienza normalmente con una partícula de polvo la cual absorbe algunas moléculas de agua que forman el núcleo del cristal de hielo. Por lo general, éstos necesitan de una superficie para su formación. El cristal recién formado crece a partir de un diminuto prisma hexagonal. Mientras el cristal se desarrolla, en las esquinas surgen pequeños brazos delgados que, al contacto con el aire, aumentan un poco más. Debido a que las condiciones atmosféricas que rodean al cristal son idénticas a él mismo, entonces los seis brazos llegan aproximadamente al mismo tamaño.

Los pequeños cristales de hielo son transportados a grandes distancias dentro de la nube y su crecimiento y desarrollo dependerán de la temperatura en el ambiente. Al ir encontrando diferencias de temperatura, humedad y viento, los pequeños brazos del cristal empiezan a crecer y a desarrollar pequeñas dendritas. Mientras el copo de nieve es arrastrado por el viento se va encontrando con distintas condiciones de crecimiento y, por ende, va creciendo en una intrincada estructura; esto explica por qué hay tal diversidad de copos de nieve en la naturaleza, lo que justifica la frase “no hay dos copos iguales”.

3.2 PELIGRO POR BAJAS TEMPERATURAS

El ser humano es vulnerable a ciertas temperaturas, tanto por arriba de un umbral, como por debajo de otro. Este documento se ocupa de aquellas temperaturas que están por debajo de un cierto umbral. Por otro lado, es de interés analizar aquellos eventos extremos, es decir, poco frecuentes, que pueden perjudicar, de manera excepcional a la población, y no el evento normal que se presenta

todas las mañanas cuando está a punto de amanecer. Adicionalmente, es un hecho que junto con la presencia de bajas temperaturas debe analizarse su duración, ya que no es lo mismo que se presenten temperaturas por debajo de los cero grados un par de horas al día, que durante varios días de manera continua. Enseguida se describirá el cálculo de peligro por bajas temperaturas, indicando en primer lugar cómo se obtiene la función de peligro y, finalmente, la probabilidad de pasar de una temperatura menor, dado que se conoce la temperatura actual, lo cual será de utilidad si se quisiera elaborar escenarios de ondas de frío para una condición inicial dada.

3.2.1 Temperatura

La variable temperatura se interpretará como aquella de tipo discreto tomada cada hora, por lo que sólo se podrá obtener de observatorios sinópticos o de estaciones automáticas. Se definirá como t_i , donde i es el número de horas en un lapso cualquiera. Un registro típico se observa en la figura 3.19.

