

Capítulo 2

Temperatura

- 2.1 Temperatura y calor
- 2.2 Radiación solar
- 2.3 Variaciones de temperatura
- 2.4 Inversión térmica
- 2.5 Escalas de temperatura

2.1 Temperatura y calor

Enuncia la primera ley de la termodinámica que la *energía no se pierde ni se destruye; se transforma*. Sin embargo, un cuerpo con energía térmica puede interactuar con su alrededor y, por supuesto, causar un intercambio de energía, siempre de mayor a menor temperatura. Este intercambio de energía es conocido como calor cuando el origen de la transferencia es una diferencia de temperatura; en caso contrario se considera trabajo.

Según su número, tamaño y estado, las moléculas de un cuerpo vibran y poseen energía cinética. La temperatura es la medida de la energía interna del cuerpo y, por lo tanto, equiparable al promedio de la energía cinética de las moléculas.

La energía o calor de un cuerpo puede ser expresada en calorías (cal) o en Joules (J). Una caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar en 1 °C la temperatura de 1 gramo de agua, mientras que el Joule se define como la cantidad de trabajo realizado por una fuerza constante de 1 Newton (N) en 1 m. La incomodidad para realizar medidas en calorías hizo más práctico introducir el término temperatura, la cual es un indicativo de la cantidad de calor de un cuerpo.

2.2 Radiación solar

La radiación electromagnética es una forma de energía emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor del cero absoluto (0 °K). Cada componente del sistema Tierra-atmósfera emite radiación en todo momento y en todas direcciones. También la emite el Sol y constituye la principal fuente de energía utilizada en todos los procesos en los que interactúan Tierra y Atmósfera, y está compuesta principalmente por radiación visible, infrarroja y ultravioleta, las cuales se desplazan a la velocidad de la luz (300 000 000 m/s).

2.2.1 División de la radiación según la longitud de onda

La Tierra y el Sol emiten radiación en forma de ondas electromagnéticas las cuales son definidas a través de su longitud y frecuencia. La *longitud de onda* (λ) es la distancia que recorre una onda completa antes de que su forma se repita, puede ser medida en metros (m) hasta micrómetros o micras (μm). Un micrómetro es igual a 10^{-6} metros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$).

Se conoce como *Periodo* (T) al tiempo en segundos requerido para completar una λ . Se denomina *frecuencia* (f) al número de veces que se repite λ en 1 segundo, se mide en hercios (Hz) y es inversamente proporcional a la longitud de onda.



La figura 7 muestra la relación entre longitud de onda, periodo y frecuencia, en este ejemplo $f = 3 \lambda/s$, o lo que es igual, $f = 3 \text{ Hz}$.

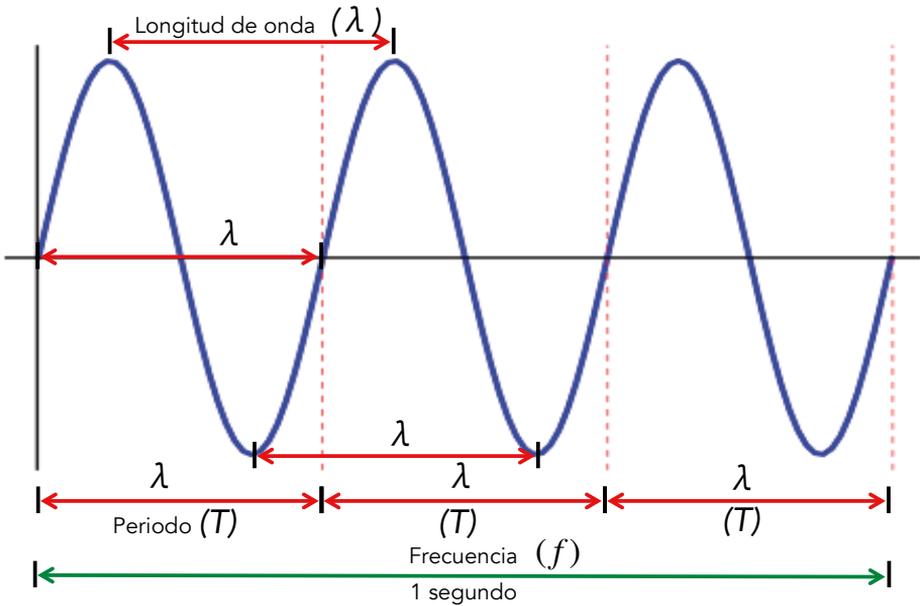


Figura 7. Longitud de onda.
Fuente: elaboración propia.

La radiación de onda menor a $3 \mu\text{m}$ se denomina *radiación solar* o *radiación de onda corta*. La radiación de onda mayor a $3 \mu\text{m}$ se denomina *radiación terrestre* o *radiación de onda larga*, de acuerdo con la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de onda corta y larga.

