

mueven hacia la toma de tierra, y a lo largo del camino, son atraídos unos con otros pasando a ser partículas en suspensión. Las partículas ahora están cargadas, lo que las hace moverse bajo la influencia del campo eléctrico hacia la superficie de recolección de la toma de tierra. Son eliminados del electrodo de recolección por la fuerza de la gravedad, golpeteando, o enjuagando la placa recolectora con líquidos. Los precipitadores electrostáticos actuales, como el que se muestra en la Figura 7.34, pueden tener centenares de placas paralelas, con un área total de recolección medida en decenas de miles de metros cuadrados.

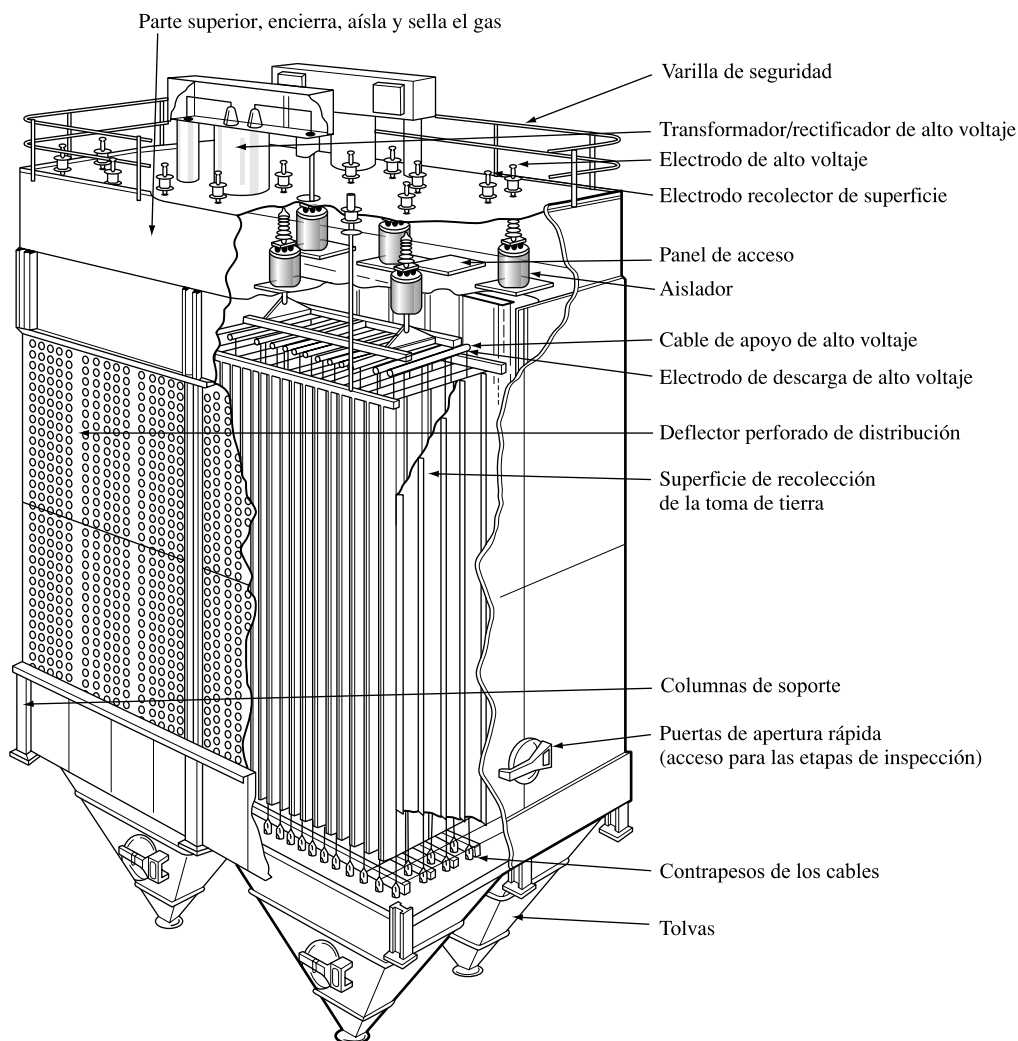


FIGURA 7.34. Corte del plano horizontal de un precipitador electrostático tipo.
(Fuente: U.S. HEW, 1969.)

El precipitador electrostático fácilmente puede eliminar más del 98% de las partículas que pasan a través de ellos, incluyendo partículas del tamaño de submicrones. Algunos consiguen eficacias aun mayores del 99,9%. Pueden tratar tasas grandes de flujo de gases de combustión con pequeñas bajadas de presión, y tienen un manejo y un coste de mantenimiento relativamente bajo. Son muy versátiles, funcionan con ambas partículas, sólidas y lí-

quidas. Los precipitadores son muy eficientes, pero son caros y ocupan una gran cantidad de espacio. El área de requerimientos no se incrementa linealmente con la eficiencia recolectora, de acuerdo con la siguiente relación, conocida como la ecuación de Deutsch-Anderson:

$$\eta = 1 - e^{-\omega A/Q} \quad (7.36)$$

donde η es la eficiencia recolectora fraccionada, A es el área total de placas recolectoras, Q es la tasa de flujo volumétrica del gas a través del precipitador, y ω es un parámetro conocido como la *velocidad efectiva de sentido*. La velocidad efectiva de sentido es la velocidad terminal con la cual las partículas se acercan a la placa recolectora del campo eléctrico. Viene determinada por estudios pilotos o por la experiencia previa con unidades similares. Cualquier grupo consistente de unidades puede servir para estas cantidades.

EJEMPLO 7.9. Área del precipitador electrostático

Un precipitador electrostático con un área de placas recolectoras de 6.000 m^2 consigue un 97% de eficiencia permitiendo un flujo de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ de gas de combustión procedentes de una central eléctrica de 200 MW. ¿Cuánto debería de medir el área de placas para incrementar su eficiencia en un 98%? ¿Y en un 99%?

Solución. Recurriendo a (7.36) y resolviendo para el sentido de la velocidad, ω , obtenemos

$$\omega = -\frac{Q}{A} \ln(1 - \eta) = -\frac{200 \text{ m}^3/\text{s}}{6.000 \text{ m}^2} \ln(1 - 0,97) = 0,117 \text{ m/s}$$

Para aumentar al 98% su eficiencia, el área requerida sería

$$A_{98} = -\frac{Q}{\omega} \ln(1 - \eta) = -\frac{200 \text{ m}^3/\text{s}}{0,117 \text{ m/s}} \ln(1 - 0,98) = 6.690 \text{ m}^2$$

Para aumentarla al 99%, el área requerida sería

$$A_{99} = -\frac{200 \text{ m}^3/\text{s}}{0,117 \text{ m/s}} \ln(1 - 0,99) = 7.880 \text{ m}^2$$

Este es aproximadamente el área de dos campos de fútbol. Como sugiere este cálculo, el área adicional que requiere el recolector para lograr las mejoras del incremento en la eficiencia de la recolección aumentan rápidamente. Para incrementar del 97 al 98% se requirieron 690 m^2 más, mientras que para el siguiente incremento del 1% se requieren 1.190 m^2 .

Cámara de filtros. La competencia principal que tienen los precipitadores electrostáticos para la recolección eficiente de partículas pequeñas es la *filtración con tela*. Los gases convertidos en polvo se hacen pasar por bolsas de filtro de tela, que están suspendidas boca abajo en una cámara grande, llamada *cámara de filtros*, como se muestra en la Figura 7.35 una cámara de filtros puede contener miles de bolsas, las cuáles son a menudo distribuidas entre varios compartimientos. Esto permite tener compartimientos individuales que serán limpiados mientras los otros permanecerán en funcionamiento.

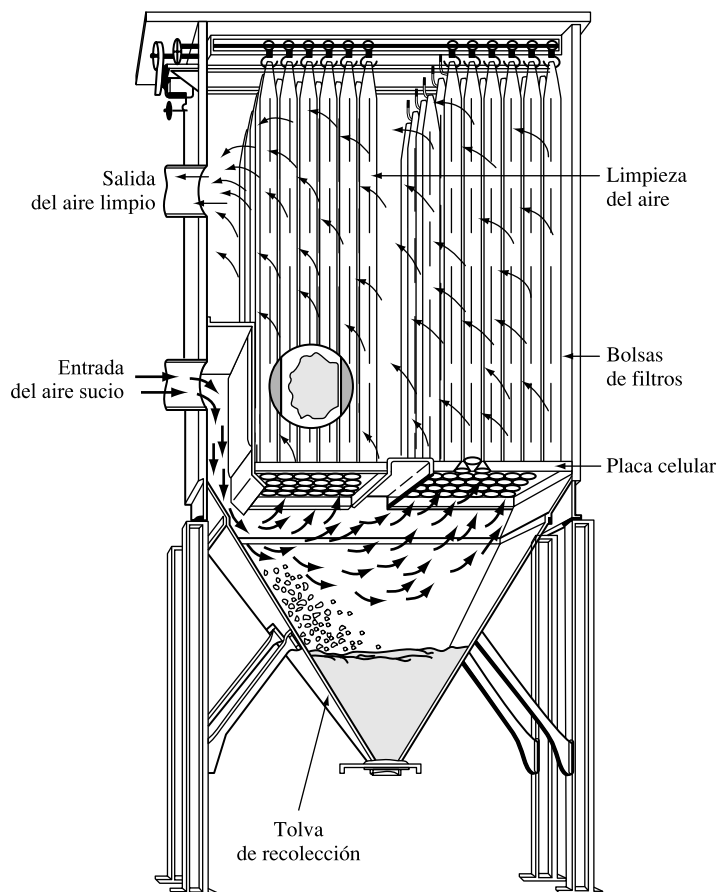


FIGURA 7.35. Típica cámara de filtros de tela.
(Fuente: Cortesía de Wheelabratos Air Pollution Control.)

Parte de la filtración la lleva a cabo la propia tela, pero una parte más significativa de la filtración se debe al polvo que se acumula en el interior de las bolsas. Tienen una eficacia de eliminación del 100% de partículas tan pequeñas como $1 \mu\text{m}$; cantidades sustanciales de partículas de un tamaño de $0,01 \mu\text{m}$ son también eliminadas. Tienen ciertas desventajas, sin embargo. Como en el caso de los precipitadores, las cámaras de filtros son grandes y caras. Pueden dañarse por los productos químicos corrosivos que conllevan los gases de combustión, y no pueden funcionar en ambientes húmedos. También tienen poco potencial para fuegos o explosiones si el polvo es combustible. La popularidad de las cámaras de filtros aumenta, sin embargo, y ahora rivalizan con los precipitadores en las ventas totales de la industria.

Sistemas combinados de calor y energía

El acercamiento tradicional para controlar las emisiones de fuentes inmóviles ha estado enfocado a las tecnologías aplicadas para las centrales eléctricas convencionales, grandes, y centralizadas. Para estas plantas, sólo aproximadamente la tercera parte de la energía que crean termina como electricidad, la cual es entonces enviada a los clientes que pueden estar ubicados a centenares de millas de distancia. Las otras dos terceras partes de la energía pro-

ducida se emite en forma de calor residual que hace que los clientes, muy a menudo, no quieran vivir muy cerca de una de estas centrales eléctricas gigantescas. Si, en lugar de eso, las centrales eléctricas fuesen más pequeñas y limpias, los clientes podrían quizá ubicarse a su lado, en cuyo caso el calor residual podría ser captado y usado para calentar, enfriar, y/o sería usado para procesos industriales. Sería necesario quemar menos combustible, lo cual se traduciría en menos emisiones.

Varias tecnologías puede usarse para esta *producción combinada de calor y electricidad* (CHP), incluyendo células de combustible, micro turbinas, motores Stirling, y nuevos motores de alta eficacia. Por varias de razones, las células de combustible son lo más interesante. Son silenciosas, no emiten casi contaminación al medio ambiente, son modulares así que pueden ser lo bastante pequeñas para cargar un ordenador portátil o lo bastante grandes como para abastecer de energía según la escala de utilidad, y tienen el potencial para ser más eficientes que la electricidad generada quemando combustibles. Dadas estas características, las células de combustible pueden situarse en lugares donde ninguna central eléctrica convencional se lo permitiría, en cuyo caso el calor residual de la célula a menudo puede destinarse a cubrir las necesidades de estos lugares. Haciendo cogeneración², la eficacia global de las células de combustible pueden llegar a alcanzar un 80 o 85%.

La Figura 7.36 muestra los tres procesos cruciales en un sistema de células de combustible completo, incluyendo un reformador que deshace el hidrógeno del gas natural, el paquete de células de combustible, y un acondicionador de electricidad para convertir la DC de electricidad de las células de combustible en AC. Para altas temperaturas las células de combustible, como las de óxido sólido (SOFC) y quizá células de carbonato líquido (MCFC), la reforma puede hacerse internamente sin un procesador separado de combustible. Los polímeros sólidos de las células PEM tienen una eficiencia eléctrica del 35 al 40%, mientras los sistemas SOFC y los MCFC pueden exceder el 50% de eficiencia eléctrica.

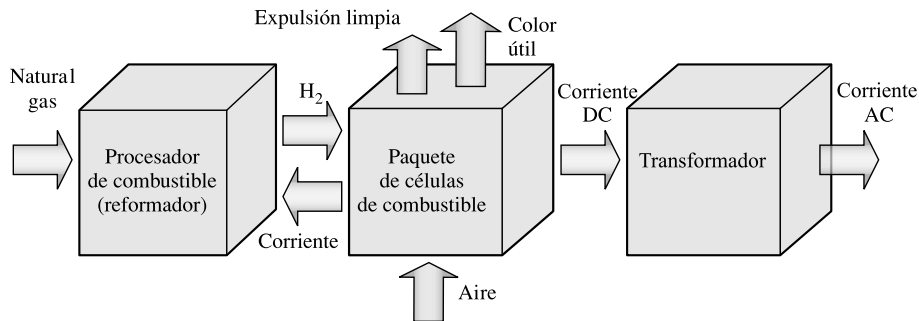


FIGURA 7.36. Sistema de células de combustible que incluyen un reformador para liberar H₂ del gas natural, el paquete de células de combustible, y un convertidor de corriente de DC a AC.

Para tener una idea de las mejoras en eficacia que ofrecen los sistemas CHP, la Figura 7.37 muestra un ejemplo donde una unidad con eficacia eléctrica del 35% y un rendimiento térmico del 50% se compara con una caldera separada que suma calor útil a la electricidad que se envía a la red de suministro. El sistema separado requeriría 180 unidades de energía de combustible para ceder la misma cantidad de calor y electricidad que un sistema CHP cedería con simplemente 100 unidades. Esto supone un ahorro de combustible del 44%.

² Nota del traductor: La cogeneración o producción combinada de calor y electricidad, (CHP) es el uso de un motor térmico o de una central eléctrica para generar simultáneamente electricidad y calor útil.

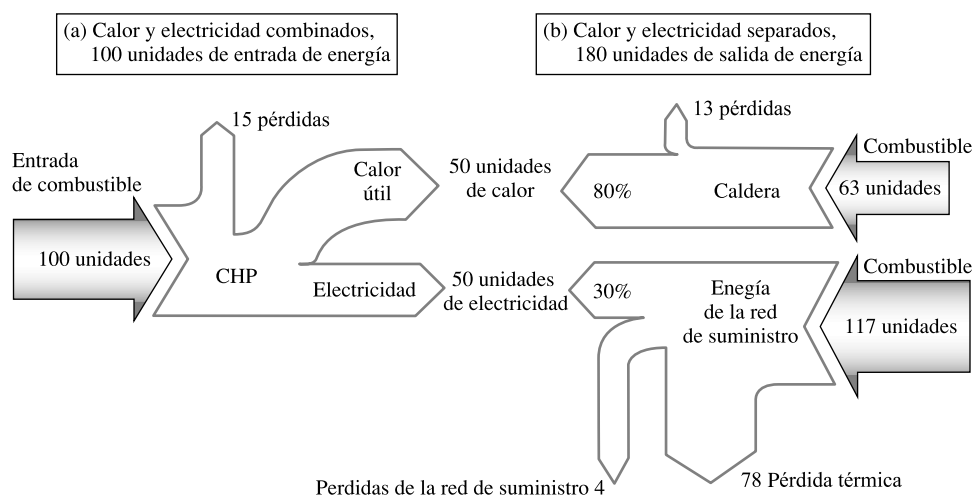


FIGURA 7.37. En este ejemplo, el mismo sistema CHP provee de calor y electricidad con 100 unidades de combustible en lugar de con las 180 unidades que serían necesarias en un sistema separado.

7.10. Contaminación ambiental y meteorológica

Obviamente, la calidad del aire en un lugar dado puede diferir tremendamente de un día para otro si bien las emisiones pueden permanecer relativamente constantes. Los factores determinantes tienen que ver con el clima: ¿Cómo son de fuertes los vientos?, ¿qué dirección tienen al soplar?, ¿cuál es el perfil de temperatura?, ¿cuánta luz del sol está disponible?, y ¿cuánto tiempo hace que los últimos vientos fuertes o precipitaciones pudieron aclarar la atmósfera? La calidad del aire depende de la dinámica de la atmósfera, el estudio de la cual se llama meteorología.

La tasa de lapso adiabático

La facilidad con la que los contaminantes pueden dispersarse verticalmente en la atmósfera viene determinada en gran medida por el cambio de temperatura del aire con la altitud. Para algunos perfiles de temperatura, el aire es *estable*, es decir, el aire a una altitud dada recibe la acción de ciertas fuerzas físicas que le marca el límite para quedar en esa elevación. El aire estable actúa contra la dispersión y la disolución de contaminantes. Para otros perfiles de temperatura, el aire es *inestable*. En este caso, tiene lugar una rápida mezcla vertical que alienta a la dispersión de contaminantes e incrementa la calidad del aire. Obviamente, la estabilidad vertical de la atmósfera es un factor importante que determina la habilidad de la atmósfera para disolver las emisiones; por lo tanto, es crucial para la calidad del aire.

Investiguemos la relación entre la temperatura y la estabilidad atmosférica. Es habitual imaginar una «parcela» de aire con un número de moléculas determinado rodeadas por una barrera imaginaria alrededor de ellas. Si esta parcela de aire asciende en la atmósfera, experimentará menos presión, se dilatará y enfriará. Por otra parte, si se mueve hacia abajo, tendrá más presión que comprimirá el aire, y su temperatura aumentará. Este calentamiento o

enfriamiento de un gas cuando se comprime o expande debería ser un concepto familiar. Inflationando una rueda de una bicicleta, por ejemplo, se calienta la válvula en la llanta; vaciar el contenido de un atomizador a presión deja al contenido expandirse y se enfría, enfriando exactamente igual nuestro dedo.

Como punto de partida, necesitaremos una relación para la tasa de cambio de temperatura de una parcela de aire cuando asciende o baja dentro de la atmósfera. Como se mueve, podemos imaginar como cambia su temperatura, su presión, y su volumen, y podríamos imaginar si su entorno añade o sustrae energía de la parcela. Si hacemos pequeños cambios en estas cantidades, y le aplicamos la ley de los gases ideales y la primera ley de la termodinámica, es relativamente exacto determinar la siguiente expresión (véase Problema 7.28):

$$dQ = C_p dT - V dP \quad (7.37)$$

donde

dQ = El calor añadido a la parcela por unidad de masa (J/kg).

C_p = El calor específico del aire a presión constante; Es decir, la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de 1 kg de aire 1 °C mientras la presión se mantiene constante (= 1.005 J/kg-K).

dT = Incremento del cambio de temperatura (K).

V = El volumen por unidad de masa (m³/kg).

dP = Incremento del cambio de presión en la parcela (Pa).

Hagamos una suposición muy precisa, cuando la parcela se mueve no hay transferencia de calor a través de su frontera; es decir, este proceso es adiabático. Esto quiere decir que $dQ = 0$, así es que podemos reacomodar (7.37) como

$$\frac{dT}{dP} = \frac{V}{C_p} \quad (7.38)$$

La Ecuación (7.38) nos da una indicación de cómo cambiaría la temperatura atmosférica con la presión, pero lo que realmente nos interesa es cómo cambia con la altitud. Para hacer esto, necesitamos saber cómo se relacionan la presión y la altitud.

Consideremos una columna estática de aire de corte transversal A , como se muestra en la Figura 7.38. Una sección horizontal del aire en esta columna de espesor dz y densidad ρ tendría una masa $\rho A dz$. Si la presión en la parte superior de la sección, debido al peso del aire por encima de ella, es $P(z + dz)$, entonces la presión en la base de la sección, $P(z)$, será $P(z + dz)$ más el peso añadido por unidad de área de la misma sección:

$$P(z) = P(z + dz) + \frac{g\rho A dz}{A} \quad (7.39)$$

donde g es la constante de gravitación. Podemos escribir el incremento de presión, dP , para un cambio en el incremento de la elevación, dz , como:

$$dP = P(z + dz) - P(z) = -g\rho dz \quad (7.40)$$

Expresando la tasa de cambio de la temperatura con respecto a la altitud como un producto y sustituyendo en (7.38) y (7.40) da

$$\frac{dT}{dz} = \frac{dT}{dP} \cdot \frac{dP}{dz} = \left(\frac{V}{C_p}\right)(-g\rho) \quad (7.41)$$

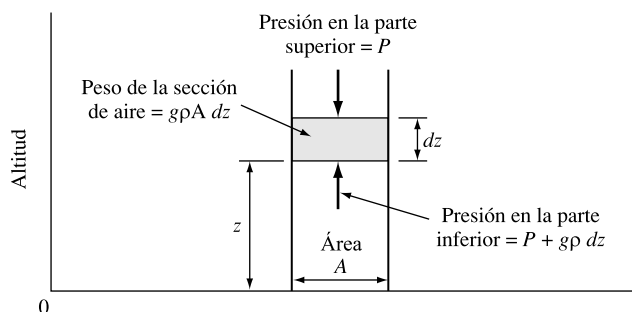


FIGURA 7.38. Una columna de un aire en equilibrio estático se usa para determinar la relación entre la presión atmosférica y la altitud.

Sin embargo, ya que V es el volumen por unidad de masa, y ρ es la masa por unidad de volumen, el producto $V\rho = 1$, y simplificando (7.41) obtenemos

$$\frac{dT}{dz} = \frac{-g}{C_p} \quad (7.42)$$

El signo negativo señala que la temperatura decrece cuando aumenta la altitud. Sustituyendo la constante $g = 9,806 \text{ m/s}^2$, y la constante volumétrica del calor específico del aire seco en la temperatura de la parcela, $C_p = 1.005 \text{ J/kg-K}$, en (7.42) obtenemos

$$\frac{dT}{dz} = \frac{-9,806 \text{ m/s}^2}{1.005 \text{ J/kg-K}} \times \frac{1 \text{ J}}{\text{kg-m}^2/\text{s}^2} = -0,00976 \text{ K/m} \quad (7.43)$$

Este resultado es de suma importancia. Cuando variamos su signo para hacer las cosas sencillas, $-dT/dz$ recibe un nombre especial, *tasa de lapso adiabático seco*, Γ_d

$$\Gamma_d = -\frac{dT}{dz} = 9,76 \text{ }^\circ\text{C/km} = 5,4 \text{ }^\circ\text{F/1.000 ft} \quad (7.44)$$

La Ecuación 7.44 nos dice que el movimiento de una masa de aire seco arriba o abajo causará un cambio de temperatura de $9,76 \text{ }^\circ\text{C/km}$, casi $10 \text{ }^\circ\text{C/km}$. Esta temperatura tipo será utilizada como referencia para comparar los gradientes de la temperatura ambiental real del aire. Como veremos, si la temperatura real del aire decrece más rápido con el incremento de altitud que la tasa de lapso adiabático, el aire será inestable y se mezclará rápidamente y tendrá lugar la disolución de contaminantes. Inversamente, si la temperatura real del aire cae más lentamente que la tasa de lapso adiabático, el aire será estable y los contaminantes se concentrarán en el aire.

La Ecuación (7.44) fue obtenida asumiendo que nuestra masa de aire podría ser tratada como un gas ideal que podía moverse de un lado para otro en la atmósfera sin ninguna transferencia de calor entre ella y su entorno. Ambas suposiciones son muy buenas. También asumimos que el aire era seco, pero esto puede no ser una suposición tan buena. Si el aire contiene algo de vapor de agua, C_p cambia ligeramente del valor asumido pero no lo suficiente como para garantizar una corrección. Por otra parte, si está presente bastante vapor de agua sobreviene la condensación cuando la masa se eleva y se enfría, el calor latente se liberará. La adición de calor produce la saturación del aire de masa, no se enfriará tan rápidamente como una seca. A diferencia de la tasa adiabática seca, la *tasa de lapso*

adiabático saturado (Γ_s) no es una constante ya que la cantidad de humedad que el aire puede mantener antes de que comience la condensación está en función de la temperatura. Un valor medio razonable de la tasa adiabática húmeda en la troposfera es $6^\circ\text{C}/\text{km}$. La Figura 7.39 muestra la tasa adiabática seca y la saturada.

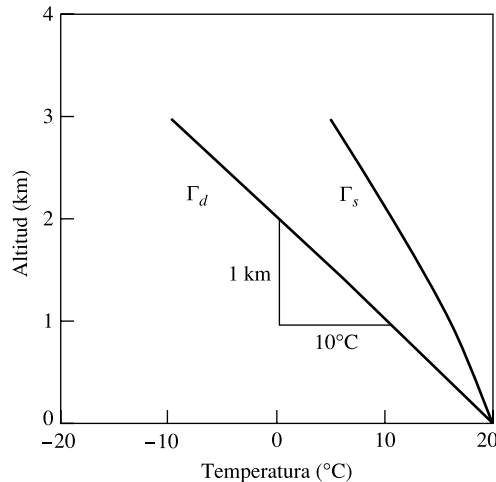


FIGURA 7.39. La tasa adiabática seca Γ_d es una constante con un valor de $10^\circ\text{C}/\text{km}$, pero la tasa adiabática saturada Γ_s difiere con la temperatura. En la troposfera, Γ_s es aproximadamente $6^\circ\text{C}/\text{km}$.

EJEMPLO 7.10. ¿El aire condiciona a los aviones a gran altitud?

Un avión vuela a una altitud de 9 km (30.000 ft) la temperatura del aire que ventila la cabina es de -40°C . Si comprimimos ese aire a la presión existente al nivel del mar, ¿necesitaríamos calentar o enfriar ese aire para que entrara en la cabina a 20°C ?

Solución. Como el aire se comprime, se calienta. Como se calienta, es aún más fácil para el aire contener cualquier tipo de humedad que pueda haber retenido, así es que no hay que preocuparse por la condensación, y podemos utilizar la tasa del lapso adiabático seco. A 10°C por km, la compresión elevará la temperatura del aire en $10 \times 9 = 90^\circ\text{C}$, luego $-40^\circ\text{C} + 90^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$ (122°F). ¡Necesitaríamos enfriar el aire!

La estabilidad atmosférica

Nuestro interés en las tasas de lapso se basa en la necesidad de comprender la estabilidad atmosférica, ya que es un factor crucial en la capacidad de la atmósfera para disolver la contaminación del medio ambiente. Hay varios factores, como la velocidad del viento, la luz del sol, y las características geográficas, que causan la actual *tasa de lapso ambiental* (Γ) en la atmósfera real para diferir $1^\circ\text{C}/100\text{ m}$ calculamos la tasa de lapso adiabática seca. Las diferencias entre la tasa de lapso ambiental y la tasa de lapso adiabático determina la estabilidad de la atmósfera.

Consideremos una masa de aire a una altitud dada. Tiene la misma temperatura y presión que el aire que la rodea. Nuestra prueba para la estabilidad atmosférica se basará en el

siguiente experimento mental. Si imaginamos que elevamos ligeramente la masa de aire, experimentará menos presión atmosférica, así es que se expandirá. Como habrá realizado un trabajo en su ambiente (expandiéndose), la energía interna en la masa se reducirá, así es que su temperatura descenderá. Asumiremos que la masa se eleva lo suficientemente rápido para poder ignorar cualquier transferencia de calor entre el aire circundante y la masa, el enfriamiento seguirá la tasa de lapso adiabática. Después de elevar la masa, observamos su temperatura, y la comparamos con la temperatura del aire circundante. Si la masa, a esa altitud superior, está más fría que su entorno, será más densa que el aire circundante y querrá descender de nuevo. Es decir, lo que sea que haya causado que la masa comience a moverse hacia arriba será lo que se opondrá inmediatamente a las condiciones que hacen que la masa vuelva a bajar otra vez. Entonces decimos que la atmósfera es estable.