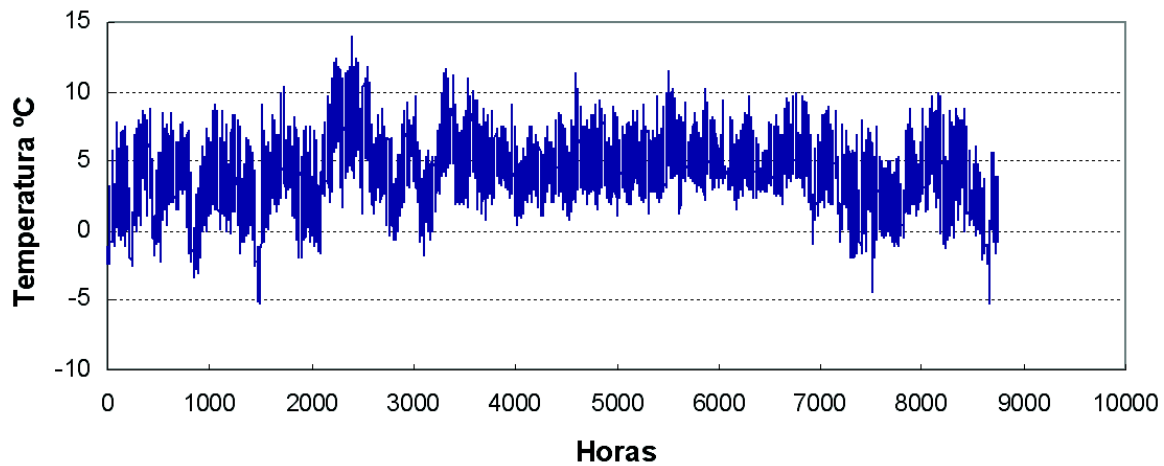


Figura 3.19 Temperatura horaria en el Nevado de Toluca durante el año 2001

3.2.2 Umbral

Un umbral es una magnitud fijada a partir de la cual se produce un efecto determinado. En el caso de bajas temperaturas se puede pensar que existen umbrales de temperatura para los cuales pueden producirse problemas en la salud de las personas; sin embargo, debido a condiciones históricas, o incluso genéticas, ciertos grupos poblacionales son más resistentes a bajas temperaturas que otros. Es por ello que se establecerá un umbral móvil que iniciará desde una temperatura determinada en grados centígrados, ° C, hacia abajo, y se denominará U_j , donde j va de cero a $m-1$, siendo m el número total de umbrales a analizar. Se puede escoger un paso de descenso o intervalo de, por ejemplo, 5° C, de modo que el umbral móvil vaya de 10, 5, 0, -5, -10, etc. (° C). Con base en lo anterior, podemos definir el evento Y , tal, que cumpla con lo siguiente:

$$Y = \{ \text{Cambio del umbral } U_j \text{ al umbral } U_{j+1} \}$$

Asimismo, se definirá como h_j , el número de horas en un periodo cualquiera donde la temperatura fue menor o igual a un umbral j determinado, donde j va de cero a $m-1$ umbrales. Con base en esto, se podrá calcular la probabilidad del evento Y mediante la división de h_{j+1} entre h_j . De

esta forma se puede determinar la probabilidad de que se inicie un evento de baja temperatura en cierto umbral. La forma en que se expresa esta probabilidad es:

$$P(Y) = P_{u=j+1} = \frac{h_{j+1}}{h_j}$$

3.2.3 Duración de un evento de baja temperatura

Se definirá dt_i como la duración, en horas, de un evento en que $t_j \leq U_i$, continuamente, es decir, la temperatura está por debajo de un cierto umbral. En la figura 3.20 se observa un evento en el que, si el umbral es igual a 0°C , entonces de la hora 1446 a la 1547 la temperatura está por debajo de ese umbral, con una duración continua de 101 horas, es decir, ¡un poco más de 4 días! Se observan otros eventos en que la temperatura está por debajo de los 0°C , aunque con duraciones continuas diferentes.

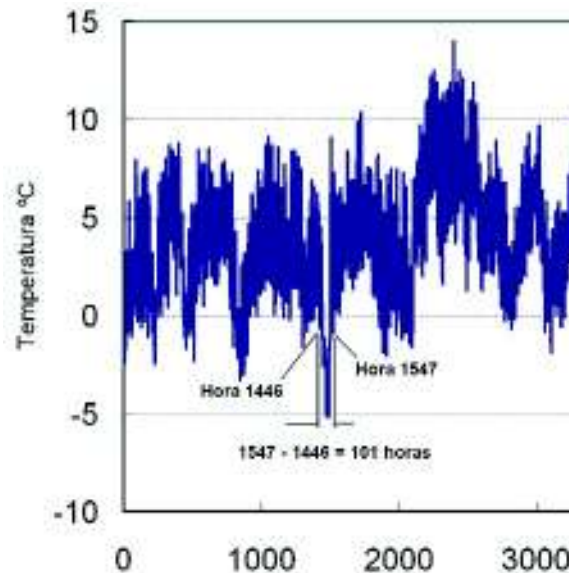


Figura 3.20 Duración de un evento de baja temperatura

3.2.4 Función de peligro por bajas temperaturas

Como se comentó anteriormente, la función de peligro por bajas temperaturas, o más específicamente de una onda de frío, dependerá de dos cosas: la temperatura, descrita por medio del concepto de umbral U_j , y de la duración de la onda dt_i . Entonces, se define un evento X , tal que cumpla con lo siguiente:

$$X = \{\text{ocurrencia de una onda de frío con duración } dt_i\}$$

De esta manera se podrá representar dicha probabilidad como se muestra en la figura 3.21, en donde se observa que la frecuencia de las ondas de frío bajo cierto umbral de temperatura y cierta duración es una superficie cuyo altura, o valor, disminuye a medida que el umbral disminuye, así como si su duración aumenta, es decir, las ondas de frío extremas y de larga duración son más raras que las de temperaturas menos extremas y de menor duración.