Tipo de radiación	Longitud de onda
Radiación solar o radiación de onda corta	$< 3,0 \mu\text{m}$ 0,01 – 0,4 μm 0,4 – 0,75 μm 0,75 – 3,0 μm
Ultravioleta	
Visible	
Infrarrojo cercano	
Radiación terrestre, infrarroja o radiación de onda larga	$> 3,0 \mu\text{m}$

Fuente: elaboración propia.

Radiación ultravioleta. Comprendida entre $0,01$ y $0,4 \mu\text{m}$, es invisible y no produce calor, pero causa fuertes daños a la piel. Este tipo de radiación es más intensa en zonas de mayor altitud donde la densidad del aire es menor y la atmósfera absorbe una menor cantidad de radiación.

Radiación visible. Ubicada en longitudes de $0,4$ a $0,75 \mu\text{m}$. Es la única visible por el ojo humano, pero no puede sentirse. Es una mezcla del color rojo ($0,75 \mu\text{m}$), anaranjado ($0,6 \mu\text{m}$), amarillo ($0,57 \mu\text{m}$), verde ($0,52 \mu\text{m}$), azul ($0,47 \mu\text{m}$) y violeta ($0,4 \mu\text{m}$).

Radiación infrarroja. Ubicada entre longitudes de $0,75$ y $120 \mu\text{m}$. Es invisible, pero se siente en forma de calor. Es la principal responsable del calentamiento de la atmósfera.



En realidad, el espectro electromagnético contiene todas las posibles longitudes y frecuencias de ondas, además de los tres rangos indicados, como se muestra en la figura 8.

42

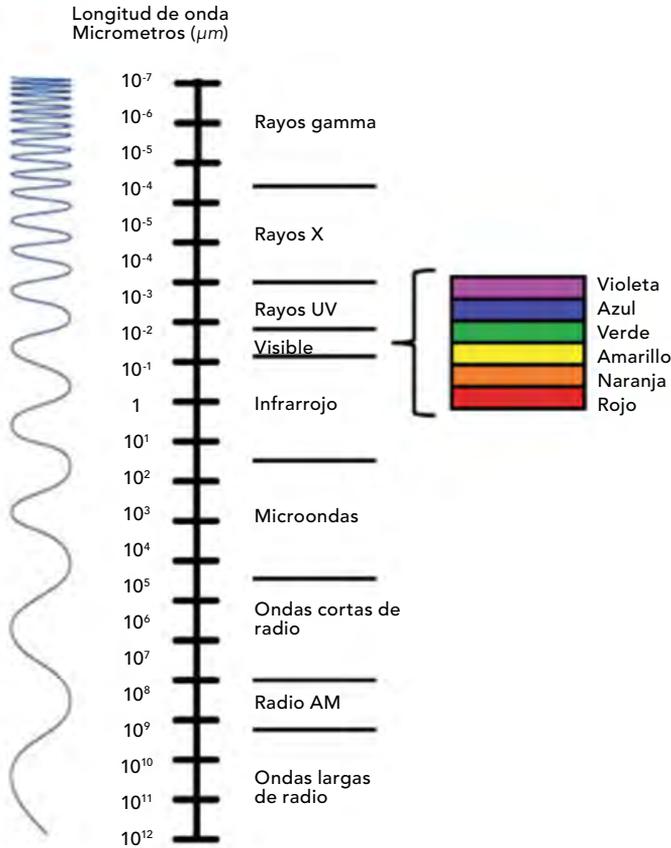


Figura 8. Espectro electromagnético.

Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Efectos de la atmósfera sobre la radiación solar

La energía solar que llega a la Tierra es tradicionalmente cuantificada en términos de la constante solar. Ésta es la radiación solar recibida en ausencia de la atmósfera, a la distancia media Tierra-Sol ($1\,496 \times 1\,011$ m), en promedio sobre una superficie plana orientada perpendicularmente a los rayos solares.

Según la WMO (1982), la Tierra recibe en el límite superior de su atmósfera una cantidad de radiación solar promedio de $1\,367$ W/m², valor que se denomina constante solar. Este valor varía de acuerdo a la distancia Tierra-Sol en perihelio y en afelio, manchas solares e inclinación del eje de rotación de la Tierra, entre otros (Tejada, 2015). A pesar de recibir $1\,367$ W/m², no toda la superficie de la Tierra está expuesta al Sol y el ángulo de incidencia varía, situación que implica una *constante solar media* de 1/4 de la radiación solar entrante, es decir 341 W/m² aproximadamente.



