

Lección 4

Circulación vertical y estabilidad atmosférica

En esta lección se describe la estructura vertical de la atmósfera, la estabilidad atmosférica y su correspondiente circulación vertical. Para facilitar la explicación de las condiciones atmosféricas que afectan la dispersión de los contaminantes del aire, se introducen diagramas adiabáticos.

Meta

Familiarizar al lector con la estructura vertical de la temperatura atmosférica y su relación con la dispersión de las plumas.

Objetivos

Al concluir esta lección, estará capacitado para:

1. Explicar el concepto de flotabilidad.
2. Definir el *gradiente vertical* de la temperatura y distinguir entre gradientes verticales adiabáticos secos, adiabáticos húmedos y ambientales.
3. Describir las condiciones estables, inestables y neutrales.
4. Identificar la categoría de estabilidad atmosférica representada en un diagrama adiabático.
5. Describir cómo influyen la estabilidad atmosférica y las inversiones en la dispersión de los contaminantes del aire.
6. Describir cómo se forman los cuatro tipos de inversiones.
7. Enumerar cinco tipos de plumas según su comportamiento y relacionarlos con las condiciones atmosféricas.

Introducción

En la lección anterior se revisó la circulación horizontal de la atmósfera. La circulación vertical es igualmente importante en la meteorología de la contaminación atmosférica ya que el grado en que se produce permite determinar la cantidad de aire disponible para la dispersión de los contaminantes. La circulación vertical se puede atribuir a sistemas de presión alta y baja, a la elevación del aire sobre terrenos o frentes y a la convección. Para comprender los mecanismos y las condiciones de la circulación vertical, es necesario conocer algunos de sus principios básicos. Por lo tanto, antes de abordar la inestabilidad, la estabilidad y el comportamiento de la pluma, presentaremos estos principios. También discutiremos la inversión, fenómeno en el que la temperatura del aire aumenta con la altura.

Principios relacionados con la circulación vertical

Porción de aire

A lo largo de la lección, se tratará el concepto de *porción de aire*. Esta porción, teóricamente infinitesimal, es un cuerpo nítido de aire (un número constante de moléculas) que actúa como un todo. Pero al ser independiente, no se mezcla fácilmente con el aire circundante. El intercambio de calor entre la porción de aire y sus alrededores es mínimo y su temperatura, generalmente uniforme. Una porción de aire es análoga al aire contenido en un globo.

Factores de flotabilidad

La temperatura y la presión atmosférica influyen en la flotabilidad de las porciones de aire. Mientras otras condiciones permanecen constantes, la temperatura del aire (un fluido) se eleva a medida que la presión atmosférica aumenta y decrece a medida que esta disminuye. En lo que respecta a la atmósfera, en la cual la presión del aire decrece con una altitud mayor, la temperatura normal de la troposfera disminuye con la altura.

Una porción de aire que se vuelve más cálida que el aire circundante (por la irradiación de calor de la superficie terrestre, por ejemplo), comienza a expandirse y enfriarse ya que la temperatura de la porción es mayor que el aire circundante, es también menos densa. Esto hace que la porción se eleve o flote. Al elevarse, también se expande, con lo cual disminuye su presión y, por lo tanto, también su temperatura. El enfriamiento inicial de una porción de aire produce el efecto contrario. Es decir, mientras que el aire cálido se eleva y enfría, el aire frío desciende y se calienta.

El grado en el que una porción de aire se eleva o desciende depende de la relación

existente entre su temperatura y la del aire circundante. Mientras más alta sea la temperatura de la porción de aire, esta se elevará, mientras más fría, descenderá. Cuando la temperatura de la porción de aire y la del aire circundante son iguales, la porción no se elevará ni descenderá a menos que sea bajo la influencia del flujo del viento.

Gradiente vertical de temperatura

El **gradiente vertical** de temperatura se define como el gradiente en el que la temperatura del aire cambia con la altura. El verdadero gradiente vertical de temperatura de la atmósfera es aproximadamente de 6 a 7 °C por km (en la troposfera) pero varía mucho según el lugar y la hora del día. Una *disminución* de temperatura con la altura se define como un gradiente vertical negativo y un *aumento* de temperatura con la altura como uno positivo.

El comportamiento de la atmósfera cuando el aire se desplaza verticalmente depende de la estabilidad atmosférica. Una atmósfera estable resiste la circulación vertical; el aire que se desplaza verticalmente en ella tiende a regresar a su posición inicial. Esta característica de la atmósfera le confiere la capacidad de dispersar los contaminantes emitidos al aire. Para comprender la estabilidad atmosférica y su importancia en la dispersión de la contaminación, es fundamental al entender los mecanismos de la atmósfera porque están relacionados con la circulación atmosférica vertical.

Gradiente adiabático seco

Una porción de aire en su mayor parte no intercambia calor traspasando sus fronteras. Por consiguiente, una porción de aire más cálida que el aire circundante no transfiere calor a la atmósfera. Cualquier cambio de temperatura producido en la porción de aire se debe a aumentos o disminuciones de la actividad molecular interna. Estas modificaciones se producen adiabáticamente y se deben sólo al cambio de la presión atmosférica provocado por el movimiento vertical de la porción de aire. Un proceso adiabático es aquel en el que no se produce transferencia de calor ni de masa a través de las fronteras de la porción de aire. En este proceso, la compresión da lugar al calentamiento, y la expansión al enfriamiento. Una porción de aire seco que se eleva en la atmósfera se enfría en el gradiente adiabático seco de 9,8 °C/1.000 m y presenta un gradiente vertical de -9,8 °C/1.000 m. De manera similar, una porción de aire seco que se hunde en la atmósfera se calienta en el gradiente adiabático seco de 9,8 °C/1.000 m y presenta un gradiente vertical de 9,8 °C/1.000 m. En este contexto, se considera que el aire es seco ya que el agua que contiene permanece en estado gaseoso.

El gradiente vertical adiabático seco es fijo, totalmente independiente de la temperatura del aire ambiental. Siempre que una porción de aire seco ascienda en la atmósfera, se enfriará en el gradiente de 9,8 °C/1.000 m, independientemente de cuál haya sido su temperatura inicial

o la del aire circundante. Como se verá más adelante, el gradiente vertical adiabático seco es fundamental en la definición de la estabilidad atmosférica.

Un diagrama adiabático simple demuestra la relación entre la elevación y la temperatura. En la figura 4-1, las líneas punteadas indican el gradiente vertical adiabático seco con diversas temperaturas al inicio y a lo largo del eje horizontal. Se debe recordar que la pendiente de la línea permanece constante, independientemente de su temperatura inicial en el diagrama.

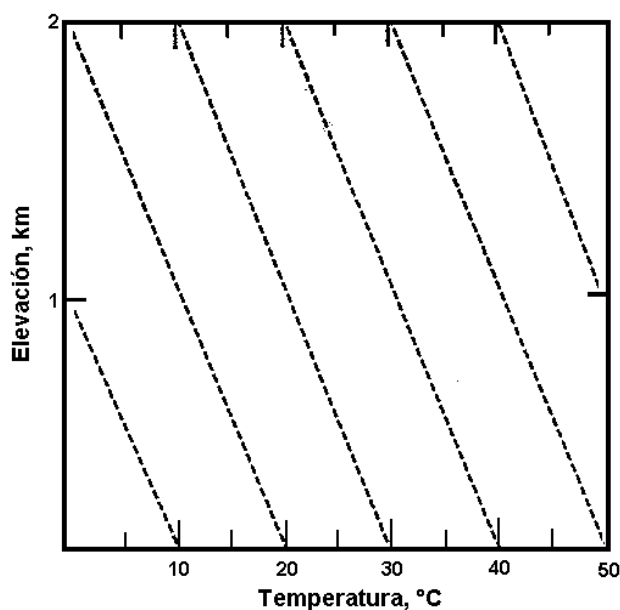


Figura 4-1. Gradiente vertical adiabático seco

Gradiente vertical adiabático húmedo

Al elevarse, una porción de aire seco que contiene vapor de agua seguirá enfriándose en el gradiente vertical adiabático seco hasta que alcance su temperatura de condensación o punto de rocío. En este punto, la presión del vapor de agua iguala a la del vapor de saturación del aire y una parte del vapor de agua se comienza a condensar. La condensación libera calor latente en la porción de aire y, por consiguiente, el gradiente de enfriamiento de la porción disminuye. La figura 4-2 ilustra este nuevo gradiente, conocido como **gradiente vertical adiabático húmedo**. A diferencia del gradiente vertical adiabático seco, no es constante pero depende de la temperatura y la presión. Sin embargo, en la mitad de la troposfera, se estima un gradiente aproximado de 6 a 7 °C/1.000 m.