Sin embargo, si al elevar la masa causamos que su temperatura sea mayor que el aire que la rodea, será menos densa que el aire circundante y experimentará fuerzas de empuje que la alentarán a mantenerse en movimiento hacia arriba. El movimiento original hacia arriba se verá reforzado, y la masa continuará ascendiendo. Esta atmósfera se dice que es *inestable*.

Consideremos la Figura 7.40(a), la cual muestra un perfil ambiental de temperaturas para el aire que se enfría más rápidamente con la altitud que la tasa de lapso adiabática seca. En este caso, se dice que la de temperatura ambiental del aire es *superadiabática*. Imagine una masa de aire a 20°C a 1 km de altura que está a la misma temperatura que el aire que la rodea. Si esa masa la elevamos a 2 km, se enfriará adiabáticamente a 10°C . La masa de aire a 10°C a 2 km está ahora más caliente que el aire circundante (0°C en la figura), así es que es menos densa, flota más, y quiere mantenerse elevada («el aire caliente sube»). En otras palabras, empujar la masa de aire hacia arriba en una atmósfera superadiabática crea fuerzas que quieren mantener el movimiento ascendente. Inversamente, una masa de aire a 1 km que es empujada hacia abajo estará más fría que el aire que la rodea, y entonces se mantendrá abajo. No tiene importancia si la masa de aire es la que se aproximó hacia arriba o hacia abajo; en cualquier caso, se mantiene el movimiento sin detenerse, y la atmósfera se dice que es inestable.

En la Figura 7.40(b), el perfil de temperatura ambiental se crea para el caso subadiabático en el cual la temperatura ambiental se enfría menos rápidamente que la tasa de lapso adiabático. Si de nuevo imaginamos una masa de aire a 1 km y 20°C que es, por una u otra razón, elevada, se encontrará más fría que el aire circundante. En su nueva elevación, experimenta la misma presión que el aire de su alrededor, pero como está más fría, será más densa y se hundirá de nuevo. Inversamente, una masa empezando a 1 km y 20°C que comienza a moverse hacia abajo se volverá más caliente, y menos densa que su entorno, así es que las fuerzas de flotabilidad lo empujarán hacia arriba otra vez. En otras palabras, cualquier cosa que empiece a mover una masa de aire hacia arriba o hacia abajo causará que la masa experimente fuerzas que querrán que ésta vuelva a su altitud original. El perfil atmosférico subadiabático es por consiguiente estable.

Si la tasa de lapso ambiental es igual a la tasa de lapso adiabático, el movimiento de la masa hacia arriba o hacia abajo provocará un cambio de temperatura en la misma medida en que cambia el aire que la rodea. En cualquier nueva posición, esta experiencia no fuerza que continúe su movimiento o que le haga querer regresar a su elevación original. A la masa le gustaba donde estaba, y le gusta también su nueva posición. Cuando una atmósfera hace esto se la llama neutralmente estable.

La Figura 7.40 muestra una atmósfera seca, es decir, cuando una masa asciende, el aire permanece insaturado, no hay condensación de humedad, y se enfría a $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Si la

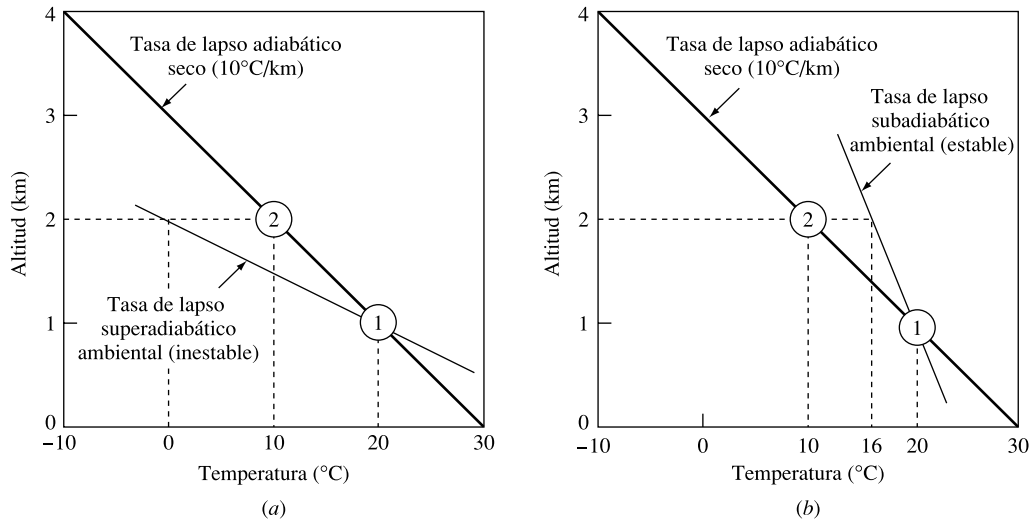


FIGURA 7.40. Demostrando la estabilidad atmosférica en una atmósfera seca. Cuando una masa de aire de 20 °C a 1 km (posición 1) avanza a 2 km (posición 2), su temperatura desciende a 10 °C (siguiendo la tasa de lapso adiabático seco). En (a) la masa de aire creado a 2 km está más caliente que el aire del ambiente circundante, así es que la masa se eleva (inestable). En (b) la masa a 2 km está más fría que el ambiente, así es que se hunde de nuevo (estable).

condensación ocurre, la tasa de lapso adiabático desciende alrededor de 6 °C/km y esto determina la condición de estabilidad neutra. La Figura 7.41 muestra un resumen de cómo las tasas de lapso determinan la estabilidad atmosférica. Si la tasa de lapso ambiental muestra una tasa de enfriamiento más rápida que la tasa de lapso adiabático seco, la atmósfera es *absolutamente inestable*. El aire siempre querrá conseguir una altitud nueva, así es que la dispersión vertical de la contaminación del medio ambiente aumentará. Para temperaturas

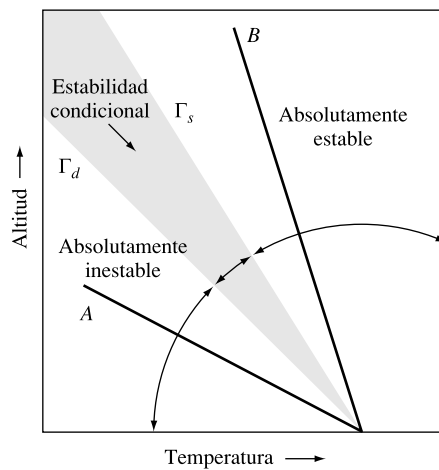


FIGURA 7.41. Las atmósferas en las que el perfil de temperatura ambiental se enfría más rápidamente que el lapso adiabático seco (Γ_d), como el de la curva A, son absolutamente inestables. Si las temperaturas ambientales descienden más lentamente que la tasa de lapso adiabático saturada, como B, la atmósfera es absolutamente estable. Entre las dos curvas se crea una región de estabilidad condicional.

ambientales que se enfrían más lentamente que la tasa de lapso adiabática saturada o húmeda, la atmósfera es *absolutamente estable*. Este aire quiere quedarse donde está. Para las tasas de lapso ambiental que quedan entre las tasas de lapso adiabáticas secas y húmedas, la atmósfera puede ser estable o inestable; no podemos decirlo sin conocer el perfil real de la temperatura ambiental y el perfil adiabático real. A esa región la definimos como *estabilidad condicional*.

Un caso extremo de tasa de lapso subadiabática es aquel en el que las temperaturas ambientales se incrementan con la altitud. Dicho *cambio o inversión de temperaturas* crea una masa de aire muy estable y la contaminación ambiental tiende a permanecer atrapada allí. En el Capítulo 8, «Cambio climático», será notable que el calentamiento causado por la absorción de energía solar entrante por el oxígeno y el ozono en las capas superiores de la atmósfera crea una inversión estratosférica de temperatura. Esa inversión causa que la estratosfera sea sumamente estable, a menudo atrapando contaminantes durante muchos años.

Las inversiones de temperatura

Las inversiones de temperatura representan un caso extremo de estabilidad atmosférica, creando una tapa virtual en el movimiento ascendente de la contaminación ambiental. Hay varios tipos de inversiones, pero las más importantes desde un punto de vista de la calidad del aire son dos, las *inversiones por radiación* y las *inversiones por hundimiento*. Las inversiones por radiación están causadas por el enfriamiento nocturno de la superficie de la Tierra, especialmente en las claras noches de invierno. Las segundas, las inversiones por hundimiento, son el resultado del calentamiento por compresión de masas de aire que descienden en zonas de altas presiones. Hay otras inversiones, menos importantes, como las *inversiones frontales*. Las inversiones frontales se crean cuando una masa de aire fría pasa bajo una masa de aire caliente, pero éstas duran poco y tienden a estar acompañadas de precipitaciones que limpian el aire. Hay también inversiones asociadas a las características geográficas del paisaje. El aire caliente que pasa por encima de una extensión de agua fría, por ejemplo, crea una inversión. Hay también inversiones en valles cuando el aire frío corre debajo de los cañones por la noche bajo el aire más caliente que podría existir en las cimas.

Las inversiones por radiación. La superficie de la tierra se enfría por la noche irradiando energía al espacio. En una noche nublada, la radiación de la Tierra tiende a ser absorbida por el vapor de agua, que a su vez irradia una cierta cantidad de esa energía de regreso a la tierra. En una noche clara, sin embargo, la superficie irradia más fácilmente energía hacia el espacio, y el enfriamiento ocurre bastante más rápidamente. Como la tierra se enfría, la temperatura del aire en contacto con la tierra también desciende. Este es el caso más corriente en las noches claras de invierno, la temperatura de este aire justo encima de la tierra se vuelve más frío que el aire por encima de ella, creando una inversión.

Las inversiones por radiación comienzan a formarse durante el crepúsculo. A medida que la tarde progresa, la inversión se va extendiendo cada vez más hasta alcanzar cierta elevación, llegando quizá a varios centenares de metros antes de que el sol de la mañana caliente la tierra otra vez, rompiendo la inversión. La Figura 7.42 muestra el desarrollo de una inversión por radiación hasta el final de la noche, seguida por la erosión de la inversión que tiene lugar al día siguiente.

Las inversiones por radiación ocurren cerca de la tierra, en su mayor parte durante el invierno, y sólo durante unas cuantas horas. A menudo comienzan cuando empieza el tráfico al inicio de la tarde, lo que conlleva la absorción automática de las expulsiones de los tubos de escape a ras de tierra y causa elevadas concentraciones de contaminación para los viaje-

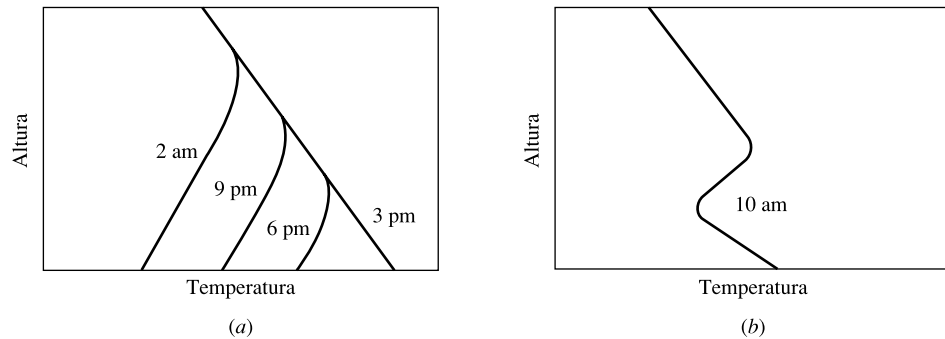


FIGURA 7.42. Desarrollo de una inversión por radiación (a), y la subsiguiente erosión de la inversión (b). Los tiempos son solo representativos. La desintegración de la inversión por la mañana conduce a un proceso denominado fumigación durante el cual la contaminación a ras de tierra puede aumentar rápidamente.

ros. Sin la luz del sol, las reacciones fotoquímicas no tienen lugar, así es que el problema más grande es habitualmente la acumulación de monóxido de carbono (CO). Por la mañana, como el sol calienta la tierra y la inversión comienza a producirse, los contaminantes que han estado atrapados en la masa de aire estable son repentinamente traídos de vuelta a la Tierra en un proceso conocido como *fumigación*. La fumigación puede causar altas concentraciones de contaminación, de breve duración, a ras de tierra.

Las inversiones por radiación son importantes en otros contextos, además de la contaminación del aire. Los cultivadores de frutas en lugares como California desde hace mucho tiempo saben que sus cultivos corren mucho peligro por el daño que causa la escarcha en las noches de invierno cuando los cielos son claros y se produce una inversión por radiación. Ya que el aire a pocos metros de altura está más caliente que el aire a nivel del cultivo, una forma para ayudar a proteger estos sensibles cultivos en tales noches es, simplemente, mezclar el aire con ventiladores accionados por grandes motores.

Las inversiones por hundimiento. Mientras las inversiones por radiación se dan en su mayor parte a nivel del suelo, durante periodos breves, en fenómenos invernales, la otra causa importante de inversiones, el hundimiento, se crea realmente con características opuestas. Las inversiones por hundimiento pueden tener lugar en sitios elevados, pueden durar meses, y pueden ser más comunes en verano que en invierno.

Las inversiones por hundimiento están asociadas con sistemas climáticos de altas presiones, conocidos como *anticiclones*. El aire del medio de una zona de altas presiones desciende, mientras que el de los bordes, se eleva. El aire cerca de la tierra se mueve hacia afuera desde el centro, mientras el aire de la parte superior se mueve hacia el centro desde los bordes. El resultado es un macizo sistema de circulación vertical. Como el aire del centro del sistema desciende, experimenta mayor presión y se comprime y calienta. Si su temperatura de elevación z_1 es T_1 , entonces cuando desciende a z_2 , se calentará adiabáticamente a $T_2 = T_1 + \Gamma d(z_1 - z_2)$, como se muestra en la Figura 7.43. Como a menudo es el caso, este calentamiento compresivo calienta el aire descendente a una temperatura superior de la que debería tener, dicha temperatura viene dictada primordialmente por las condiciones del terreno.

Ya que el aire hundido se calienta cuando desciende, puede soportar mayor cantidad de vapor de agua sin tener que condensarse. A menos que haya nuevas fuentes de humedad, su humedad relativa desciende, y allí es poco probable que se formen nubes. El resultado es

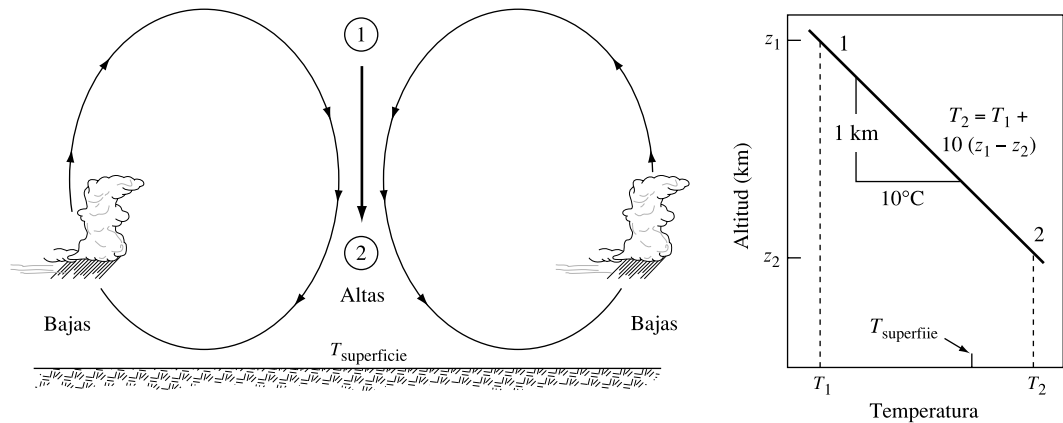


FIGURA 7.43. Al descender el aire se calienta a 10 °C/km por compresión. Es común que este hundimiento cálido cree condiciones más tibias en altura que cerca de la superficie, lo que causa una inversión de temperaturas. Los cielos claros son típicos en regiones de altas presiones mientras que los cielos nublados y las precipitaciones son comunes en áreas de bajas presiones.

que las zonas de altas presiones crean un clima claro y seco, con muchos rayos de sol durante el día y cielos despejados durante la noche. Los cielos claros durante el día permiten que el sol caliente la superficie de la Tierra, lo cual a menudo crea condiciones superadiabáticas bajo la inversión. El resultado del hundimiento y calentamiento es una inversión localizada aproximadamente desde varios centenares a varios miles de metros por encima de la superficie, esto persiste a lo largo del sistema de altas presiones. Durante la noche, la superficie puede enfriarse rápidamente por radiación, lo cual puede dar como resultado una inversión por radiación localizada bajo la inversión por hundimiento, como se muestra en la Figura 7.44.

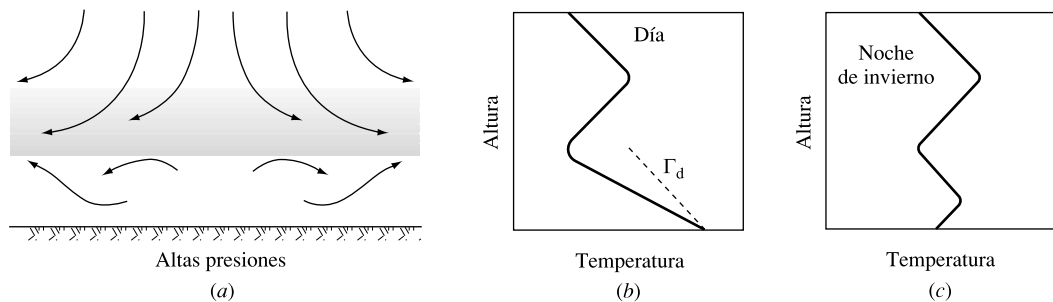


FIGURA 7.44. El descenso del aire causa la inversión por hundimiento (a). Durante el día el aire bajo la inversión puede ser inestable debido al calentamiento de la superficie terrestre por los rayos de sol (b). La inversión por radiación puede formarse bajo la inversión por hundimiento cuando las noches son claras, especialmente en invierno (c).

Algunos anticiclones y sus consiguientes inversiones por hundimiento se mueven a la deriva a través de los continentes (de oeste a este en altitudes medias del norte) así puede parecer que van y vienen de algún lugar con cierta frecuencia. Por otra parte, otros anticiclones son semi-permanentes en la naturaleza y pueden causar inversiones por hundimiento que duren durante meses. Estos altos semi-permanentes son el resultado de los patrones generales de circulación atmosférica mostrados en la Figura 7.45.

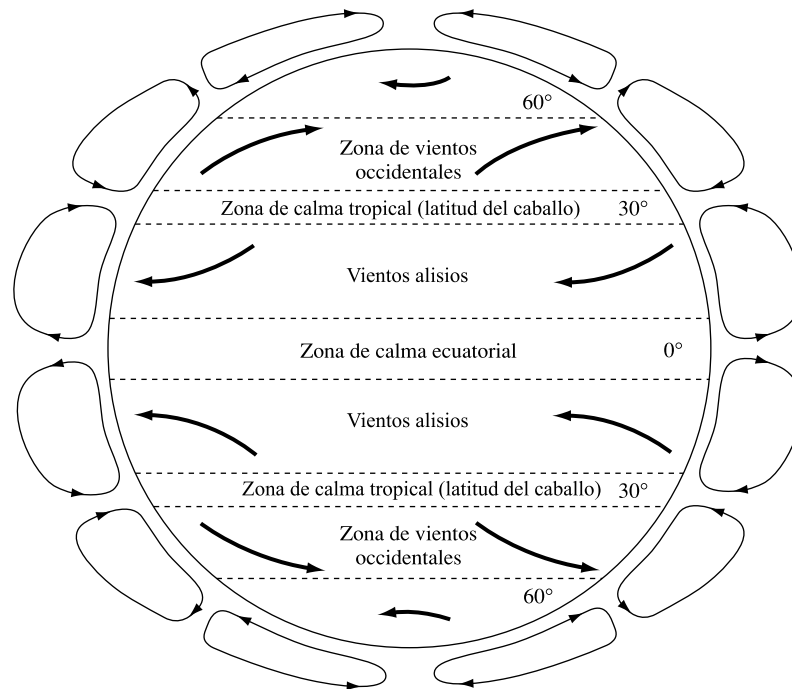


FIGURA 7.45. Comportamiento ideal del patrón de circulación del aire en el equinoccio. Las zonas de altas presiones son comunes alrededor de los 30° de latitud produciendo cielos claros e inversiones por hundimiento.

En el equinoccio, el ecuador está directamente bajo el sol, y allí el aire se calentará, comenzará a flotar y se levantará. Cuando ese aire se acerque a la parte superior de la troposfera (apenas 10 o 12 km), comenzará a girar, parte de la cabecera al norte y parte al sur. Un meteorólogo del siglo dieciocho, George Hadley, postuló que el aire continuaría hacia los polos antes de descender. En realidad, descienden a una latitud de aproximadamente 30° y luego regresan al ecuador, formando las llamadas *células de Hadley*. De modo similar, sin embargo no está muy bien definido, hay otras células conectadas como en una cadena, entre la latitud 30° y la 60° , y entre 60° y los polos. El aire descendente a los 30° de latitud crea una persistente zona de altas presiones con su correspondiente falta de nubes o lluvia, factor que contribuye a la creación de los grandes desiertos del mundo. Los desiertos del sur de California, los del suroeste de Estados Unidos, el Sahara, el desierto chileno, el Kalahari en el sur de África, y los grandes desiertos de Australia, están todos localizados a aproximadamente 30° de latitud por esta razón. Por el contrario, el aire que se levanta junto al ecuador y cerca de los 60° de latitud tiende a estar húmedo después de pasar por encima de los océanos. Cuando se enfría, la humedad se condensa, dando lugar a las nubes y a la lluvia. Por esta razón, algunas de las regiones más húmedas de mundo están en esas bandas de latitud.

El aire que avanza por la superficie de la Tierra cerca de las células de Hadley se ve afectado por las fuerzas de Coriolis, obligándole a girar hacia el oeste si se mueve hacia el ecuador o hacia el este si se mueve hacia los polos. Los vientos resultantes entre 30° y 60° son conocidos como los vientos del oeste, y entre los 30° y el ecuador son los *vientos alisios*. Acercándose al ecuador, hay poco viento ya que el aire en su mayor parte se eleva. Esa banda se llama *zona de calma ecuatorial*. De modo semejante, la superficie del aire está relativamente en calma alrededor de los 30° de latitud, formando una banda llamada latitud

del caballo. (Aparentemente los primeros marineros exploradores se encontraron atrapados en un mar en calma y sin viento que hinchaba las velas, por lo que se vieron obligados a arrojar los caballos por la borda a fin de conservar el agua y la comida, a la vez que aligeraban la carga para poder llegar al Nuevo Mundo).

Todas estas importantes bandas de latitud, zonas de calma, latitud del caballo, zonas de altas y bajas presiones, se mueven arriba y abajo del globo con el cambio de estaciones. La Figura 7.45 muestra los patrones globales de circulación en un equinoccio, cuando el sol se sitúa directamente sobre el ecuador. En verano en el Hemisferio Norte, el sol se mueve hacia el norte, como lo hacen las persistentes zonas de altas y bajas presiones que se asocian con estas bandas. Hay, por ejemplo, una zona de altas presiones a las afueras de la costa de California que se mueve sobre Los Ángeles (latitud 34°) y San Francisco (latitud 38°) en primavera, y permanece allí hasta la caída de las hojas. Esa es la razón principal del clima soleado de California, y también de su *smog*. Los cielos claros aseguran bastante luz del sol para impulsar reacciones fotoquímicas, la falta de lluvia elimina el mecanismo atmosférico de purificación, y las inversiones por hundimiento prolongadas concentran los contaminantes. En el caso de Los Ángeles, hay también un anillo de montañas alrededor de la ciudad que tiende a protegerla de los vientos que expulsarían el *smog*. En invierno en el Hemisferio Norte, el sol está directamente sobre algún lugar en el Hemisferio Sur, y las bandas se desplazan hacia el sur.

Los patrones globales de circulación de la Figura 7.45 están, claro está, idealizados. Las interacciones entre el mar y la tierra, los efectos de las tormentas y otros disturbios pasajeros, u otras características geográficas como las cadenas de altas montañas marcan este modelo, útil únicamente a gran escala. Pero incluso un modelo global simplificado, ayuda a explicar varias características significativas del clima del mundo y algunos aspectos de los problemas de contaminación atmosférica de algunas regiones.

La estabilidad atmosférica y la profundidad de la mezcla

La estabilidad atmosférica es importante porque determina la habilidad de los contaminantes para dispersarse verticalmente en la atmósfera. Ya sabemos que los estratos de la atmósfera tienen características de estabilidad que dependen de su tasa de lapso local en comparación con la tasa de lapso adiabático. Ese cuadro está incompleto, sin embargo, y debemos introducir otro concepto experimental antes de que podamos estar seguros de las consecuencias de las tasas de lapso local.

Consideremos el perfil de temperaturas de la Figura 7.46(a) y, por el momento, asumamos que el aire está seco, así que no tenemos que preocuparnos por la diferencia entre las tasas de lapso secas y saturadas. Si consideramos sólo las tasas de lapso, el tramo de aire desde tierra hasta 0,5 km es superadiabático, y debería ser etiquetado como «inestable»; El estrato desde 0,5 a 1,5 km es superadiabático y sería «estable»; y el estrato por encima de 1,5 km tiene una tasa de lapso igual para la tasa de lapso adiabática seca de $10^\circ\text{C}/\text{km}$ y la llamamos «neutral». Llamaremos a esto clasificación de estabilidad «local».

Ahora consideremos las tres masas de aire, etiquetadas como 1, 2 y 3, de la Figura 7.46(b). Si por alguna razón una de estas masas empieza a ascender o descender, su temperatura cambiará a $10^\circ\text{C}/\text{km}$. Después de imaginar que la masa se ha movido, comparemos su temperatura con la temperatura del aire circundante en la nueva altitud. Si la masa está más caliente, flotará y se elevará; si está más fría que el aire circundante, será más densa y se hundirá. Con esto en mente, consideremos la masa 1. Si por alguna razón la masa 1 comienza a moverse ligeramente hacia arriba, se enfriará a la tasa de lapso adiabático

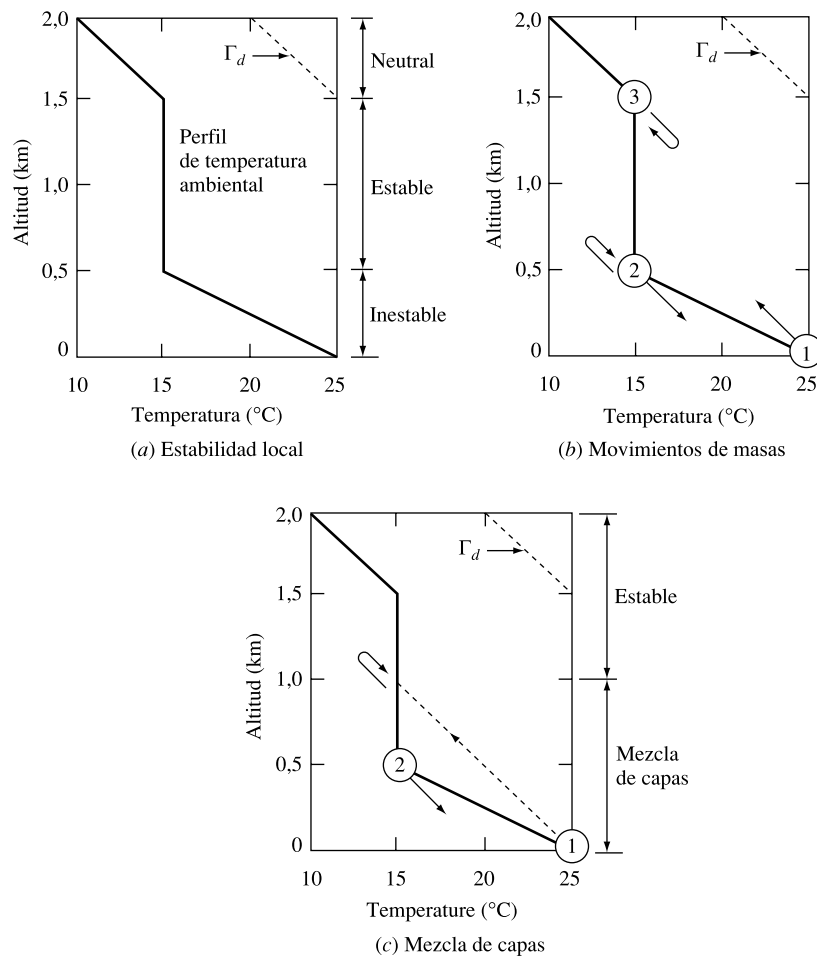


FIGURA 7.46. Ilustra la diferencia entre la estabilidad local y la estabilidad basada en la mezcla de capas. (a) Estabilidad Local determinada por las tasas de lapso; (b) las masas 1 y 2 se moverán; (c) la masa 1 se elevará a la altura de 1 km creando turbulencias y mezclándose a 1 km del nivel del suelo.

seca de $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$, haciéndola más caliente que el aire circundante, así la masa continuará elevándose. Si la masa 2 comienza a elevarse, sin embargo, se encontrará más fría que el aire circundante, así es que se hundirá de regreso a donde empezó. Si se hunde por debajo de su nivel inicial, estará más fría que el aire que la rodea y continuará hundiéndose. Si la masa 3 comienza a bajar, estará más caliente que el aire circundante y se elevará de regreso a donde estaba.

