

Espectrometría de masas	¿Cuál es la masa molecular y la fórmula?
Espectroscopia de infrarrojo	¿Qué grupos funcionales están presentes?
Espectroscopia de ultravioleta	¿Está presente un sistema de electrones π conjugados?
Espectroscopia de resonancia magnética nuclear	¿Cuál es la estructura de carbono-hidrógeno y conectividad?

¿POR QUÉ ESTE CAPÍTULO?

Encontrar las estructuras de nuevas moléculas, ya sean pequeñas sintetizadas en el laboratorio o de proteínas y ácidos nucleicos grandes halladas en los organismos vivos, es primordial en el desarrollo de la química y la bioquímica. Sólo podemos estudiar de manera superficial la determinación de la estructura en este libro, pero después de leer éste y el siguiente capítulo debería tener una buena idea del intervalo de las técnicas estructurales disponibles y de cómo y cuándo se utiliza cada una.

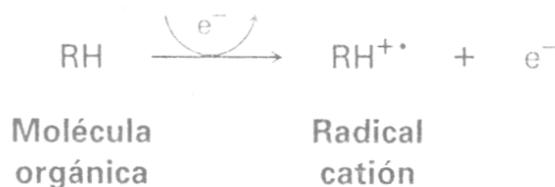
12.1 Espectrometría de masas de moléculas pequeñas: instrumentos de sector magnético

En su definición más sencilla, la **espectrometría de masas (EM)** es una técnica para medir la masa y, por tanto, la masa molecular (MM) de una molécula. Además, con frecuencia es posible obtener información acerca de las moléculas al medir las masas de los fragmentos producidos cuando se rompen las moléculas.

Están disponibles más de 20 tipos diferentes de espectrómetros de masas que dependen de la aplicación prevista, pero todos tienen tres partes básicas: una *frente de ionización* en la que se ioniza a las moléculas, un *analizador de masas* en el que se separan los iones por su relación de masa a carga (m/z), y un *detector* en el que registran los iones separados.

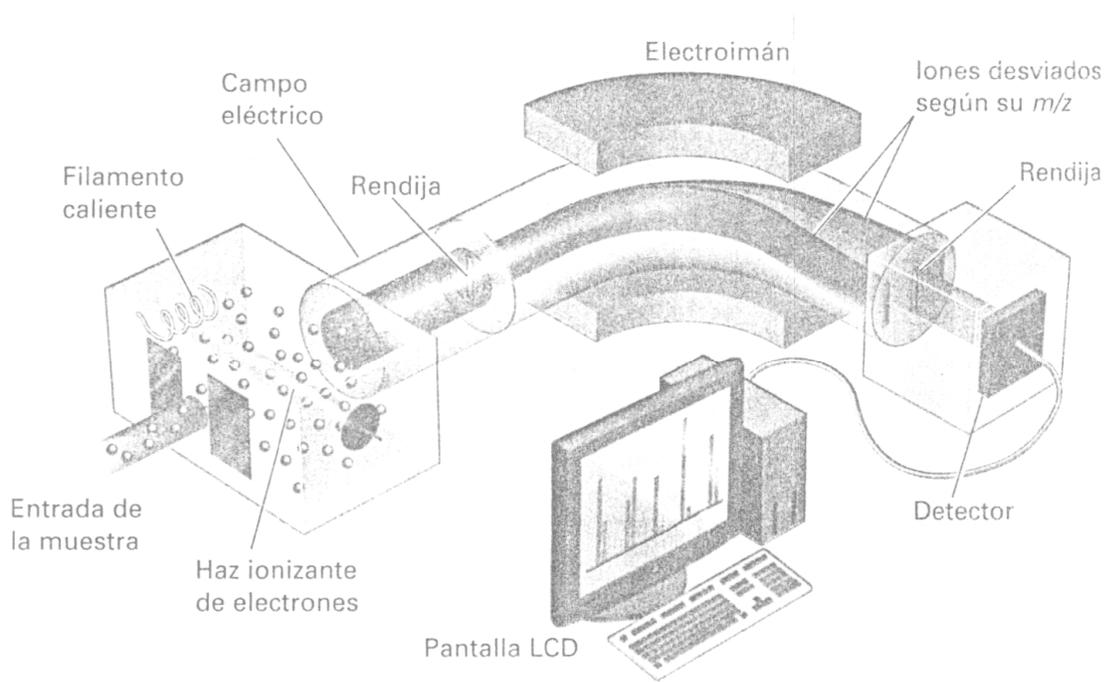


Quizás el espectrómetro de masas más común utilizado para propósitos rutinarios en el laboratorio, es el instrumento con impacto electrónico y con sector magnético mostrado esquemáticamente en la figura 12.1. En la fuente de ionización se evapora una pequeña cantidad de la muestra, donde ésta se bombardea por un flujo de electrones de alta energía. Puede variarse la energía del haz de electrones pero por lo regular es de 70 electrón volts (eV), o 6700 kJ/mol. Cuando un electrón de alta energía golpea una molécula orgánica, desprende un electrón de valencia de la molécula, produciendo un *radical catión*; *catión* porque la molécula pierde un electrón y tiene ahora una carga positiva; *radical* porque la molécula tiene ahora un número impar de electrones.