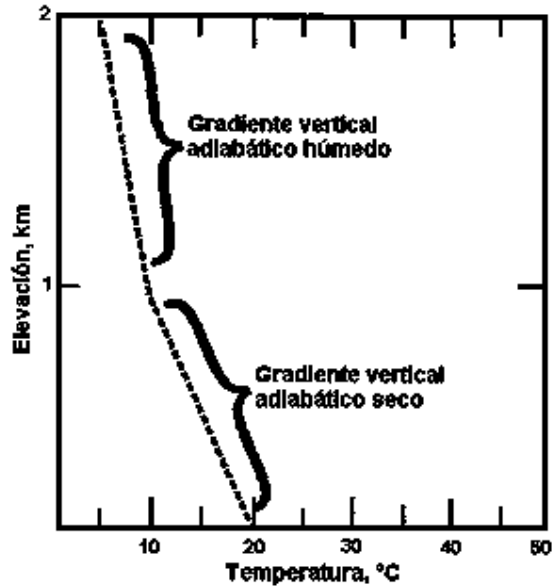


Figura 4-2. Gradiente vertical adiabático húmedo

Gradiente ambiental

Como se dijo anteriormente, el verdadero perfil de la temperatura del aire ambiental muestra el **gradiente vertical del ambiente**. Este, algunas veces denominado **gradiente vertical prevalente** o **atmosférico**, es el resultado de complejas interacciones producidas por factores meteorológicos y generalmente se considera que consiste en una disminución en la temperatura con la altura. Es particularmente importante para la circulación vertical, ya que la temperatura del aire circundante determina el grado en el que una porción de aire se eleva o desciende. Como se indica en la figura 4-3, el perfil de la temperatura puede variar considerablemente con la altitud; algunas veces puede alcanzar gradientes mayores que el adiabático seco y en otras ocasiones, menores. El fenómeno producido cuando la temperatura aumenta con la altitud se conoce como **inversión de la temperatura**. En la figura 4-4, esta inversión se produce en elevaciones de 200 a 350 m. Esta situación es importante principalmente en la contaminación del aire porque limita la circulación vertical de este.

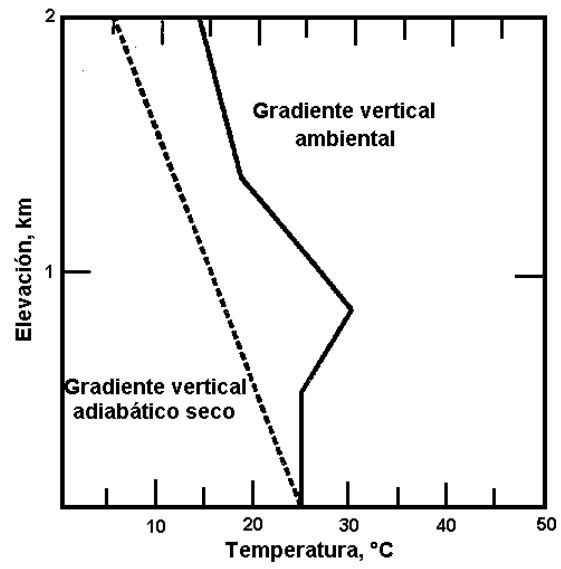


Figura 4-3. Gradiente vertical ambiental

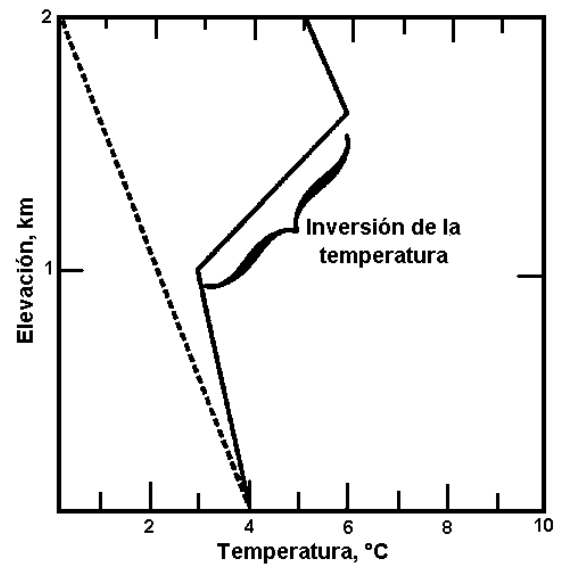


Figura 4-4. Inversión de la temperatura

Altura de mezcla

Recuerde la analogía de la porción de aire con un globo. La figura 4-5 indica tres maneras en que el gradiente adiabático influye en la flotabilidad. En cada situación asuma que el globo se infla con aire a 20 °C en el nivel del suelo y luego es impulsado manualmente a una altura de 1 km (por ejemplo, por el viento sobre la cresta de una montaña). El aire del globo se expandirá y enfriará a aproximadamente 10 °C. La elevación o caída del globo debido a la descarga depende de la temperatura y la densidad del aire circundante. En la situación “A”, el globo se elevará porque permanece más cálido y menos denso que el aire circundante. En la situación “B”, se hundirá porque es más frío y denso. En la situación “C”, no se moverá porque tiene la misma temperatura y densidad que el aire circundante.

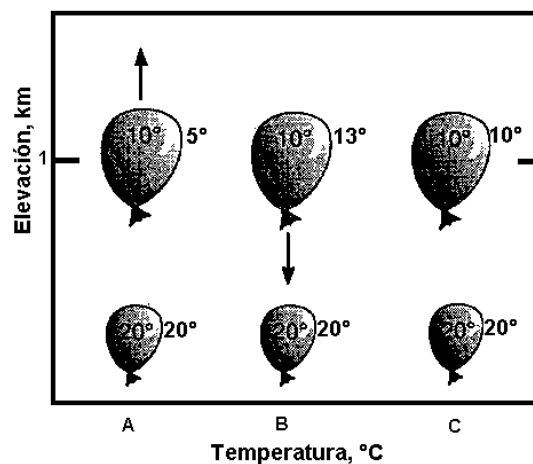


Figura 4-5. Relación del gradiente adiabático con la temperatura del aire

Los mismos principios se aplican para las condiciones reales de la atmósfera cuando una porción de aire se calienta cerca de la superficie y se eleva, y otra desciende para tomar su lugar. La relación entre el gradiente vertical adiabático y el gradiente vertical ambiental debería ser visible entonces. Este último controla el grado en el que una porción de aire puede elevarse o descender.

En un diagrama adiabático, como el de la figura 4-6, el punto en el que la porción de aire que se enfría en el gradiente vertical adiabático seco intersecta la “línea” perfil de la temperatura ambiental se conoce como **altura de mezcla**. Este es el nivel máximo al que la porción de aire puede ascender. Cuando no se produce ninguna intersección (cuando el gradiente vertical ambiental es mucho mayor que el gradiente vertical adiabático), la altura de mezcla se puede extender a mayores alturas en la atmósfera. El aire que se encuentra debajo de la altura de mezcla conforma la **capa de mezclada**. Mientras más profunda sea esta capa, mayor será el volumen de aire disponible para la dispersión de los contaminantes.

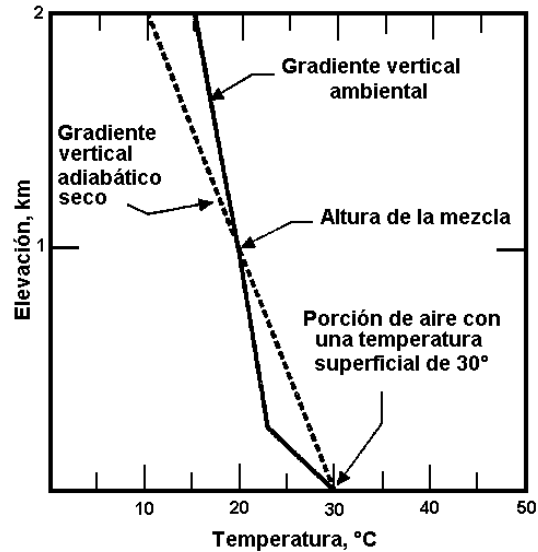


Figura 4-6. Altura de mezcla

Estabilidad atmosférica

El grado de estabilidad atmosférica se determina a partir de la diferencia de temperatura entre una porción de aire y el aire circundante. Este contraste puede causar el movimiento vertical de la porción (esto es, su elevación o caída). Este movimiento se caracteriza por cuatro condiciones básicas que describen la estabilidad general de la atmósfera. En condiciones **estables**, el movimiento vertical se inhibe, mientras que en condiciones **inestables** la porción de aire tiende a moverse continuamente hacia arriba o hacia abajo. Las condiciones neutras no propician ni inhiben el movimiento del aire después del gradiente de calentamiento o enfriamiento adiabático. Cuando las condiciones son extremadamente estables, el aire frío cercano a la superficie es “entrapado” por una capa de aire cálido sobre este. Esta condición, denominada **inversión**, prácticamente impide la circulación vertical del aire. Estas condiciones están directamente relacionadas con las concentraciones de contaminantes en el aire ambiental.