Entonces, ¿hasta que altura subirá la masa 1? Continuará elevándose mientras esté más caliente que el aire que la rodea. Como se muestra en la Figura 7.46(c), se elevará a la altura de 1 km y luego se detendrá. Si subiese más arriba de 1 km, se encontraría más fría que el aire circundante y se hundiría de regreso a 1 km. En otras palabras, el aire a 1 km del suelo realmente experimentará una mezcla turbulenta a pesar de la tasa de lapso «estable» por encima de 0,5 km.

El proceso ilustrado en la Figura 7.46 ayuda a dar sentido a la habilidad de la atmósfera para promover la disolución de contaminantes del aire. Una región de mezcla turbulenta se

identifica proyectando el ascenso de temperaturas desde la tierra hacia arriba en la tasa de lapso adiabática seca, hasta que cruza el perfil ambiental real de temperaturas. La altitud del tope de esta mezcla de capas se llama *profundidad de la mezcla* (o, algunas veces, *altura de la mezcla*).

El producto de la profundidad de la mezcla y la velocidad media del viento dentro de la profundidad de la mezcla se usa algunas veces como indicador de la capacidad de dispersión de la atmósfera. Este producto es conocido como el *coeficiente de ventilación* (m^2/s). Los valores del coeficiente de ventilación menores de aproximadamente $6.000 \text{ m}^2/\text{s}$ se consideran indicadores potenciales de alta contaminación en el aire (Portelli and Lewis, 1987).

Columnas de humo en chimeneas y tasas de lapso adiabático

El perfil de la temperatura atmosférica afecta a la dispersión de contaminantes de una chimenea, como se muestra en la Figura 7.47. Si una chimenea emitiera contaminantes a una atmósfera neutralmente estable, podríamos esperar que la columna de humo fuera relativamente simétrica, como se muestra en la Figura 7.47(a). El término usado para describir esta columna es *cono*. En la Figura 7.47(b), la atmósfera está muy inestable, y el aire experimenta un movimiento vertical rápido, tanto hacia arriba como hacia abajo, produciendo una columna ondulante. En la Figura 7.47(c), una columna de ventilación resulta cuando existe una atmósfera muy restrictiva de la dispersión en sentido vertical, aunque si hay propagación horizontal. En la Figura 7.47(d), cuando una chimenea está bajo un estrato de inversión, las emisiones se mueven hacia abajo bastante más fácilmente que hacia arriba. La *fumigación* resultante, si es a favor del viento, puede llegar a elevar mucho las concentraciones del nivel del suelo.

Cuando la chimenea está por encima de un estrato de inversión, como en la Figura 7.47(e), se cohibe la subida de la mezcla, pero el movimiento descendente se restringe mucho por la inversión del aire estable. Esta elevación ayuda a mantener la contaminación alta por encima del nivel del suelo, reduciendo la exposición de las personas que viven a favor del viento. De hecho, una propuesta común para el control de la contaminación atmosférica en el pasado ha sido construir chimeneas más altas para que emitiesen los contaminantes por encima de las inversiones. Una consecuencia desafortunada de esta propuesta, sin embargo, ha sido que los contaminantes emitidos por las altas chimeneas pueden viajar a lo largo de grandes distancias y causar efectos inesperados, como lluvia ácida, a centenas de millas de la fuente.

7.11. | Modelo gaussiano de columna de una fuente puntual

La Ley de Calidad del Aire especifica nuevos estándares para fuentes de emisiones, y especifica estándares de calidad del aire ambiental. El vínculo de conexión entre las dos es la atmósfera. ¿Cómo se comportan los contaminantes una vez que se han emitido y como podemos predecir sus concentraciones en la atmósfera? ¿Cómo pueden mostrarse las limitaciones impuestas por una política de Prevención de Deterioro Significativo para que sean satisfechas por las nuevas fuentes en un área en la que el aire reúne las condiciones estándar de calidad? ¿Cómo podemos predecir la mejora que debe alcanzarse en la calidad del aire cuando se proponen nuevas fuentes en un área que no reúne estas condiciones? Para responder a preguntas como éstas se han desarrollado modelos informáticos que utilizan datos tales

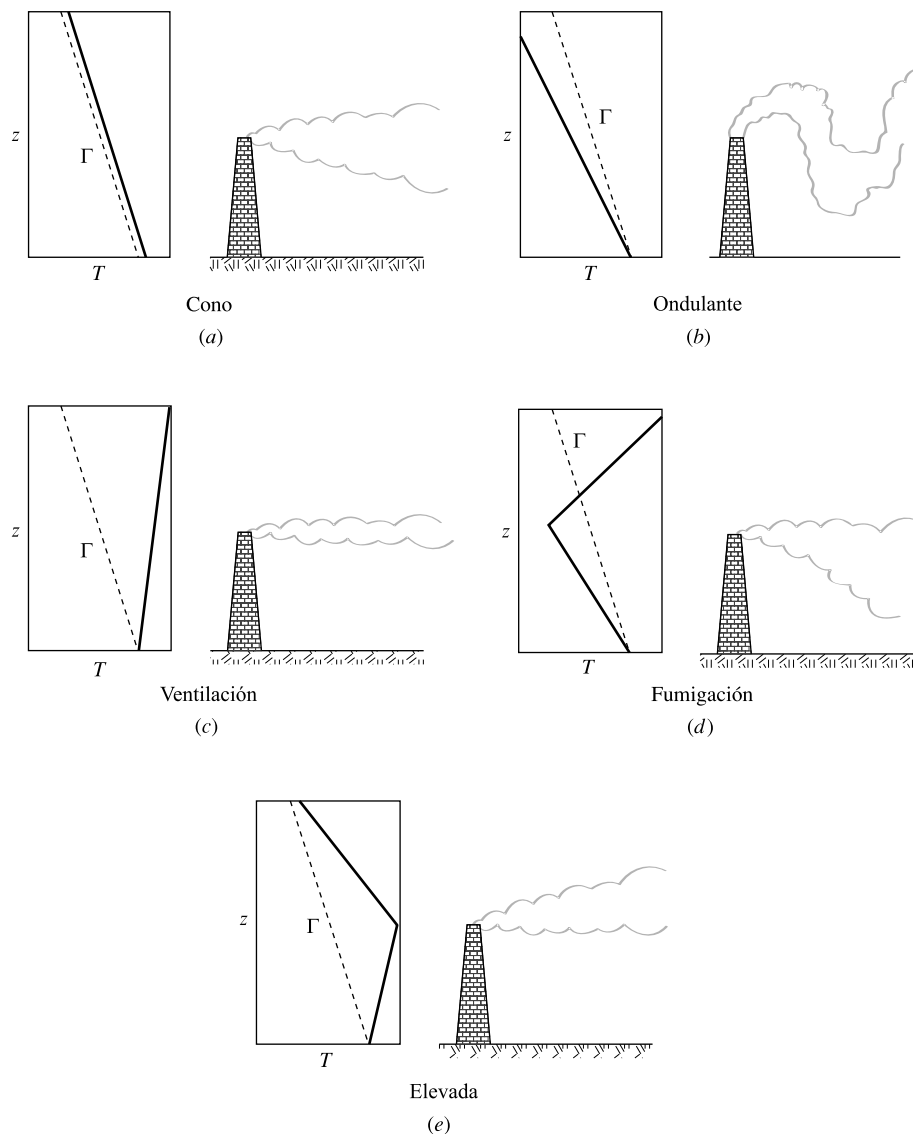


FIGURA 7.47. Efecto de la tasa de lapso atmosférico y la altura de la chimenea en el comportamiento de la columna. La línea obtenida es la tasa de lapso adiabático seco por referencia.

como la predicción de emisiones, altura de chimeneas, datos eólicos, perfiles de temperaturas atmosféricas, temperatura ambiental, insolación y características del terreno local que se expondrán en esta sección.

En el corazón de casi cualquier programa informático que trate de relacionar las emisiones con la calidad del aire figura la suposición de que la concentración media de contaminante de una fuente en la dirección del viento, puede modelarse utilizando una curva de distribución normal, o gaussiana. (Para una breve exposición de la campana de Gauss, véase la Sección 3.3). El modelo básico de dispersión de Gauss se aplica a una *fuentes puntual* (o punto de origen) como por ejemplo una chimenea, pero puede modificarse a fin de ser aplicable a una *fuentes lineal* (como por ejemplo las emisiones de los motores de los vehículos

que recorren una carretera), *fuentes dispersas* (que pueden modelarse como un gran número de fuentes puntuales).

Para comenzar, consideremos tan sólo una fuente puntual tal como la que muestra la Figura 7.48. El sistema de coordenadas se ha establecido para mostrar una sección transversal de la columna, donde l representa la dirección vertical y x la distancia en la dirección del viento desde la fuente. Si tuviéramos que observar la columna en un momento concreto, podría tener una forma irregular, como muestra el contorno ondulado de la columna. Pocos minutos después ésta podría tener una forma totalmente diferente. Si instaláramos una cámara y dejásemos el obturador abierto durante un rato, podríamos imaginar que la fotografía obtenida sería la imagen de la media del humo que circula por delante de la lente, que es exactamente lo que pretende mostrar la figura.

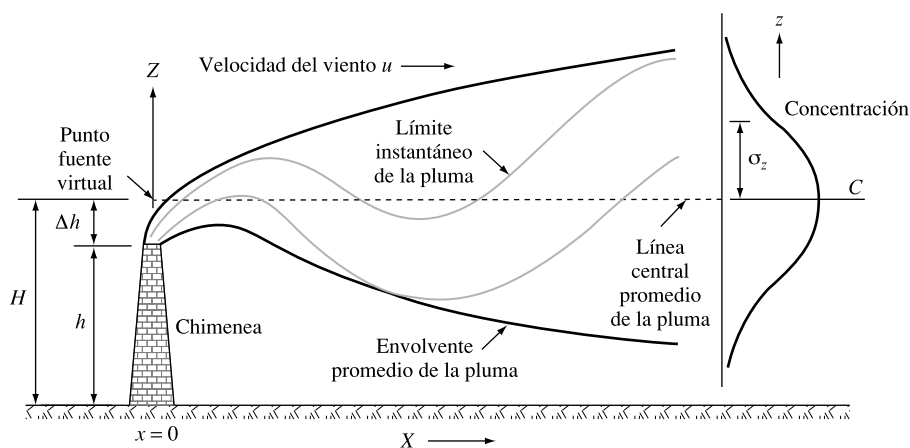


FIGURA 7.48. Límites instantáneos de la columna y tiempo medio envoltorio de la columna.

Puesto que las emisiones de humo poseen velocidad inicial creciente y flotabilidad, es posible que sea necesaria cierta distancia en la dirección del viento antes de que la columna se muestre simétrica en torno a una línea central fija. Esta línea central se establecerá un poco por encima de la altura de la columna.

La concentración más elevada de contaminación se hallaría en torno a este eje de simetría, con concentraciones decrecientes a medida que nos alejamos de éste. El modelo de columna de Gauss supone que la concentración de contaminantes obedece a una distribución normal en torno a este eje, tanto en el plano vertical, que muestra la figura, como en la dirección horizontal, que no se muestra. También trata las emisiones como si procedieran de una fuente puntual virtual junto con el eje de la columna, hasta una *altura efectiva* H .

La ecuación de dispersión de la fuente puntual gaussiana relaciona las concentraciones de contaminantes medias y de estado estacionario con la fuerza de la fuente, la velocidad del viento, la altura efectiva, y las condiciones atmosféricas. Su forma puede concluirse a partir de consideraciones básicas como la difusión gaseosa en el espacio tridimensional. En cualquier caso, la conclusión se encuentra más allá del alcance de este libro (véase, por ejemplo, Seinfeld y Pandis, 1998). Es importante tener en cuenta las siguientes suposiciones que se incorporan al análisis:

- La tasa de emisiones de la fuente es constante.
- La velocidad del viento es constante en el tiempo y con la elevación.

- El contaminante es conservativo, es decir, no se descompone por la degradación, reacciones químicas o deposición. Cuando desciende a la tierra no se absorbe y se refleja todo.
- El terreno es relativamente llano, en campo abierto.

El sistema coordinado tridimensional establecido en la Figura 7.49 tiene la chimenea en su origen, donde x representa la distancia en la dirección del viento, y representa la distancia fuera del eje del viento, y z representa la elevación. Puesto que nuestra preocupación va a tratar sólo con los receptores (personas y ecosistemas) al nivel terrestre, la forma de la ecuación de la columna de Gauss dada aquí es menos general de lo que puede ser, y se aplica sólo para $z = 0$:

$$C(x, y) = \frac{Q}{\pi u_H \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (7.45)$$

donde

$C(x, y)$ = Concentración a nivel del suelo el punto (x, y) , $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

x = Distancia, en m.

y = Distancia horizontal en m. desde el eje central de la columna.

Q = Tasa de emisión de contaminantes, $\mu\text{g}/\text{s}$.

H = Altura efectiva, en m ($H = h + \Delta h$, donde h = altura real, y Δh = elevación de la columna).

u_H = Velocidad media del viento en la altura efectiva de la chimenea, en m/s.

σ_y = Coeficiente de dispersión horizontal (desviación estándar), en m.

σ_z = Coeficiente de dispersión vertical (desviación estándar), en m.

Antes de entrar en detalles acerca de (7.45), hay diversas características que podemos considerar despreciables. La concentración de contaminantes a nivel del suelo es directa-

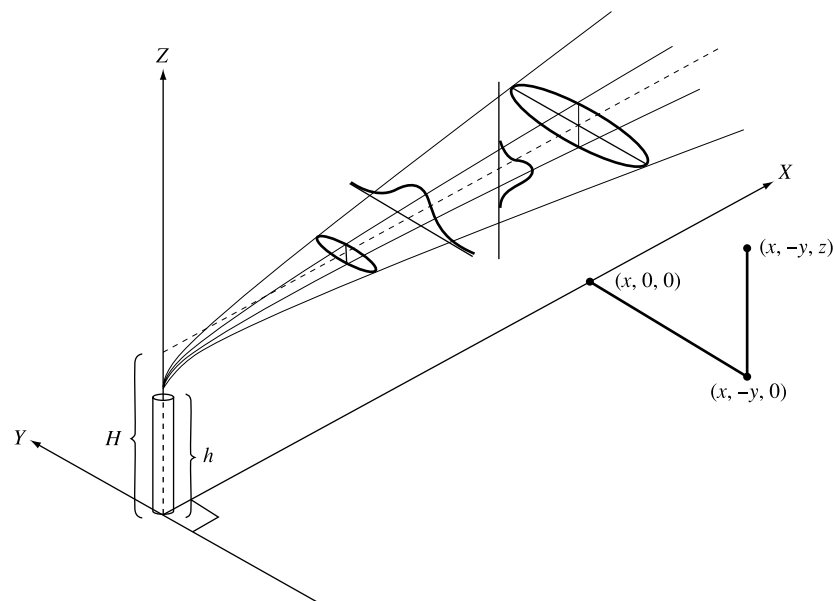


FIGURA 7.49. Sistema de coordenadas de dispersión de la columna. Muestra su distribución en las direcciones vertical y horizontal. (Fuente: Turner, 1970.)

mente proporcional a la potencia de la fuente Q , de modo que es fácil determinar cuánta reducción de fuente es necesaria para alcanzar la disminución deseada en la concentración en la dirección del viento. Las unidades de Q se han dado en microgramos de modo que las concentraciones se establecerán en los habituales microgramos por metro cúbico. La contaminación a nivel del suelo decrece cuando se utilizan chimeneas más altas, aunque la relación no es lineal. Nótese también que no hay una relación explícita entre la tasa de emisión, Q , y la distancia, x . La distancia se introducirá en la ecuación cuando σ_y y σ_z se evalúen.

La Ecuación (7.45) indica que la concentración en la dirección del viento aparenta ser inversamente proporcional a la velocidad del viento, lo cual es lo que podría concluirse intuitivamente. En realidad, la relación inversa está ligeramente modificada por la dependencia de la elevación de la columna Δh de la velocidad del viento. Velocidades más altas reducen la altura efectiva de la chimenea H , lo que evita que la contaminación a nivel del suelo caiga tanto como lo que una simple relación inversa implicaría.

Finalmente, y como punto más importante, aunque la ecuación de la columna de Gauss se basa tanto en datos y mediciones teóricos como reales, no por ello deja de ser, cuando menos, un modelo tosco. Las predicciones basadas en el modelo deberían suponerse precisas hasta un $\pm 50\%$. A pesar de esta incertidumbre es todavía muy útil, dado que goza de una aceptación universal, es fácil de usar y permite una comparación entre los cálculos efectuados mediante modelos diferentes en diversas circunstancias.

Cambios en la velocidad del viento con la elevación

La velocidad del viento empleada en (7.42), u_H , es la velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea. Habitualmente la velocidad del viento se mide con un anemómetro que se ubica a una altura de 10 metros sobre el suelo, de manera que necesitamos algún modo de relacionar la velocidad del viento a la altura del anemómetro con la velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea. La siguiente ley exponencial se utiliza con frecuencia para elevaciones inferiores a pocos cientos de metros sobre el suelo:

$$\left(\frac{u_H}{u_a}\right) = \left(\frac{H}{z_a}\right)^p \quad (7.46)$$

donde

u_H = Velocidad del viento en la elevación H .

u_a = Velocidad del viento a la altura del anemómetro.

H = Altura efectiva de la columna.

z_a = Altura del anemómetro sobre el suelo.

p = Parámetro adimensional dependiente de la rugosidad del terreno y la estabilidad atmosférica.

La Tabla 7.6 ofrece valores para p recomendados por la EPA cuando existen superficies rugosas en las proximidades del anemómetro (Peterson, 1978). Para terrenos llanos, como campos, o terrenos cercanos a masas de agua, los valores de p dados en la Tabla 7.6 deberían multiplicarse por 0,6. Los indicadores de *clase de estabilidad* en la tabla se especifican mejor en la Tabla 7.7, cuando calculemos las características de las columnas o columnas de humo.

TABLA 7.6. Exponente de perfil de viento p , para terreno rugoso^(a)

Clase de estabilidad	Descripción	Exponente p
A	Altamente inestable	0,15
B	Moderadamente inestable	0,15
C	Ligeramente inestable	0,20
D	Neutro	0,25
E	Levemente estable	0,40
F	Estable	0,60

^(a) Para terreno plano, multiplíquese p por 0,6; véase la Tabla 7.7 para una mayor descripción de las clases de estabilidad utilizadas aquí.

Fuente: Peterson, 1978.

TABLA 7.5. Clasificaciones de Estabilidad Atmosférica

Velocidad del viento superficial (m/s)	Insolación diurna			Nubosidad nocturna ^(e)	
	Fuerte ^(b)	Moderada ^(c)	Leve ^(d)	Nublado ($\geq 4/8$)	Despejado ($\leq 3/8$)
<2	A	A-B ^(f)	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

^(a) La velocidad del viento superficial está tomada a 10 m sobre el suelo.

^(b) Corresponde a un día de verano claro con el sol a más de 60° de elevación sobre la línea del horizonte.

^(c) Corresponde a un día de verano con algunas nubes o un día claro con el sol entre 35-60° de elevación sobre la línea del horizonte.

^(d) Corresponde a un crepúsculo, o a un día de verano nublado, o a un día de verano claro con el sol entre 15-30° sobre la línea del horizonte.

^(e) La nubosidad se define como la fracción del cielo cubierta por nubes.

^(f) Para las condiciones A-B, B-C, C-B, los valores son la media de los obtenidos por cada uno.

Nota: A, altamente inestable; B, moderadamente inestable; C, ligeramente inestable; D, neutro; E, ligeramente estable; F, estable. Al margen de la velocidad del viento, la clase D se supondrá para condiciones de nubosidad, diurnas o nocturnas.

Fuente: Turner, 1970.

EJEMPLO 7.11. Velocidad del viento en la chimenea

Imaginemos que un anemómetro a una altura de 10 m sobre el suelo mide una velocidad del viento de 2,5 m/s. Calcular la velocidad del viento a una elevación de 300 m, en un terreno rugoso si la atmósfera se halla en condiciones ligeramente inestables.

Solución. De la Tabla 7.6, hallamos que el exponente de perfil del viento para una atmósfera ligeramente inestable (clase de estabilidad C) es de 0,20. Si reagrupamos (7.46) obtenemos:

$$u_H = u_a \left(\frac{H}{z_a} \right)^p = 2,5 \cdot \left(\frac{300}{10} \right)^{0,2} = 4,9 \text{ m/s}$$

El coeficiente de dispersión de Gauss

Los dos coeficientes de dispersión en (7.45), σ_y y σ_z necesitan una explicación. Son apenas las desviaciones estándar de las distribuciones gaussianas vertical y horizontal, respectivamente (alrededor de un 68% de la zona por debajo de la que la campana de Gauss se halla en $\pm 1 \sigma$ del valor medio). Valores menores del coeficiente de dispersión significan que la campana de Gauss es más estrecha, con un pico más alto y valores más elevados representan lo contrario. Cuanta más distancia recorrida mayores son los coeficientes. Esto provoca que la campana de Gauss se vaya ensanchando más y más. Estos coeficientes no están sólo en función de la distancia, sino que también dependen, de modo complejo, de la estabilidad atmosférica.

El procedimiento más común para calcular los coeficientes de dispersión lo introdujo Pasquill (1961), fue modificado por Gifford (1961), y adoptado por el Servicio de Salud Pública de U.S. (Turner, 1970); se presenta aquí en la Figura 7.50. Los parámetros desde A hasta F en la Figura 7.50 representan clasificaciones de estabilidad basadas en descripciones cualitativas de condiciones ambientales dominantes.

La Tabla 7.7 describe estos parámetros. Por ejemplo, un día estival claro, con el sol más alto de 60° sobre la línea del horizonte, con velocidades de viento inferiores a 2 m/s (a una elevación de 10 m), crea una atmósfera *altamente inestable* con una clase de estabilidad de A. El extremo opuesto es la clase F, la cual se etiqueta de *estable* y corresponde a una noche clara (menos de 3/8 del cielo nublado), con vientos de menos de 3 m/s.

La representación gráfica de los coeficientes de dispersión en la Figura 7.50 es conveniente cuando se efectúan cálculos con un ordenador. Un resultado ajustado a estos gráficos puede obtenerse utilizando las siguientes ecuaciones (Martin, 1976):

$$\sigma_y = ax^{0,894} \tag{7.47}$$

y

$$\sigma_z = cx^d + f \tag{7.48}$$

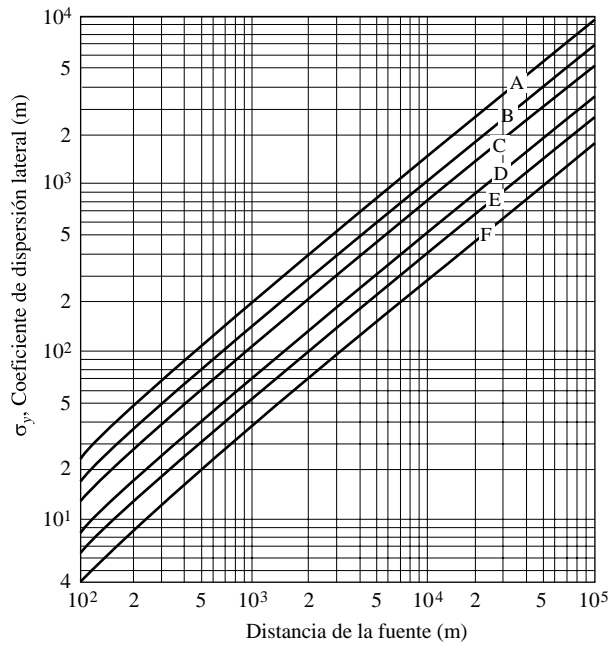
donde las constantes a , c , d , y f se reflejan en la Tabla 7.8 para cada clase de estabilidad. La distancia x debe expresarse en kilómetros para obtener σ_y y σ_z en metros. Por conveniencia, unos pocos valores de los coeficientes de dispersión calculados utilizando (7.47) y (7.48) se listan en la Tabla 7.9.

TABLA 7.8. Valores de las constantes a , c , d , y f para su uso en (7.47) y (7.48)

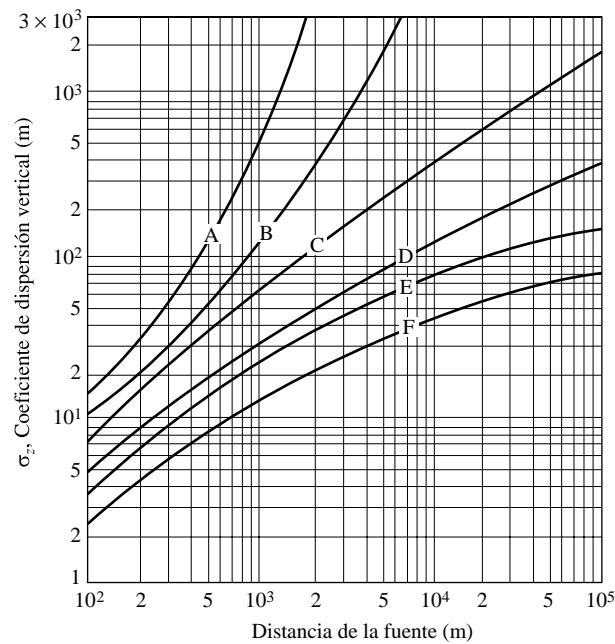
Estabilidad	$x \leq 1 \text{ km}$				$x \geq 1 \text{ km}$		
	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440,8	1,941	9,27	459,7	2,094	-9,6
B	156	106,6	1,149	3,3	108,2	1,098	2,0
C	104	61,0	0,911	0	61,0	0,911	0
D	68	33,2	0,725	-1,7	44,5	0,516	-13,0
E	50,5	22,8	0,678	-1,3	55,4	0,305	-34,0
F	34	14,35	0,740	-0,35	62,6	0,180	-48,6

Nota: Los valores calculados de se expresarán en metros cuando x se exprese en kilómetros.

Fuente: Martin, 1976.



(a)



(b)

FIGURA 7.50. Coeficientes de dispersión de Gauss como una función de la distancia (a) coeficiente horizontal, σ_y , (b) coeficiente vertical, σ_z .
(Fuente: Turner, 1970.)