Debido al efecto de la atmósfera sobre la radiación, sólo una parte alcanza la superficie de la Tierra. Dos causas alteran fuertemente la radiación solar en su paso a través de la atmósfera: la reflexión y la absorción. Trenberth et al (2009) explican la influencia de estos factores si se considera como 100 % la radiación que llega al tope de la atmósfera:

- La **reflexión** causa que un 29 % de la radiación sea devuelta al espacio. De ese porcentaje, un 7% es radiación reflejada por la superficie de la Tierra y un 22 % por las nubes y las capas de la atmósfera.
- Por medio de la **absorción**, se distribuye el 71 % restante. Mientras el 23 % es absorbido por la atmósfera, el otro 48 % es absorbido por la superficie de la Tierra, que al calentarse irradia a la atmósfera radiación de onda larga, la cual permite el calentamiento atmosférico.

43

2.2.3 Efecto selectivo de la atmósfera

El comportamiento selectivo consiste en que la atmósfera deja pasar fácilmente las radiaciones de onda corta, provenientes del Sol, mientras que absorbe y dificulta el paso de las radiaciones de longitud de onda larga, irradiadas por la Tierra (figura 9).

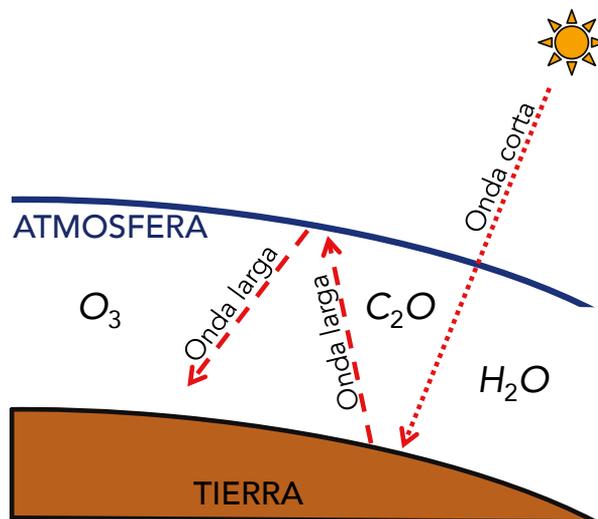


Figura 9. Efecto selectivo de la atmósfera.

Fuente: elaboración propia.

Debido a que la radiación entrante emitida por el Sol es de onda corta, la atmósfera la retiene en menor cantidad y permite que la mayor parte de la radiación llegue hasta la superficie de la Tierra, donde los rayos solares son absorbidos causando calentamiento. Una vez que la Tierra se ha calentado, irradia su calor en longitudes de onda larga (rayos infrarrojos), que pueden ser retenidos por el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases presentes en la atmósfera y causantes del efecto de invernadero. Por consiguiente, el Sol no calienta directamente a la atmósfera, sino que lo hace por intermedio de la Tierra.

El efecto de invernadero es un efecto natural y beneficioso que mantiene una temperatura media de 15 °C en la Tierra; de no ser así, la temperatura sería demasiado baja para



mantener la vida en la Tierra. El peligro del efecto invernadero es que se intensifique por la presencia de contaminantes atmosféricos, productos de la combustión en fábricas, automóviles, etc. Estos contaminantes también absorben la radiación de onda larga, irradiada por la Tierra, lo que produce un incremento de la temperatura media en el planeta; es decir, un sobrecalentamiento artificial de la atmósfera.

2.3 Variaciones de temperatura

La cantidad de energía solar recibida en cualquier región del planeta varía por diferentes factores, entre ellos la hora del día, la latitud, estación del año, distribución de distintos tipos de superficies y en función de la elevación.

2.3.1 Variación diurna

Se define como el cambio de temperatura entre el día y la noche, producido por el movimiento de rotación⁵ de la Tierra

En Colombia, debido a su ubicación tropical, la temperatura es poco influenciada por las masas de aire de latitudes medias y sus fluctuaciones dependen fundamentalmente del ciclo diurno (calentamiento por efecto del Sol). La figura 10 muestra la variación horaria de temperatura que presentó el aeródromo de Palanquero (SKPQ) el 20 de agosto de 2015.

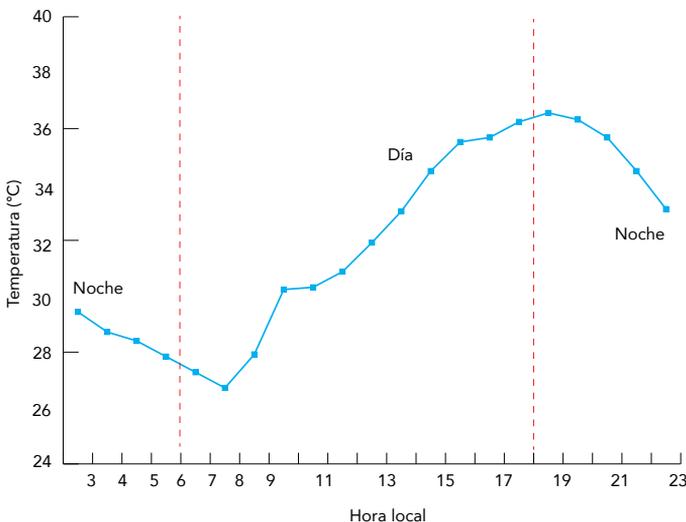


Figura 10. Variación horaria de la temperatura en SKPQ el 20/AGO/15.