Condiciones inestables

Recuerde que una porción de aire que empieza a elevarse se enfriará en el gradiente adiabático seco hasta que alcance su punto de rocío, en el que se enfriará en el gradiente adiabático húmedo. Esto supone que la atmósfera circundante tiene un gradiente vertical mayor que el gradiente vertical adiabático (con un enfriamiento a más de $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$), de modo que la porción que se eleva seguirá siendo más cálida que el aire circundante. Este es un **gradiente superadiabático**. Como se indica en la figura 4-7, la diferencia de temperatura entre el verdadero gradiente vertical de temperatura del ambiente y el gradiente vertical

adiabático seco en realidad aumenta con la altura, al igual que la flotabilidad.

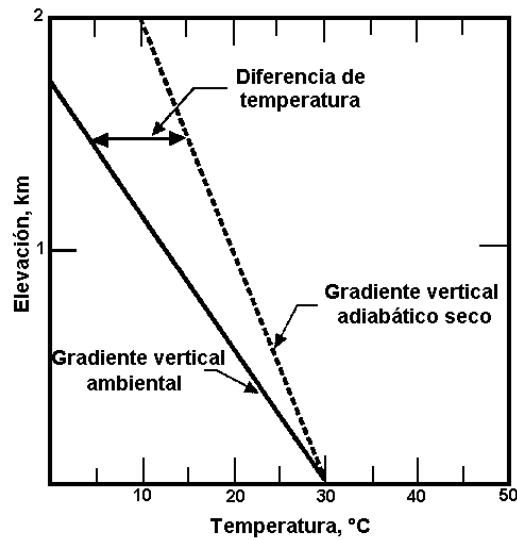


Figura 4-7. Aumento de la flotabilidad relacionado con la inestabilidad (gradiente vertical superadiabático)

A medida que el aire se eleva, el aire más frío se mueve por debajo. La superficie terrestre puede hacer que se caliente y empiece a elevarse nuevamente. Bajo estas condiciones, la circulación vertical en ambas direcciones aumenta y se produce una mezcla vertical considerable. El grado de inestabilidad depende de la importancia de las diferencias entre los gradientes verticales ambientales y los adiabáticos secos. La figura 4-8 muestra condiciones ligeramente inestables y condiciones muy inestables.

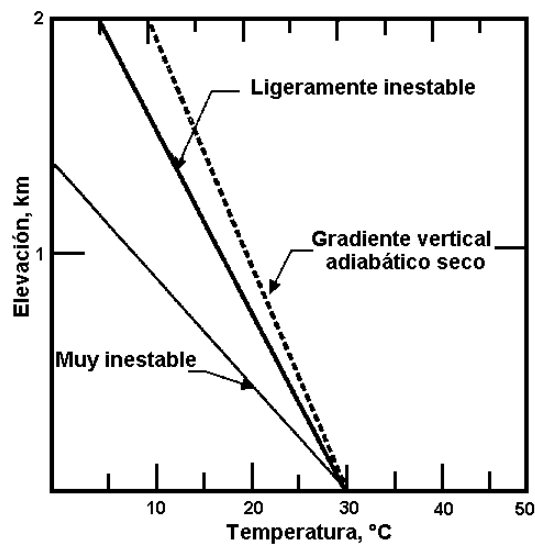


Figura 4-8. Condiciones inestables

Las condiciones inestables más comunes se producen durante los días soleados con vientos de bajas velocidades y fuerte insolación. La Tierra absorbe rápidamente el calor y transfiere parte de este a la capa de aire superficial. Si las propiedades térmicas de la superficie son uniformes, es posible que exista una masa flotante de aire, o numerosas porciones de aire si dichas propiedades varían. Cuando el aire se calienta, se vuelve menos denso que el aire circundante y se eleva.

Otra condición que puede conducir a la inestabilidad atmosférica es la producción de ciclones (sistema de presión baja), caracterizados por aire ascendente, nubes y precipitación.

Condiciones neutrales

Cuando el gradiente vertical de la temperatura del ambiente es el mismo que el gradiente vertical adiabático seco, la atmósfera se encuentra en estabilidad neutral (figura 4-9). Estas condiciones no estimulan ni inhiben el movimiento vertical del aire. La condición neutral es importante porque constituye el límite entre las condiciones estables y las inestables. Se produce durante los días con viento o cuando una capa de nubes impide el calentamiento o enfriamiento fuerte de la superficie terrestre.

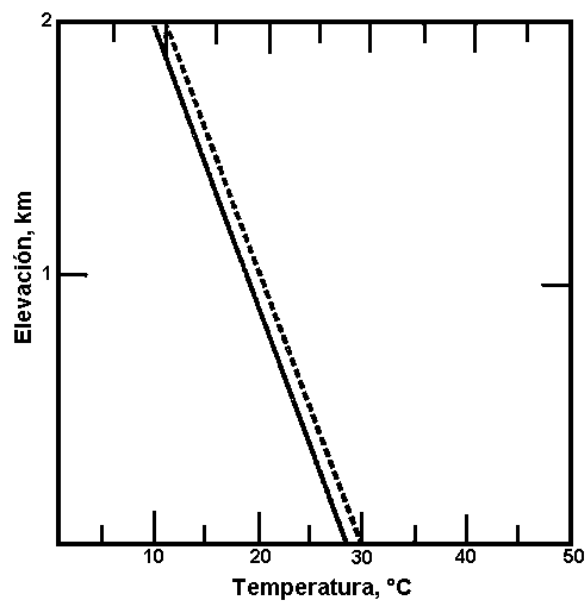


Figura 4-9. Condiciones neutrales

Condiciones estables

Cuando el gradiente vertical ambiental es menor que el gradiente vertical adiabático (se enfría a menos de $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$), el aire es estable y resiste la circulación vertical. Este es un **gradiente vertical subadiabático**. El aire que se eleva verticalmente permanecerá más frío y, por lo tanto, más denso que el aire circundante. Una vez que se retira la fuerza de elevación, el aire que se elevó regresará a su posición original (figura 4-10). Las condiciones estables se producen durante la noche, cuando el viento es escaso o nulo.

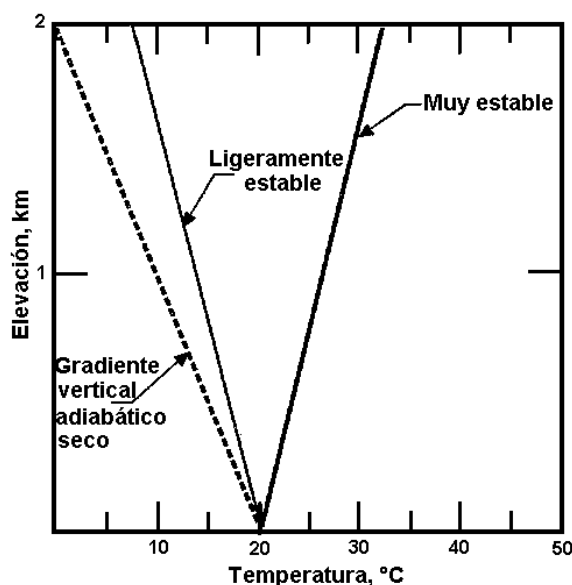


Figura 4-10. Condiciones estables

Estabilidad e inestabilidad condicional

En la discusión previa sobre la estabilidad y la inestabilidad, hemos asumido que una porción de aire ascendente se enfría en el gradiente vertical adiabático seco. Sin embargo, muchas veces la porción de aire se satura (alcanza su punto de rocío) y empieza a enfriarse más lentamente en el gradiente vertical adiabático húmedo. Este cambio en el gradiente de enfriamiento puede modificar las condiciones de estabilidad. La inestabilidad condicional se produce cuando el gradiente vertical ambiental es mayor que el gradiente vertical adiabático húmedo pero menor que el gradiente seco. La figura 4-11 ilustra esta situación. Las condiciones estables se producen hasta el nivel de condensación y las inestables, sobre este.