TABLA 7.9. Coeficientes de dispersión (m) para determinadas distancias (km), calculados con (7.47) y (7.48)

Distancia x (km)	Clase de estabilidad y σ_y						Clase de estabilidad y σ_z					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
0,2	51	37	25	16	12	8	29	20	14	9	6	4
0,4	94	69	46	30	22	15	84	40	26	15	11	7
0,6	135	99	66	43	32	22	173	63	38	21	15	9
0,8	174	128	85	56	41	28	295	86	50	27	18	12
1	213	156	104	68	50	34	450	110	61	31	22	14
2	396	290	193	126	94	63	1.953	234	115	51	34	22
4	736	539	359	235	174	117		498	216	78	51	32
8	1.367	1.001	667	436	324	218		1.063	406	117	70	42
16	2.540	1.860	1.240	811	602	405		2.274	763	173	95	55
20	3.101	2.271	1.514	990	735	495		2.904	934	196	104	59

Concentración a nivel del suelo en la dirección del viento

La concentración a nivel del suelo de la contaminación desde la chimenea en la dirección del viento resulta de interés puesto que la polución será la más alta a lo largo de este eje. Con $y = 0$, (7.45) se simplifica en

$$C(x, 0) = \frac{Q}{\pi u_H \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_x^2}\right) \tag{7.49}$$

El siguiente ejemplo ilustra el uso de la ecuación de columna de Gauss.

EJEMPLO 7.12. Columna de una central térmica

Una central térmica de 1.000 MW (10^6 kW) alimentada con carbón que tiene un rendimiento del 40%, emite SO_2 a la tasa legalmente permitida de 0,6 lb de SO_2 por millón de Btu de energía de entrada en la central. La columna tiene una altura efectiva de 300 m. Un anemómetro situado a 10 m mide una velocidad de viento de 2,5 m/s, en un día estival nublado. Predecir la concentración de SO_2 a nivel del suelo 4 km en la dirección del viento.

Solución. Conocemos la electricidad saliente de la central, 10^6 KW, pero los estándares de emisión están escritos en términos de energía entrante. Utilizando la conversión de $3.412 \text{ Btu} = 1 \text{ kW/h}$, la energía entrante es

$$\text{Energía entrante} = \frac{\text{Energía saliente}}{\text{Rendimiento}} = \frac{1,0 \times 10^6 \text{ kW}}{0,40} \times \frac{4.412 \text{ Btu}}{\text{kWh}} = 8.530 \times 10^6 \text{ Btu/h}$$

De modo que la tasa de emisión de SO_2 sería

$$Q = \frac{8.530 \times 10^6 \text{ Btu}}{\text{h}} \times \frac{0,6 \text{ lb SO}_2}{10^6 \text{ Btu}} \times \frac{\text{kg}}{2,2 \text{ lb}} \times \frac{10^9 \mu\text{g}}{\text{kg}} \times \frac{\text{h}}{3.600 \text{ s}} = 6,47 \times 10^8 \mu\text{g de SO}_2/\text{s}$$

Para las condiciones de velocidad del viento del anemómetro y las condiciones solares dadas, la Tabla 7.7 indica que la clase de estabilidad apropiada es C. Notar que la Tabla 7.7 utiliza la velocidad del viento como medida a la altura anemométrica estándar de 10 m. La velocidad del viento en la ecuación de columna de Gauss, en cualquier caso, exige que calculemos el viento a la altura efectiva de la chimenea. Lo hicimos en el Ejemplo 7.11 y hallamos que era 4,9 m/s a 300 m.

A 4 km en la dirección del viento, la Tabla 7.9 indica que los coeficientes de dispersión son $\sigma_y = 359$ m y $\sigma_z = 216$ m. Junto con (7.49) obtenemos

$$C(4,0) = \frac{6,47 \times 10^8 \text{ } \mu\text{g/s}}{\pi \times 4,9 \text{ m/s} \times 359 \text{ m} \times 216 \text{ m}} \exp\left[\frac{-(300)^2}{2 \times (216)^2}\right] = 206 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

Utilizando 24.465×10^{-3} /mol (a una atm, y 25 °C) junto con el peso molecular del SO₂ ($32 + 2 \times 16 = 64$ g/mol), podemos convertir las unidades en las más utilizadas ppm:

$$C = \frac{206 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3 \times 24,465 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}}{64 \text{ g/mol}} = 0,109 \times 10^{-6} = 0,109 \text{ ppm}$$

De modo que la central térmica del Ejemplo 7.12 añadiría 0,11 ppm a cualquier nivel de SO₂ que se hallara ya allí a causa de otras fuentes. Para tener perspectiva, comparémoslo con las emisiones de los estándares de calidad del aire. La Tabla 7.1 indica que la concentración media anual de SO₂ debe ser inferior a 0,03 ppm, lo que significa que esta central térmica por sí sola causaría una contaminación que excedería enormemente los estándares si estas condiciones atmosféricas prevaleciesen durante todo el año.

El estándar de emisión de SO₂ durante las 24 horas del día es de 0,14 ppm, así que bajo las condiciones expuestas, esta central no violaría dicho estándar, pero no permitiría ninguna otra fuente en las proximidades.

El Ejemplo 7.12 abre las puertas a muchas preguntas interesantes, ¿Cuánto varía la concentración a medida que cambia la distancia en la dirección del viento? ¿Cuál sería el efecto de los cambios de la velocidad del viento o la clase de estabilidad? ¿Cómo utilizaríamos los datos estadísticos sobre la velocidad y dirección del viento y las condiciones atmosféricas para asegurar que se cumplirán los requisitos y exigencias estándar? Si no se cumplen, ¿Qué alternativas hay? Algunos ejemplos vienen a la mente. Podríamos elevar la altura de la chimenea (añadiendo con esto problemas de deposición ácida); podríamos incrementar la eficacia con la que el filtro limpia las emanaciones, o podríamos recomendar la utilización de carbón con menor contenido en azufre. Quizá algunos esfuerzos por conservar o recuperar energía podrían reducir el tamaño de la central eléctrica lo necesario para cumplir los requisitos que nos atañen. Obviamente, para efectuar los análisis adecuados al respecto de una nueva fuente, tal como la central eléctrica del Ejemplo 7.12, se requiere un estudio de extrema complejidad. Aunque no llevaremos a cabo tales cálculos aquí, sí presentamos el punto de partida crucial para tal estudio, denominado el Modelo de Columna de Gauss.

Concentración del pico en la dirección del viento

Representar (7.49) a mano resulta tedioso, especialmente si queremos realizar un análisis de sensibilidad a fin de ver cómo cambian los resultados con el cambio en la altura de la chimenea y las condiciones atmosféricas. Resulta mucho más fácil efectuar esto con un ordena-

dor, y es especialmente sencillo si se utiliza un programa de hojas de cálculo con capacidad de desarrollo de gráficas. Utilizando el Ejemplo 7.12 como base, el efecto de los cambios en la altura efectiva de la chimenea sobre la concentración a lo largo de la dirección del viento se ha representado en la Figura 7.51(a). El efecto del cambio en la clase de estabilidad, manteniendo la altura de la chimenea constante a 300 m se muestra en la Figura 7.51(b).

La concentración en la dirección del viento es sensible a los cambios en la altura efectiva de la chimenea, como puede apreciarse en la Figura 7.51(a). Elevando la altura efectiva de la chimenea de 250 a 300 m se reduce la concentración del pico a menos de la mitad. La capacidad de reducir la contaminación a nivel del suelo de modo significativo mediante el aumento de la altura de la chimenea ha conducido a la construcción de chimeneas extremadamente altas. De hecho, la chimenea más alta del mundo se creó para una industria de fundición en Subdury, Ontario, y es tan alta como el Empire State Building de Nueva York (380 m). La altura efectiva de la chimenea sería incluso mayor.

El impacto del cambio de clase de estabilidad que muestra la Figura 7.51(b) quizá no sea esperado. La mayor concentración en el pico en la dirección del viento acontece cuando la atmósfera es altamente inestable, en lugar de estable. Las turbulencias propias de una atmósfera inestable atraen hacia la tierra las irregularidades en la columna muy rápidamente, lo que resulta en valores de pico muy elevados cerca de la chimenea. No obstante, más adelante en la dirección del viento, las concentraciones se desvanecen con gran rapidez. El hecho de tener una elevada concentración en el pico cerca de la chimenea puede resultar una situación satisfactoria siempre que los ecosistemas o la población de cualquier índole que pudieran resultar dañados por la contaminación se hallen a no menos de algunos kilómetros de distancia.

La atmósfera estable que muestra la Figura 7.51(b), por otra parte, causa una concentración en el pico relativamente baja. El diagrama de una columna en condición de ventilación (fanning plume) de la Figura 7.47(c) puede ayudar a la comprensión de una conclusión de este tipo.

La columna se despliega horizontalmente, pero gran parte de ella no alcanza el suelo hasta que la columna se halla a alguna distancia de la chimenea, en la dirección del viento. Como se muestra en la Figura 7.51(b), la atmósfera estable es peor que las atmósferas inestables más allá de los 14 km. Nótese en cualquier caso que las concentraciones mostradas en la Figura 7.51 no toman en cuenta el hecho de que la altura efectiva de la chimenea depende de la clase de estabilidad. Si se incluye este factor, los altos picos que se muestran en atmósferas inestables se reducen de una forma moderada.

Una pregunta obvia es ¿cómo puede predecirse la concentración pico a lo largo de la dirección del viento partiendo de (7.49)? Desafortunadamente, no resulta posible deducir una solución matemática. Un modo de predecir el pico consiste en simplificar representaciones de curvas del tipo mostrado en la Figura 7.51 empleando para ello un ordenador. Con la disponibilidad de los programas para PC de hojas de cálculo, este método no es demasiado laborioso. Turner (1970) ha obtenido gráficas que utilizan la clase de estabilidad y la altura efectiva de la chimenea como parámetros para determinar la distancia en la dirección del viento donde se produce la máxima concentración ($x_{\text{máx}}$). El mismo proceso produce una concentración normalizada $(Cu_H/Q)_{\text{máx}}$, a partir de donde se puede hallar la concentración máxima empleando la fórmula siguiente:

$$C_{\text{máx}} = \frac{Q}{u_H} \left(\frac{Cu_H}{Q} \right)_{\text{máx}} \quad (7.50)$$

Las curvas se presentan en la Figura 7.52, y el Ejemplo 7.13 ilustra su uso.

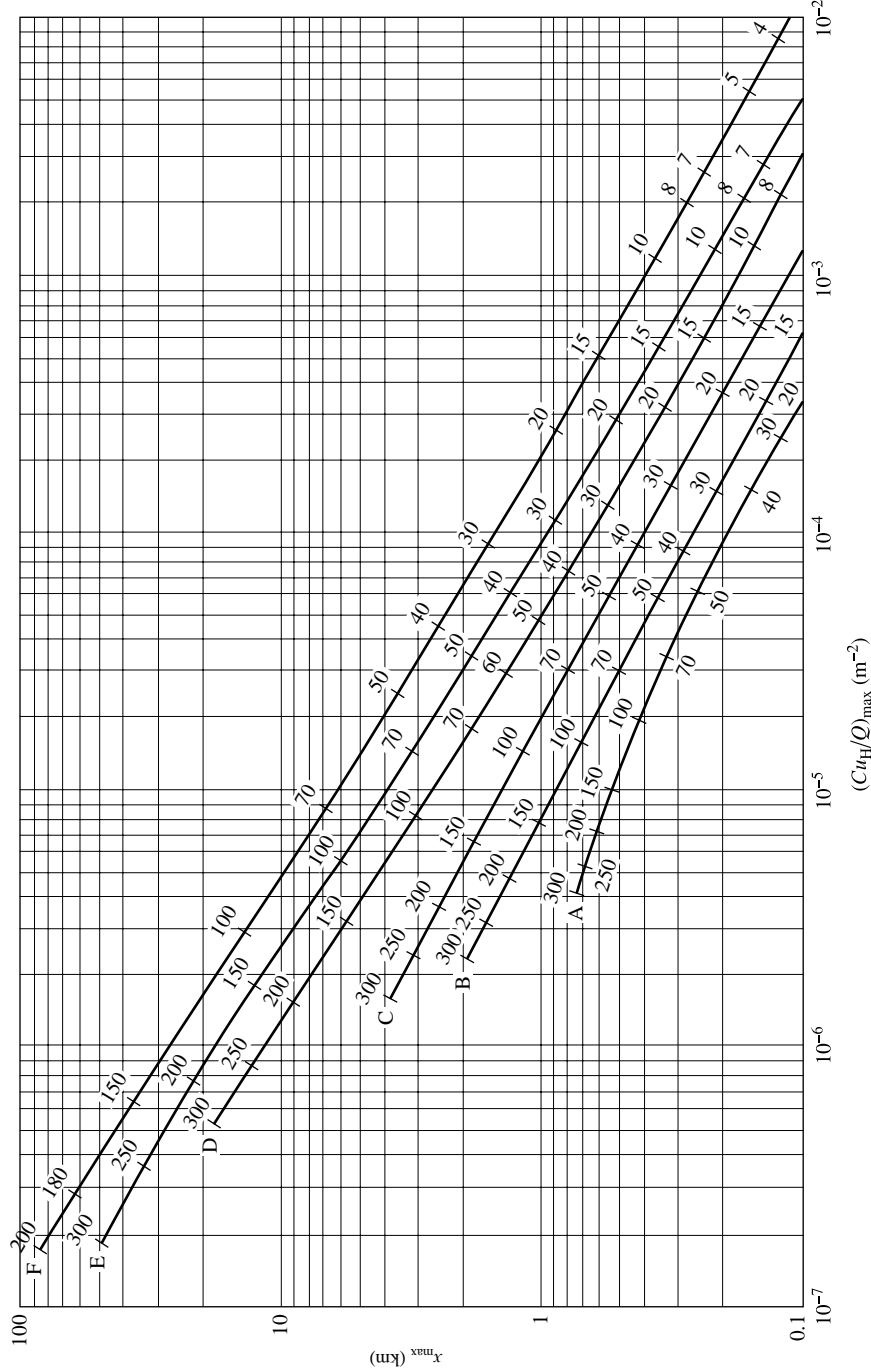


FIGURA 7.52. Para determinar el pico de concentración en la dirección del viento, introducir el gráfico con la clase de estabilidad apropiada y la altura efectiva de la chimenea (números en la gráfica, en metros). Seguir la línea hacia la derecha para hallar la distancia hasta el pico y, una vez encontrada, en la base figura la lectura del parámetro a partir del cual puede hallarse la concentración de pico buscada. (Fuente: Turner, 1970.)

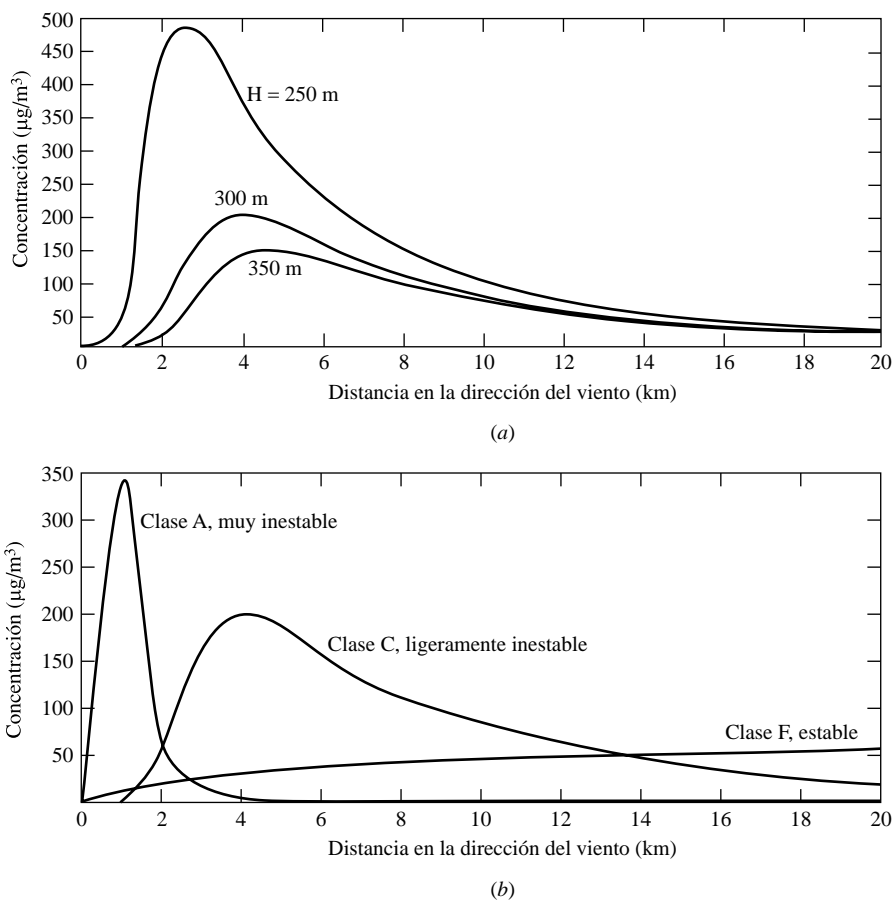


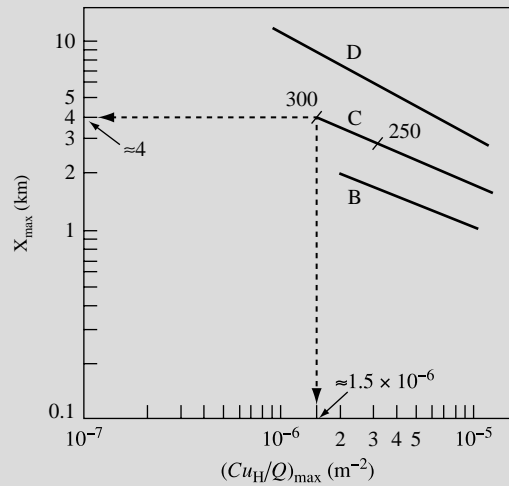
FIGURA 7.51. El efecto de las variaciones de los parámetros clave sobre la columna de SO₂ de la central del Ejemplo 7.12. (a) El efecto de los cambios en la altura efectiva de la chimenea para una clase de estabilidad constante, y (b) la variación de clase de estabilidad para una altura efectiva de chimenea constante.

EJEMPLO 7.13. Concentración del pico en la dirección del viento

Trabajando con la central eléctrica del Ejemplo 7.12, de 1.000 MW, alimentada con carbón, utilizar la Figura 7.52 para determinar la distancia en la dirección del viento donde se alcanzará la máxima concentración de SO₂. Hallar dicha concentración.

Solución. La clase de estabilidad es C, y la altura efectiva de la chimenea es de 300 m. Partiendo de la Figura 7.52, la distancia en la dirección del viento, $x_{\text{máx}}$, es de aproximadamente 4 km (lo que coincide con la Figura 7.51). Nótese que las escalas en la Figura 7.52 son logarítmicas, de modo que conviene ser cuidadoso durante la lectura de los valores.

La lectura general desde el punto en la figura corresponde a la clase de estabilidad C y la altura efectiva de la chimenea es de $H = 300$ m, $(Cu_H/Q)_{\text{máx}}$ aparenta ser de unos $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^{-2}$.



La velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea se halló en el Ejemplo 7.11 y resultó de $u_H = 4,9$ m/s, y Q era de $6,47 \times 10^8$ $\mu\text{g/s}$, de modo que

$$C_{\text{máx}} = \frac{Q}{u_H} \left(\frac{C u_H}{Q} \right)_{\text{máx}} = \frac{6,47 \times 10^8 \mu\text{g/s}}{4,9 \text{ m/s}} \times \frac{1,5 \times 10^{-6}}{\text{m}^2} = 198 \mu\text{g/m}^3$$

lo cual es bastante cercano a los $206 \mu\text{g/m}^3$ calculados a 4 km en el Ejemplo 7.12. Es bastante difícil leer la Figura 7.52, de modo que no ha de esperarse una gran exactitud.

Elevación de la columna

Hasta aquí hemos tratado únicamente con la altura efectiva de la chimenea H en nuestros cálculos. La diferencia entre la altura de la chimenea real h y la altura efectiva H se denomina la *elevación de la columna* Δh . La elevación de la columna la provoca una combinación de factores, los más importantes de los cuales son la flotación y el momento de los gases de combustión, y la estabilidad de la atmósfera en sí. La flotación aparece cuando los gases de combustión están más calientes que el aire ambiente o cuando el peso molecular de éstos es menor que el del aire (o una combinación de ambos factores). El momento lo causa la masa y la velocidad de los gases a medida que éstos salen de la chimenea.

Se han propuesto diversas técnicas para tratar la elevación de la columna, pero tienden a producir resultados muy distintos. La EPA recomienda un modelo basado en el trabajo de Briggs (1972), y por ello será el que utilizaremos aquí. La elevación de la columna depende del momento y de la flotación. La flotación asumida para este análisis se debe a que la temperatura de los gases que emanan de la chimenea es mayor que la del ambiente circundante, pero se podrían incluir diferencias en el peso molecular de los gases de combustión con respecto al del aire.

La siguiente ecuación de elevación de columna puede utilizarse para condiciones *estables* (categorías de estabilidad E y F):

$$\Delta h = 2,6 \left(\frac{F}{u_h S} \right)^{1/3} \quad (7.51)$$

La cantidad F se denomina *parámetro de flujo por flotación* (m^4/s^3)

$$F = gr^2v_s \left(1 - \frac{T_a}{T_s} \right) \quad (7.52)$$

donde

- Δh = Elevación de la columna, en m.
- g = Aceleración de la gravedad, $9,8 \text{ m/s}^2$.
- r = Radio interior de la chimenea.
- u_h = Velocidad del viento a la altura de la chimenea, m/s.
- v_s = Velocidad de salida de gases de la chimenea, m/s.
- T_s = Temperatura de los gases en la chimenea, K.
- T_a = Temperatura ambiente, K.

La cantidad S es un *parámetro de estabilidad* con unidades de s^{-2} dadas por

$$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0,01 \text{ }^\circ\text{C/m} \right) \quad (7.53)$$

La cantidad $\Delta T_a/\Delta z$ representa la tasa real de cambio de la temperatura ambiente con la altitud en $^\circ\text{C/m}$ (nótese que un valor positivo significa que la temperatura aumenta con la altitud).

En condiciones *neutras* o *inestables* de la atmósfera (categorías de estabilidad A-D), puede utilizarse la siguiente ecuación para calcular la elevación de la columna:

$$\Delta h = \frac{1,6 F^{1/3} x_f^{2/3}}{u_h} \quad (7.54)$$

donde

x_f = Distancia en la dirección del viento hasta el final de la elevación de la columna, en m.

Puesto que (7.54) se utiliza cuando las condiciones son neutras o inestables, puede resultar difícil determinar si la distancia en la dirección del viento a la que el eje central de la columna deja de elevarse. Las expresiones siguientes se utilizan de modo ocasional:

$$\begin{aligned} x_f &= 120 F^{0,4} & \text{si} & \quad F \geq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 \\ x_f &= 50 F^{5/8} & \text{si} & \quad F < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 \end{aligned}$$

EJEMPLO 7.14. Elevación de la columna

Una gran central eléctrica tiene una chimenea de 250 m con un radio interior de 2 m. La velocidad de salida de gases por la chimenea es de 15 m/s, a una temperatura de $140 \text{ }^\circ\text{C}$ (413 K). La temperatura ambiente es de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (298 K), y el viento a la altura de la chimenea se calcula de 5 m/s. Calcular la altura efectiva de la chimenea si (a) la atmósfera es estable con un incremento en la temperatura correspondiente a una tasa de $2 \text{ }^\circ\text{C/km}$, y (b) la atmósfera es ligeramente inestable, de clase C.

Solución. Primero, hallaremos el parámetro de flotación F a partir de (7.52)

$$F = gr^2v_s \left(1 - \frac{T_a}{T_s} \right) = 9,8 \text{ m/s}^2 \times (2 \text{ m})^2 \times 15 \text{ m/s} \times \left(1 - \frac{298}{413} \right) = 164 \text{ m}^4/\text{s}^3$$

(a) Con una atmósfera estable, necesitamos utilizar (7.51) y (7.53),

$$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta z} + 0,01 \text{ }^\circ\text{C/m} \right) = \frac{9,8 \text{ m/s}^2}{298 \text{ K}} (0,002 + 0,01) \text{ K/m} = 0,0004/\text{s}^2$$

$$\Delta h = 2,6 \left(\frac{F}{u_h S} \right)^{1/3} = 2,6 \left(\frac{164 \text{ m}^4/\text{s}^3}{5 \text{ m/s} \times 0,0004/\text{s}^2} \right)^{1/3} = 113 \text{ m}$$

De modo que la altura efectiva de la chimenea es $H = h + \Delta h = 250 + 113 = 363 \text{ m}$.

(b) Con una atmósfera inestable, clase C, necesitamos utilizar (7.54). Puesto que $F < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$, la distancia en la dirección del viento hasta el punto donde la columna deja de elevarse, tendríamos que utilizar:

$$x_f = 120 F^{0,4} = 120 \times (164)^{0,4} = 923 \text{ m}$$

$$\Delta h = \frac{1,6 F^{1/3} x_f^{2/3}}{u_h} = \frac{1,6(164)^{1/3}(923)^{2/3}}{5} = 166 \text{ m}$$

y la altura efectiva de la chimenea es $H = 250 + 166 = 413 \text{ m}$.

Concentración en la dirección del viento en condiciones de inversión térmica

La ecuación de la columna de Gauss, tal como la hemos presentado hasta aquí, se aplica a una atmósfera en la que el perfil de temperaturas es una simple línea recta. Si, como ocurre a menudo, existe una inversión sobre la altura efectiva de la chimenea, la ecuación de Gauss básica debe modificarse para tener en cuenta el hecho de que la dispersión vertical de contaminantes queda limitada por la inversión.

Si suponemos que los contaminantes se reflejan en la capa de inversión, tal como suponíamos que se reflejaban en la tierra en la ecuación básica de Gauss, es necesario un cálculo de la concentración en cualquier punto en la dirección del viento exigiría un análisis de estas reflexiones múltiples. Tal complejidad puede evitarse si estamos dispuestos a limitar nuestras predicciones sobre la concentración de columna a distancias lo suficientemente lejanas en la dirección del viento como para que la suma de estas reflexiones múltiples converjan en una solución. (¿?) Más allá de esa distancia, el aire se considera completamente mezclado bajo la inversión, con concentraciones uniformes desde el nivel del suelo hasta la parte inferior de la capa de inversión.

Turner (1970) aconseja la siguiente ecuación de Gauss modificada para calcular las concentraciones a nivel del suelo en la dirección del viento bajo inversión. Está derivada basándose en la suposición de que la distancia en la dirección del viento desde la fuente es, al

menos, dos veces la distancia hasta donde la columna interactúa por primera vez con la capa de inversión:

$$C(x, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u_H \sigma_y L} \quad \text{para } x \geq 2X_L \quad (7.55)$$

donde

L = Elevación de la parte inferior de la capa de inversión (m).

X_L = Distancia en la dirección del viento donde la columna interactúa primero con la capa de inversión.

Notar que (7.55) es aplicable sólo para distancias de $x \geq 2X_L$ (véase la Figura 7.53). Esa distancia, X_L , se cumple en el punto donde el coeficiente de dispersión vertical, σ_z , es igual a

$$\sigma_z = 0,47(L - H) \quad \text{para } x = X_L \quad (7.56)$$

Tras averiguar σ_z partiendo de (7.56), la distancia X_L puede calcularse utilizando la Figura 7.50b, o utilizando (7.48) y la Tabla 7.7.

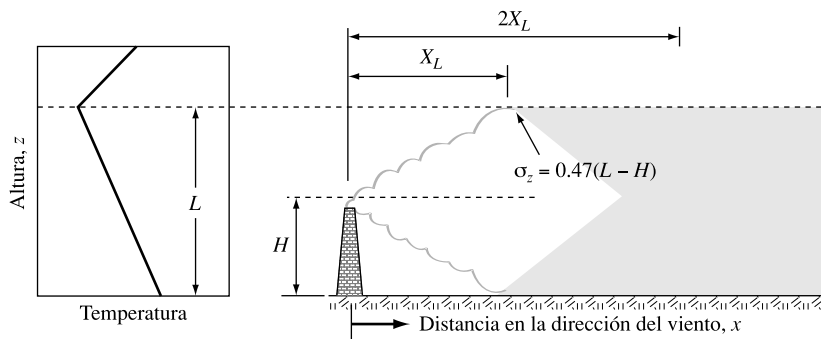


FIGURA 7.53. Dispersión de la columna en condiciones de inversión térmica. La Ecuación (7.55) se aplica para distancias mayores que $2X_L$ en la dirección del viento, donde X_L se cumple en el punto donde $\sigma_z = 0,47(L - H)$.