Fuente: elaboración propia.

⁵ La rotación terrestre es el movimiento giratorio del planeta Tierra sobre su propio eje. El movimiento se realiza hacia el este en ciclos de 24 horas.



2.3.2 Variación de la temperatura con la latitud

Debido a que el ángulo de incidencia de los rayos solares varía con la latitud geográfica (figura 11), las zonas que más podrían calentarse son las comprendidas entre el trópico de cáncer y el trópico de capricornio, las cuales están expuestas a un ángulo de incidencia de 90° . Esta distribución natural de la temperatura sobre la esfera terrestre produce diferencias de temperatura en todo el planeta. Las zonas polares son alcanzadas oblicuamente por los rayos solares, de tal manera que el polo expuesto al Sol tiene un calentamiento leve y el otro polo queda en total oscuridad por 6 meses.

45

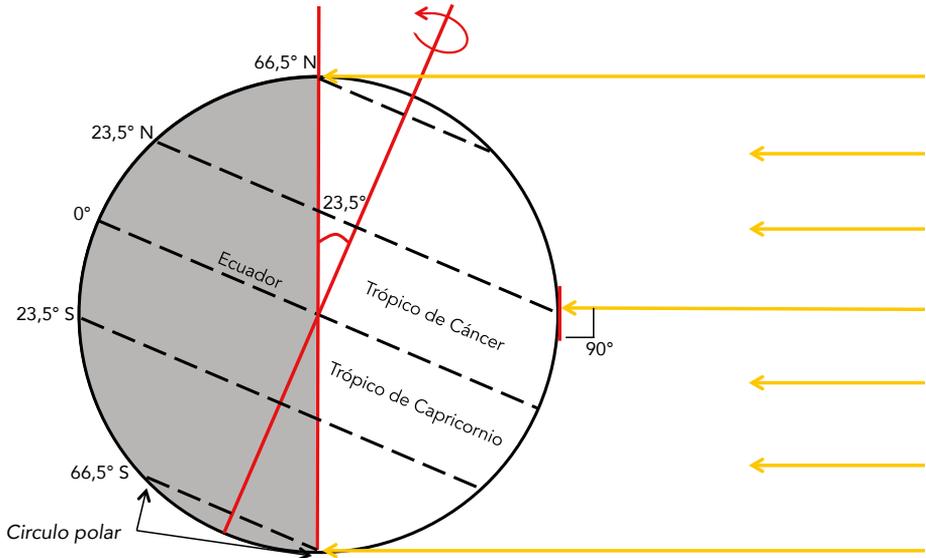


Figura 11. Variación latitudinal de la temperatura.

Fuente: elaboración propia.

2.3.3 Variación estacional

La temperatura de la Tierra varía según las estaciones del año (figura 12): verano, otoño, invierno y primavera. Las estaciones son causadas por el ángulo de inclinación de la Tierra ($23,5^\circ$), el cual impide la distribución homogénea de los rayos solares, evitando la incidencia de los mismos en alguna de las zonas polares según la época del año. Aun cuando la Tierra realiza su movimiento de rotación y traslación, durante seis meses el Sol no logra calentar la superficie de alguno de los polos. Países como Colombia –ubicados en la línea ecuatorial– no poseen estaciones; sus días y sus noches son de 12 horas casi exactas, y en ellos oscurece con regularidad a las 18:00 horas y amanece a las 06:00 horas. Países en zonas extratropicales experimentan diferentes horas de luz según la estación del año.

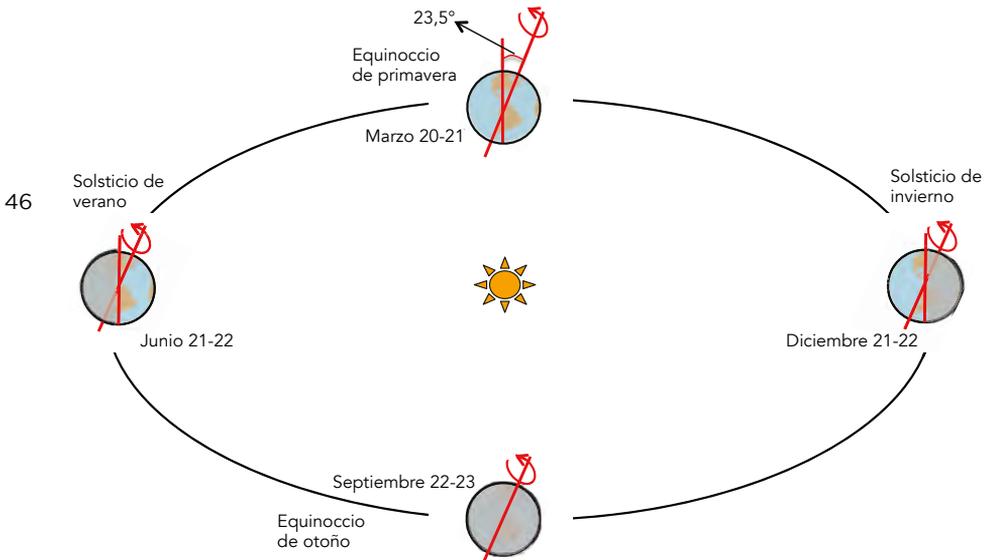


Figura 12. Estaciones del año.