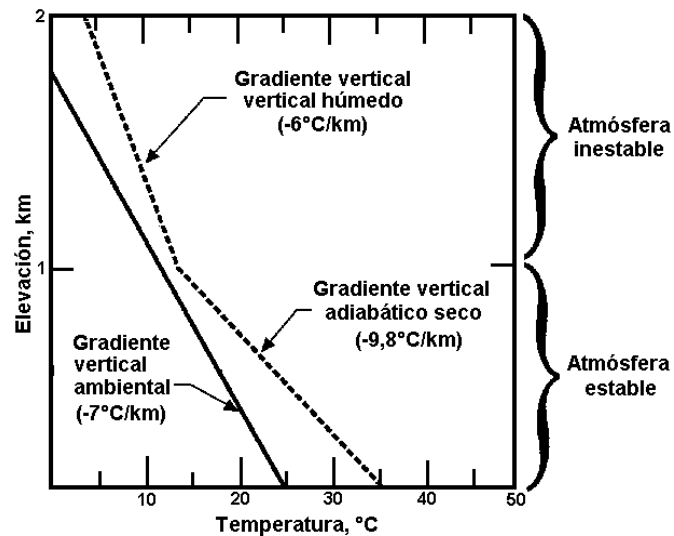


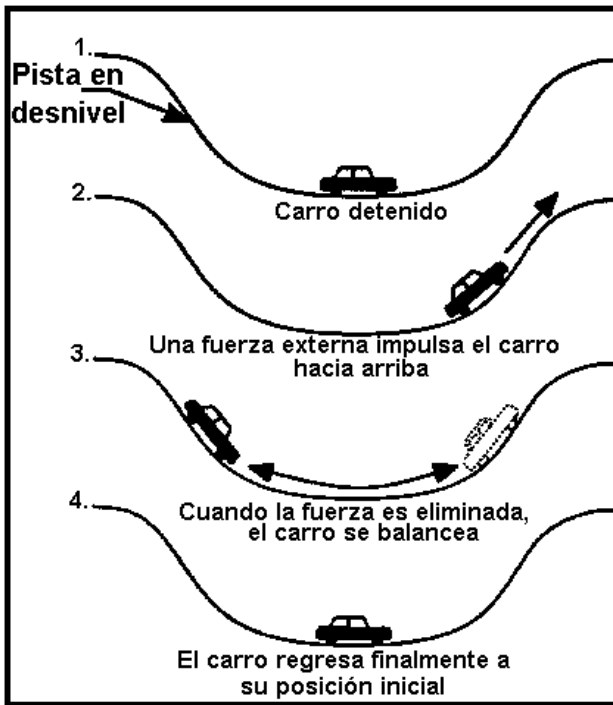
Figura 4-11. Estabilidad condicional

Ejemplos de condiciones de estabilidad atmosférica

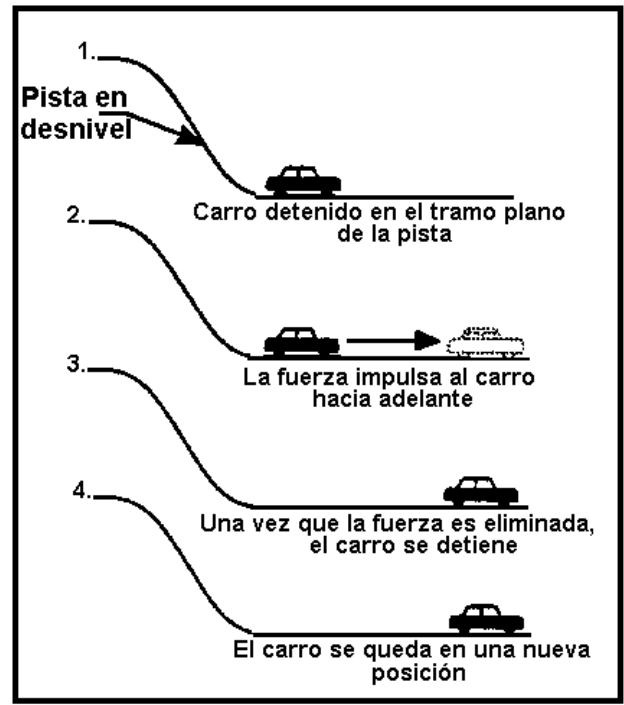
La figura 4-12 representa las diversas categorías de estabilidad. La finalidad de estas analogías es ilustrar las diferentes condiciones de estabilidad atmosférica. La figura 4-12 (a) describe condiciones atmosféricas estables. Nótese que cuando se elimina la fuerza de elevación, el carro regresa a su posición original. Como el carro resiste el desplazamiento de su posición original, se trata de un ambiente estable.

La figura 4-12 (b) describe condiciones neutrales. Cuando se ejerce una fuerza sobre el carro, este se mueve mientras la fuerza se mantenga. Cuando esta es eliminada, el carro se detiene y permanece en su nueva posición. Esta condición representa la estabilidad neutral.

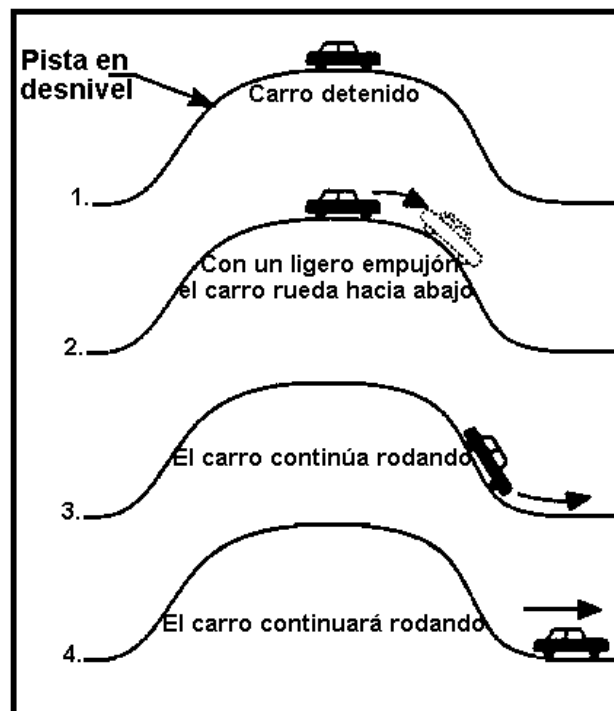
La figura 4-12 (c) describe condiciones inestables. Una vez que se ha ejercido una fuerza sobre el carro, este continúa moviéndose incluso después de que se ha eliminado la fuerza.



(a) Condiciones estables



(b) Condiciones neutrales



(c) Condiciones inestables

Figura 4-12. Condiciones de estabilidad atmosférica

Inversiones

Una inversión se produce cuando la temperatura del aire aumenta con la altura. Esta situación es muy común pero generalmente está confinada a una capa relativamente superficial. Las plumas emitidas a las capas de aire que experimentan una inversión (capas invertidas) no se dispersan mucho al ser transportadas por el viento. Las plumas emitidas por encima o por debajo de una capa invertida no penetran en ella sino que quedan atrapadas. La figura 4-13 presenta un ejemplo del gradiente vertical para una inversión. Por lo general, las altas concentraciones de contaminantes del aire están relacionadas con las inversiones ya que estas inhiben la dispersión de las plumas. Los cuatro tipos de inversión principales se deben a diversas interacciones atmosféricas y presentan diferentes períodos de duración.

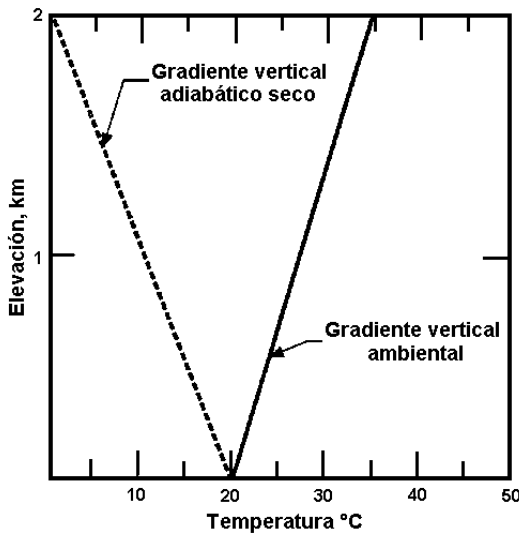


Figura 4-13 Temperatura de inversión

Inversión por radiación

La **inversión por radiación** es el tipo más común de inversión superficial y se produce con el enfriamiento acelerado de la superficie terrestre. A medida que la Tierra se enfría, la capa de aire cercana a la superficie también lo hace. Si este aire se enfría a una temperatura menor que la del aire de la capa superior, se vuelve muy estable y la capa de aire cálido impide cualquier movimiento vertical.