Para distancias de $x \leq X_L$, la ecuación de columna de Gauss estándar (7.42) puede utilizarse para calcular las concentraciones en la dirección del viento. Para $X_L \geq 2X_L$, se aplica (7.55). Para distancias entre X_L y $2X_L$, las concentraciones pueden calcularse mediante la interpolación entre los valores calculados para $x = X_L$ y $x = 2X_L$.

EJEMPLO 7.15. Concentración bajo una inversión térmica en altura

Consideremos una chimenea con una altura efectiva de 100 m, que emite SO_2 a una velocidad de $2 \times 10^8 \mu\text{g/s}$. La velocidad del viento a 10 m es de 5,5 m/s, y a 100 m es de 10 m/s. Es un día estival claro con el sol cercano al cénit y tenemos en cuenta una capa de inversión que comienza a 300 m. Calcular la concentración de SO_2 a nivel del suelo a una distancia en dirección del viento el doble de la existente hasta el punto donde comienza a tener lugar la reflexión a consecuencia de la capa de inversión.

Solución. La Ecuación (7.56) da σ_z a una distancia X_L ,

$$\sigma_z = 0,47(L - H) = 0,47(300 - 100) = 94 \text{ m}$$

Para averiguar X_L , podemos utilizar la Figura 7.50b, pero primero necesitamos conocer la clase de estabilidad por debajo de la inversión. De la Tabla 7.7, un día claro de verano con una velocidad del viento de 5,5 m/s corresponde a una estabilidad de clase C. Necesitamos hallar X_L para determinar σ_y en (7.55). Introduciendo la Figura 7.50b en el eje vertical para $\sigma_z = 94$ m, consultando la indicación acerca de la clase C y consultando el dato en la base del eje horizontal, nos conduce a un resultado aproximado de $X_L = 1.600$ m.

Para hallar la concentración para $x = 2X_L = 2 \times 1.600$ m = 3.200 m, necesitamos calcular σ_y en ese punto. Utilizando la Figura 7.47a para $x = 3.200$ m y clase C, podemos calcular σ_y a unos 300 m (podríamos haber utilizado la Ecuación 7.47 con la Tabla 7.8). Utilizando (7.55), la concentración en la dirección del tiempo a nivel del suelo es

$$C(x, 0) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} u_H \sigma_y L} = \frac{2 \times 10^8 \text{ } \mu\text{g/s}}{(2\pi)^{1/2} \times 10 \text{ m/s} \times 300 \text{ m} \times 300 \text{ m}} = 90 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

Modelo de dispersión para una fuente lineal

En algunas circunstancias resulta apropiado construir un modelo que refleje diversas fuentes distribuidas a lo largo de una línea, como si formaran una fuente lineal infinita con emisiones continuas. Ejemplos de fuentes lineales que pueden modelarse de esta manera pueden hallarse en los vehículos a motor que recorren tramos rectos de carreteras o autopistas, la quema de residuos agrícolas paralela al borde de un campo o la línea de fuentes industriales situadas a lo largo de la ribera de un río. Para simplificar, consideraremos tan sólo el caso de una fuente de longitud infinita a nivel del suelo, con vientos que soplen perpendicularmente a la línea, como se muestra en la Figura 7.54.

Bajo estas circunstancias especiales, la concentración de contaminación a nivel del suelo a una distancia perpendicular x de la línea fuente puede describirse de la siguiente manera:

$$C(x) = \frac{2q}{\sqrt{2\pi} \sigma_z u} \quad (7.57)$$

donde

q = Tasa de emisión por unidad de distancia a lo largo de la línea (g/m-s).

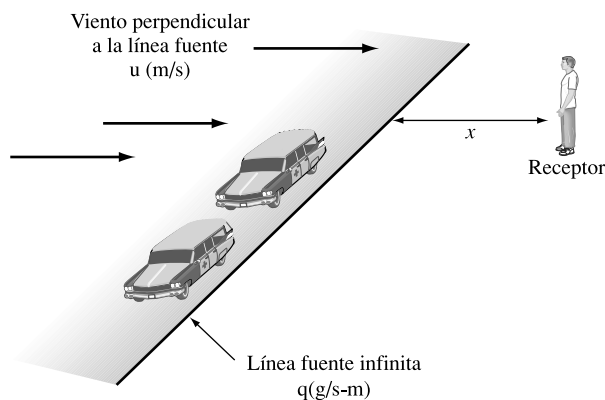


FIGURA 7.54. Ejemplo de la geometría de una fuente lineal, tal como un tramo recto de autopista, y el receptor situado a una distancia x de la línea.

EJEMPLO 7.16. CO cerca de una autopista

Los estándares de emisión federales del CO desprendido de los vehículos nuevos es de 3,4 gpm. Imagínese que por un punto dado de una autopista pasan 10 vehículos por segundo, con una emisión de 3,4 g/milla de CO por cada uno. Si el viento es perpendicular a la autopista y sopla a 5 mph (2,2 m/s) en un día nublado, calcular la concentración de CO a nivel del suelo a 100 m de la autopista.

Solución. Necesitamos calcular la tasa de emisión de CO por metro de autopista,

$$q = 10 \text{ vehículos/s} \times 3,4 \text{ g/vehículo} \cdot \text{milla} \times 1 \text{ milla}/1.609 \text{ m} = 0,021 \text{ g/s}\cdot\text{m}$$

y necesitamos el coeficiente de dispersión vertical σ_z . Puesto que es un día nublado, las notas al pie de la Tabla 7.7 indican que deberíamos utilizar la clase de estabilidad D. Comprobando la Tabla 7.9 en busca de σ_z no obtenemos ayuda puesto que no ofrece valores para distancias tan cortas. De modo que, con (7.48) y los valores de c , d y f tomados de la Tabla 7.8, podemos calcular σ_z :

$$\sigma_z = cx^d + f = 33,2(0,1)^{0,725} - 1,7 = 4,6 \text{ m}$$

Sustituyendo estos valores en (7.57) obtenemos

$$C(0,1 \text{ km}) = \frac{2q}{\sqrt{2\pi} \sigma_z u} = \frac{2 \times 0,021 \text{ g/m}\cdot\text{s} \times 10^3 \text{ mg/g}}{(2\pi)^{1/2} \times 4,6 \text{ m} \times 2,2 \text{ m/s}} = 1,7 \text{ mg/m}^3$$

El estándar de calidad del aire del CO de ocho horas es de 10 mg/m³, así es que este cálculo está bastante por debajo.

Modelos de fuentes de área

Para fuentes diseminadas pueden tomarse diversas aproximaciones para calcular las concentraciones de contaminantes. Si existe un número moderado de fuentes puntuales resulta razonable emplear la ecuación de columna de Gauss para cada fuente puntual a fin de predecir su contribución individual. Hecho esto, no queda sino sumar las contribuciones individuales para hallar la concentración total. Otro modelo radica en el uso de múltiples ecuaciones gaussianas de fuentes lineales. Mediante la división de la superficie en una serie de franjas paralelas, y tomando cada franja como una fuente lineal, podemos calcular la concentración total.

Existe una aproximación mucho más sencilla y más intuitiva que puede tomarse para estimar las concentraciones de contaminantes sobre una zona (como una ciudad) que consiste en utilizar el modelo de caja tratado en la Sección 1.3. Consideremos el volumen de aire sobre una zona urbana representado por un paralelepípedo rectangular, tal como se muestra en la Figura 7.55, con unas dimensiones de base L y W y una altura H . Esta caja está orientada de modo que el viento, con una velocidad u , incide sobre uno de sus lados. La altura de la caja queda determinada por las condiciones atmosféricas, y podríamos considerarla como simplemente la altura de mezclado. Las emisiones por unidad de área se representarán por q_s (g/m²-s).

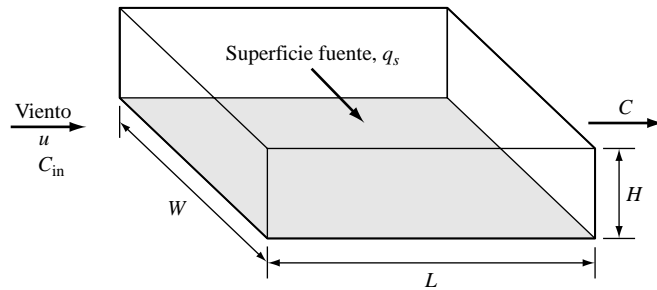


FIGURA 7.55. Modelo de caja que representa el volumen de aire sobre una ciudad. Las emisiones por unidad de superficie están representadas por q_s , los contaminantes se consideran repartidos uniformemente con una concentración C , y en dirección contraria al viento, la concentración está representada como C_{in} .

Consideremos que el aire que sopla dentro del paralelepípedo desde el lado de donde viene el viento tiene una concentración de contaminantes de C_{in} , y, para simplificar, supongamos que no se pierde contaminación por los lados paralelos al viento ni por la parte superior. Supongamos también que los contaminantes se mezclan rápido y uniformemente dentro de los límites de nuestro modelo, creando una concentración media uniforme C . Finalmente, trataremos los contaminantes desde el punto de vista de que son conservativos, es decir, que no reaccionan, no se descomponen ni se desprenden de la corriente de aire. Todas estas restricciones pueden modificarse en distintas versiones de este modelo, dependiendo del grado de complejidad y sofisticación.

Trabajando con la masa de los contaminantes, la cantidad de polución dentro de la caja es el volumen de ésta multiplicado por la concentración, $LWHC$. El flujo del aire que entra y sale de la caja es el área de cada cara por la velocidad del viento, WHu , de modo que la velocidad a la que la contaminación entra en el prisma es $WHuC_{in}$. La velocidad a la que sale de la caja es $WHuC$. Si suponemos que el contaminante es conservativo, podemos escribir el siguiente balance de masas:

$$\left(\frac{\text{Tasa de cambio de la}}{\text{contaminación en el prisma}} \right) = \left(\frac{\text{Velocidad a la que la}}{\text{polución entra en el prisma}} \right) - \left(\frac{\text{Velocidad a que la}}{\text{polución sale del prisma}} \right)$$

o

$$LWH \frac{dC}{dt} = q_s LW + WHuC_{in} - WHuC \quad (7.58)$$

donde

C = Concentración de contaminante en el volumen de aire, mg/m^3 .

C_{in} = Concentración del aire entrante, mg/m^3 .

q_s = Tasa de emisión por unidad de área, $\text{mg}/\text{s}\cdot\text{m}^2$.

H = Altura de mezclado, m.

L = Longitud del volumen de aire, m.

W = Anchura del volumen de aire, m.

u = Velocidad media del viento en las caras de la caja, m/s.

La solución en estado estacionario para (7.58) puede obtenerse estableciendo $dC/dt = 0$, de manera que

$$C(\infty) = \frac{q_s L}{uH} + C_{in} \quad (7.59)$$

lo que parece ser razonable. Si el aire que entra en el prisma está limpio, la concentración en estado estacionario es proporcional a la tasa de emisión, e inversamente proporcional al coeficiente de ventilación (el producto de la altura de mezclado y la velocidad del viento). Si no está limpio nos limitaremos a añadir el efecto de la concentración entrante. Podemos resolver (7.58) también para obtener el incremento con dependencia del tiempo sobre la ciudad. Si $C(0)$ representa la concentración en el volumen de aire sobre la ciudad (la caja) en un tiempo $t = 0$, la solución resulta ser

$$C(t) = \left(\frac{q_s L}{uH} + C_{in} \right) (1 - e^{-ut/L}) + C(0)e^{-ut/L} \quad (7.60)$$

Si suponemos que el viento entrante no acarrea contaminación y si la concentración inicial del prisma es cero, entonces (7.60) se simplifica en

$$C(t) = \frac{q_s L}{uH} (1 - e^{-uH/L}) \quad (7.61)$$

Cuando $t = L/u$, la función exponencial se convierte en e^{-1} y la concentración alcanza aproximadamente un 63% de su valor final. Ese valor de t tiene varios nombres. Generalmente se le denomina *constante de tiempo*, *tiempo de ventilación* o *tiempo de residencia*.

EJEMPLO 7.17. Tráfico en hora punta vespertina

Imaginemos que en una ciudad cuadrada, de 15 km de lado, hay 200.000 coches en la carretera. Cada uno recorre 30 km entre las 4 PM y las 6 PM, y cada uno emite 3 g/km de CO. Es una tarde invernal despejada con una inversión térmica que limita la mezcla a 20 m. El viento sopla limpio a una velocidad constante de 1 m/s a lo largo de uno de los lados de la ciudad. Utilícese un modelo de caja para calcular la concentración de CO a las 6 PM suponiendo que no había CO en el aire a las 4 PM, y que la única fuente de CO son los coches. Supóngase que el CO es conservativo y que la mezcla en el aire es completa e instantánea.

Solución. Las emisiones por m^2 , q_s , serían

$$q_s = \frac{200.000 \text{ coches} \times 30 \text{ km/coche} \times 3 \text{ g/km}}{(15 \times 10^3 \text{ m})^2 \times 3.600 \text{ s/hr} \times 2 \text{ hr}} = 1,1 \times 10^{-5} \text{ g/s-m}^2$$

Utilizando (7.61), la concentración después de 2 horas (7.200 s) sería

$$\begin{aligned} C(t) &= \frac{q_s L}{uH} (1 - e^{-ut/L}) \\ C(2 \text{ hr}) &= \frac{1,1 \times 10^{-5} \text{ g/s-m}^2 \times 15 \times 10^3 \text{ m}}{1,0 \text{ m/s} \times 20 \text{ m}} \left[1 - \exp\left(\frac{-1,0 \text{ m/s} \times 7.200 \text{ s}}{15.000}\right) \right] = \\ &= 3,2 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3 = 3,2 \text{ mg/m}^3 \end{aligned}$$

lo cual está considerablemente por debajo tanto de los 40 mg/m^3 en 1 hora para el CO según los Estándares de Calidad del Aire Ambiente Nacional (NAAQS) como para el estándar a ocho horas de 10 mg/m^3 . Cualquier CO que estuviera en el aire a las cuatro de la tarde incrementaría, por supuesto, este cálculo. La constante de tiempo, $L/u = 15.000 \text{ m}/(1\text{m/s}) = 15.000 \text{ s} = 4,2 \text{ horas}$, indica que en esas dos horas, la concentración está bastante por debajo de lo que estaría si continuaran dichas condiciones.

7.12. | Calidad del aire en espacios cerrados

Este capítulo comenzó con la bastante sorprendente afirmación de que, en términos de exposición humana a partículas respirables, una reducción del 2% en las emisiones de *humo ambiental de tabaco* sería equivalente a eliminar todas las centrales térmicas de carbón de los Estados Unidos (Smith, 1993b). La clave, por supuesto, está en el tema del Capítulo 5 en el que se afirma que los efectos para la salud son el resultado de la exposición no de las emisiones. Nos encontramos expuestos a los productos químicos y a las partículas del aire que respiramos, y éste se encuentra sobre todo en el interior de los edificios en los que pasamos casi todo nuestro tiempo.

Algunos de los contaminantes de los espacios cerrados son los mismos que ya nos son familiares por nuestro estudio de la calidad del aire ambiental. Por ejemplo, la combustión que tiene lugar en los hogares y otros edificios para cocinar, calentar agua y climatizar puede producir elevados niveles de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y otras partículas respirables. El humo del cigarrillo emite monóxido de carbono, benceno, acroleína y otros aldehídos y partículas, así como otras casi 4.000 sustancias. Algunas máquinas fotocopadoras emiten ozono. Los materiales de construcción tales como aglomerado, contrachapado, espuma de urea-formaldehído, varios adhesivos y otros, emiten formaldehído. Las raspaduras y descascarillados de pinturas que contienen plomo se convierten en polvo tóxico en suspensión. Hay una larga lista de compuestos orgánicos volátiles que provienen de los productos de limpieza domésticos, pinturas y otras sustancias que usamos en nuestras casas.

Algunos contaminantes son exclusivos de espacios cerrados, tales como el amianto usado como ignífugo y aislante, el gas radón que se filtra desde el suelo y se acumula en las casas, y los contaminantes biológicos, como las bacterias, mohos, ácaros, polen y virus. Una bacteria de interiores, la *Legionella*, causa la enfermedad del legionario y la fiebre de Pontiac. Muchos contaminantes, como el humo del cigarrillo o el gas radón, si se emiten en espacios abiertos se diluyen en el aire adecuadamente para que las personas no estén expuestas a niveles de contaminación peligrosos. En interiores, sin embargo, estas sustancias se concentran y conducen frecuentemente a niveles dañinos de exposición.

La contaminación del aire en hogares está ampliamente bajo nuestro control pero en oficinas y otros centros de trabajo dependemos de la elección de materiales del constructor, y del adecuado diseño y mantenimiento de la filtración del aire y los sistemas de ventilación del edificio. No es del todo infrecuente en la actualidad que los ocupantes de edificios nuevos o remodelados experimenten un conjunto confuso de síntomas que caracteriza al recientemente denominado *síndrome del edificio enfermo*. Estornudos o toses, ojos llorosos, dolores de cabeza, picor de ojos, nariz y garganta, piel seca o irritada, mareos y náuseas, fatiga, dificultad para concentrarse y malestar general sin una causa identificable. Los estudios su-

gieren que cerca del 25% de los trabajadores de oficina en los Estados Unidos perciben anomalías en la calidad del aire de su ambiente de trabajo, y un 20% cree que su rendimiento se ve perjudicado por reacciones a la contaminación de dicho aire (Kreiss, 1990). La importancia de este campo de estudio se ha reconocido finalmente, y está en marcha un importante esfuerzo investigador (Ott, Steinemann y Wallace, 2006).

La Tabla 7.10 resume algunas de las fuentes y pautas de exposición de algunos contaminantes que se encuentran habitualmente en ambientes cerrados.

TABLA 7.10. Fuentes y pautas de exposición de contaminantes del aire en espacios cerrados

Contaminante y fuentes	Pautas, concentración promedio
<i>Amiantos y otros aerosoles fibrosos</i>	
Amiantos pulverizables; ignífugos, aislamiento térmico y acústico, decoración.	0,2 fibras/mL para fibras más largas de 5 μm
Amiantos duros: suelo de vinilo y productos para el cemento	
<i>Monóxido de carbono</i>	
Queroseno y gas de calentadores, estufas de gas, estufas de leña, chimeneas, humo de tabaco	10 mg/m^3 en 8 hr, 40 mg/m^3 en 1 hr
<i>Formaldehído</i>	
Aglomerados, paneles, laminados, alfombras, falsos techos, aislamiento de espuma de urea-formaldehído, otros materiales de construcción	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
<i>Partículas inhalables</i>	
Humo de tabaco, polvo de aspiradora, estufas de leña, chimeneas	55-110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anuales, 150-350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 hr
<i>Dióxido de nitrógeno</i>	
Queroseno y gas de calentadores, estufas de gas	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anuales
<i>Ozono</i>	
Fotocopiadoras, limpiadores electrostáticos del aire	235 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$ una vez al año
<i>Radón y sus derivados</i>	
Difusión desde el suelo, aguas subterráneas, materiales de construcción	0,01 niveles de trabajo anuales
<i>Dióxido de azufre</i>	
Calentadores de queroseno	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anuales, 365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 hr
<i>Compuestos orgánicos volátiles</i>	
Humos de cocina, del tabaco, ambientadores, sprays de limpieza, pinturas, barnices, disolventes, alfombras, muebles, ropa	No hay datos

Fuente: Nagda, Rector y Koontz, 1987.

El humo ambiental del tabaco (ETS)

Un contaminante de interiores sobresale por encima de todos los demás: es el humo del tabaco. Se estima que cerca del 26% de la población adulta de los Estados Unidos son fumadores que consumen más de 500.000 millones de cigarrillos al año. El humo del tabaco contiene más de 4.000 compuestos químicos, más de 40 de los cuales son conocidos causantes de cáncer en humanos o animales, y muchos más, fuertes irritantes respiratorios. Se cree que el fumar es responsable de entre el 80 y el 90% de las muertes por cáncer de pulmón en los Estados Unidos. La tasa de mortalidad combinada de cáncer de pulmón, enfisemas y enfer-

medades cardiovasculares atribuibles al hábito de fumar es superior a medio millón al año. Desafortunadamente no sólo los fumadores sufren los efectos del tabaco.

En primer lugar definamos algunos términos. Los fumadores inhalan lo que se entiende por humo *principal*. El humo *secundario*, emitido por el ascua del cigarrillo junto con el exhalado por el fumador se conoce como *humo ambiental de tabaco* o *humo de segunda mano*. Respirar aire con humo ambiental de tabaco se denomina *fumar pasivamente o involuntariamente*.

A principios de 1993, la EPA emitió un informe (*Efectos sobre la salud respiratoria de fumar pasivamente: cáncer de pulmón y otras enfermedades*) que concluía con que el humo ambiental del tabaco causa cáncer de pulmón en adultos no fumadores y tiene importantes efectos en el aparato respiratorio de los niños. El humo ambiental del tabaco está en el Grupo A de la lista de carcinógenos humanos. La EPA concluye que el humo de segunda mano causa unas 3.000 muertes por cáncer de pulmón anualmente en los Estados Unidos, así como entre unos 150.000 y 300.000 casos de neumonía o bronquitis cada año en niños de menos de 18 meses de edad, y empeora la situación de más de un millón de niños asmáticos. Los fumadores tienen casi 10 veces más del carcinógeno benceno en su sangre que los no fumadores, y una embarazada fumadora le transfiere este benceno a su feto en desarrollo. Esto se corresponde con el hecho de que los hijos de fumadoras mueren de leucemia en un número varias veces superior al de las no fumadoras. Un estudio más reciente concluye que la incidencia del síndrome de muerte súbita aumenta según lo hace la exposición al humo del tabaco.

El amianto

Otro problema de calidad del aire de algún modo especial puede ser provocado por los materiales con contenido en amianto. El amianto solía ser un material de construcción común para la protección estructural contra incendios, aislamiento de sistemas de calefacción, falsos techos y suelos, y aislantes bajo teja. Se ha usado también en productos de consumo como guantes aislantes para chimeneas y barbacoas, muletones para tablas de plancha y soportes de resistencias en secadores de pelo.

Cuando los materiales que contienen amianto envejecen o resultan dañados de algún modo durante su uso, las fibras microscópicas que los componen pueden dispersarse en el aire del ambiente. La inhalación de estas fibras puede conducir a un cierto número de enfermedades respiratorias, como fibrosis pulmonar, cáncer de pulmón y mesotelioma. El amianto es conocido desde hace tiempo como carcinógeno; de hecho es una de las primeras sustancias catalogada como contaminante peligroso del aire en la sección 112 de la CAA. Fue identificado por la EPA como contaminante peligroso en 1971, y en 1973 se inició el Estándar Nacional de Emisiones de Amianto para Contaminantes Peligrosos del Aire (Asbestos National Emissions Standards for Hazardous Air Pollutants NESHAP). Una especialmente mortífera combinación es la exposición al amianto junto con fumar tabaco, que eleva el riesgo de cáncer de pulmón en un factor de cinco.

Hay dos tipos principales de materiales con contenido en amianto: desmenuzable y no desmenuzable. Materiales desmenuzables son aquéllos que pueden desmoronarse, pulverizarse o reducirse a polvo con las manos. Obviamente éstos son los más peligrosos puesto que las fibras de amianto se liberan fácilmente al ambiente. Los materiales no desmenuzables, como las losetas de solar de vinilo con amianto y los productos de tela asfáltica no requieren un manejo especialmente cuidadoso durante la demolición o renovación de edificios. Las sustancias desmenuzables, sin embargo, están sujetas al NESHAP en estos casos.

Puesto que perturbar el amianto que está en buenas condiciones puede crear más riesgo que sellarlo simplemente en el lugar en que se encuentra, se decide a menudo no intentar remover materiales de un edificio con contenido en amianto a menos que se sepa que existe un problema o haya que acometer un trabajo mayor de construcción.

El radón

Uno de los problemas más populares de contaminación del aire en espacios cerrados es el relativo a la acumulación de gas radón en algunos hogares. El gas radón y sus productos de desintegración son conocidos carcinógenos y pueden ser la segunda causa de cáncer de pulmón, después del hábito de fumar.

Recuérdese de la Sección 2.6 que el radón es un gas radiactivo que es parte de la cadena natural de desintegración que comienza en el uranio y termina en el plomo. Una descripción simplificada de la secuencia, junto con las vidas medias y la emisión de partículas alfa, beta y gamma, se muestra en la Figura 7.56. El gas radón formado en los poros entre los granos minerales del suelo puede abrirse paso hacia la superficie, por la que penetra a través del piso. El radón propiamente, es inerte, pero sus productos de desintegración de vida corta, polonio, plomo y bismuto, son químicamente activos y se fijan fácilmente a partículas que se inhalan y alojan en los pulmones. De hecho, el polonio emisor de radiación alfa, formado a partir de la desintegración del radón, es el que causa mayor daño pulmonar.

El radón puede proceder también de algunos materiales de construcción obtenidos de la tierra, como los ladrillos, el hormigón y las tejas. Puede ser capturado en las aguas subterrá-

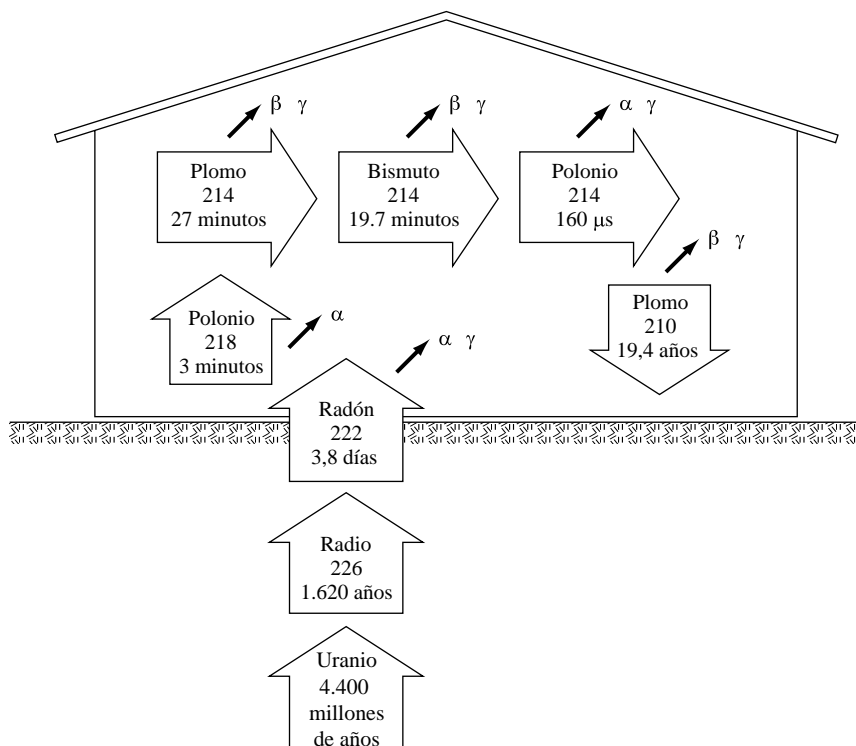


FIGURA 7.56. Serie de desintegración del uranio simplificada, con vidas medias y emisiones. El gas radón que se filtra por el suelo puede desintegrarse en el interior de los edificios.

neas y liberado cuando éstas son aireadas, por ejemplo durante la ducha (el riesgo de radón en el agua es por inhalación del gas liberado, no por beber el agua misma). Se ha detectado también en algunas fuentes de gas natural, así pueden liberarse pequeñas cantidades durante el cocinado de los alimentos. Con mucho, sin embargo, la fuente más importante de radón es el suelo bajo los edificios.