Fuente: elaboración propia.

2.3.4 Variaciones con los tipos de superficie

Influye directamente en la temperatura debido a varios factores:

- En la Tierra existen diferentes tipos de suelos definidos por sus características físicas (estructura, densidad, temperatura), químicas (cantidad de nutrientes, acidez), textura, y uso de suelo, entre otros. Stull (2016) presenta un albedo⁶ típico relacionado con estas características (figura 13), en donde superficies con albedo alto como la nieve reflejan la mayor parte de la energía electromagnética que reciben, a diferencia del agua y los bosques con el albedo más bajo; por lo tanto, tienden a absorber la energía electromagnética que reciben.
- La temperatura de la tierra tiene diferencias de amplitud mucho más altas que las presentes en el agua.
- La tierra se calienta y se enfría mucho más rápido que el agua.
- La distribución de continentes y océanos en el hemisferio norte o sur.

6 Albedo es la capacidad que tiene una superficie para reflejar la radiación electromagnética.



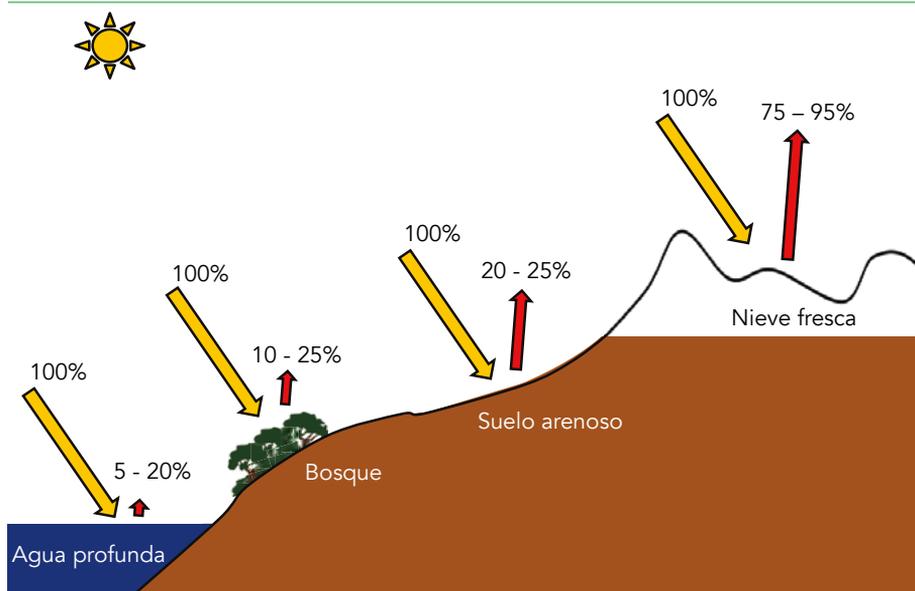


Figura 13. Tipos de superficie y albedo.
Fuente: elaboración propia.

2.3.5 Variaciones con la altura

En la primera capa de la atmósfera (troposfera), la temperatura normalmente decrece con la altura. Esta disminución se conoce como *gradiente vertical de temperatura*, y se define como un cociente entre la variación de la temperatura y la variación de altura, entre dos niveles. En la troposfera el gradiente vertical de temperatura medio es de $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ o de $2\text{ }^{\circ}\text{C}/1\text{ 000 ft}$, y es el utilizado para calcular rápidamente la variación de la temperatura respecto a la altura. Sin embargo, no debe olvidarse que existen en la atmósfera dos tipos de gradientes: el gradiente adiabático⁷ seco y el húmedo.

El gradiente adiabático seco se utiliza para calcular la disminución de la temperatura respecto a la altura cuando la parcela de aire aún no ha alcanzado la saturación y por lo tanto la humedad relativa es menor al 100 %, el valor de este gradiente se aproxima a $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ y es relativamente constante, es decir, no depende de la temperatura ni de la presión. El gradiente adiabático húmedo es en promedio de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ —mucho menor que el gradiente seco—, porque al condensarse el agua se libera calor latente evitando que la temperatura disminuya rápidamente; este gradiente puede variar en función de la temperatura y la presión (figura 14).