El bombardeo electrónico transfiere tanta energía que la mayor parte de los radicales catión se *fragmentan* después de la formación. Salen despedidos por la acción de un campo eléctrico y lo fragmenta en pedazos más pequeños, algunos de los cuales retienen la carga positiva, y algunos de los cuales son neutros. Los fragmentos fluyen a través de una tubería curvada en un campo magnético poderoso, el cual los desvía a diferentes rutas de acuerdo con su relación de masa a carga (m/z). Los fragmentos neutros no son desviados por el campo magnético y se pierden en las paredes de la tubería, pero los fragmentos cargados positivamente son registrados por el detector en el espectrómetro de masas, el cual los registra en forma de picos en las distintas relaciones de m/z . Dado que por lo regular es 1 el número de cargas z en cada ion, el valor de m/z de cada ion es sencillamente su masa m . Pueden analizarse masas de hasta aproximadamente 2500 unidades de masa atómica (uma).

Figura 12.1 Esquema de un espectrómetro de masas de ionización con electrones y sector magnético. Las moléculas se ionizan al colisionar contra electrones de alta energía, causando que se fragmenten algunas de las moléculas. El paso de los fragmentos cargados a través de un campo magnético los separa de acuerdo con sus masas.



El espectro de masas de un compuesto se representa típicamente como una gráfica de barras con las masas (valores m/z) en el eje x , y la intensidad, o abundancia relativa de los iones de cierta relación m/z que llega al detector en el eje y . Al pico más alto que se le asigna una intensidad del 100 por ciento, se llama pico base, y el pico que corresponde al radical catión sin fragmentar se llama pico principal o *ion molecular* (M^+). La figura 12.2 muestra el espectro de masas del propano.

Por lo regular, los patrones de la fragmentación espectral de masas son complejos, y con frecuencia el ion molecular no es el pico base. Por ejemplo, el espectro de masas del propano en la figura 12.2 muestra un ion molecular de $m/z = 44$, que es sólo casi el 30% de la altura del pico base de $m/z = 29$. Además están presentes varios otros iones fragmentados.

12.6 Espectroscopia de infrarrojo

La región infrarroja (IR) del espectro electromagnético cubre el intervalo desde justo arriba del visible (7.8×10^{-7} m) a aproximadamente 10^{-4} m, pero únicamente la porción media desde 2.5×10^{-6} m a 2.5×10^{-5} m es utilizada por los químicos orgánicos (figura 12.13). Por lo regular las longitudes de onda en la región IR se dan en micrómetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m), y las frecuencias se dan en números de onda en lugar de hertz. El número de onda ($\tilde{\nu}$) es el recíproco de la longitud de onda en centímetros, y por lo tanto se expresa en unidades de cm^{-1} .

$$\text{Número de onda: } \tilde{\nu} (\text{cm}^{-1}) = \frac{1}{\lambda (\text{cm})}$$

Por tanto, la región IR útil es de 4000 a 400 cm^{-1} , que corresponde a las energías de 48.0 kJ/mol a 4.80 kJ/mol (11.5 - 1.15 kcal/mol).

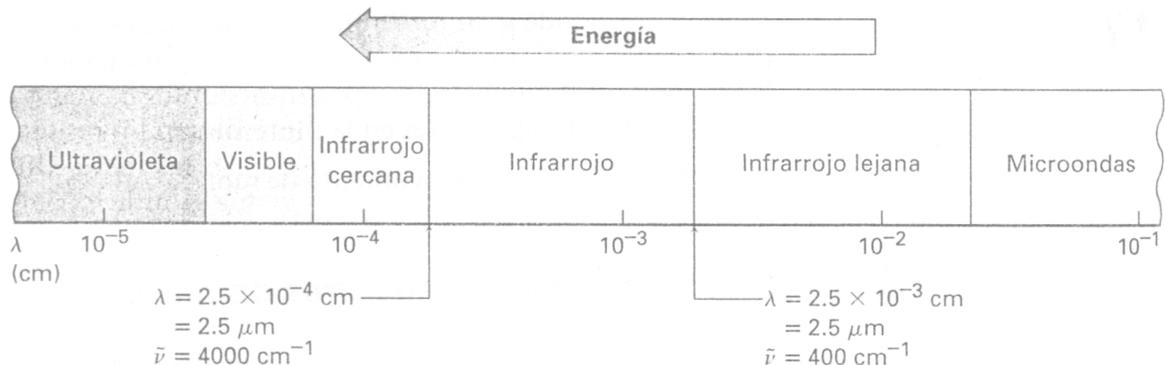
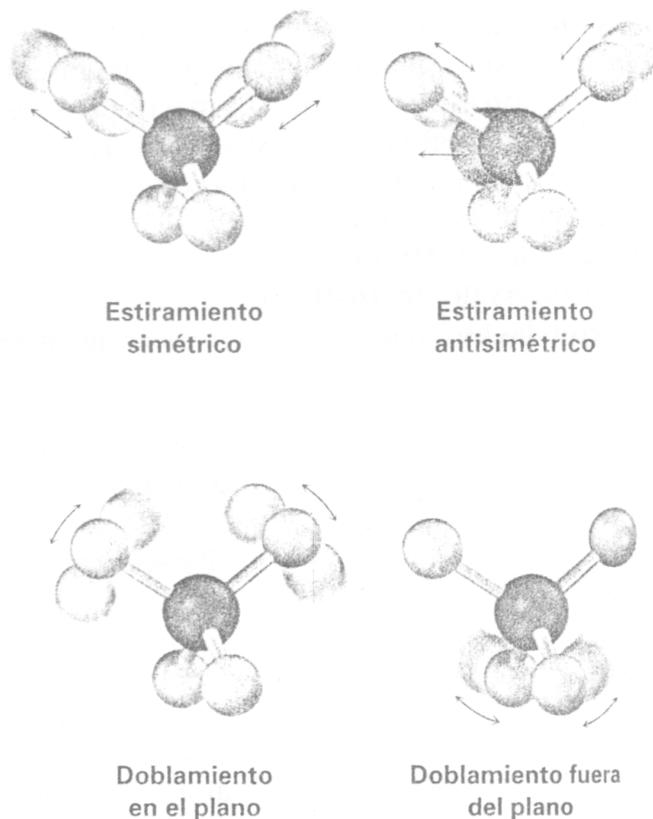