Las unidades de medida usadas para describir el radón son de alguna manera inusuales y se resumen en la Tabla 7.11. La velocidad de desintegración de 1 gramo de radio ($3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo) es el origen del *curie*. Una unidad más intuitiva es el *becquerel*, que corresponde a 1 desintegración radiactiva por segundo. El *nivel de trabajo-mes* (WLM) se basa en la exposición media de un minero que trabaja 173 horas por mes. Las concentraciones de radón en espacios cerrados se han expresado siempre en *pico-curies por litro* de aire (pCi/L). Se estima que una vivienda promedio en los Estados Unidos tiene un nivel de 1,25 pCi/L, y alrededor de 6 millones de hogares (6% del total) tienen niveles por encima de 4 pCi/L, que es el nivel de preocupación de la EPA. Modificar estos 6 millones de hogares instalando medidas de control de radón costaría del orden de 50.000 millones de dólares.

TABLA 7.11. Unidades de medida del radón

Curie	1 Ci = 37.000 millones de desintegraciones radiactivas por segundo (1 g de radio)
Picocurie	1 pCi = 2,2 desintegraciones radiactivas por minuto
Becquerel	1 Bq = 1 desintegración radiactiva por segundo
Picocurie por litro	1 pCi/L = 37 Bq/m ³
Criterio EPA	4 pCi/L = 150 Bq/m ³ (0,0000028 partes por billón de radón)
Nivel de trabajo ^(a)	1 WL = 200 pCi/L = 7.400 Bq/m ³ de radón
Nivel de trabajo-mes	1 WLM = 1 nivel de trabajo de exposición por 173 horas

^(a) 1 WL se define como 100 pCi/L de radón en equilibrio con su progenie.

Las primeras estimaciones del riesgo de cáncer de pulmón asociado con la inhalación de radón y su progenie se basaban en gran parte en estudios epidemiológicos de mineros de uranio que habían estado expuestos a altos niveles de radón y para los cuales la incidencia de este cáncer era mucho más alta que para la población general. Trasladar datos de los mineros, sin embargo, para analizar el riesgo en viviendas introduce grandes incertidumbres. Los trabajadores de las minas, por ejemplo, tendrán presumiblemente unas tasas de respiración más elevadas que la gente sentada en su casa, por lo que debería esperarse que estén mucho más expuestos tanto al radón como a partículas.

Varios estudios recientes han encontrado pruebas de altas tasas de cáncer de pulmón a unos niveles relativamente bajos de radón en viviendas. Un informe sueco de 1994 mostraba tasas progresivamente más altas de cáncer en ratas según se elevaba la exposición al radón. A niveles de 3,8 a 10,8 picocuries por litro (pCi/L), los riesgos se incrementaban en un 30% con respecto a los que vivían en casas con menos de 1,4 pCi/L. Por encima de 10,8 pCi/L, la incidencia era del 80% mayor. El sexto informe de la Academia Nacional de las Ciencias sobre los «Efectos biológicos de la radiación ionizante» de 1999 concluía que el radón causa entre 15.000 y 22.000 muertes por cáncer de pulmón anuales en los Estados Unidos, la mayoría de los cuales se daban en fumadores (NRC, 1999). Dos estudios confirmando esta correlación en Estados Unidos y en Europa en 2005 llevaron al Ministerio de Sanidad a emitir un informe sobre las repercusiones en la salud de la concentración de radón en espacios cerrados.

Muchos de los peligros asociados con el radón son causados por los productos de desintegración que se adhieren a pequeñas partículas y son inhaladas al interior de los pulmones. La combinación del humo del cigarrillo y el radón es, como resultado, especialmente mortífera. De acuerdo con los datos resumidos en la Tabla 7.12, sólo un 3% de la tasa de mortalidad debida al radón se produce entre no fumadores. Si estos datos son ciertos, bastante más del 90% del riesgo de padecer cáncer de pulmón asociado con el radón podría ser controlado simplemente con dejar de fumar, sin otro cambio en las concentraciones de radón (Nazaroff y Teichman, 1990).

TABLA 7.12. Estimación de las muertes anuales por cáncer de pulmón en los Estados Unidos atribuibles a la exposición al radón, datos de 1986

Historial fumador	Población (millones)	Muertes por cáncer de pulmón	
		Todas las causas	Atribuibles al radón
No fumador (nunca)	145	5.000	500
Ex-fumador	43	57.000	6.400
Fumador normal ^(a)	38	37.600	4.500
Gran fumador	14	30.800	4.200
Total	241	130.400	15.700

^(a) Menos de 25 cigarrillos por día.

Fuente: Nazaroff y Teichman, 1990.

Las viviendas construidas sobre suelos de alta permeabilidad y ricos en radón son más propensas a tener altos niveles de este gas. La tasa de emanación desde el suelo varía desde 0,1 pCi/m² s hasta más de 100 pCi/m² s, con un valor típico de 1 pCi/m² s. Esta enorme diversidad en las tasas de emisión es la principal causa de las variaciones en las concentraciones de radón en espacios cerrados medidas en los Estados Unidos. Cuando la tasa de emanación es baja, como es el caso de la mayoría del territorio, las casas pueden ser construidas herméticamente, orientadas al aprovechamiento de la energía, sin preocupación de los niveles de radón. En las zonas donde las emisiones de este gas son altas, las técnicas de hermetismo pueden elevar los niveles de radón en el interior. Los fumadores, por supuesto, serían los más afectados.

La EPA, el Instituto de Cartografía, y el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley de los Estados Unidos han intentado evaluar el potencial de radón, lo que ha llevado al desarrollo de mapas de radón tales como el mostrado en la Figura 7.57. Tales mapas ayudan a identificar las regiones en las que hacer pruebas de radón a las viviendas, así como sugerir recomendaciones para realizar medidas de control preventivas a las de nueva construcción. El umbral usual para llevar a cabo alguna acción es 4 pCi/L. Puesto que se encuentran a menudo variaciones significativas de los niveles dentro del mismo barrio, y entre barrios dentro de la misma ciudad, las medidas a tomar para solucionar el problema han de diseñarse después de observar cuidadosamente los resultados obtenidos en cada vivienda individual.

Las técnicas disponibles para reducir la concentración de radón dependen del tipo de construcción empleada. Muchas casas en los Estados Unidos están construidas sobre sótanos, con y sin calefacción. Otras, especialmente en el oeste, lo están con cámara bajo el piso o sobre una losa de hormigón. La ocupación de los sótanos presenta el mayor riesgo puesto que las paredes y el suelo están en gran medida expuestas a las emanaciones, mientras que la ventilación habitual es mala. Con cada tipo de construcción, las actuaciones de mitigación

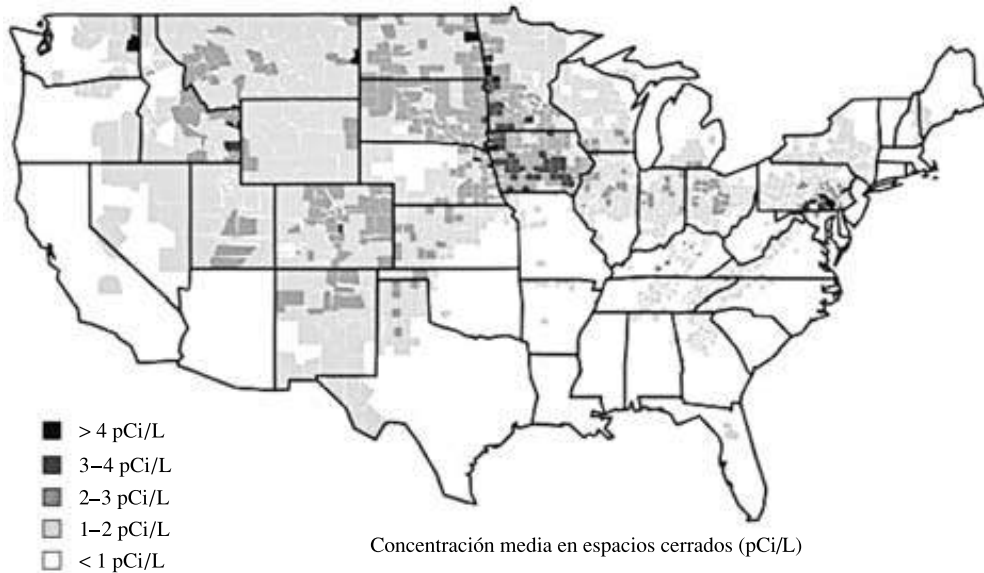


FIGURA 7.57. Concentraciones de radón medias a largo plazo en zonas habitadas de diferentes partes de los Estados Unidos.

(Fuente: <http://www.stat.columbia.edu/radon/>.)

comienzan con el sellado de cada grieta y abertura entre el piso y el suelo bajo él. Para casas con sótanos o cámaras bajo el piso, puede ser muy efectiva la ventilación de esas áreas, natural o forzada. Si el sótano tiene calefacción puede requerir una circulación con intercambiador de calor para no derrochar una cantidad de energía excesiva. Una de las técnicas más ampliamente usadas para la reducción del radón se basa en la succión bajo la plataforma de cimentación, como se muestra en la Figura 7.58. Se instalan unas chimeneas atravesando el piso y, por medio de extractores, se impulsa el gas radón absorbido del suelo a la atmósfera sobre el tejado de la casa.

Estimación de la exposición

Los compuestos tóxicos afectan a la salud humana cuando la gente se expone a ellos. Tal vez lo evidente de este hecho hace que su importancia sea a menudo pasada por alto. Para exponerse a los contaminantes, éstos deben estar en el aire que respiramos, el agua que bebemos o el alimento que ingerimos, de modo que tiene sentido el método de estimar la exposición evaluando estas rutas. Tal método, denominado *metodología de estimación de exposición total* (TEAM), fue promovido por la Oficina de Investigación y Desarrollo de la EPA en 1979, y se ha recogido ahora una considerable cantidad de datos sobre exposición real (Ott, Steinemann y Wallace, 2006).

Desde la perspectiva de la contaminación del aire, el punto de partida para una estimación total ambiental es determinar la cantidad de tiempo que se permanece en edificios, en vehículos y al aire libre. Estudios de campo a gran escala basados en diarios cuidadosamente rellenos indican que los estadounidenses están bajo techo un 89% de su tiempo, en vehículos un 6% y al aire libre 74 minutos por día, es decir el 5% del tiempo (Figura 7.59). Tal vez, sorprendentemente, los californianos, de quienes podría pensarse que estuvieran más tiempo al aire libre que la media nacional, son sólo ligeramente diferentes, con un 6%

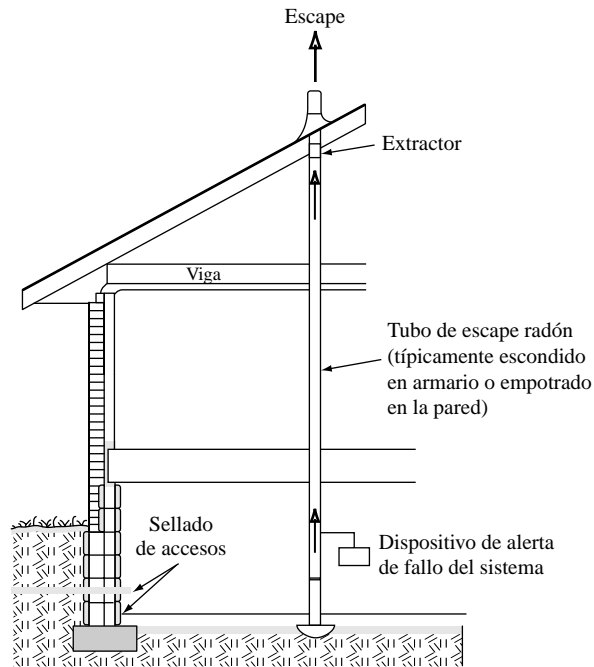


FIGURA 7.58. Un sistema de reducción de radón por succión bajo la plataforma de cimentación. (Fuente: U.S. EPA, 1993.)

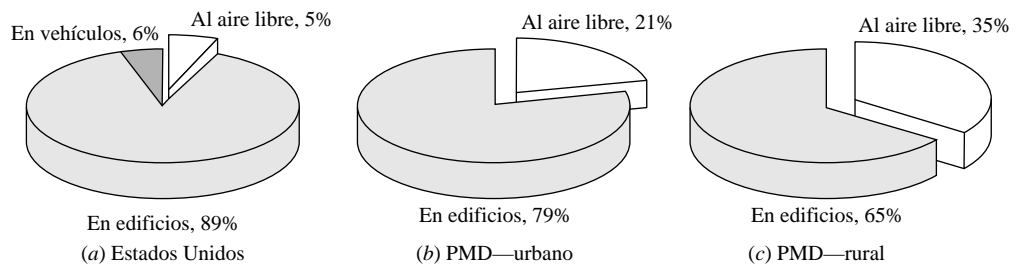


FIGURA 7.59. (a) En los Estados Unidos el 89% del tiempo se pasa dentro de edificios (Robinson, Thomas y Behan, 1991). Porcentaje de tiempo que se pasa bajo techo y al aire libre en países menos desarrollados (PMD): (b) urbano y (c) rural. (Fuente: Smith, 1993a.)

en vez de un 5 (Jenkins, 1992). También se muestran en la Figura 7.59 estimaciones del tiempo pasado en espacios cerrados en países menos desarrollados (PMD). A mayor desarrollo una mayor fracción de la población vive en áreas urbanas y pasa más tiempo bajo techo.

La importancia de la cantidad de tiempo que se pasa en espacios cerrados se enfatiza en estudios de exposición humana a un cierto número de contaminantes especialmente importantes. Estos estudios TEAM se basan en medidas de exposición real hechas con monitores de calidad del aire personales que acompañan a los participantes durante sus actividades diarias normales. Las medidas de exposición se complementan con análisis de gases en sangre para verificar la absorción real de contaminantes. Uno de tales estudios (Smith, 1993b) estima que las emisiones de partículas de las centrales térmicas de carbón en los Estados Uni-

dos son de aproximadamente 1,6 kg/persona, mientras que las emisiones de humo ambiental de tabaco son de unos 0,050 kg/persona. Esto es, las emisiones de las centrales de carbón son unas 30 veces más altas que las de tabaco. Pero aquéllas se liberan en un gran depósito, la atmósfera, mientras que éstas lo hacen en el interior de edificios, en los que la dilución es menor y donde la gente permanece la mayoría de su tiempo. En términos de partículas inhaladas se ha estimado que la exposición al humo del tabaco es 60 veces mayor que la relativa a las centrales térmicas aunque sus emisiones sólo constituyan el 3% del total. Estos datos, resumidos en la Figura 7.60, sugieren que la mayor reducción posible en las emisiones de las centrales de carbón siempre tendría mucho menor efecto en la salud pública que la llevada a cabo con pequeñas reducciones en la concentración de humo ambiental de tabaco.

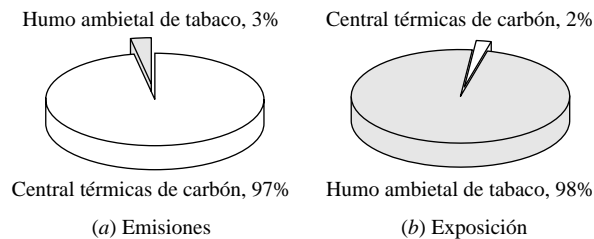


FIGURA 7.60. Emisión de partículas y exposición al humo ambiental de tabaco y a las centrales térmicas de carbón de los Estados Unidos. Del total, (a) el humo de tabaco es el 3% de las emisiones pero (b) el 98% de la exposición.

(Fuente: basado en Smith, 1993b.)

Se pueden alcanzar conclusiones similares para el benceno, carcinógeno humano de Clase A. La combustión de gasolina corre con el 82% de las emisiones de benceno en los Estados Unidos, mientras que las fuentes industriales emiten la mayor parte del resto, 14%. El humo de cigarrillo es responsable de sólo el 0,1% de todas las emisiones de benceno, pero en promedio, el 40% de toda la exposición a esta sustancia es inhalada directamente por los fumadores, y el 5% se absorbe por exposición al humo ambiental de tabaco. En comparación, todas las fuentes industriales combinadas son responsables de una exposición menor (3%) que la que sufre el fumador pasivo (5%). La Figura 7.61 muestra estos datos (Wallace, 1995).

Los cigarrillos emiten no sólo benceno sino también una multitud de otros compuestos entre los que se cuentan el estireno, tolueno, xilenos, etilbenceno, formaldehído y 1,3-butadieno. Las prendas recién sacadas de la tintorería después de un lavado en seco emiten tetracloroetileno durante días después de colgarlas en el armario. El antipolilla y muchos ambientadores emiten p-diclorobenceno, que causa cáncer en ratas y ratones. La ducha caliente, las ropas y los lavavajillas son fuentes importantes de cloroformo, otro carcinógeno. Cocinar añade hidrocarburos aromáticos policíclicos al aire de la casa. Los insecticidas almacenados en garajes y hogares son fuentes importantes de muchos otros carcinógenos que se encuentran en el interior de las viviendas. Los insecticidas de exteriores y las partículas de plomo que se sedimentan en el suelo son arrastrados a las casas con la suciedad de los zapatos. En total, los estudios TEAM sobre exposición humana a 33 compuestos orgánicos volátiles (VOC) y pesticidas en los Estados Unidos muestran que la exposición en ambientes cerrados resulta ser responsable del 85% del riesgo total de cáncer provocado por estos compuestos (Figura 7.62).

De modo que, si queremos reducir los riesgos de la contaminación del aire el lugar por donde debemos empezar es nuestra casa. Cosas simples como usar un felpudo, o quitarse los

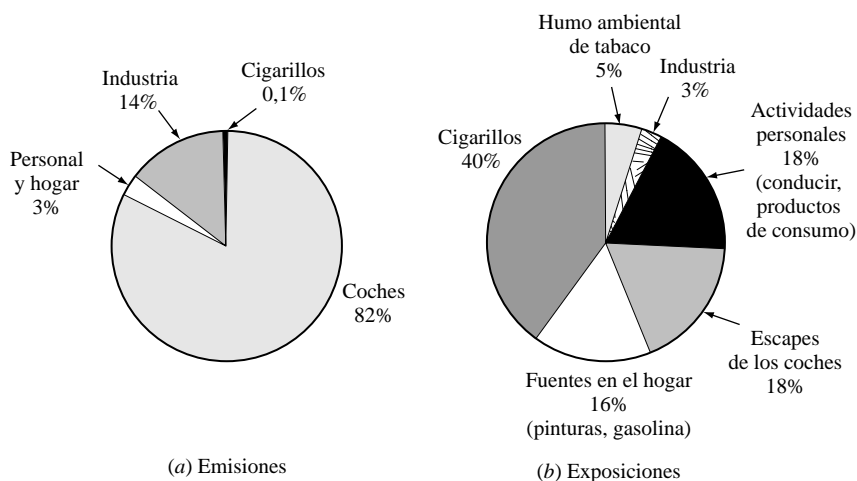


FIGURA 7.61. (a) Las emisiones de benceno son debidas fundamentalmente a los escapes de los automóviles y a las industrias, mientras que todos los cigarrillos fumados en los Estados Unidos aportan sólo el 0,1%. (b) La exposición al benceno es abrumadoramente debida a los cigarrillos, sobre todo por fumar activamente. El humo ambiental de tabaco contribuye a una exposición mayor que todas las fuentes industriales combinadas.
(Fuente: Wallace, 1995.)

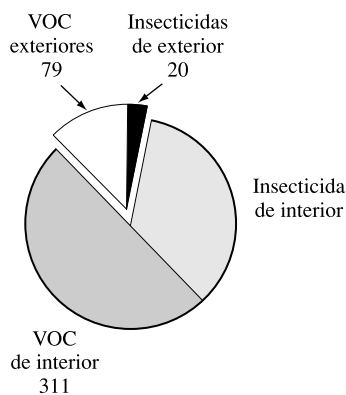


FIGURA 7.62. Los estudios TEAM sobre 33 carcinógenos que se encuentran comúnmente en los hogares, muestran un riesgo de cáncer asociado de 0,0006. Este valor es similar al relativo al radón y al del fumador pasivo. Los números se refieren al riesgo de cáncer a lo largo de la vida por millón de habitantes.
(Fuente: Wallace, 1995.)

zapatos a la entrada, pueden reducir la cantidad de contaminación que llega del exterior a nuestra casa en los zapatos. Limpiar en seco menos frecuentemente, o, por lo menos, airear las prendas durante un día o dos antes de colgarlas en el armario ayudaría bastante. Las campanas extractoras pueden reducir la exposición a las partículas y a los hidrocarburos aromáticos policíclicos., y los extractores de baño disminuir la concentración de cloroformo procedente del agua clorada de la ducha. Asegurarse de que el monóxido de carbono y otros productos de combustión formados en las calderas de calefacción y agua caliente son adecuadamente evacuados, y, por supuesto, no calentar una casa con una estufa de carbón o de

queroseno que no tienen un escape al exterior. Asegurarse de que los envases de pintura, líquidos limpiadores y otras fuentes de VOC están correctamente tapados antes de guardarlos y utilícelos sólo en lugares bien ventilados. Y, si usted fuma, hágalo en el exterior siempre que sea posible. Medidas sencillas como éstas, que no tienen coste, pueden reducir muy significativamente la exposición de las personas a los contaminantes tóxicos del aire.

En los países menos desarrollados del mundo, la exposición a los contaminantes del aire en interiores es mucho más intensa. Con los métodos tradicionales de cocinar, a menudo se utilizan combustibles «sucios» como carbón, leña, estiércol de animales y queroseno, que se queman en las casas o en cabañas de cocinar sin chimenea ni ventilación adecuada. Las mujeres y los niños están frecuentemente expuestos a concentraciones de partículas y otros productos de combustión, extremadamente altas durante largos periodos de tiempo. Como resultado aparecen elevados índices de infecciones respiratorias agudas (IRA) en niños que algunos estudios correlacionan con la exposición al humo. Las infecciones respiratorias, como la neumonía son la principal causa de mortalidad infantil en el mundo y matan a unos 4,3 millones de niños al año, esto es, un 30% más que las causadas por el asesino número dos, la diarrea. Varios estudios muestran una incidencia de IRA de dos a seis veces superior entre los niños que viven en casas donde se cocina con fuego abierto de biomasa, comparada con la de aquéllos que cuentan con cocinas de combustible moderno, como el gas butano. En China se han observado tasas igualmente elevadas de cáncer de pulmón en viviendas urbanas que queman carbón para cocinar o calentarse, comparadas con aquéllas que usan gas (Smith, 1993a). La magnitud del problema de calidad del aire interior que existe en los países en desarrollo es verdaderamente alarmante.

Filtración, ventilación y calidad del aire

Del mismo modo que sucedía con el aire exterior, la cantidad disponible de aire para diluir los contaminantes es un importante indicador de su probable concentración. El aire del interior puede ser intercambiado con el del exterior por una combinación de tres mecanismos: filtración, ventilación natural y ventilación forzada. *Filtración* es el término usado para describir el intercambio natural de aire que se produce entre un edificio y su entorno cuando puertas y ventanas se encuentran cerradas, es decir, son las fugas que existen a través de las grietas y agujeros existentes en el perímetro del edificio. *Ventilación natural* es el intercambio de aire que se produce cuando puertas o ventanas están intencionadamente abiertas para favorecer la circulación, mientras que la *ventilación forzada* sucede cuando se utilizan medios mecánicos como ventiladores o extractores, para inducir el intercambio de aire.

Se pierden grandes cantidades de energía cuando el aire climatizado (calentado o enfriado) se difunde al exterior por fugas y es reemplazado por aire exterior que debe ser de nuevo calentado o enfriado para mantener la temperatura interior deseada. No es infrecuente, por ejemplo, que se pierda un tercio de la energía necesaria para calentar y enfriar una vivienda por fugas indeseables de aire, es decir, por filtración. Alrededor del 10% del total de la energía consumida en Estados Unidos se escapa por filtración, por lo que la energía desperdiciada se traduce en un valor de decenas de miles de millones de dólares cada año. Puesto que controlar las filtraciones es bastante fácil y barato, es lógico que perseguir la estanqueidad en los edificios se haya convertido en un método popular de ahorro de energía. Desgraciadamente en el proceso podemos exacerbar los problemas de calidad del aire interior, a menos que simultáneamente reduzcamos las fuentes de contaminación.

El aire entra y sale de los edificios a través de numerosas grietas y aberturas en el perímetro de la construcción. Las inevitables rendijas en torno a puertas y ventanas son las que

primero intentamos sellar con silicona o burlete, pero hay muchas menos obvias aunque potencialmente más importantes, como las abiertas para que pasen a través de los muros, techos y suelos tuberías, conductos y cableado eléctrico; chimeneas sin tiro; agujeros para luces de techo empotradas, trampillas y cualquier otro paso practicable para comunicar los espacios calefactados con la buhardilla; grietas donde las paredes arrancan de los cimientos; rejillas de ventilación en baños y cocinas; y, tal vez lo más importante, conductos de sistemas de calefacción por aire forzado con fugas. La Figura 7.63 muestra algunos de estos puntos de filtración.

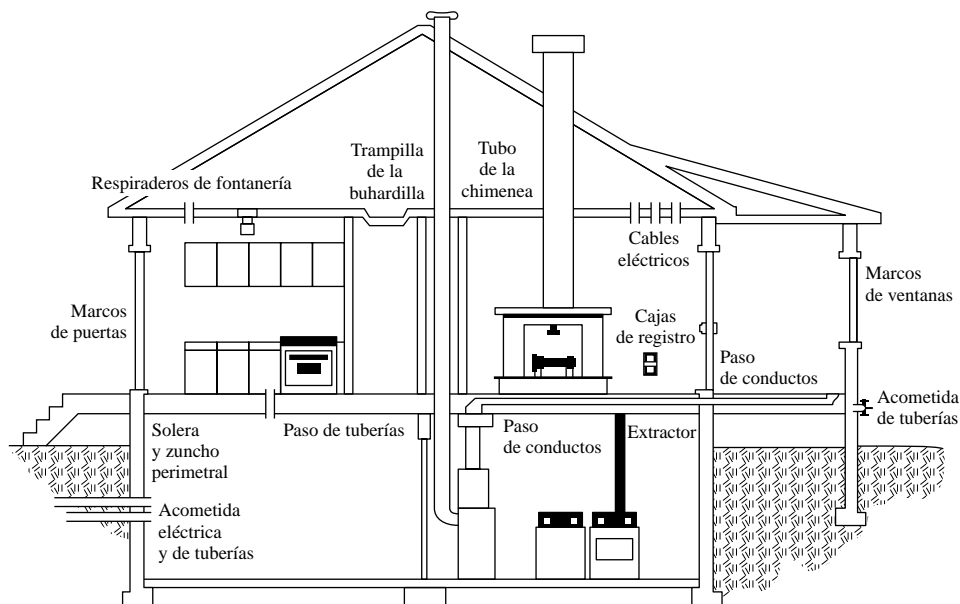


FIGURA 7.63. Puntos de filtración en viviendas.

(Fuente: Asociación Nacional de Constructores de Viviendas.

http://www.nahbrc.org/greenguidelines/userguide_energy_prescriptive.html.)

La filtración se favorece con las diferencias de presión entre el interior y el exterior del edificio. Estas diferencias de presión pueden ser causadas por el viento o por diferencias de temperatura. El viento que sopla contra una edificación crea una presión más alta sobre una cara que sobre otra, lo que induce filtraciones a través de las rendijas y otras aberturas de las paredes. Las filtraciones inducidas por temperatura (lo que se suele llamar *efecto chimenea*) tienen menos que ver con los agujeros de las paredes que con las aberturas en suelos y techos. En invierno, el aire cálido de un edificio tiende a subir y a salir por las aberturas del techo, con lo que arrastra aire frío a través de las del suelo. Así, la tasa de filtración depende no sólo de la velocidad del viento y la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, sino también por la situación de las fugas de la edificación. Las fugas en el piso y el techo favorecen filtraciones por efecto chimenea, mientras que las situadas en las superficies verticales fomentan filtraciones debidas al viento.

Además, mientras que normalmente se asume que al aumentar la tasa de filtración se mejorará la calidad del aire, puede no ser así en una situación importante: para el radón, que se emite desde el suelo bajo el edificio. Para el radón, la filtración inducida por el viento ayuda a reducir la concentración en el interior ya que permite entrar aire fresco, libre de este

gas, en el edificio. El efecto chimenea, sin embargo, al arrastrar el aire desde el suelo, puede en realidad ayudar a entrar más radón al revés de la limpieza que normalmente causa la filtración. La Figura 7.64 ilustra estas importantes diferencias.