Las inversiones por radiación generalmente se producen desde las horas finales de la tarde hasta las primeras de la mañana, con el cielo despejado y vientos calmados, cuando el efecto de enfriamiento es mayor. Las mismas condiciones que conducen a las inversiones nocturnas por radiación, determinan la inestabilidad durante el día. Los ciclos de inestabilidad a lo largo del día e inversiones durante la noche son

relativamente comunes. Por consiguiente, los efectos de las inversiones por radiación generalmente son de corta duración. Los contaminantes que quedan atrapados debido a las inversiones son dispersados por la vigorosa mezcla vertical producida cuando la inversión se interrumpe después del amanecer. La figura 4-14 ilustra este ciclo diario.

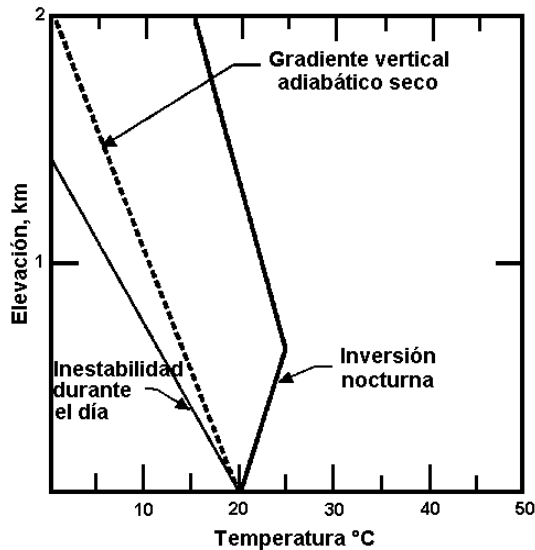


Figura 4-14. Ciclo diario

Sin embargo, en algunos casos el calentamiento diario que sigue a una inversión nocturna por radiación puede no ser lo suficientemente fuerte para disminuir la capa de inversión. Por ejemplo, una niebla espesa puede acompañar la inversión y reducir el efecto de la luz solar al día siguiente. En condiciones adecuadas, pueden generarse varios días de inversión por radiación con altas concentraciones de contaminantes. Es muy probable que esta situación ocurra en un valle cerrado, donde el movimiento nocturno descendente del aire frío puede reforzar una inversión por radiación y propiciar la formación de niebla.

En los lugares donde las inversiones por radiación son comunes y tienden a estar relativamente cerca de la superficie, las chimeneas altas que emiten contaminantes sobre la capa de inversión pueden ayudar a reducir las concentraciones de estas sustancias en el nivel superficial.

Inversión por subsidencia

La **inversión por subsidencia** (figura 4-15) generalmente está asociada con los anticiclones (sistemas de alta presión). Se debe recordar que el aire de un anticiclón desciende y fluye hacia afuera con una rotación que sigue la dirección de las agujas del reloj. A medida que el aire desciende, la mayor presión existente en altitudes menores lo

comprime y calienta en el gradiente vertical adiabático seco. Por lo general, este calentamiento se produce en un gradiente más acelerado que el gradiente vertical ambiental. Durante el día, la capa de inversión resultante de este proceso con frecuencia se eleva a cientos de metros sobre la superficie. Durante la noche, la base de una inversión por subsidencia generalmente desciende, quizás hasta llegar al suelo, debido al enfriamiento del aire superficial. En efecto, los días despejados y sin nubes característicos de los anticiclones propician las inversiones por radiación, de modo que se puede producir una inversión superficial durante la noche y una elevada durante el día. Si bien la capa de mezcla que se encuentra debajo de la inversión puede variar diariamente, nunca será muy profunda.

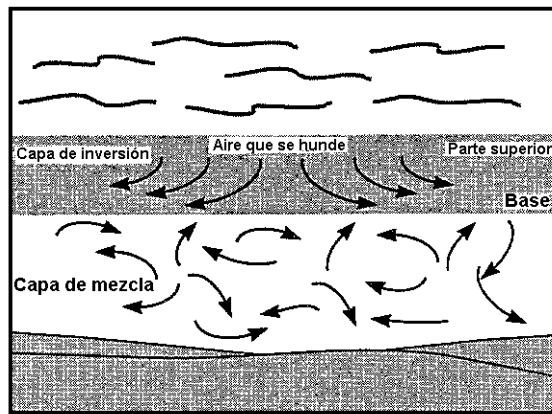


Figura 4-15. Inversión por subsidencia

A diferencia de las que se producen por radiación, las inversiones por subsidencia tienen una duración relativamente larga. Esto se debe a su relación tanto con los anticiclones semipermanentes centrados en cada océano como con los anticiclones migratorios de movimiento lento.

Cuando un anticiclón se estanca, los contaminantes emitidos dentro de la capa de mezcla no se pueden diluir. Como resultado, es probable que las concentraciones de contaminantes se eleven durante algunos días. Los casos más graves de contaminación del aire en Estados Unidos se han producido o bien por un anticiclón migratorio estancado (por ejemplo, el de Nueva York en noviembre de 1966 y el de Pensilvania en octubre de 1948) o bien en el límite este del anticiclón semipermanente del Pacífico (Los Ángeles).

Inversión frontal

En la lección 3 se menciona sobre el atrapamiento frontal, la inversión relacionada tanto con los frentes fríos como con los cálidos. En el avance de cada frente, el aire cálido desplaza al frío, de modo que se produce una circulación vertical mínima en la capa de aire frío más cercana a la superficie (figura 4-16). La fuerza de la inversión depende de la diferencia de temperatura entre las dos masas de aire. Como los frentes

se mueven horizontalmente, los efectos de la inversión generalmente duran poco y la falta de movimiento vertical suele compensarse con los vientos relacionados con el paso frontal.

Sin embargo, cuando los frentes se vuelven estacionarios, las condiciones de inversión pueden prolongarse.

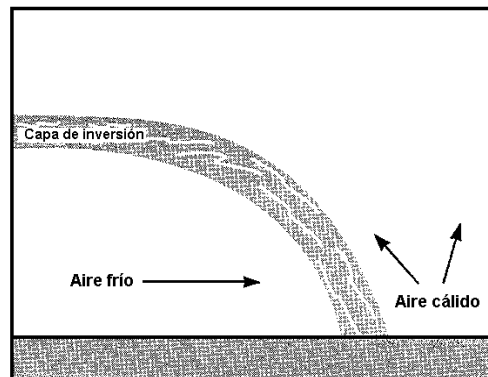


Figura 4-16. Inversión frontal (frente frío)

Inversiones por advección

Las inversiones por advección están relacionadas con el flujo horizontal del aire cálido. Cuando este se mueve sobre una superficie fría, los procesos de conducción y convección enfrían el aire más cercano a la superficie y conducen a una inversión basada en la superficie (figura 4-17). Este tipo de inversión es más común durante el invierno, cuando el aire cálido pasa sobre una superficie cubierta de nieve o extremadamente fría.

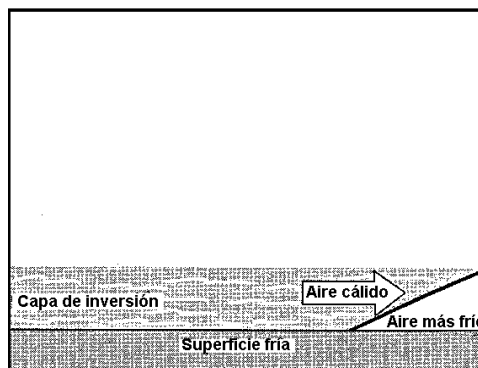


Figura 4-17. Inversión por advección basada en la superficie

Otro tipo de inversión por advección se produce cuando el aire cálido es impulsado sobre la parte superior de una capa de aire frío. Este tipo de inversión es común en las pendientes del este de las cordilleras (figura 4-18), donde el aire cálido del oeste

desplaza al aire frío del este. Este tipo de inversiones es muy común en Denver. Ambos tipos de inversiones son verticalmente estables pero pueden presentar vientos fuertes bajo la capa de inversión.

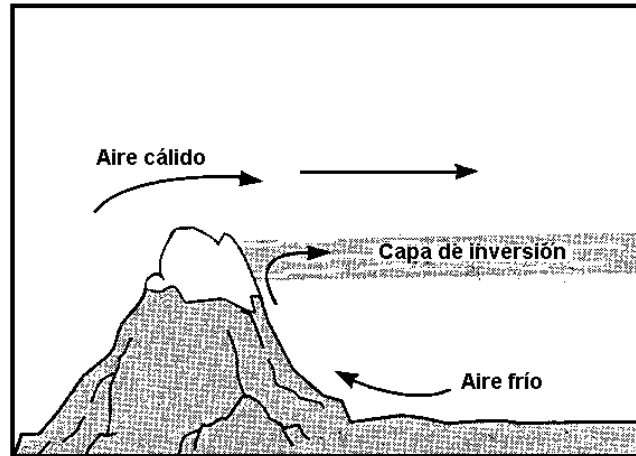


Figura 4-18. Advección basada en el terreno

Estabilidad y comportamiento de la pluma

El grado de estabilidad atmosférica y la altura de mezcla resultante tienen un importante efecto en las concentraciones de contaminantes en el aire ambiental. Si bien en la discusión sobre la mezcla vertical no hemos abordado el movimiento horizontal del aire, o el viento, es importante saber que este se produce bajo condiciones de inversión. Los contaminantes que no se pueden dispersar hacia arriba lo pueden hacer horizontalmente a través de los vientos superficiales.