Figura 12.13 La región infrarroja del espectro electromagnético.

¿Por qué una molécula orgánica absorbe algunas longitudes de onda de la radiación IR pero otras no? Todas las moléculas tienen una cierta cantidad de energía y están en movimiento constante. Sus enlaces se estiran y se contraen, los átomos se mueven hacia atrás y hacia adelante y ocurren otras vibraciones moleculares. A continuación están algunos de estos tipos de vibraciones permitidas:



La cantidad de energía que contiene una molécula no es variable en forma continua pero es cuantizada, esto es, una molécula únicamente puede estirarse y doblarse a frecuencias específicas que corresponden a niveles de energías específicos; por ejemplo, considere el estiramiento del enlace. Aunque por lo regular hablamos de longitudes de enlaces como si fueran fijas, realmente los números dados son promedios; de hecho, un enlace típico C—H con una longitud de enlace promedio de 110 pm realmente está vibrando a una frecuencia específica, alternando estiramiento y contracción como si estuvieran conectados con un resorte los dos átomos.

Cuando se irradia una molécula con radiación electromagnética, la energía se absorbe si la frecuencia de la radiación coincide con la frecuencia de la vibración. El resultado de esta absorción de energía es una amplitud incrementada por la vibración; en otras palabras, el "resorte" que conecta los dos átomos se estira y se contrae un poco más. Dado que cada frecuencia absorbida por una molécula corresponde a un movimiento molecular específico, podemos encontrar qué tipos de movimientos tiene una molécula midiendo su espectro en el IR. Al interpretar estos movimientos, podemos encontrar qué tipos de enlaces (grupos funcionales) están presentes en la molécula.

Espectro de IR → ¿Qué movimiento de moléculas? → ¿Qué grupos funcionales?

12.7 Interpretación de espectros de infrarrojo

La interpretación completa del espectro de IR es difícil porque la mayor parte de las moléculas orgánicas tienen docenas de diferentes estiramientos de enlace y movimientos de doblamiento y, por tanto, docenas de absorciones. Por un lado, esta complejidad representa un problema, debido a que por lo general esto limita el uso de la espectroscopia de IR en el laboratorio a muestras puras de moléculas medianamente pequeñas; poco puede aprenderse de la espectroscopia de IR de biomoléculas grandes y complejas. Por otro lado, la complejidad es útil debido a que un espectro de IR sirve como una huella digital única de un compuesto. De hecho, la región compleja del espectro IR de 1500 cm^{-1} a alrededor de 400 cm^{-1} se llama *región de huella digital*; y si dos muestras tienen espectros de IR idénticos, es casi seguro que sean compuestos idénticos.

Afortunadamente, no necesitamos interpretar por completo un espectro de IR para obtener información estructural útil. La mayor parte de los grupos funcionales tiene bandas de absorción en el IR características que no cambian de un compuesto a otro. La absorción del C=O de una cetona casi siempre está en el intervalo de 1680 a 1750 cm^{-1} ; la absorción del O—H de un alcohol casi siempre está en el intervalo de 3400 a 3650 cm^{-1} ; la absorción del C=C de un alqueno casi siempre está en el intervalo de 1640 a 1680 cm^{-1} ; y así sucesivamente. Al aprender dónde ocurren las absorciones características de los grupos funcionales, es posible obtener información estructural de los espectros de IR. La tabla 12.1 lista las bandas de IR características de algunos grupos funcionales comunes.