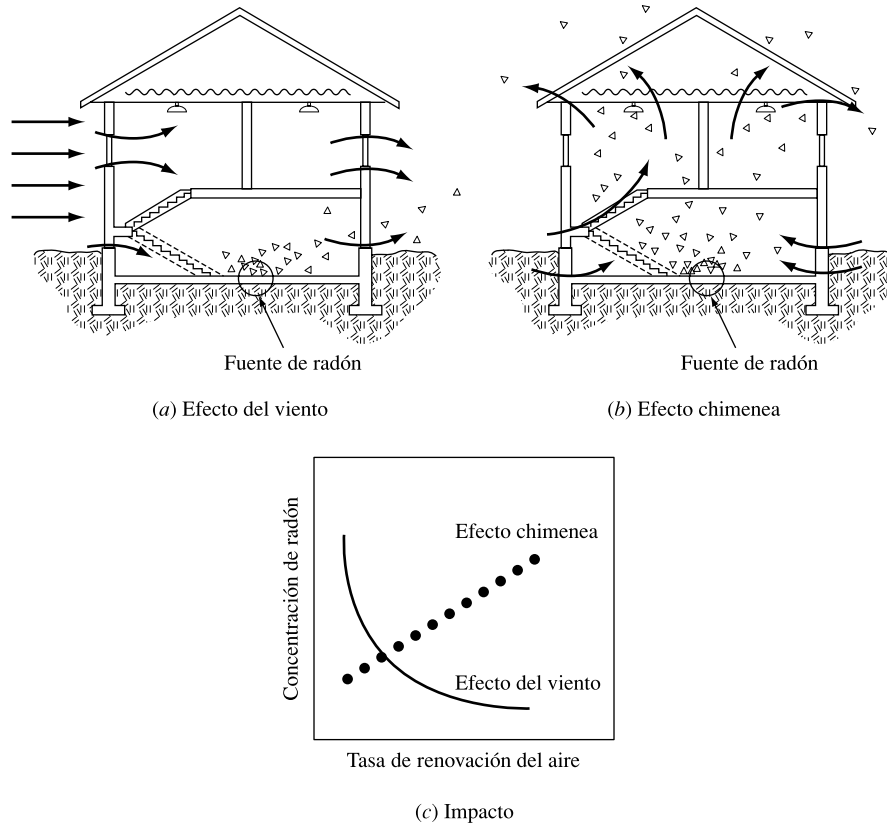


FIGURA 7.64. La infiltración con efecto viento ayuda a reducir el radón, mientras que la infiltración con efecto chimenea podría hacer que se incrementara. (Fuente: Reece, 1988.)

Las tasas de filtración pueden expresarse en unidades como m^3/hr o pies cúbicos por minuto (cfm), pero más a menudo las unidades se dan en cambios de aire por hora (ach). La tasa de cambio de aire en ach es simplemente el número de veces por hora que un volumen de aire igual al volumen de la casa se cambia por aire del exterior. Las tasas de filtración promedio en los hogares estadounidenses están entre 0,5 y 1 ach, con las casas de nueva construcción en los valores más bajos y las más antiguas en los más altos. Algunas viviendas mal construidas tienen tasas de hasta 3-4 ach. Hoy, las nuevas, cuidadosamente edificadas, pueden conseguir unas tasas de filtración de hasta 0,1 ach utilizando hoja de plástico continuo «barrera de gases» en los muros, junto con la aplicación de espuma y silicona para sellar grietas y agujeros. Con estas tasas de filtración tan bajas, la concentración de humedad y contaminantes puede ser suficientemente importante como para requerir ventilación extra, y lo delicado es conseguir esta ventilación sin perder el calor que contiene el aire viciado a expulsar.

Un modo de obtener ventilación extra con la mínima pérdida de calor es con un mecanismo llamado de *ventilación con recuperación de calor* (HRV), en el cual el aire viciado

saliente, a mayor temperatura, transfiere gran parte de su calor al aire fresco que se introduce en la vivienda. Otro método más simple y más barato es proveer de sistemas de ventilación mecánica que puedan ser usados intermitentemente y en la vecindad inmediata de cualquier fuente de contaminante. Los extractores en los baños y las campanas en las cocinas, por ejemplo, pueden reducir enormemente la contaminación interior y con un uso racional, las pérdidas de calor pueden ser pequeñas.

Un modelo de calidad del aire interior

Resulta bastante inmediato aplicar los conceptos desarrollados hasta aquí al problema de la calidad del aire en interiores. El modelo simple que usaremos trata el edificio como una caja simple y bien mezclada, con fuentes y sumideros de los contaminantes en cuestión. Si es necesario, este modelo sencillo puede ampliarse para incluir varias cajas, cada una caracterizada por concentraciones constantes de contaminantes. Un modelo de dos cajas, por ejemplo, se usa a veces para estimaciones de radón, en las cuales una caja constituye el modelo del aire del espacio habitable y la otra el del espacio bajo la vivienda.

Consideremos el modelo simple de una caja de una edificación como la mostrada en la Figura 7.65. Hay fuentes de contaminación en el edificio que pueden caracterizarse por sus tasas de emisión. Además, el aire exterior que penetra en el edificio puede aportar nuevas fuentes de contaminación, que se añaden a las que pudieran generarse dentro. Estas sustancias pueden eliminarse por ventilación o por filtración, o pueden ser no conservativas y degradarse con el tiempo. También, si hay sistemas mecánicos de limpieza del aire, algunos compuestos pueden ser extraídos, pasados por el sistema de limpieza, y retornados como aire limpio. Para poder mantener este modelo tan sencillo, ignoraremos tales sistemas de limpieza.

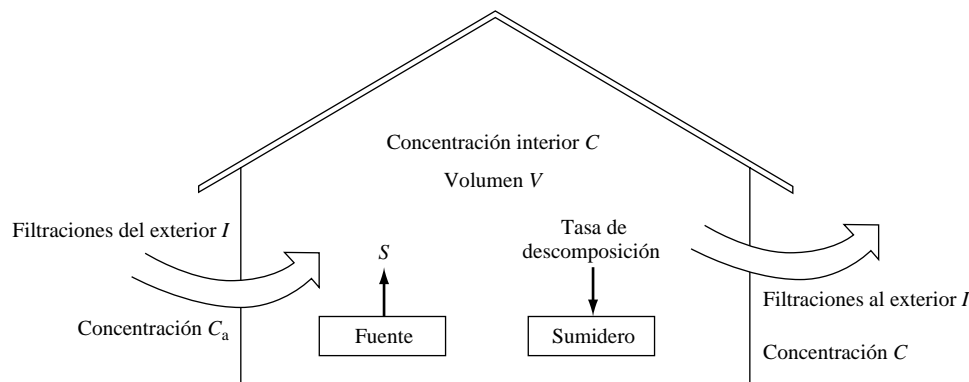


FIGURA 7.65. Modelo de caja para la contaminación del aire interior.

Un balance de masas para la contaminación del edificio, suponiendo que el aire está bien mezclado, es

$$\left(\frac{\text{tasa de incremento}}{\text{en la caja}}\right) = \left(\frac{\text{tasa de contaminación}}{\text{que entra en la caja}}\right) - \left(\frac{\text{tasa de contaminación}}{\text{que sale de la caja}}\right) - \left(\frac{\text{tasa de descomposición}}{\text{en la caja}}\right)$$

$$V \frac{dC}{dt} = (S + C_a n V) - C n V - K C V \quad (7.62)$$

donde

- V = Volumen de espacio climatizado en la edificación ($\text{m}^3/\text{cambio de aire}$).
- n = Número de cambios de aire por hora.
- S = Tasa de emisión de la fuente (mg/hr).
- C = Concentración en el interior (mg/m^3).
- C_a = Concentración ambiente (mg/m^3).
- K = Velocidad de degradación del contaminante o reactividad ($1/\text{hr}$).

Una manera fácil de encontrar la solución para el estado estacionario es hacer $dC/dt = 0$ para obtener

$$C(\infty) = \frac{(S/V) + C_a n}{n + K} \quad (7.63)$$

Una solución general es

$$C(t) = \left[\frac{(S/V) + C_a n}{n + K} \right] [1 - e^{-(n+K)t}] + C(0)e^{-(n+K)t} \quad (7.64)$$

donde

$C(0)$ = Concentración inicial en el edificio.

Algunos de los contaminantes que podríamos querer incluir en el modelo, como el CO y el NO, pueden tratarse como si fueran conservativos, esto es, no se descomponen con el tiempo o tienen unas reactividades muy bajas, así $K = 0$. La Ecuación (7.64) se simplifica considerablemente para las condiciones básicas en las que la concentración ambiente exterior es nula ($C_a = 0$); la concentración inicial de contaminantes [$C(0) = 0$] y los contaminantes son conservativos ($K = 0$). Bajo estas circunstancias

$$C(t) = \frac{S}{nV} (1 - e^{-nt}) \quad (7.65)$$

En la Tabla 7.13 se dan ejemplos de tasas de emisión para varias fuentes, y en la 7.14 se indican estimaciones de velocidades de descomposición para contaminantes comunes de interior.

Las estufas portátiles de queroseno, como la analizada en el Ejemplo 7.18 se hicieron bastante populares al poco de la crisis de energía de los años 70, y continúan usándose en las viviendas, especialmente en países en vías de desarrollo, a pesar de las etiquetas de advertencia. Hay dos tipos de ellas: las radiantes, que calientan los objetos de forma directa, en el modo en que se transfiere el calor por radiación, y las convectivas, que calientan el aire, que, a su vez, pasa el calor a los objetos de la habitación. Los calefactores radiantes trabajan a temperaturas más bajas, hecho que reduce las emisiones de NO_x , pero su generación de CO es superior a las del tipo convectivo, de mayor temperatura. Ambos tipos de calefactores de queroseno tienen tasas de emisión suficientemente altas para necesitar cuidados especiales cuando se utilizan en espacios cerrados como una casa o una caravana.

El Ejemplo 7.19 muestra cómo podemos estimar la concentración de radón en una vivienda usando este modelo simple de contaminación del aire interior.

TABLA 7.13. Algunas tasas de emisión de contaminantes medidas para diversas fuentes

Fuente	Tasa de emisión de contaminante (mg/hr)			
	CO	NO _x ^(a)	SO ₂	HCHO
Cocina				
Horno	1.900	52	0,9	23
Quemador	1.840	83	1,5	16
Estufa de queroseno ^(b)				
Convectiva	71	122	—	1,1
Radiante	590	15	—	4
Un cigarrillo (humo ambiental) ^(c) (mg)	86	0,05	—	1,44

^(a) NO_x expresado como N.

^(b) Estufa nueva portátil, emisiones de calentamiento no incluidas, SO₂ no medido.

^(c) Fuente: Consejo de Investigación Nacional (NRC), 1981.

Fuente: Traynor *et al.*, 1981, 1982.

TABLA 7.14. Constante de descomposición o reactividad, > K

Contaminante	K (1/hr)
CO	0,0
NO	0,0
NO _x (como N)	0,15
HCHO	0,4
SO ₂	0,23
Partículas (<0,5 μm)	0,48
Radón	7,6 × 10 ⁻³

Fuente: Traynor *et al.*, 1981.

EJEMPLO 7.18. Una estufa portátil de queroseno

Una estufa portátil de queroseno se somete a observación en laboratorio en condiciones controladas. Después de dos horas de funcionamiento en una cámara de 46 m³ de volumen, con una tasa de filtración de 0,25 ach, la concentración de monóxido de carbono (CO) alcanza las 20 ppm. El CO inicial en la cámara es 0 y el nivel ambiente fuera de ella es despreciable a lo largo de la prueba. Tratando el CO como un contaminante conservativo, hallar la tasa a la que la estufa emite CO. Predecir la concentración estacionaria si la estufa tuviera que usarse en una vivienda pequeña para calentar 120 m³ de aire con una tasa de filtración de 0,4.

Solución. Comenzamos por convertir la concentración volumétrica de 20 ppm a mg/m³, utilizando (1.9), en condiciones de 1 atm de presión y 25 °C.

$$C(\text{mg}/\text{m}^3) = \frac{\text{ppm} \times \text{peso mol}}{24,465} = \frac{20 \times (12 + 16)}{24,465} = 22,9 \text{ mg}/\text{m}^3$$

Reordenando (7.65) para encontrar la tasa de emisión de la estufa S , tenemos

$$S = \frac{nVc(t)}{(1 - e^{-nt})} = \frac{0,25 \text{ ac/hr} \times 46 \text{ m}^3/\text{ac} \times 22,9 \text{ mg/m}^3}{[1 - e^{-0,25/\text{hr} \times 2 \text{ hr}}]} = 669 \text{ mg/hr}$$

En la casa pequeña, usando (7.63), la concentración sería

$$C(\infty) = \frac{S}{nV} = \frac{669 \text{ mg/hr}}{0,4 \text{ ac/hr} \times 120 \text{ m}^3/\text{ac}} = 13,9 \text{ mg/m}^3 \text{ (12,1 ppm)}$$

Lo que excede la concentración ambiente estándar de 9 ppm para el CO.

EJEMPLO 7.19. Concentración de radón en una vivienda

Supongamos que el suelo bajo una casa de una planta emite $1 \text{ pCi/m}^2\text{s}$ de gas radón. En el peor de los casos supondremos que todo este gas se filtra a través del piso y penetra en la casa. Ésta tiene 250 m^2 de superficie, una altura de techos promedio de $2,6 \text{ m}$, y una tasa de cambio de aire de $0,9 \text{ ach}$. Estimar la concentración estacionaria de radón en el aire, suponiendo que la concentración ambiente es despreciable.

Solución. Podemos hallar la concentración estacionaria usando (7.62) con $C_a = 0$. La tasa de descomposición del radón se da en la Tabla 7.14, y es $K = 7,6 \cdot 10^{-3}/\text{hr}$, que podríamos haber calculado usando (3.8) junto con el periodo de semidesintegración del radón, que es de 3,8 días.

$$C(\infty) = \frac{S/V}{n + K} = \frac{\left(\frac{1 \text{ pCi/m}^2 \text{ s} \times 3.600 \text{ s/hr} \times 250 \text{ m}^2}{250 \text{ m}^2 \times 2,6 \text{ m}} \right)}{0,9/\text{hr} + 7,6 \times 10^{-3}/\text{hr}} = 1,5 \times 10^3 \text{ pCi/m}^3 = 1,5 \text{ pCi/L}$$

Lo que es un valor típico para las casas en los Estados Unidos.

PROBLEMAS

- 7.1. Convertir los siguientes estándares de calidad de aire interior (ocho horas) establecidos por la Agencia de Seguridad y Salud en la Administración de los U.S (OSHA) de ppm a mg/m^3 (a 25° C y una atmósfera), o viceversa.
 - a) Dióxido de Carbono (CO_2), 5.000 ppm.
 - b) Formaldehído (HCHO), $3,6 \text{ mg/m}^3$.
 - c) Óxido nítrico (NO), 25 ppm.
- 7.2. Consideremos una nueva central eléctrica de 600 MW con un 38% de eficacia que quema 9.000 Btu/b de carbón con un contenido en azufre del 1%. Si usamos un depurador eficiente al 70%, ¿cuál sería la tasa de emisión de azufre (lb/hr)?

- 7.3.** En la central eléctrica del Problema 7.2, si todo el azufre oxidado pasa a SO_2 , ¿cuántas libras por hora de SO_2 se liberarían si la planta se equipa con un depurador eficiente en un 90%? ¿Cuántas libras de SO_2 por kilovatio-hora de electricidad generada serían liberadas?
- 7.4.** Una central eléctrica que funciona por combustión de un nuevo carbón ha sido construida usando un sistema de control de emisiones de azufre que es eficiente en un 70%. Si todo el azufre oxidado pasa a SO_2 , y si las emisiones de SO_2 son limitadas a 0,6 lb SO_2 por millón Btu de calor en la central eléctrica, ¿cuál es el máximo porcentaje de contenido de azufre que puede tener el combustible?
- a) Si quema 15.000 Btu/lb de carbón.
b) Si quema 9.000 Btu/lb de carbón.
- 7.5.** El carbón de conformidad no tiene más de 1,2 lb de SO_2 por 10^6 Btu de calor emitido, sin control. ¿Cuál es el máximo porcentaje de azufre que podrían contener 12.000 Btu/lb de carbón de conformidad si todo el azufre oxidado pasa a SO_2 durante la combustión?
- 7.6.** ¿Qué descriptor AQI (Bueno, moderado, etc.) debería proporcionar la calidad del aire en los siguientes días?

Contaminante	Día 1	Día 2	Día 3
O_3 , 1-hr (ppm)	0,15	0,22	0,12
CO, 8-hr (ppm)	12	15	8
$\text{PM}_{2,5}$, 24-hr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	130	150	10
PM_{10} , 24-hr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	180	300	100
SO_2 , 24-hr (ppm)	0,12	0,20	0,05
NO_2 , 1-hr (ppm)	0,4	0,7	0,1

- 7.7.** El estándar OSHA para tratar la exposición durante 8 horas de CO es 50 ppm. ¿Qué porcentaje de COHb resultaría de esta exposición?
- 7.8.** Una competición interior de «tractor pull»³ dio en una concentración 436 ppm de CO. ¿Qué porcentaje de COHb tendría que soportar un espectador que está expuesto durante una hora a este nivel? ¿Cuánto tiempo se necesitaría para alcanzar el 10% de COHb?, ¿cuál es el nivel en el que la mayoría de la gente experimentaría mareo y dolor de cabeza?
- 7.9.** ¿Qué hidrocarburo, RH, reaccionando con el radical OH^\bullet en (7.16), produciría formaldehído, HCHO, dentro de (7.19)?
- 7.10.** Supongamos que el Propano, $\text{CH}_2 = \text{CH}-\text{CH}_3$, es el hidrocarburo (RH) que reacciona con el radical hidroxilo OH^\bullet en (7.16). Escribe el conjunto de reacciones químicas que terminarían formando un aldehído. ¿Cuál es el aldehído final?

³ Nota del traductor: «tractor pull», es una competición de tractores que arrastran un trineo con un determinado peso.

- 7.11.** Encontrar la velocidad de sedimentación de una partícula de $2 \mu\text{m}$ de diámetro con densidad 1.500 kg/m^3 . Si esta partícula hubiera sido arrojada a una altura de 8.000 m durante una explosión volcánica, estimar el tiempo que hace falta para alcanzar la tierra (a nivel del mar). Podemos asumir que la viscosidad del aire no cambia lo suficiente como para preocuparse. Si el promedio de vientos es 10 m/s , ¿hasta cuanto de lejos soplaría en su descenso?
- 7.12.** Encontrar el tiempo de permanencia en la atmósfera de una partícula de $10 \mu\text{m}$ con la unidad de densidad (ejemplo, la densidad del agua, 10^6 g/m^3) a 1.000 m de altura.
- 7.13.** La Ecuación (7.24) vale para números Reynolds mucho menores que 1:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{aire}} d v}{\eta}$$

Donde ρ_{aire} es la densidad del aire ($1,29 \times 10^3 \text{ g/m}^3$), d es el diámetro de la partícula, v es su velocidad, y η es la viscosidad. Encontrar la velocidad de sedimentación y los números Reynolds para partículas que tienen la densidad de gotitas de agua, con diámetros de

- a) $1 \mu\text{m}$.
 - b) $10 \mu\text{m}$.
 - c) $20 \mu\text{m}$.
- 7.14.** Para el siguiente oxigenación potencial de la gasolina, encontrar el porcentaje por peso de oxígeno. Luego encuentra la fracción (por peso) de oxigenación necesaria para proveer del 2% de oxígeno el preparado resultante de gasolina (que no tiene oxígeno) y oxigenar.
- a) Etanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$.
 - b) Éter metil terbutílico (MTBE), $\text{CH}_3\text{OC}(\text{CH}_3)_3$.
 - c) Etil ter-butil éter (ETBE), $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OC}(\text{CH}_3)_3$.
 - d) Éter metílico terciario - amilo (TAME), $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_2\text{OCH}_3$.
- 7.15.** La densidad específica del etanol oxigenado ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) es $0,791$, mientras que para la gasolina pura es $0,739$. Un preparado de gasolina (sin oxígeno propio) y etanol necesita incorporar el 2% de oxígeno por peso para que resulte el combustible. ¿Qué fracción volumétrica del preparado resultante necesita ser etanol?
- 7.16.** Calcula la eficacia del combustible CAFE para los coches de combustibles flexibles siguientes
- a) 18 mpg en gasolina y 12 mpg en etanol.
 - b) 22 mpg en gasolina y 15 mpg en etanol.
 - c) 27 mpg en gasolina y 18 mpg en etanol.
- 7.17.** El crédito del CAFE que está previsto para vehículos de energía de gas natural es similar a los combustibles de alcohol (Ejemplo 7.6). Las reglas AMFA dicen que 100 ft^3 de gas natural equivalen a $0,823$ galones de gasolina, y cada galón equivalente cuenta como $0,15$ galones de gasolina. Todas las millas conducidas —se asume—

están accionadas por gas natural. Demostrar que un vehículo que logra hacer 25 millas con 100 ft^3 de gas natural tendría una tasación de CAFE de 203 mpg.

- 7.18.** Usando la energía contenida en el combustible como criterio, ¿cuál sería el precio de fábrica que el E85 tiene que tener si la gasolina cuesta 3,50 dólares/galón?
- 7.19.** En energía-contenida básica, ¿cuáles serían más baratos?
- E85 a 2 \$/galón o gasolina a 3 \$/galón.
 - E85 a 2,50 \$/galón o gasolina a 3,30 \$/galón.
 - E85 a 2,75 \$/galón o gasolina a 4 \$/galón.
- 7.20.** Un automóvil con un tanque de combustible de 15 galones obtiene 25 mpg cuando está accionado con gasolina pura. Usando el valor de la densidad de energía de la Tabla 7.6, estimar la eficiencia del combustible (mpg) y el rango (millas) para ese coche cuando corre con
- Gasóleo (E10).
 - E85.
 - Medio tanque de gasolina y medio tanque de E85.
- 7.21.** Supongamos que un vehículo eléctrico híbrido 50-mpg (HEV) es reconstruido con partes nuevas de baterías adicionales, haciéndole un vehículo híbrido con enchufe (PHEV). Las baterías le dan al PHEV un rango de 30 millas en electricidad, con una potencia eficaz de ruedas de 0,25 el kWh /milla. Después de esas 30 millas, el peso adicional de las baterías hace que el coche sólo obtenga 45 mpg al funcionar con gasolina. El PHEV recorre 50 millas cada día, ida y vuelta, para ir al trabajo, 5 días a la semana. Los fines de semana, se conduce durante 25 millas al día para recados.
- A 3,50 \$ por galón de gasolina y 0,08 \$/kWh de electricidad, ¿cuál es el coste del combustible expresado en céntimos/milla? Compárelo con el HEV original.
 - Si el coche no hubiera sido convertido, ¿cuál sería el coste anual del combustible y cuánto ahorraría al año transformándolo en un PHEV?
 - Si la conversión costase 3.000 dólares, ¿cuál es el plazo de recuperación de esta inversión? ¿Cuántas millas tienen que hacer las baterías para que esta inversión valga la pena?
- 7.22.** Usa las notas al pie de la Figura 7.28 para verificar la altura del *well to wheels* CO_2 /millas barra para los siguientes vehículos:
- Un vehículo convencional 25-mpg.
 - Un vehículo híbrido-eléctrico (HEV) 50-mpg.
 - Un vehículo híbrido con enchufe (PHEV).
 - Un vehículo eléctrico alimentado por batería (EV).
 - Un vehículo de la célula de combustible (FCV).
- 7.23.** Supongamos que el EV y el PHEV 0,25 kWh/milla de la Figura 7.28 obtienen el 60% de su electricidad del gas natural de una central eléctrica de ciclo combinado (NGCC) que envía energía a la red de suministro con un 96% de eficiencia. El gas natural emite $14,41 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$.

- a) Encontrar los $\text{gCO}_2/\text{milla}$ para este EV.
- b) Encontrar los $\text{gCO}_2/\text{milla}$ para este PHEV.
- 7.24.** Los Ángeles tiene una radiación solar equivalente a 5,5 horas por día de pleno sol calentando el techo de un garaje orientado al sur. ¿Cuánto tendría que medir para conseguir una conexión a la red de PV (módulos solares) con un 17% de eficiencia y obtener los 0,25 kWh/milla de energía que necesita un EV o PHEV para hacer una media de 30 millas por día? Asumamos un 75% de factor de conversión desde la tasa de energía PV a la AC liberada a la red eléctrica.
- 7.25.** Consideremos un 50% de eficiencia del combustible en la célula de óxido sólido (SOFC) usada en un sistema combinado de calor y energía (CHP). Los SOFC convierten el 50% de la energía del combustible del gas natural en electricidad y el 20% en calor útil. Comparar su eficiencia energética global con un sistema separado que provee del mismo calor y electricidad con un 30% de eficiencia en la red de suministro eléctrico y una caldera un 80% eficiente.
- 7.26.** Comparar las emisiones de un sistema de gas natural que combina calor y electricidad (CHP) con los siguientes sistemas separados de generación de calor y electricidad. Para las emisiones de carbono, asumir que el gas natural emite 14,4 gC/MJ, y para la red de suministro 175 gC/MJ. El julio equivalente a un kWh de electricidad es 3,6 MJ.
- a) Un CHP con una eficacia eléctrica del 36% y un 40% de eficacia térmica contra una caldera de gas eficiente en un 85% para calor y red eléctrica.
- b) Un CHP con un 50% de eficacia eléctrica y un 20% de eficacia térmica contra un 33% de eficacia, 280 g/kWh, de una central eléctrica que funciona con carbón y un 80% de eficacia para una caldera que quema gas para obtener calor.
- 7.27.** En 1989, $0,39 \times 10^{12}$ g de partículas fueron liberados cuando se quemaron 685 millones de toneladas (2.000 lb) de carbón en centrales eléctricas produciendo 1.400.000 millones de kWh de electricidad. Suponer que el contenido medio de calor del carbón es 10.000 Btu/lb. ¿Cuál ha sido la eficacia media (calor a electricidad) de estas plantas de carbón? ¿Cuántas partículas en suspensión habrían sido liberadas si todas las plantas siguiesen la New Source Performance Standards que limita las emisiones de partículas a 0,03 lb por 10^6 Btu de calor?
- 7.28.** En este capítulo, la siguiente expresión fue utilizada en la derivación de la tasa de lapso adiabática seca: $dQ = C_p dT - V dP$ (Ecuación 7.37). Derivar esta expresión comenzando con la declaración de la primera ley de la termodinámica: $dQ = dU + dW$, donde $dU = C_v dT$ es el cambio en la energía interna cuando una cantidad de calor, dQ , es añadida al gas, elevando su temperatura a dT y causando su expansión que realiza un trabajo $dW = P dV$. C_v es el calor específico a volumen constante. Luego use la ley de los gases ideales, $PV = nRT$, donde n son los moles (una constante) y R es la constante del gas, junto con la definición de la derivada de un producto, $d(PV) = P dV + V dP$, para encontrar otra expresión para dQ . Finalmente, usando la definición $C_p = (dQ/dT)$ a presión constante, salta a la vista que $C_p = C_v + nR$.

7.29. Suponer la siguiente altitud atmosférica y los datos de temperatura con los que se la relaciona.

Altitud	Temperatura (°C)
0	20
100	18
200	16
300	15
400	16
500	17
600	18

- a) ¿Cuál sería la profundidad de la mezcla?
 - b) ¿Cómo haríamos de alta la columna de humo a 21 °C de una chimenea de 100 m si se levanta sobre la tasa de lapso adiabático seca? ¿Esperaríamos que fuera una columna bucle, cónica, en ventilación, o de fumigación?
- 7.30. Para el perfil de temperaturas dado en el Problema 7.29, si la temperatura de la superficie durante el día es de 22 °C, y un anemómetro de la estación meteorológica a una altura de 10 m muestra un promedio de vientos de 4 m/s, ¿cuál sería el coeficiente de ventilación? Asumir estabilidad de clase C, y usa el viento en la altura media para la profundidad de la mezcla.
- 7.31. Una chimenea alta y una chimenea pequeña cercana tienen columnas como se muestra en la Figura P7.31. ¿Cuál es el perfil de la temperatura atmosférica que tendría más probabilidad de causar ese par de columnas? Las líneas punteadas representan la tasa de lapso adiabático seca.