La combinación de los movimientos verticales y horizontales del aire influye en el comportamiento de las plumas de fuentes puntuales (chimeneas). En la lección 6 se revisa más detalladamente la dispersión de las plumas. Sin embargo, en esta lección se describirán los diversos tipos de plumas característicos de diferentes condiciones de estabilidad.

La **pluma de espiral** de la figura 4-19 se produce en condiciones muy inestables debido a la turbulencia causada por el acelerado giro del aire. Mientras las condiciones inestables generalmente son favorables para la dispersión de los contaminantes, algunas veces se pueden producir altas concentraciones momentáneas en el nivel del suelo si los espirales de la pluma se mueven hacia la superficie.

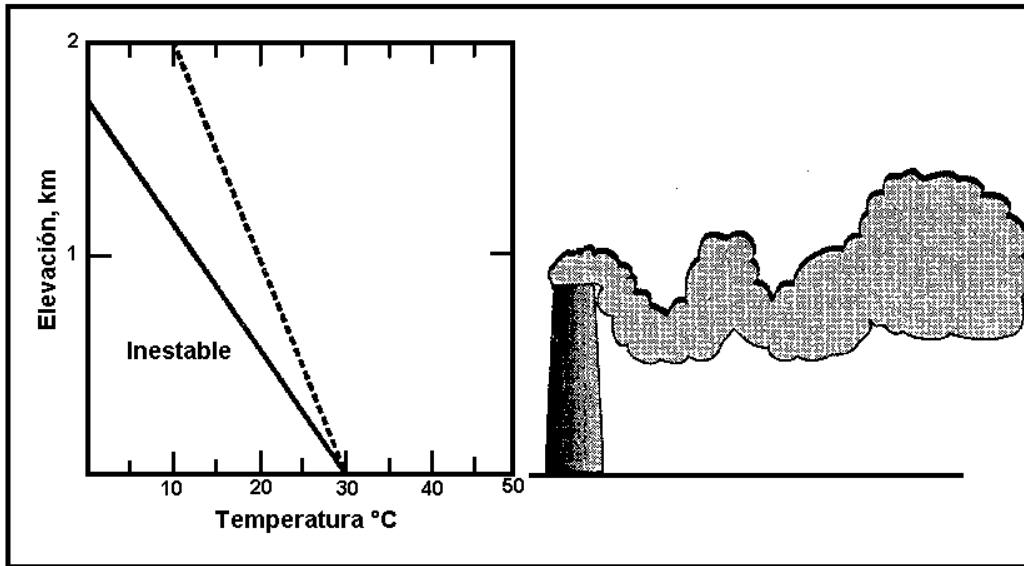


Figura 4-19. Pluma de espiral

La **pluma de abanico** (figura 4-20) se produce en condiciones estables. El gradiente de inversión inhibe el movimiento vertical sin impedir el horizontal y la pluma se puede extender por varios kilómetros a sotavento de la fuente. Las plumas de abanico ocurren con frecuencia en las primeras horas de la mañana durante una inversión por radiación.

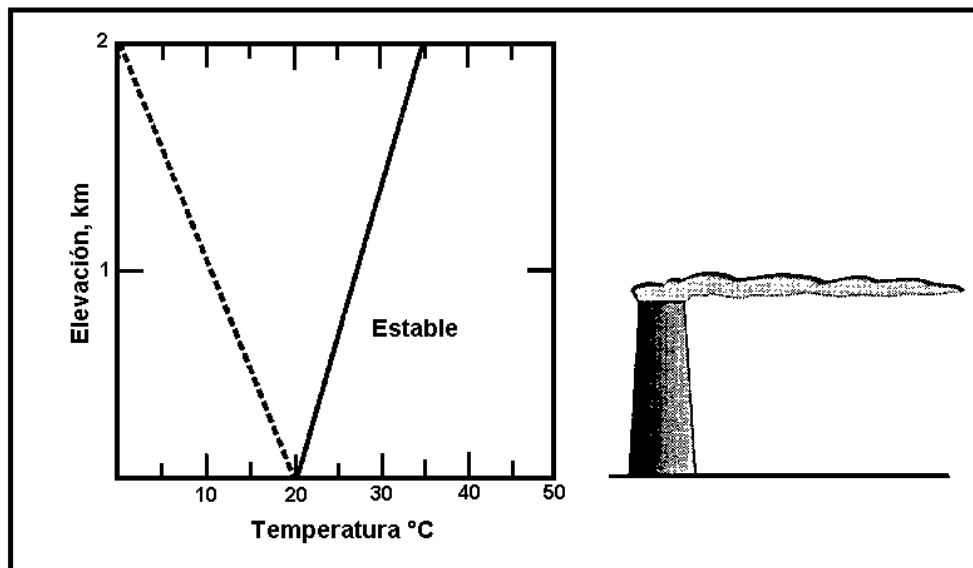


Figura 4-20. Pluma de abanico

La **pluma de cono** (figura 4-21) es característica de las condiciones neutras o ligeramente estables. Este tipo de plumas tiene mayor probabilidad de producirse en días nublados o soleados, entre la interrupción de una inversión por radiación y el desarrollo de condiciones diurnas inestables.

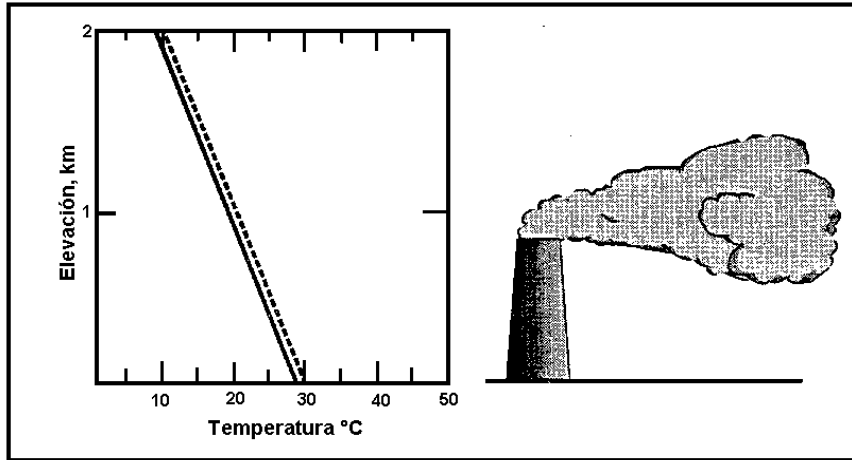


Figura 4-21 Pluma de cono

Obviamente, un problema importante para la dispersión de los contaminantes es la presencia de una capa de inversión, que actúa como una barrera para la mezcla vertical. Durante una inversión, la altura de una chimenea en relación con la de una capa de inversión muchas veces puede influir en la concentración de los contaminantes en el nivel del suelo.

Cuando las condiciones son inestables sobre una inversión (figura 4-22), la descarga de una pluma sobre esta da lugar a una dispersión efectiva sin concentraciones notorias en el nivel del suelo. Esta condición se conoce como **flotación**.