Obsérvese los espectros de IR del hexano, 1-hexeno y 1-hexino en la figura 12.14 para ver un ejemplo de cómo puede utilizarse la espectroscopia de IR. Aunque los tres espectros de IR contienen varios picos, existen absorciones características del C=C y de los grupos funcionales en C≡C que permiten que se distingan los tres compuestos; por tanto, el 1-hexeno muestra una absorción característica C=C en 1660 cm^{-1} y una absorción vinílica =C—H en 3100 cm^{-1} , mientras que el 1-hexino tiene una absorción C≡C en 2100 cm^{-1} y una absorción de alquino terminal ≡C—H en 3300 cm^{-1} .

Como se muestra en la figura 12.15, es de ayuda recordar la posición de las absorciones de IR específicas para dividir la región IR de 4000 a 400 cm^{-1} en cuatro partes.

- La región de 4000 a 2500 cm^{-1} corresponde a absorciones ocasionadas por los movimientos de estiramiento de los enlaces sencillos N—H, C—H y O—H. Los enlaces N—H y O—H se absorben en el intervalo de 3300 a 3600 cm^{-1} ; el estiramiento del enlace C—H ocurre cercano a 3000 cm^{-1} .

Tabla 12.1 Absorciones IR características de algunos grupos funcionales

Grupo funcional	Absorción (cm ⁻¹)	Intensidad	Grupo funcional	Absorción (cm ⁻¹)	Intensidad
Alcano			Amina		
C-H	2850-2960	Media	N-H	3300-3500	Media
Alqueno			C-N	1030-1230	Media
=C-H	3020-3100	Media	Compuesto carbonílico		
C=C	1640-1680	Media	C=O	1670-1780	Fuerte
Alquino			Ácido carboxílico		
≡C-H	3300	Fuerte	O-H	2500-3100	Fuerte, amplia
C≡C	2100-2260	Media	Nitrilo		
Haluro de alquilo			C≡N	2210-2260	Media
C-Cl	600-800	Fuerte	Nitro		
C-Br	500-600	Fuerte	NO ₂	1540	Fuerte
Alcohol					
O-H	3400-3650	Fuerte, amplia			
C-O	1050-1150	Fuerte			
Areno					
C-H	3030	Débil			
Anillo aromático	1660-2000	Débil			
	1450-1600	Media			

- La región de 2500 a 2000 cm⁻¹ es donde ocurre el estiramiento de los enlaces triples, y los enlaces C≡N y C≡C absorben aquí.
- La región de 2000 a 1500 cm⁻¹ es donde absorben los enlaces dobles (C=O, C=N, y C=C). Por lo general los grupos carbonílicos absorben en el intervalo de 1680 a 1750 cm⁻¹, y comúnmente, el estiramiento de alquenos ocurre en el intervalo angosto de 1640 a 1680 cm⁻¹.
- La región por debajo de los 1500 cm⁻¹ es la porción de huella digital del espectro de IR. Una gran cantidad de absorciones debido a que aquí ocurre una variedad de vibraciones de enlaces sencillos C—C, C—O, C—N y C—X.

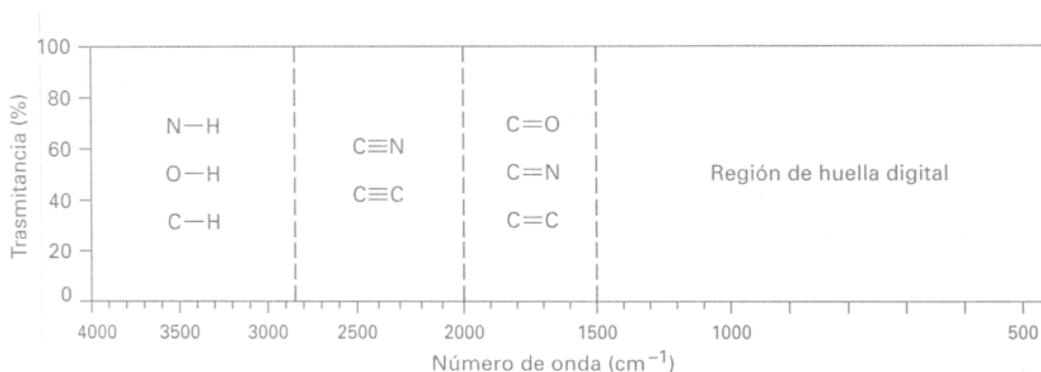


Figura 12.15 Las cuatro regiones del espectro infrarrojo: enlaces sencillos a hidrógeno, enlaces triples, enlaces dobles y huella digital.

¿Por qué los diferentes grupos funcionales absorben donde lo hacen? Como se notó previamente, una buena analogía es la de dos masas (átomos) conectadas por un resorte (un enlace). Los enlaces cortos y fuertes vibran a una energía más alta y a una frecuencia mayor de lo que lo hacen los enlaces largos y débiles, al igual de como los resortes cortos y fuertes vibran más rápido que un resorte largo y débil; por tanto, los enlaces triples absorben a una mayor frecuencia que los enlaces dobles, los cuales a su vez absorben a una mayor frecuencia que los enlaces sencillos. Además, los resortes que conectan masas pequeñas vibran más rápido que los resortes que conectan masas grandes: por tanto, los enlaces C—H, O—H y N—H vibran a una mayor frecuencia que los enlaces entre los átomos más pesados C, O y N.