Por sus condiciones tropicales y alto contenido de humedad, en Colombia el gradiente vertical de la temperatura oscila desde $0,46\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la región del Pacífico, hasta $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la región Andina cada vez que se ascienden 100 metros de altura (Eslava, 1994). Para todo Colombia y a diferencia del gradiente medio de $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ usado típicamente en Colombia, Eslava (1992b) concluyó que un gradiente promedio más adecuado sería $0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Sin embargo, a menudo se registra un aumento de temperatura con la altura en la troposfera denominado *inversión de temperatura* o *inversión térmica*.

⁷ Se considera un proceso adiabático cuando se asume que la parcela de aire en ascenso o descenso no intercambia calor con su entorno.

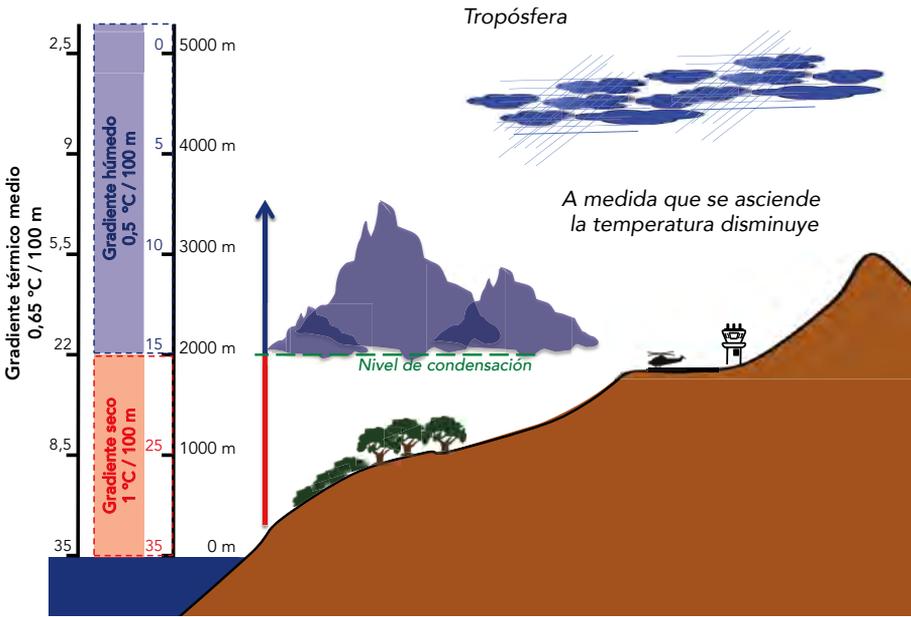


Figura 14. Disminución de la temperatura con la altura.

Fuente: elaboración propia.

2.4 Inversión térmica

Se conoce como inversión térmica al fenómeno por el cual la temperatura aumenta con la altura y no sigue su comportamiento normal en la tropósfera (disminuir con la altura). Una inversión de temperatura se puede desarrollar en las capas de aire que están en contacto con la superficie terrestre, durante noches despejadas y frías, y en condiciones de calma o de vientos muy suaves. También puede presentarse en altura como consecuencia del descenso, compresión, y por lo tanto, calentamiento de una capa de aire asociada a un anticiclón⁸ (figura 15). Superada esta capa de inversión térmica, la temperatura comienza a disminuir nuevamente con la altura, restableciéndose las condiciones normales en la tropósfera.

Una inversión térmica puede detectarse por métodos de medición sofisticados –como radiosondeos– o de forma visual cuando se observa smog⁹ en las ciudades.

⁸ Sistema de alta presión asociado al buen tiempo.

⁹ Partículas contaminantes suspendidas en el aire sin posibilidad de ascenso.



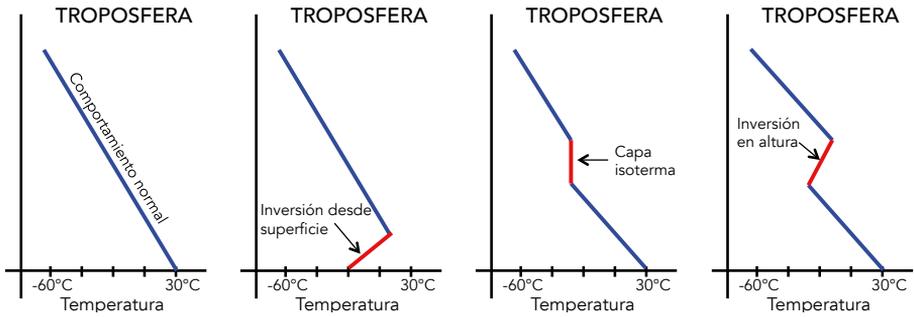


Figura 15. Tipos de inversión térmica.
Fuente: elaboración propia.