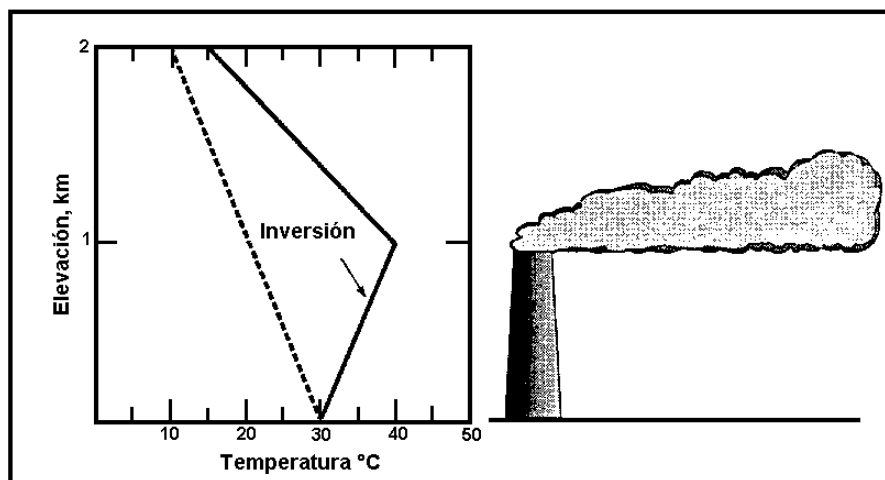


Figura 4-22. Pluma de flotación

Si la pluma se libera justo debajo de una capa de inversión, es probable que se desarrolle una grave situación de contaminación del aire. Ya que el suelo se calienta durante la mañana, el aire que se encuentra debajo de la mencionada capa se vuelve inestable. Cuando la inestabilidad alcanza el nivel de la pluma entrampada bajo la capa de inversión, los contaminantes se pueden transportar rápidamente hacia abajo hasta llegar al suelo (figura 4-23). Este fenómeno se conoce como **fumigación**. Las concentraciones de contaminantes en el nivel del suelo pueden ser muy altas cuando se produce la fumigación. Esta se puede prevenir si las chimeneas son suficientemente altas.

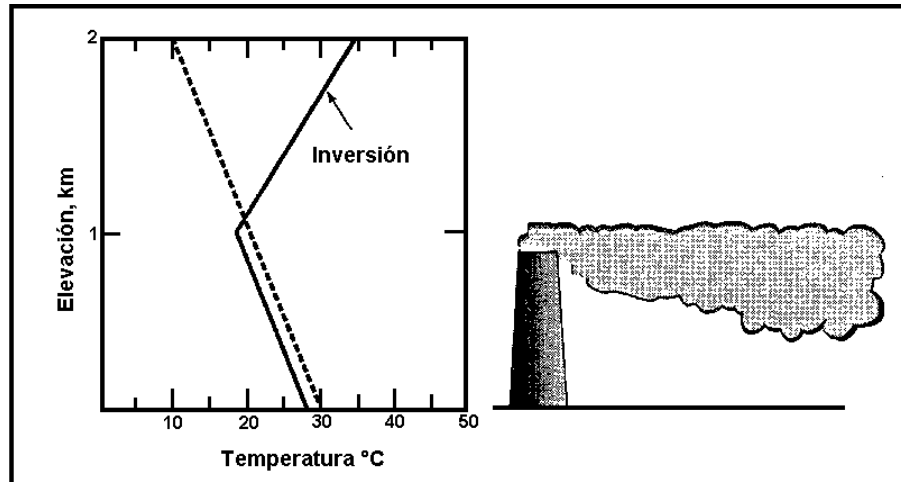


Figura 4-23. Fumigación

Hasta este punto, hemos desarrollado las condiciones y eventos meteorológicos básicos que influyen en el movimiento y la dispersión de los contaminantes del aire en la atmósfera. En la lección 6, se explicará más detalladamente el comportamiento de los contaminantes alrededor de fuentes puntuales, y en la siguiente lección, se abordarán los instrumentos empleados en la medición meteorológica.

Ejercicio de revisión

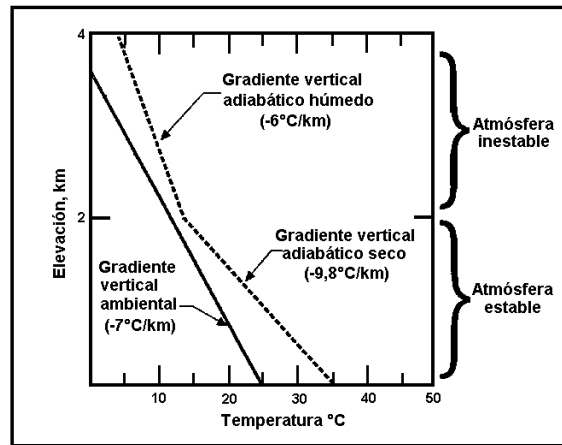
1. Un pequeño cuerpo de aire infinitesimal y nítido, de aire que no se mezcla fácilmente con el aire circundante, se denomina:
 - a. Columna de aire
 - b. Masa de aire
 - c. Porción de aire
 - d. Globo de aire caliente
 - e. b y c
2. La temperatura del aire _____ a medida que la presión atmosférica aumenta.
 - a. Se incrementa
 - b. Disminuye
3. ¿Cuáles son los dos factores que influyen en la flotabilidad de una porción de aire?

_____ .
4. Si la temperatura de una porción de aire es más fría que el aire circundante, generalmente:
 - a. Se eleva
 - b. Desciende
 - c. Permanece en el mismo lugar
5. El gradiente ambiental o prevalente se puede determinar a partir de:
 - a. La tasa de cambio de presión en la atmósfera
 - b. La tasa de aire húmedo *versus* el cambio de presión
 - c. El perfil de la temperatura atmosférica
 - d. La tasa del paso del sistema frontal
6. Los cambios de temperatura de una porción de aire producidos por modificaciones en la presión atmosférica se denominan:
 - a. Advectivos
 - b. Adiabáticos
 - c. Pendientes
 - d. Prevalentes

7. El gradiente adiabático seco es:
- $-6\text{ }^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$
 - $<1\text{ }^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$
 - $-9,8\text{ }^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$
 - $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}/1.000\text{ m}$
8. ¿Verdadero o falso? El gradiente adiabático seco es fijo y totalmente independiente de la temperatura del aire ambiental.
- Verdadero
 - Falso
9. Una porción de aire desplazada se enfría en el gradiente adiabático cuando se _____ .
10. En el gradiente adiabático húmedo, la tasa de enfriamiento de la porción de aire generalmente es:
- La misma que en el gradiente seco
 - Menor que en el gradiente seco
 - Más acelerada que en el gradiente seco
11. El perfil real de la temperatura del aire ambiental se puede usar para determinar el gradiente _____.
12. ¿Verdadero o falso? El gradiente ambiental influye en el grado en el que una porción de aire puede elevarse o descender.
- Verdadero
 - Falso
13. El nivel máximo al que una porción de aire puede elevarse bajo determinadas condiciones se conoce como:
- Nivel ascendente/descendente
 - Vaguada de mezcla
 - Tasa de humedad
 - Altura de mezcla
 - Capa de mezcla
14. El gradiente adiabático para una determinada porción de aire intersecta el gradiente ambiental en:
- La vaguada de mezcla
 - La tasa de humedad

- c. La altura de mezcla
 - d. Ninguna de las anteriores
15. Una gran capa de mezcla implica que los contaminantes del aire tienen un _____ volumen de aire para la dilución.
- a. Mayor
 - b. Menor
16. ¿Verdadero o falso? Una atmósfera estable resiste el movimiento vertical.
- a. Verdadero
 - b. Falso
17. La mezcla vertical causada por la flotabilidad aumenta cuando las condiciones atmosféricas son:
- a. Inestables
 - b. Neutras
 - c. Estables
 - d. Extremadamente estables
18. Las condiciones atmosféricas inestables generalmente se desarrollan durante:
- a. Días nublados
 - b. Días soleados
 - c. Noches nubladas
 - d. Noches claras
19. Durante los días nublados sin calentamiento fuerte de la superficie, las condiciones atmosféricas tienden a ser:
- a. Inestables
 - b. Neutras
 - c. Estables
 - d. Extremadamente estables

20. En este diagrama, una porción de aire desplazada se satura en una elevación de 2 km. ¿Cuál de las siguientes condiciones de estabilidad representa el siguiente diagrama?



- Estable bajo 1 km
 - Estabilidad condicional sobre 1 km
 - Neutral de 0 a 2 km
 - Inestabilidad condicional sobre 2 km
21. Una _____ actúa como una tapa en el movimiento vertical del aire.
22. Cuando la superficie terrestre se enfría rápidamente -por ejemplo, en el intervalo entre las últimas horas de la noche y las primeras de la mañana con el cielo despejado- es probable que se produzca una inversión _____ .
23. Cuando se produce una fuerte mezcla vertical después de una inversión por radiación, las plumas contaminantes:
- Se quedarán atrapadas cerca de la superficie
 - Se dispersarán lejos de su fuente
24. ¿Verdadero o falso? Un sistema de presión alta puede causar una inversión por subsidencia.
- Verdadero
 - Falso
25. La inversión por subsidencia está relacionada con _____ porque generalmente se forma en una capa muy alta sobre la superficie durante el día.
26. Por lo general, una inversión por subsidencia tiende a durar un período relativamente _____ en comparación con la inversión por radiación.
- Corto
 - Largo

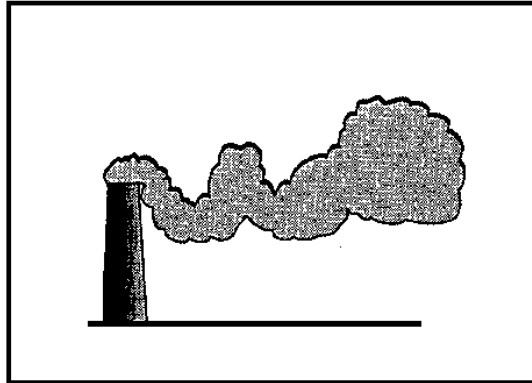
27. Las inversiones basadas en la superficie relacionadas con el flujo horizontal del aire, como cuando el aire cálido circula sobre una superficie fría, se denominan inversiones _____ .