EJEMPLO RESUELTO

Distinguir compuestos isoméricos por espectroscopia de IR

La acetona (CH_3COCH_3) y el 2-propen-1-ol ($\text{H}_2\text{C}=\text{CHCH}_2\text{OH}$) son isómeros. ¿Cómo puede distinguirlos por espectroscopia de IR?

Estrategia Identifique los grupos funcionales en cada molécula y refiérase a la tabla 12.1.

Solución La acetona tiene una absorción fuerte C=O en 1715 cm^{-1} , mientras que el 2-propen-1-ol tiene una absorción —OH en 3500 cm^{-1} y una absorción C=C en 1660 cm^{-1} .

Problema 12.7

¿Qué grupos funcionales pueden contener las siguientes moléculas?

- a) Un compuesto con una absorción fuerte en 1710 cm^{-1}
- b) Un compuesto con una absorción fuerte en 1540 cm^{-1}
- c) Un compuesto con absorciones fuertes en 1720 cm^{-1} y en 2500 a 3100 cm^{-1}

Problema 12.8

¿Cómo puede utilizar la espectroscopia de IR para distinguir los siguientes pares de isómeros?

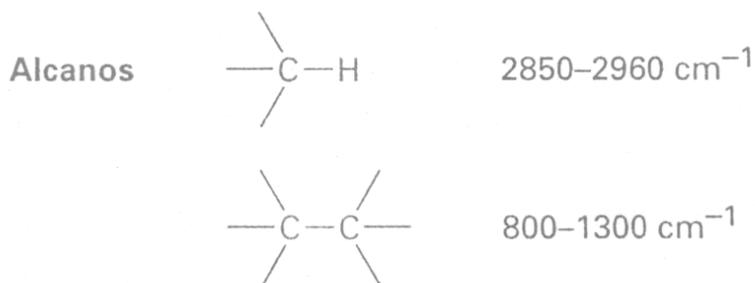
- (a) $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ y CH_3OCH_3
- (b) Ciclohexano y 1-hexeno
- (c) $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H}$ y $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{CHO}$

12.8 Espectros de infrarrojo de algunos grupos funcionales comunes

A medida que se explique cada grupo funcional en capítulos futuros, se describirán las propiedades espectroscópicas de ese grupo. Por ahora, indicaremos algunas características distinguibles de los grupos funcionales hidrocarburos ya estudiados, y haremos una revisión breve de algunos otros grupos funcionales comunes. Sin embargo, también debemos señalar que además de la interpretación de las absorciones que *están* presentes en un espectro de IR, también es posible obtener información estructural y observar qué absorciones *no están* presentes. Si el espectro de un compuesto no tiene absorciones en 3300 y 2150 cm^{-1} , el compuesto no es un alquino terminal; si el espectro no tiene absorción cerca de 3400 cm^{-1} , el compuesto no es un alcohol; y así por el estilo.

Alcanos

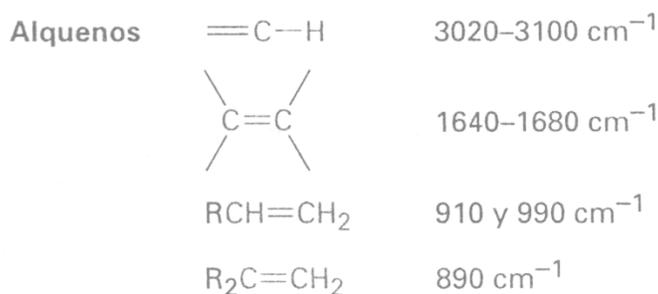
El espectro de IR de un alcano no es muy informativo debido a que no hay grupos funcionales presentes y todas las absorciones se deben a enlaces C—H y C—C. Los enlaces C—H del alcano muestran una absorción fuerte de 2850 a 2960 cm^{-1} , y los enlaces saturados C—C muestran un número de bandas en el intervalo de 800 a 1300 cm^{-1} . Dado que la mayor parte de los compuestos orgánicos contienen porciones parecidas a las de los alcanos saturados, la mayor parte de los compuestos orgánicos tienen estas absorciones IR características. Los enlaces C—H y C—C son claramente visibles en los tres espectros mostrados en la figura 12.14.



Alquenos

Los alquenos muestran varias absorciones de estiramiento características. Los enlaces vinílicos =C—H absorben de 3020 a 3100 cm⁻¹, y por lo regular los enlaces C=C de los alquenos absorben cerca de 1650 cm⁻¹, aunque en algunos casos los picos pueden ser más pequeños y más difíciles para verse claramente. Ambas absorciones son visibles en el espectro del 1-hexeno en la figura 12.14b.

Los alquenos monosustituídos y disustituídos tienen absorciones de doblamiento fuera del plano características =C—H en el intervalo de 700 a 1000 cm⁻¹, razón por la que permite determinar el patrón de sustitución en el enlace doble. Los alqueno monosustituídos como el 1-hexeno muestran bandas características fuertes en 910 y 990 cm⁻¹, y los alquenos 2,2-disustituídos (R₂C=CH₂) tienen una banda intensa en 890 cm⁻¹.