La inversión térmica es especialmente peligrosa para los pilotos que sobrepasan u operan muy cerca a los límites operacionales de sus aeronaves. En un caso de ejemplo: un piloto de UH-1H está haciendo relevos de soldados desde la base militar de CACOM-4 (Melgar, Tolima) hasta el cerro la María, son las 08:00 horas y desea hacer el cálculo de cuanto peso estaría en capacidad de transportar, para esto debe conocer:

a. Peso de su aeronave:

- **Peso básico:** el peso básico de una aeronave es el peso que incluye todos los sistemas hidráulicos y sistemas de aceite llenos, el combustible atrapado e inservible y todo el equipo fijo. El peso básico varía con las modificaciones estructurales y cambios al equipo fijo de la aeronave.
- **Peso de operación:** el peso de operación incluye el peso básico más la tripulación, el equipaje de la tripulación, equipo de emergencia u otro equipo que pueda ser requerido.
- **Peso bruto o peso al despegue:** el peso bruto es el peso de operación más el peso del combustible, munición, carga o tanques externos de combustible auxiliar.

Los pesos usuales para la operación del Huey UH-1H pueden resumirse a manera de ejemplo en la tabla 4.

Tabla 4. Discriminación de los diferentes tipo de peso en una configuración operacional típica para un helicóptero Huey UH-1H.

Peso básico	7 000 lb
Piloto	+ 170 lb
Copiloto	+ 170 lb
Técnico de vuelo	+ 170 lb
Kit supervivencia	+ 90 lb
Peso de operación	7 600 lb
Combustible	+ 1 200 lb
Carga	+ 1 450 lb
Peso bruto	10 250 lb

Fuente: elaboración propia.



b. Elevación del terreno:

Elevación de Melgar: 1 000 ft.
 Elevación cerro La María: 5 000 ft.

c. Peso máximo autorizado al despegue:

50

El peso máximo autorizado al despegue se rige por la tabla de rendimiento de cada aeronave y depende únicamente de dos factores, la elevación del terreno –que no varía– y la temperatura, que es fácilmente medible en cualquier aeródromo. El problema podría presentarse especialmente en helicópteros, los cuales operan en sitios donde no se cuenta con toda la instrumentación.

Si el piloto no cuenta con un instrumento para medir la temperatura en el cerro la María y hace un cálculo rápido basado en una temperatura de 28 °C en la Base Aérea de Melgar, podría pensar que la temperatura en La María es de 20 °C, 8 °C menos como consecuencia de los 4 000 ft de diferencia entre las dos elevaciones y un gradiente de 2 °C cada 1 000 ft. Sin embargo, en ese momento la temperatura real en el cerro podría alcanzar los 30 °C, temperatura mayor que la registrada en Melgar como consecuencia de una inversión térmica. Este nuevo panorama modifica el peso máximo al despegue, tal como se muestra en la figura 16.

Si la temperatura fuera de 20 °C, el piloto podría despegar con un máximo de 10300 lb, así que podría aceptar un peso al despegue de 10 250 lb (operando muy cerca a los límites), pero si en ese momento, la temperatura real fuera de 30 °C, sólo podría despegar con 9 540 lb. Si decide despegar con 10 250 lb, podría causar un accidente aéreo debido a que estaría por encima de sus límites operacionales.

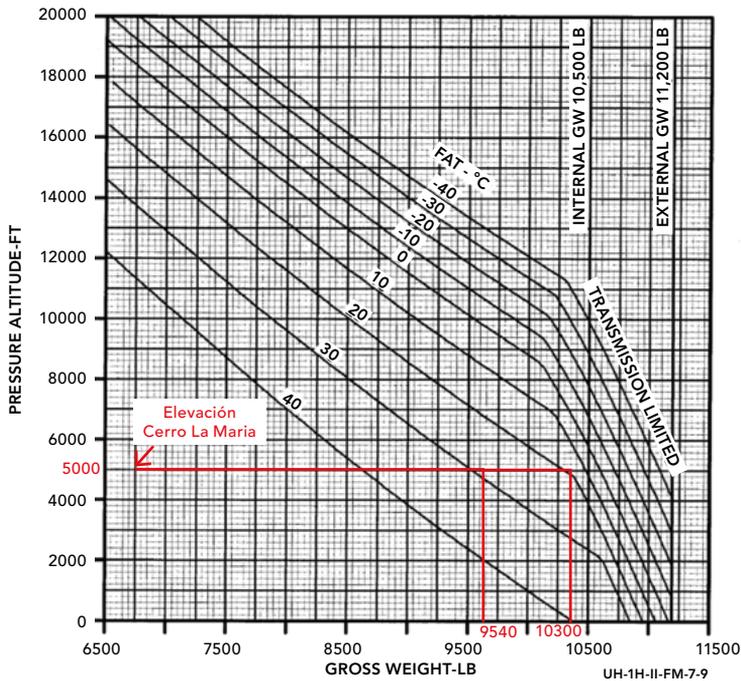


Figura 16. Peso máximo al despegue sin efecto tierra.