- a. Por subsidencia
- b. Frontales
- c. Por advección
- d. Adiabáticas

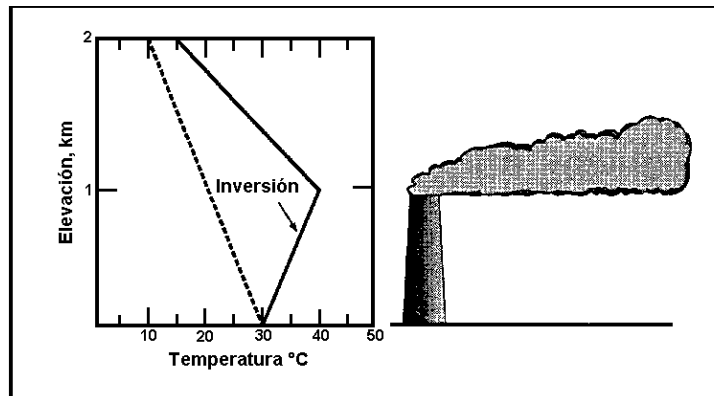
28. La pluma _____ es característica de condiciones neutrales o ligeramente estables.

- a. De abanico
- b. De espiral
- c. De cono
- d. De flotación

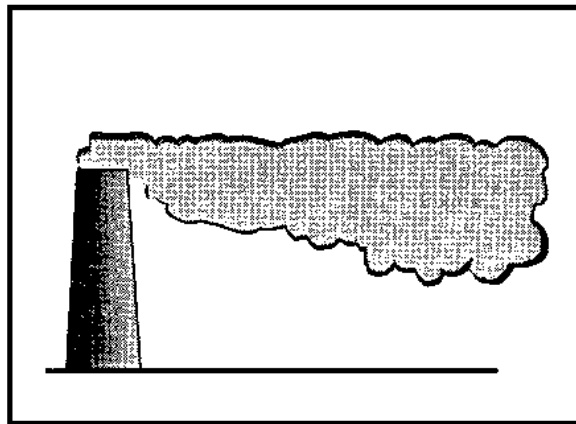
29. ¿Cuál es el nombre de la pluma que aparece en esta figura? _____ .



30. ¿A qué pluma representa este gradiente y altura de chimenea? _____ .



31. Una pluma de abanico generalmente se produce bajo condiciones atmosféricas:
- a. Altamente estables
 - b. Estables
 - c. Neutras
32. La pluma de espiral puede causar _____ concentraciones de contaminantes del aire en el nivel del suelo.
33. Si la pluma se libera justo _____ una capa de inversión, se puede producir una grave situación de contaminación.
- a. Debajo de
 - b. Sobre
34. Este dibujo muestra una pluma _____ .



- a. De cono
- b. De espiral
- c. De fumigación
- d. De flotación

Respuestas al ejercicio de revisión

1. **c. Porción de aire**

Un pequeño cuerpo de aire infinitesimal y nítido, que no se mezcla fácilmente con el aire circundante, se denomina *porción de aire*.

2. **a. Aumenta**

La temperatura del aire se incrementa a medida que la presión atmosférica aumenta.

3. **Temperatura y presión**

La temperatura y la presión son los dos factores atmosféricos que influyen en la flotabilidad de una porción de aire.

4. **b. Desciende**

Si la temperatura de una porción de aire es más fría que el aire circundante, generalmente desciende.

5. **c. El perfil de la temperatura atmosférica**

El gradiente ambiental o prevalente se puede determinar a partir del perfil de la temperatura atmosférica.

6. **b. Adiabático**

Los cambios de temperatura de una porción de aire producidos por las modificaciones en la presión atmosférica se denominan adiabáticos.

7. **c. -9,8 °C/1.000 m**

El gradiente adiabático seco es -9,8 °C/1.000 m

8. **a. Verdadero**

El gradiente adiabático seco es fijo y totalmente independiente de la temperatura del aire ambiental.

9. **Satura**

Una porción de aire desplazada se enfría en el gradiente adiabático cuando se satura.

10. **b. Menor que la del gradiente seco**

En el gradiente adiabático húmedo, la tasa de enfriamiento de la porción de aire generalmente es menor que en el gradiente seco.

11. **Ambiental**

El perfil real de la temperatura del aire ambiental se puede usar para determinar el gradiente **ambiental**.

12. **a. Verdadero**

El gradiente ambiental influye en el grado en el que una porción de aire puede elevarse o descender.

13. **c. Altura de mezcla**

El nivel máximo al que una porción de aire puede elevarse bajo determinadas condiciones se conoce como la *altura de mezcla*.

14. **c. Altura de mezcla**

El gradiente adiabático para una determinada porción de aire intersecta el gradiente ambiental en la altura de mezcla.

15. **a. Mayor**

Una gran capa de mezcla implica que los contaminantes del aire tienen un mayor volumen de aire para la dilución.

16. **a. Verdadero**

Una atmósfera estable resiste el movimiento vertical.

17. **a. Inestable**

La mezcla vertical causada por la flotabilidad aumenta cuando las condiciones atmosféricas son inestables.

18. **b. Días soleados**

Las condiciones atmosféricas inestables generalmente se desarrollan durante los días soleados.

19. **b. Neutrales**

Durante los días nublados sin calentamiento fuerte de la superficie, las condiciones atmosféricas tienden a ser neutrales.

20. **d. Inestabilidad condicional sobre 2 km**

El diagrama representa la inestabilidad condicional sobre 2 km.

21. **Inversión**

Una inversión actúa como una tapa en el movimiento vertical del aire.

22. **Por radiación**

Cuando la superficie terrestre se enfría rápidamente -por ejemplo en el intervalo entre las últimas horas de la noche y las primeras de la mañana con cielo despejado- es probable que se produzca una inversión por radiación.

23. **b. Se dispersarán lejos de su fuente**

Cuando se produce una fuerte mezcla vertical después de una inversión por radiación, las plumas contaminantes se dispersarán lejos de su fuente.

24. **a. Verdadero**

Un sistema de presión alta puede causar una inversión por subsidencia.

25. **Anticiclones**

La inversión por subsidencia está relacionada con los anticiclones porque generalmente se forma en una capa muy alta sobre la superficie durante el día.

26. **b. Largo**

Por lo general, una inversión por subsidencia tiende a durar un período relativamente largo en comparación con la inversión por radiación.

27. **c. Advección**

Las inversiones basadas en la superficie relacionadas con el flujo horizontal del aire, como cuando el aire cálido circula sobre una superficie fría, se denominan inversiones por advección.

28. **c. De cono**

La pluma de cono es característica de condiciones neutrales o ligeramente estables.

29. **De espiral**

Esta figura muestra una pluma de espiral.

30. **Pluma de flotación**

Este gradiente y esta altura de chimenea representan una pluma de flotación.

31. **b. Estables**

Una pluma de abanico generalmente se produce bajo condiciones atmosféricas estables.

32. **Altas**

La pluma de espiral puede causar altas concentraciones de contaminantes del aire en el nivel del suelo.

33. **a. Debajo**

Si la pluma se libera justo debajo de una capa de inversión, se puede producir una grave situación de contaminación.

34. **c. Fumigación**

Este dibujo muestra una pluma de fumigación.

Bibliografía

Drake, R.L. y otros, 1979. *Mathematical Models for Atmospheric Pollutants*. EA-1131.
Preparado para el Electric Power Research Institute

Hanna, S.R. y otros, 1982. *Handbook on Atmospheric Diffusion*. U.S. Dept. of
Energy. DOE/tic-11223, pp.2-4.

Turner, D.B. 1970. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. Environmental
Protection Agency, Office of Air Programs, Research Triangle Park, Carolina del Norte.

Stern, A.C. y otros, 1984. *Fundamentals of Air Pollution*. Second Edition. Nueva York: Academic
Press

U.S. Air Force, 1962. *Weather for Aircrews*. AF Manual 105-5.