Alquinos

Los alquinos muestran una absorción de estiramiento C≡C de 2100 a 2260 cm⁻¹, una absorción que es mucho más intensa para alquinos terminales que para alquinos internos. De hecho, los enlaces triples sustituidos simétricamente como en el 3-hexino no muestran ninguna absorción, por razones que no se discutirán aquí. Los alquinos terminales como el 1-hexino también tienen un estiramiento característico =C—H en 3300 cm⁻¹ (figura 12.4c). Esta banda se diagnostica para los alquinos terminales debido a que es muy intensa y bastante definida

Alquinos	$\text{—C}\equiv\text{C—}$	2100–2260 cm^{-1}
	$\equiv\text{C—H}$	3300 cm^{-1}

Compuestos aromáticos

Los compuestos aromáticos como el benceno tienen una absorción de estiramiento C—H débil en 3030 cm^{-1} , una serie de absorciones débiles en el intervalo de 1660 a 2000 cm^{-1} , y una segunda serie de absorciones medianamente intensas en la región de 1450 a 1600 cm^{-1} . Estas últimas absorciones se deben a movimientos moleculares complejos del anillo entero. El espectro de IR del fenilacetileno, mostrado en la figura 12.17 al final de esta sección, da un ejemplo.

Compuestos aromáticos		3030 cm^{-1} (débil)
		1660–2000 cm^{-1} (débil) 1450–1600 cm^{-1} (media)

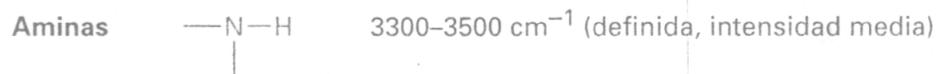
Alcoholes

El grupo funcional O—H de los alcoholes es fácil de localizar. Los alcoholes tienen una banda característica en el intervalo de 3400 a 3650 cm^{-1} por lo regular es amplio e intenso. Si está presente, es difícil no encontrar esta banda o confundirla con otra cosa.

Alcoholes	—O—H	3400–3650 cm^{-1} (amplia, intensa)
-----------	---------------	--

Aminas

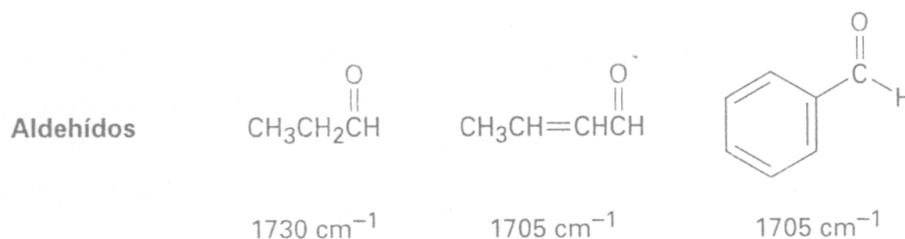
El grupo funcional N—H de las aminas también es fácil de localizar en el IR, con una absorción característica en el intervalo de 3300 a 3500 cm^{-1} . Aunque los alcoholes absorben en el mismo intervalo, una absorción N—H está mucho más definida y es menos intensa que una banda O—H.



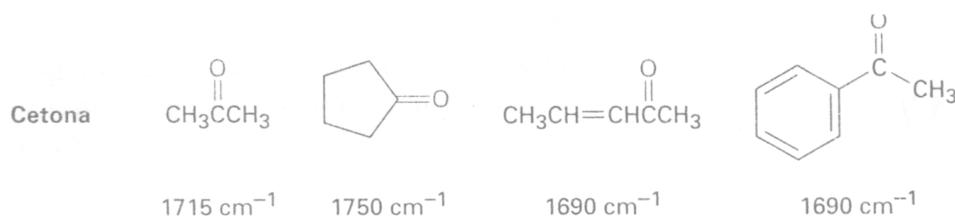
Compuestos carbonílicos

Los grupos funcionales carbonílicos son los más fáciles de identificar debido a su pico intenso y definido en el intervalo de 1670 a 1780 cm^{-1} . Más importante, con frecuencia la posición exacta de la absorción en el intervalo puede utilizarse para identificar el tipo exacto del grupo funcional carbonílico—aldehído, cetona, éster, y así sucesivamente.

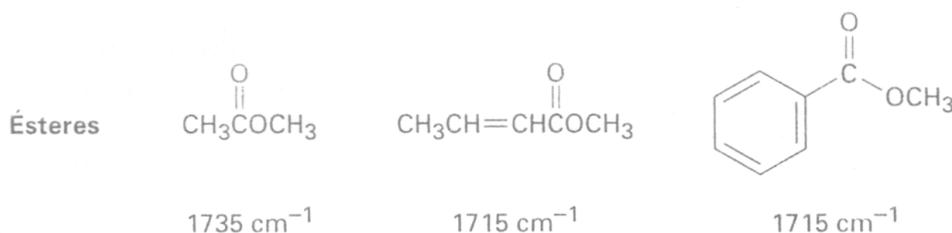
Aldehídos Los aldehídos saturados absorben en 1730 cm^{-1} ; los aldehídos al lado del enlace doble o del anillo aromático absorben en 1705 cm^{-1} .