Fuente: Tomado del manual de vuelo del UH-1H.



La temperatura se mide en las inmediaciones de la pista. En un día muy caluroso y en calma, pueden encontrarse diferencias de temperaturas entre diferentes sectores del aeródromo; cuando hay viento, las diferencias de temperatura en el entorno de la pista son mínimas. La temperatura es tan importante para la operación de aeronaves de ala rotatoria en entornos de alta dificultad como los cerros y pináculos, que muchas veces su operación se ve restringida por la hora del día en que la temperatura es muy alta, toda vez que afecta significativamente la densidad y aumenta la intensidad de viento.

Al utilizar la ecuación de estado se puede identificar que la temperatura influye en la densidad del aire de forma inversamente proporcional: a menor temperatura, mayor densidad del aire, tal como sucede en la tropósfera, donde a medida que la aeronave gana altura, la temperatura disminuye. El problema que se presenta en las inversiones térmicas es que a medida que la aeronave gana altura, la temperatura aumenta y la densidad disminuye, causando problemas de sustentación para la aeronave, ya que está sobrevolando un entorno fuera de las condiciones estándar.

Ecuación de Estado

$$PV = nRT$$

Donde:

$$PV = \frac{nRT}{V}$$

P = Presión

$$PV = \rho RT$$

V = Volumen

$$\frac{P}{RT} = \rho$$

n = Numero moles (masa)

ρ = Densidad

T = Temperatura

R = Constante de los gases

2.5 Escalas de temperatura

En temperatura, se usan las escalas Celsius, Fahrenheit y Kelvin (figura 17), siendo esta última usada sobre todo en experimentos científicos. La escala Celsius fue inventada en 1742 por Anders Celsius, quien declaró que el punto de congelación del agua se alcanza a los 0 grados centígrados y el punto de ebullición se logra cuando la temperatura llega a 100 grados centígrados, invirtiendo de esta forma la "Escala Centígrada" que había sido ideada por Carlos Linneo unos años antes. Linneo propuso que el punto de congelación del agua se presentara a 100 grados centígrados y que su punto de ebullición ocurriera a 0 grados centígrados. En el año de 1948, el término *grados centígrados* fue reemplazado definitivamente por *grados Celsius* (°C).



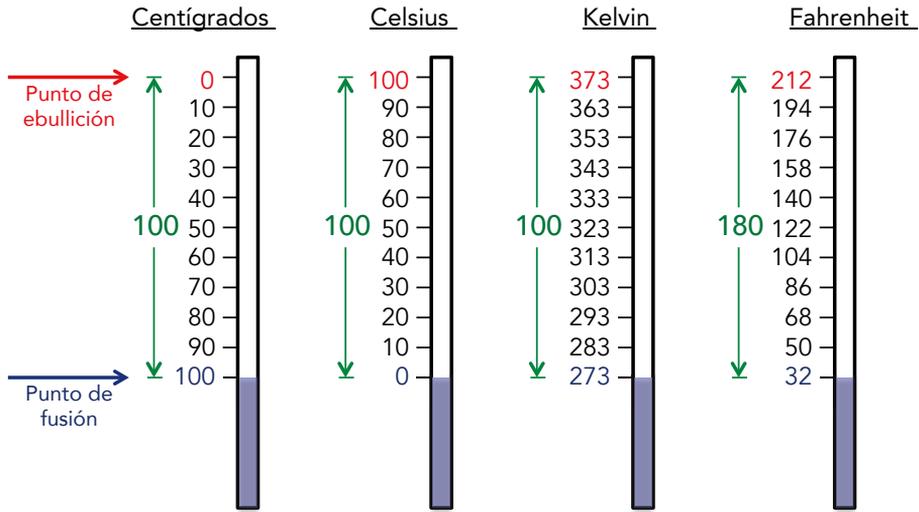


Figura 17. Escalas de temperatura.
Fuente: elaboración propia.

2.5.1 Conversión de valores de temperaturas

Teniendo en cuenta que en Colombia se utilizan los grados Celsius, para convertir grados Kelvin a Celsius –que conservan los mismos 100 grados de diferencia entre el punto de fusión y el punto de ebullición–, sólo es necesario igualar los puntos de fusión ($K - 273$). La conversión de Fahrenheit a Celsius requiere igualar los puntos de fusión ($F - 32$) y multiplicarlo por el cociente de sus diferencias de amplitud entre el punto de fusión y ebullición ($100/180$). De esta manera se pueden inferir las fórmulas de conversión resumidas en la tabla 5.

Tabla 5. Fórmulas de conversión de la temperatura.

De Kelvin a Celsius	$C = K - 273$
De Fahrenheit a Celsius	$C = 100/180 (F - 32) = 5/9 (F - 32)$
De Celsius a Fahrenheit	$F = 180/100 (C + 32) = 9/5 (C + 32)$

Fuente: elaboración propia.