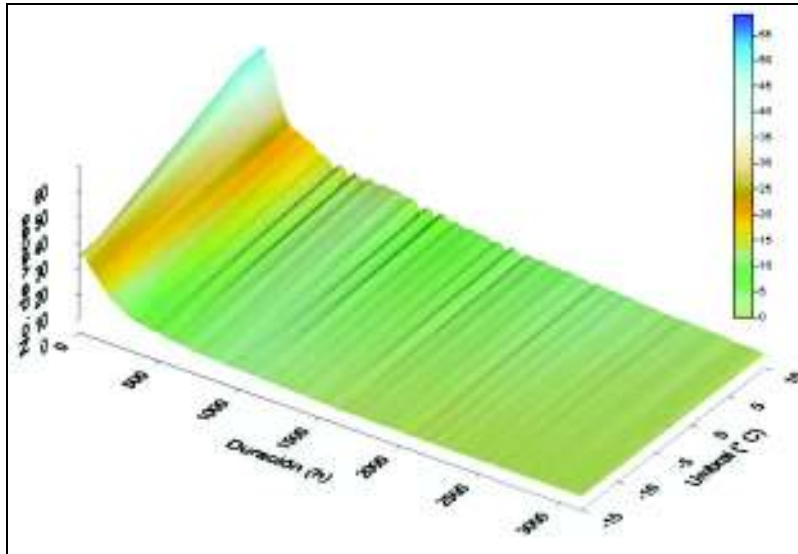


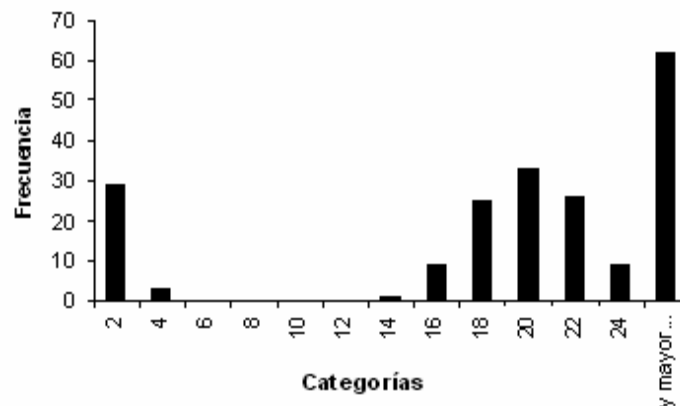
Figura 3.21 Posible función de probabilidad de ondas de frío

Por lo anterior, en este documento se propondrá una manera de obtener esta función de probabilidad para poder estimar entonces el riesgo por bajas temperaturas. Para un caso práctico en el que se tenga información de una estación meteorológica automática, que registre la temperatura a intervalos de una hora, o menores, se propone construir un histograma que registre las frecuencias de ondas de frío para los umbrales seleccionados y con diferentes duraciones. Hay que recordar que un histograma es una representación gráfica de las frecuencias, o veces, que se repite un valor de una cierta variable, para varios intervalos, o categorías, en las que se divide el rango de estos valores, para lo cual es necesario saber las magnitudes mínima y máxima que pueden tomar.

Para este caso la obtención del histograma consiste en contar el número total de ondas de frío para un umbral específico, por categorías de dos horas, es decir, contar cuantas ondas de frío duraron máximo dos, cuatro horas, seis y 24 horas, y una última categoría que tiene todas las ondas de frío de mayor duración a 24, dando un total de 15 categorías. Lo anterior significa mucho trabajo dada la cantidad de información que se puede obtener de una sola estación, por lo que se sugiere automatizar este proceso mediante un programa de cómputo, por ejemplo, una macro de Excel. Un ejemplo de este conteo se ilustra en la tabla 3.2 y en la figura 3.22 para un umbral de 10° C.

Tabla 3.3 Ejemplo de conteo de ondas de frío con umbral 10° C

Categorías (horas)	Frecuencia
2	29
4	3
6	0
8	0
10	0
12	0
14	1
16	9
18	25
20	33
22	26
24	9
y mayor...	62
Total	197

**Figura 3.22 Ejemplo de histograma**

Con base en el conteo de eventos X , es decir, ondas de frío con duración d_{ti} , se obtuvo la probabilidad de que al momento de iniciarse el registro de un cambio de temperatura a un umbral establecido, este evento tenga una duración específica.