Cetonas Las cetonas saturadas de cadena abierta y las cetonas cíclicas con seis miembros absorben en 1715 cm^{-1} , las cetonas cíclicas con cinco miembros absorben en 1750 cm^{-1} , y las cetonas al lado del enlace doble o de un anillo aromático absorben en 1690 cm^{-1} .



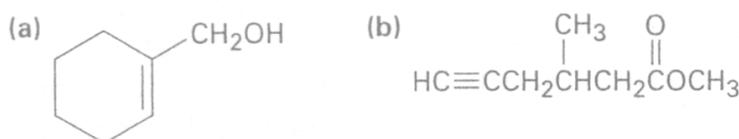
Ésteres Los ésteres saturados absorben en 1735 cm^{-1} ; los ésteres al lado de un anillo aromático o de un enlace doble absorben en 1715 cm^{-1} .



EJEMPLO RESUELTO 12.5

Predicción de absorciones IR de compuestos

Dónde pueden tener absorciones IR los siguientes compuestos?



Estrategia Identifique los grupos funcionales en cada molécula y revise la tabla 12.1 para ver dónde absorben esos grupos.

Solución (a) *Absorciones:* 3400-3650 cm⁻¹ (O—H), 3020-3100 cm⁻¹ (=C—H), 1640-1680 cm⁻¹ (C=C). Esta molécula tiene un grupo alcohol O—H y un enlace doble de alqueno.

(b) *Absorciones:* 3300 cm⁻¹ (≡C—H), 2100-2260 cm⁻¹ (C=C), 1735 cm⁻¹ (C=O). Esta molécula tiene un enlace triple de alquino terminal y un grupo carbonílicoéster saturado.

EJEMPLO RESUELTO 12.6

Identificación de los grupos funcionales de un espectro de IR

En la figura 12.16 se muestra un espectro de IR de un compuesto desconocido. ¿Qué grupos funcionales contiene el compuesto?

Estrategia Todos los espectros de IR tienen varias absorciones, pero por lo regular son útiles para identificar grupos funcionales específicos que se encuentran en la región de 1500 cm⁻¹ a 3300 cm⁻¹. Ponga atención particular a la región carbonílica (1670-

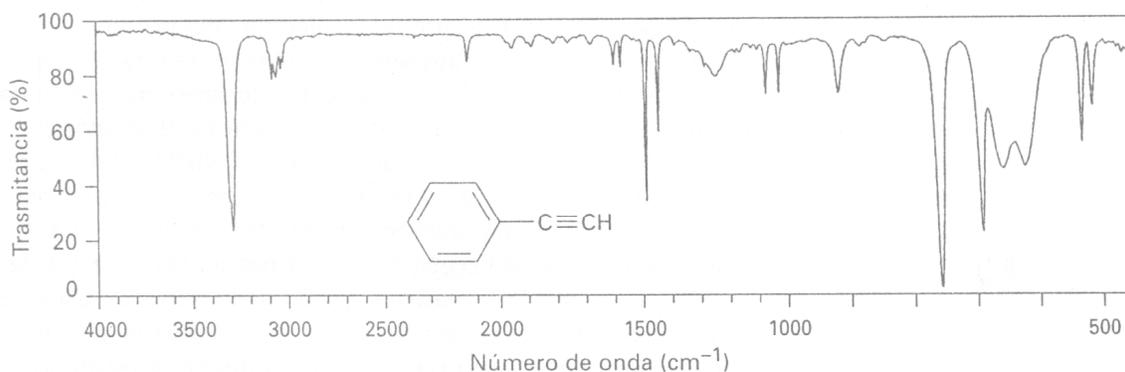
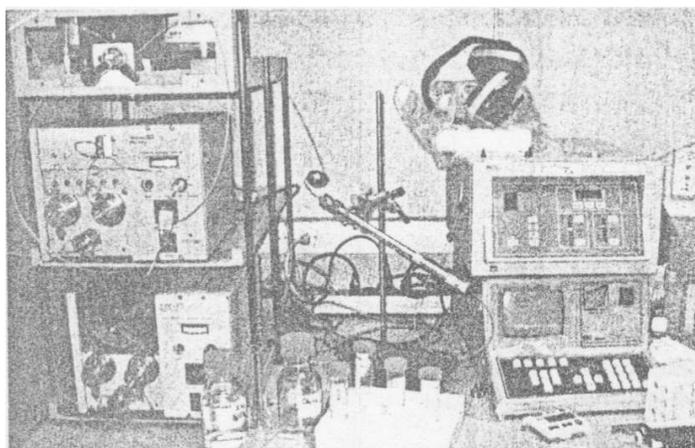


Figura 12.17 El espectro de IR del fenilacetaldeído, problema 12.9.

Enfocado a . . .



Cromatografía: purificación de compuestos orgánicos



La cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) se utiliza para separar y purificar los productos de las reacciones en el laboratorio.