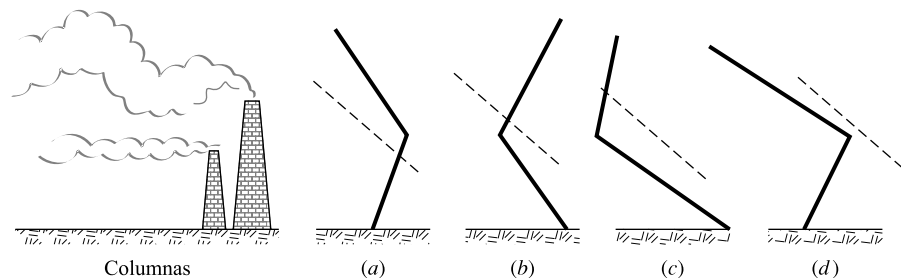


FIGURA P7.31.

- 7.32. El modelo gaussiano de columna de una fuente puntual para una central eléctrica usa 50 m como altura efectiva (véase Figura 7.32) de la chimenea. La noche está nublada. (Nota: Esto no es lo mismo que «nublado» en este modelo; Comprobar las notas al pie de la Tabla 7.8). Debemos averiguar la contaminación a nivel del suelo en dos posiciones, A y B, que están a 1,2 y 1,4 km en la dirección del viento que mueve el humo de la chimenea.
- a) ¿A qué distancia tendrá lugar la máxima concentración de contaminación? ¿Qué posición (A o B) tendría la contaminación más elevada?

- b) Supongamos cielos claros, y que la velocidad del viento está por debajo de los 5 m/s. ¿Se moverá la posición en la dirección del viento en la cual ocurre la máxima concentración? ¿Si es así, se moverá más cerca de la chimenea o se alejará de la chimenea? (H sigue siendo 50 m).
- c) Bajo las nuevas condiciones del apartado (b), ¿qué casa experimentaría la mayor contaminación?

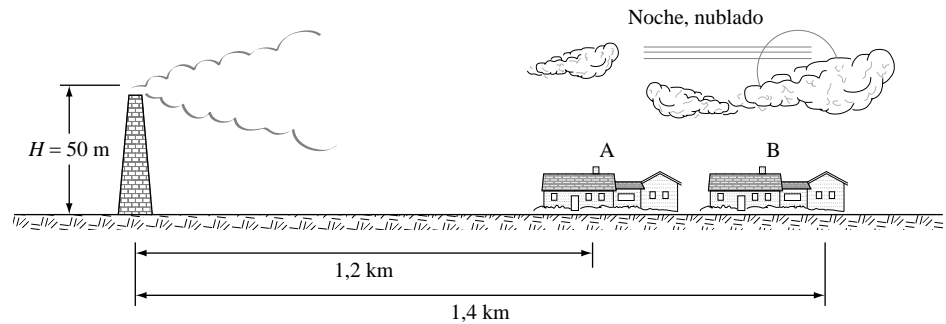


FIGURA P7.32.

- 7.33. Supongamos que una hoguera emite CO a razón de 20 g/s en una noche clara cuando el viento sopla a 2 m/s. Si la altura efectiva de la chimenea es de 6 m, (a) ¿qué concentración de CO esperaríamos a nivel del suelo estando a 400 m a favor del viento? (b) Estimar la máxima concentración a nivel del suelo.
- 7.34. Una central eléctrica que funciona con la combustión de carbón con una altura efectiva de chimenea de 100 m emite 1,2 g/s de SO_2 por megavatio de energía liberado. Si se asume que los vientos soplan a 4 m/s de altura de la chimenea, y a apenas 3 m/s a 10 m, ¿hasta cuantos MW podría emitir la planta sin exceder los $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 a nivel del suelo? (Primero decida cuál estabilidad conduce a la clasificación para las peores condiciones.)
- 7.35. Una central eléctrica con efectividad del 35% que funciona por combustión de carbón con una altura efectiva de 100 m emite SO_2 a razón de $0,6 \text{ lb}/10^6 \text{ btu}$ en la planta. Si se asume que los vientos soplan a 4 m/s de altura de la chimenea, y a apenas 3 m/s a 10 m, ¿hasta cuantos MW podría emitir la planta sin exceder los $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 a nivel del suelo?
- 7.36. Una chimenea emitiendo 80 g/s de NO tiene una altura efectiva de chimenea de 100 m. La velocidad del viento es de 4 m/s a 10 m, y es un día claro de verano con sol. Estimar la concentración de NO a nivel del suelo
- Directamente en la dirección en la que sopla el viento a una distancia de 2 km.
 - En el punto de la dirección a favor del viento donde el NO es máximo.
 - En un punto localizado a 2 km en la dirección en la que sopla el viento y a 0,1 km fuera del eje de la dirección del viento.
- 7.37. Para la estabilidad de clase C, la proporción σ_y/σ_z es esencialmente una constante, independiente de la distancia x . Asumiendo que es una constante, hacer la derivada de (7.49) y

- a) Mostrar la distancia en la dirección del viento de una chimenea en la cual la máxima concentración tiene lugar en el punto donde concuerda $\sigma_z = H/\sqrt{2} = 0,707 H$
- b) Demostrar que la máxima concentración es

$$C_{\text{máx}} = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u e} = \frac{0,117Q}{\sigma_y \sigma_z u}$$

- c) Demostrar que $C_{\text{máx}}$ es inversamente proporcional a H^2 .

- 7.38.** La chimenea más alta del mundo está en un horno de fundición de cobre en Sudbury, Ontario. Mide 380 m de altura y tiene un diámetro interior en la parte superior de 1,52 m. Si los gases de la chimenea salen a 130 °C y a 20 m/s mientras que la temperatura ambiental es de 10 °C y los vientos en lo alto de la chimenea son de 8 m/s, estimar la altura efectiva de la chimenea usando el modelo Briggs. Asumir una atmósfera ligeramente inestable de clase C.
- 7.39.** Repetir el Problema 7.38 para una atmósfera estable e isotérmica (la temperatura no cambia con la altitud).
- 7.40.** Una central eléctrica tiene una chimenea de 100 m con un radio interior de 1 m. Los gases expulsados dejan la chimenea con una velocidad de la salida de 10 m/s y una temperatura de 120 °C. La temperatura ambiente es de 6 °C, se estima que los vientos a la altura efectiva de la chimenea son de 5 m/s, la velocidad del viento en superficie es 3 m/s, y es un día nublado de verano. Estimar la altura efectiva de esta chimenea.
- 7.41.** Una central eléctrica del 200 MW tiene una chimenea de 100 m con un radio de 2,5 m, el gas fluye al exterior con una velocidad de 13,5 m/s, y a una temperatura de 145 °C. La temperatura ambiente es de 15 °C, la velocidad del viento en la chimenea es de 5 m/s, y la atmósfera es estable, clase E, con una tasa de lapso de 5 °C/km. Si emite 300 g/s de SO₂, estimar la concentración a ras de tierra a una distancia de 16 km en la dirección en la que sopla el viento.
- 7.42.** Una fuente emite 20 g/s de algún contaminante por una chimenea con 50 m efectivos de altura y vientos que rondan los 5 m/s. En una simple gráfica, esboza la concentración en la dirección del viento para una clasificación estable A, C y F, usando la Figura 7.52 identificar la concentración máxima y la distancia.
- 7.43.** Una fuente emite 20 g/s de algún contaminante y vientos que rondan los 5 m/s, en un día de clase C. Usa la Figura 7.52 para encontrar las concentraciones máximas para una altura efectiva de la chimenea de 50, 100, y 200 m. Notar si la concentración es apenas proporcional para $(1/H^2)$, como el Problema 7.37 sugiere.
- 7.44.** Se propone la ubicación de una planta de papel a 1 km contra el viento de un pueblo. Emitirá 40 g/s de sulfuro de hidrógeno, el cual tiene un umbral de olor de cerca de 0,1 mg/m³. Los vientos en la chimenea pueden variar de 4 a 10 m/s soplando hacia el pueblo. ¿Qué altura máxima debería tener la chimenea para asegurar concentraciones inferiores a 0,1 veces el umbral del olor en las afueras del pueblo en un día de clase B? Al ser conservativa, la chimenea será diseñada sin asumir la crecida de la columna. Si el pueblo se extiende más allá de la distancia de 1 km, ¿experimenta-

rán algunos edificios concentraciones más altas que una residencia en la frontera bajo estas condiciones?

- 7.45.** Una chimenea con una altura efectiva de 45 m emite SO_2 a razón de 150 g/s. Los vientos son estimados en 5 m/s a la altura de la chimenea, la clase de estabilidad es C, y hay una inversión a 100 m. Estimar la concentración a nivel del suelo en el punto donde las reflexiones de la inversión comienzan a ocurrir y en un punto situado a dos veces esta distancia en la dirección del viento.
- 7.46.** Un punto de origen con una altura efectiva de chimenea de 50 m emite 80 g/s de SO_2 , en un día claro de verano con vientos de superficie de 4 m/s. Los vientos a 50 m son de 5 m/s. Un estrato de inversión empieza a una elevación de 250 m
- Estimar la concentración de SO_2 a nivel del suelo a una distancia de 4 km a favor del viento de la chimenea.
 - Si no hubiera habido estrato de inversión, estimar la concentración a 4 km en la dirección del viento.
- 7.47.** Una larga línea de quemar desperdicios agrícolas emite 0,3 g/m-s de partículas en suspensión en una clara caída de la tarde con vientos que soplan a 3 m/s en perpendicular a la línea. Estimar la concentración de partículas a nivel del suelo en la dirección del viento de la línea.
- 7.48.** Una autopista que pasa a unos 200 m de una casa tiene 10.000 vehículos por la hora pasando. Cada coche emite un promedio de 1,5 g/mi de NO_x , y los vientos soplan a 2 m/s a través de la autopista hacia la casa. Estimar la concentración del NO_x en la casa en un día de verano cerca del mediodía (asumiendo que el NO_x es químicamente estable).
- 7.49.** Considera un modelo de caja para la contaminación del aire de una fuente de área situada sobre una península de tierra (véase Figura P7.49). La longitud de la caja es de 15 km, su anchura es de 80 km, y una inversión de la radiación restringe la mezcla a 15 m. El viento lleva aire limpio a lo largo de la dimensión de la caja a 0,5 m/s. Entre las 4 y las 6 de la tarde hay 250.000 vehículos en la carretera, cada uno circula a 40 km y cada uno emite 4 g/km de CO.

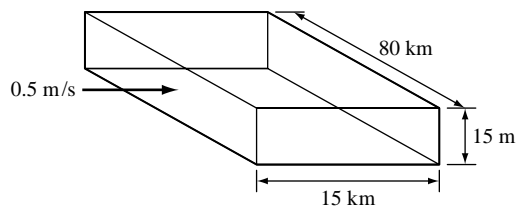


FIGURA P7.49.

- Encontrar la tasa media de emisiones de CO durante un periodo de dos horas (CO g/s por m^2 de terreno).
- Estimar la concentración de CO a las 6 PM si no había CO en el aire a las 4 PM. Supongamos que el CO es conservativo y que hay una mezcla completa e instantánea en la caja.

- c) Si la velocidad del viento es igual a 0, usar la fórmula (7.58) para obtener la relación entre el CO y el tiempo y usarlo para encontrar el CO sobre la península a las 6 PM.
- 7.50.** Considera un modelo de caja para el aire derramado sobre una ciudad de 1×10^5 m de lado, con una profundidad de mezcla de 1.200 m. Los vientos libres de SO₂ soplan a 4 m/s contra un lado de la caja. El SO₂ es emitido de la caja a razón de 20 kg/s. Si se considera que el SO₂ es conservativo, estimar la concentración estable en el aire emitido.
- 7.51.** Con la misma emisión de aire y las mismas condiciones ambientales dadas en el Problema 7.50, suponer que las emisiones ocurren sólo en los días laborables. Si las emisiones se detienen a las 5 PM en viernes, estimar la concentración de SO₂ a medianoche. Si comienzan de nuevo el lunes a las 8 AM, qué concentración tendría a las 5 PM.
- 7.52.** Si las condiciones estables han sido alcanzadas por la ciudad en el Problema 7.50 y que luego el viento desciende a 2 m/s, estimar la concentración de SO₂ dos horas más tarde.
- 7.53.** Si el viento que sopla sobre el aire que desciende del Problema 7.50 tiene $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO₂ en él, y la concentración del SO₂ en el aire emitido a las 8 AM del lunes es $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Estimar la concentración al mediodía, asumiendo que esa emisión es todavía de 20 kg/s.
- 7.54.** Con el mismo aire emitido y las condiciones ambientales dadas en el problema 7.50, si el SO₂ no se conserva y de hecho tiene una reactividad de 0,23/h, estimar su concentración estable sobre la ciudad.
- 7.55.** Se va a usar un gas trazador para determinar la tasa de cambio de aire en una sala. Inyectando un gas estable en la sala y observando el descenso de la concentración con el tiempo, podremos estimar I (ach). La ecuación que determina el proceso es

$$C = C_0 e^{-It}$$

Tomando logaritmos en ambos lados tenemos: $\ln C = (\ln C_0) - It$.

Así, haciendo una gráfica de $\ln C$ con respecto al tiempo, tendremos una línea recta de pendiente negativa igual a la tasa de filtración I (véase Figura P7.55).

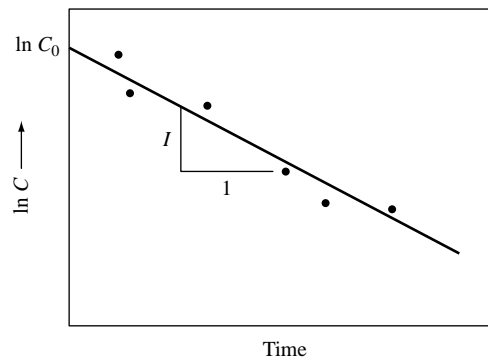


FIGURA P7.55.

Supongamos que se obtienen los siguientes datos

Tiempo (hr)	Concentración (ppm)
0	10,0
0,5	8,0
1,0	6,0
1,5	5,0
2,0	3,3

Hacer una gráfica de $\ln C$ respecto del tiempo, hallar la pendiente y con ello la tasa de filtración I (ach).

- 7.56.** Una vivienda de una planta con tasa de filtración de 0,5 ach tiene 200 m² de superficie y un volumen total de 500 m³. Si el suelo emite 0,6 pCi/m²-s de radón y todo él entra en la casa, estimar la concentración estacionaria de radón en el interior.
- 7.57.** Si la casa del Problema 7.56 se hubiera construido de dos pisos con 100 m² en cada planta y el mismo volumen total, ¿cuál hubiera sido la concentración de radón estimada?
- 7.58.** Si una persona vive 30 años en la casa del Problema 7.56, estimar el riesgo de cáncer por la exposición al radón resultante. Usar los datos de potencia del radón de los Problemas 4.10 y 4.12 y los factores de exposición estándar para las condiciones residenciales dadas en la Tabla 4.10.
- 7.59.** Consideremos una vivienda «hermética» de 300 m³ que tiene una tasa de filtración de 0,2 ach. La única fuente de CO en la casa es la cocina de gas, y la concentración del ambiente exterior es siempre cero. Supongamos que no hay CO en la casa a las 6 de la tarde, pero a esa hora el horno y dos quemadores se encienden durante una hora. Asumir que el aire de la casa está bien mezclado y estimar la concentración de CO en la casa a las 7 de la tarde y a las 10 de la noche.
- 7.60.** Una estufa convectiva de queroseno se enciende en una habitación de 27 m³ de aire bien mezclado con una tasa de filtración de 0,39 ach. Después de una hora de funcionamiento la concentración de NO alcanza las 4,7 ppm. Tratando el NO como un contaminante conservativo
- Estimar la tasa de emisión de NO de la estufa (mg/hr).
 - Estimar la concentración de NO que se esperaría en la habitación una hora después de apagada la estufa.
 - Si se tuviera que usar en la casa descrita en el Problema 7.59, ¿cuál sería la concentración estacionaria de NO causada por la estufa?
- 7.61.** Hallar la velocidad de sedimentación de partículas de 2,5 micras que tienen una densidad de $1,5 \times 10^6$ g/m³. Usar el modelo de caja bien mezclada para estimar el tiempo de permanencia en una sala que tiene un techo de 2,50 m de altura.

- 7.62. Considerar una central térmica de carbón de 100 MW, con un rendimiento del 33,3%, que trabaja a su potencia máxima durante un 70% del tiempo y está parada el 30% restante (es decir, su factor de capacidad es de 0,70).

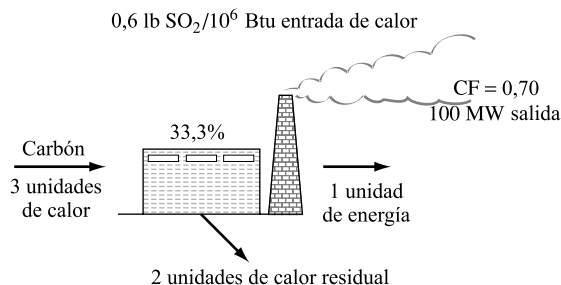


FIGURA P7.62.

- ¿Cuánta electricidad (kWh/año) producirá la central?
- ¿Cuántas Btu anuales de energía serán necesarias para generar esa electricidad? (Nota: a un 33,3% de rendimiento, se necesitan 3 kWh de energía a razón de 3,412 Btu/kWh para producir 1 kWh de electricidad, como se muestra en la Figura P7.62.)
- Supongamos que esta central ha estado emitiendo 0,6 lb de SO₂ por millón de Btu de energía de entrada, y supongamos que tiene suficientes créditos de SO₂ para continuar haciéndolo. Si la compañía eléctrica decide cerrar esta central y sustituirla por una de gas natural que no emite SO₂, ¿cuántas toneladas de este gas se evitaría emitir a la atmósfera cada año? Si los créditos de SO₂ se pagan a 400 dólares, ¿cuánto dinero podría recibir la compañía vendiendo los equivalentes a las emisiones de un año?

REFERENCIAS

American Lung Association, American Medical Association, U.S. Consumer Product Safety Commission, U.S. Environmental Protection Agency, 1994, *Indoor Air Pollution: An Introduction for Health Professionals*, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Briggs, G. A., 1972, Dispersion of chimney plumes in neutral and stable surroundings, *Atmospheric Environment*, 6(1).

California Air Resources Board (CARB), 2004, *Initial Statement of reasons for proposed rulemaking, public hearing to consider adoption of regulation to control greenhouse gas emissions from motor vehicles*, August.

California Energy Commission, 1989, *News and Comment, CEC Quarterly Newsletter*, No. 23, Fall.

Chestnut, L. G., and D. M. Mills, 2005, A fresh look at the benefits and costs of the U.S. Acid Rain Program, *Journal of Environmental Management*, 77(3):252-266.

DeCicco, J., and M. Ross, 1993, *An Updated Assessment of the Near-Term Potential for Improving Automotive Fuel Economy*, American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington, DC.

- Diamond, R. C., and D. T. Grimsrud, 1984, *Manual on Indoor Air Quality*, prepared by Lawrence Berkeley Laboratory for the Electric Power Research Institute, Berkeley, CA.
- Energy Foundation, *China's Energy Challenge, 2004 Annual Report*, 2005.
- Energy Information Administration (EIA), 2006, *International Energy Outlook*, 2006, Washington, DC.
- Farrell, A. E., R. J. Plevin, B. T. Turner, A. D. Jones, M. O'Hare, and D. M. Kammen, 2006, Ethanol can contribute to energy and environmental goals, *Science*, 311(27):506-508.
- Gifford, F. A., 1961, Uses of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion, *Nuclear Safety*, 2(4).
- Interagency Taskforce on Acid Precipitation, 1983, *Annual Report 1983 to the President and Congress*, Washington, DC.
- Jacobson, M. Z., 2007, *Effects of Ethanol (E85) Versus Gasoline Vehicles on Cancer and Mortality in the United States* (in publication).
- Jenkins, P. L., T. J. Phillips, E. Mulberg, and S. P. Hui, 1992, Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollution sources, *Atmospheric Environment*, 26A(2): 2141-2148.
- Kreiss, K., 1990, The sick building syndrome: Where is the epidemiologic basis?, *American Journal of Public Health*, 80:1172-1173.
- Lovins, A., and H. Lovins, 1995, Reinventing the wheels, *The Atlantic Monthly*, January.
- Martin, D. O., 1976, The change of concentration standard deviation with distance, *Journal of the Air Pollution Control Association*, 26(2).
- McCosh, D., 1994, Emerging technologies for the supercar, *Popular Science*, June, 95-101.
- Moyer, C. B., 1989, *Global Warming Benefits of Alternative Motor Fuels*, Acurex Corporation, Mountain View, CA.
- Murphy, J. J., M. A. Delucchi, D. R. McCubbin, and H. J. Kim, 1999, The cost of crop damage caused by ozone air pollution from motor vehicles, *Journal of Environmental Management*, 55:273-289.
- Nagda, N. L., H. E. Rector, and M. D. Koontz, 1987, *Guidelines for Monitoring Indoor Air Quality*, Hemisphere, Washington, DC.
- National Research Council, 1981, *Indoor Pollutants*, National Academy Press, Washington, DC.
- National Research Council, 1999, *Health Effects of Exposure to Radon (BEIR VI)*, National Academy Press, Washington, DC.
- Nazaroff, W. W., and K. Teichman, 1990, Indoor radon, exploring U.S. federal policy for controlling human exposures, *Environmental Science and Technology*, 24:774-782.
- NEDO. 1994, *NEDO Creates New Energy*, New Energy and Industrial Technology Development Organization, Tokyo.
- OTA, 1984, *Acid Rain and Transported Air Pollutants, Implications for Public Policy*, Office of Technology Assessment, Washington, DC.
- Ott, W. R., A. C. Steinemann, and L. A. Wallace, 2006, *Exposure Analysis*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Pasquill, F., 1961, The estimation of the dispersion of windborne material, *Meteorological Magazine*, 90: 1063.
- Perkins, H. C., 1974, *Air Pollution*, McGraw-Hill, New York.
- Pershagen, G., G. Akerblom, O. Axelson, B. Clavensjo, L. Damber, G. Desai, A. Enflo, F. Lagarde, H. Mellander, and M. Svartengren, 1994, Residential radon exposure and lung cancer in Sweden, *New England Journal of Medicine*, 330(3):159-164.

- Peterson, W. B., 1978, *User's Guide for PAL-A Gaussian Plume Algorithm for Point, Area, and Line Resources*, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- Portelli, R. V., and P. J. Lewis, 1987, Meteorology, in *Atmospheric Pollution*, E. E. Pickett (ed.), Hemisphere, Washington, DC.
- Powell, J. D., and R. P. Brennan, 1988, *The Automobile, Technology and Society*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Powell, J. D., and R. P. Brennan, 1992, *Automotive Technology*, Stanford University, Stanford, CA.
- Raloff, J., 1995, Heart-y risks from breathing fine dust, *Science News*, 148, July 1.
- Reece, N. S., 1988, Indoor air quality, *Homebuilding & Remodeling Resource*, November/December.
- Robinson, J. P., J. Thomas, and J. V. Behar, 1991, Time spent in activities, locations, and microenvironments: A California-national comparison. Report under Contract No. 69-01-7324, Delivery Order 12, Exposure Assessment Research Division, National Exposure Research Center, U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, NV.
- Seinfeld, J. H., and S. N. Pandis, 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Shepard, M., 1988, Coal technologies for a new age, *EPRI Journal*, Electric Power Research Institute, Jan./Feb.
- Smith, K. R., 1993a, Fuel combustion, air pollution exposure, and health: The situation in the developing countries, *Annual Review of Energy and Environment*, 18:529-566, Annual Reviews Inc., Palo Alto, CA.
- Smith, K. R., 1993b, Taking the true measure of air pollution, *EPA Journal*, U.S. Environmental Protection Agency, October- December, 6-8.
- SMUD, 1993, *Fuel Cell Power Plants*, Sacramento Municipal Utility District, Sacramento, CA.
- The World Bank, 1997, *Clear Water, Blue Skies: China's Environment in the New Century*, Washington, DC.
- Thomas, V. M., 1995, The elimination of lead in gasoline, *Annual Review of Energy and the Environment*, Annual Reviews, Inc., Palo Alto.
- Traynor, G. W., D. W. Anthon, and C. D. Hollowell, 1981, *Technique for Determining Pollutant Emissions from a Gas-Fired Range*, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-9522, December.
- Traynor, G. W., J. R. Allen, M. G. Apte, J. F. Dillworth, J. R. Girman, C. D. Hollowell, and J. F. Koonce, Jr., 1982, *Indoor Air Pollution from Portable Kerosene-Fired Space Heaters, Wood-Burning Stoves, and Wood-Burning Furnaces*, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-14027, March.
- Turner, D. B., 1970, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- U.S. Department of Energy (U.S. DOE), 2006, *Biodiesel Handling and Use Guidelines*, 3rd ed., DOE/GO-102006-2358, September.
- U.S. Department of Transportation, 2002, *Effects of the Alternative Motor Fuels Act CAFE Incentives Policy: Report to Congress*, March, Washington, DC.
- U.S. DOE and Southern Company, 1997, *Control of Nitrogen Oxide Emissions: Selective Catalytic Reduction (SCR)*, Clean Coal Technology Topical Report Number 9, July.
- U.S. EPA, 1993, *Radon, The Threat with a Simple Solution*, EPA 402-K-93-008, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

U.S. EPA, 1994a, *Acid Rain Program: Conservation and Renewable Energy Reserve Update*, EPA 430-R-94-010, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

U.S. EPA, 1994b, *National Air Quality and Emissions Trends Report*, 1993, EPA-454/R-94-026, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

U.S. EPA, 1995a, *Air Quality Trends*, EPA-454/F-95-003, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

U.S. EPA, 1995b, *1993 Air Toxic Release Inventory, Public Data Release*, EPA 745-R-95-019, Environmental Protection Agency, Washington, DC.

U.S. EPA, 2003, *Air Trends Report*, Washington, DC.

U.S. EPA, 2006a, *NO_x Budget Trading Program 2005 Program Compliance and Environmental Results*, September, retrieved from <http://www.epa.gov/airmarkets>.

U.S. EPA, 2006b, *September 2006 Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for Particle Pollution*, Washington, DC.

U.S. EPA, 2006c, *Light-Duty Automotive Technology and Fuel Economy Trends: 1975 through 2006*, EPA 420-S-06-003, Washington, DC.

U.S. HEW, 1969, *Control Techniques for Particulate Air Pollutants*, National Air Pollution Control Administration, Washington, DC.

U.S. HEW, 1970, *Air Quality Criteria for Carbon Monoxide*, AP-62, National Air Pollution Control Administration, Washington, DC.

U.S. PHS, 1991, *Preventing Lead Poisoning in Young Children*, U.S. Department of Health and Human Services, Washington, DC.

Wadden, R. A., and P. A. Scheff, 1983, *Indoor Air Pollution, Characterization, Prediction, and Control*, Wiley-Interscience, New York.

Wallace, L., 1993, The TEAM studies, *EPA Journal*, U.S. Environmental Protection Agency, October-December, 23-24.

Wallace, L., 1995, Human exposure to environmental pollutants: A decade of experience, *Clinical and Experimental Allergy*, 25:4-9.

Wark, K., and C. F. Warner, 1981, *Air Pollution, Its Origin and Control*, Harper & Row, New York.

Williamson, S. J., 1973, *Fundamentals of Air Pollution*, Addison-Wesley, Reading, MA.

WHO, UNEP, 1992, *Urban Air Pollution in Megacities of the World*, World Health Organization and the United Nations Environment Programme, Blackwell Publishers, Oxford, UK.

Yeager, K. E., 1991, Powering the second electrical century, in *Energy and the Environment in the 21st Century*, J. W. Tester (ed.), MIT Press, Boston.

Yokum, J. E., D. R. Murray, and R. Mikkelsen, 1991, Valdez Air Health Study-Personal, Indoor, Outdoor, and Tracer Monitoring, Paper No. 91-172.12, 84th Annual Meeting of the Air and Waste Management Association, Vancouver, BC.