Por ejemplo, la probabilidad de que una onda de frío menor o igual a 10° C tenga una duración máxima de dos horas, es el resultado de dividir el total de ondas menores o iguales a 10° C con duración máxima de dos horas, entre el número total de ondas de frío con este umbral para cualquier duración. Este proceso se aplica a los demás umbrales.

Por lo anterior, y de la tabla 3.3, se tiene que:

$$P(X=\{\text{onda de frío con umbral de } 10^{\circ}\text{ C y duración máxima de } 2\text{ h}\}) = 29/197 = 0.147$$

Probabilidad de cambio de un umbral a otro en el Nevado de Toluca

Para finalizar el análisis de peligro, y poder realizar posteriormente el de riesgo, es necesario obtener la función de probabilidad de los cambios entre umbrales de temperatura, es decir, que una onda de frío cambie a otra de frío más intenso. En la tabla 3.4 se observa el número total de horas de ondas de frío donde se registró una temperatura para el umbral j , nuevamente se sugiere automatizar el proceso mediante un programa de cómputo. La probabilidad de que la temperatura baje al umbral 1 dado que estamos en el umbral 0 es $50388/52589 = 0.9581$; la probabilidad de pasar del umbral 1 al umbral 2, es decir, que la temperatura baje mínimo a 5°C , dado que se encontraba entre 10°C y 5°C es de $34437/50388 = 0.6834$, y así sucesivamente. En el caso de exceder la intensidad 5 a una mayor, notamos que la probabilidad es cero, por el hecho de que no ha ocurrido un evento con una intensidad mayor. Asimismo, y para el cálculo de riesgo, se obtiene la función de peligro por umbral de temperatura, dividiendo para cada umbral la diferencia de horas entre el número total de horas; por ejemplo, para un umbral de 10°C se divide $52589 - 50388 = 2201$ entre 52589, lo que da como resultado 0.0419 y, para un umbral de 5°C se divide $50388 - 34437 = 15951$ entre 52589, y resulta 0.3033.

Tabla 3.4 Probabilidad de cambio de umbral y función de peligro por umbral de temperatura

Umbral j	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Hrs. Totales h_j	Probabilidad de cambio de umbral $P(Y)$	Función de peligro por umbral de temperatura
0	Todas	52589	0.9581	
1	10°	50388	0.6834	0.0419
2	5°	34437	0.0934	0.3033
3	0°	3216	0.0177	0.5937
4	-5°	57	0.0702	0.0601
5	-10°	4	0.0000	0.0010
				1

3.2.5 Mapeo de las zonas de peligro por bajas temperaturas

En las figuras 3.1 y 3.2 se observa una relación muy estrecha entre la elevación del terreno y la presencia de bajas temperaturas. De esta manera, se puede suponer que una estación meteorológica que esté a una altura determinada puede proporcionar información útil para valorar el peligro por bajas temperaturas en cierto entorno. Como se observa en el ejemplo siguiente se tiene una zona donde existe una elevación en el terreno y tres estaciones que miden temperatura ubicadas a diferentes elevaciones. Con base en los datos obtenidos por dichas estaciones es factible suponer que hay “franjas de influencia” que rodean a la montaña.



Figura 3.23 Mapeo de zonas de peligro

3.2.6 Función de peligro por la presencia de nevadas

Una función de peligro permite conocer la probabilidad de presentación de nevadas en una zona dada, donde la precisión de los resultados dependerá de la calidad y la cantidad de datos que se tengan para el área de estudio. Así mismo, se recomienda contar con un sistema de información geográfica (SIG) para facilitar la visualización y el manejo de los datos tanto geográficos, como los que se refieren a las estaciones que registraron nevadas.

Para definir la función de peligro es deseable contar con información de espesores de nieve, pero a falta de dicha información se analizarán las nevadas con base en el único parámetro que se maneja en el país: el número de días con nevada.

Planteamiento general de la metodología

La metodología se puede resumir en los siguientes pasos:

- a. Selección de la zona de estudio
- b. Recolección de datos de nevadas
- c. Revisión y análisis de los datos
- d. Análisis estadístico

Selección de la zona de estudio

Las nevadas ocurren en elevaciones aproximadamente por arriba de los 2,000 msnm, por lo que se entiende que la metodología se aplicará en regiones montañosas o en sus faldas; de tal