Aun antes de que una nueva sustancia orgánica tenga su estructura determinada, debe purificarse separándola de los disolventes y de todos los contaminantes. En el siglo XIX y a principio del XX era una propuesta de prueba y error que consumía una gran cantidad de tiempo, pero ahora instrumentos poderosos desarrollados en las últimas décadas simplifican el problema.

La mayor parte de la purificación se hace por cromatografía (literalmente "escritura del color"), una técnica de separación que data del trabajo del químico ruso Mikhail Tswett en 1903. Tswett completó la separación de los pigmentos en las hojas verdes, al disolver el extracto de la hoja con un disolvente orgánico y dejar que la disolución descienda a través de un tubo de cristal vertical empaquetado con polvo de yeso. Los pigmentos diferentes atravesaron la columna a velocidades distintas, dejando una serie de bandas coloreadas en la columna de yeso blanca.

Ahora es de uso común una variedad de técnicas cromatográficas, de las cuales todas trabajan bajo un principio similar. La mezcla a separarse se disuelve en un disolvente, llamada fase móvil, y pasa sobre un material adsorbente, llamado fase estacionaria. Debido a que los diferentes compuestos se adsorben en la fase estacionaria a intervalos diferentes, migran a lo largo de la fase a diferentes velocidades y se separan a medida que salen (se eluyen) desde el extremo de la columna de cromatografía.

La *cromatografía de líquidos*, o *cromatografía en columna*, es quizás el método cromatográfico que se utiliza con más frecuencia. Como en los experimentos originales de Tswett, una mezcla de compuestos orgánicos se disuelve en un disolvente adecuado y se adsorbe en una fase estacionaria como la alúmina (Al_2O_3) o gel de sílice (SiO_2 hidratado) empaquetado en una columna de vidrio. La mayor parte del disolvente desciende a través de la columna y se eluyen los compuestos diferentes a tiempos distintos.

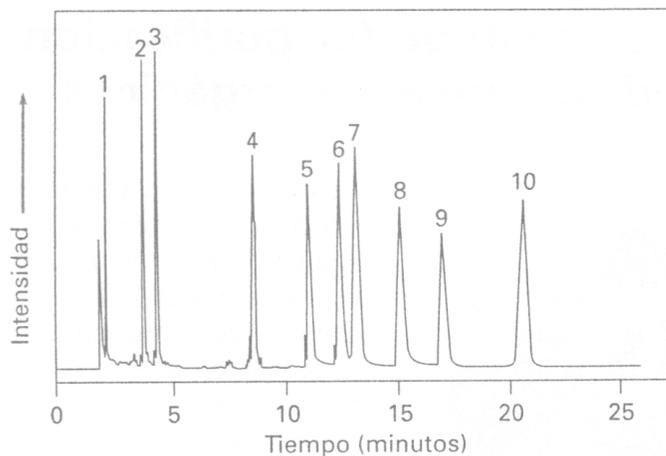
El tiempo en el cual un compuesto es eluido está fuertemente influenciado por su polaridad. Por lo regular las moléculas con grupos funcionales polares se adsorben más fuertemente y, por tanto, migran más lentamente a través de la fase estacionaria que las moléculas no polares. Por ejemplo, una mezcla de un alcohol y un alqueno puede separarse fácilmente con una cromatografía de líquidos, debido a que el alqueno no polar pasa a través de la columna mucho más rápido que el alcohol que es más polar.

La cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC, por sus siglas en inglés) es una variante de la técnica en columna simple, basada en el descubrimiento de que las separaciones cromatográficas mejoran inmensamente si la fase estacionaria está constituida por partículas esféricas de tamaño uniforme y muy pequeñas. El tamaño pequeño de la partícula asegura un área de superficie grande para mejor adsorción, y una forma esférica uniforme permite un empaquetamiento de partículas uniforme y estrecho. En la práctica con frecuencia se utilizan microesferas recubiertas de SiO_2 de 3.5 a 5 μm de diámetro.

Se requieren bombas de alta presión de hasta 6000 psi para forzar al disolvente a través de una columna de HPLC estrechamente empaquetada, y se utilizan detectores electrónicos para monitorear la aparición del material que eluye de la columna. De manera alternativa, la columna puede interconectarse al espectrómetro de masas para determinar el espectro de masas de toda sustancia a

medida que ésta es eluída. La figura 12.18 muestra los resultados del análisis HPLC de una mezcla de 10 vitaminas solubles en grasas usando gel de sílice de 5 µm con acetonitrilo como disolvente.

Figura 12.18 Resultados de un análisis HPLC de una mezcla de 10 vitaminas solubles en grasas.



- | | |
|---|--|
| 1. Menadiona (vitamina K ₃) | 6. Ergocalciferol (vitamina D ₂) |
| 2. Retinol (vitamina A) | 7. Colecalciferol (vitamina D ₃) |
| 3. Acetato de retinol | 8. α-tocoferol (vitamina E) |
| 4. Menaquinona (vitamina K ₂) | 9. Acetato de α-tocoferol |
| 5. δ-tocoferol | 10. Filoquinona (vitamina K ₁) |