

107

Remington 2

FARMACIA

SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO



No. 09-031232- -00003-0000

Fecha: 2012-09-19 14:52:29 Dep. 2020 DIR.NUEVASCR
Tra. 11 PATENTEIYII Eve: 378 FASENACIONALI
Act. 519 TRASLADOINFORME Folios: 17

17ª edición

EDITORIAL MEDICA
panamericana

JUNÍN 831 - BUENOS AIRES
BOGOTÁ - CARACAS - MADRID - MÉXICO - SANTIAGO DE CHILE - SÃO PAULO

103

Título del original en inglés

REMINGTON'S PHARMACEUTICAL SCIENCES, 17ª ed.
© 1985. The Philadelphia College of Pharmacy and Science.
Publicado en su 165º aniversario e impreso por
Mack Publishing Company - Easton - Pennsylvania

1ª edición, 1886	5ª edición, 1907	9ª edición, 1948	13ª edición, 1969
2ª edición, 1889	6ª edición, 1917	10ª edición, 1951	14ª edición, 1970
3ª edición, 1897	7ª edición, 1926	11ª edición, 1956	15ª edición, 1975
4ª edición, 1905	8ª edición, 1936	12ª edición, 1961	16ª edición, 1980

Traducción de
EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA S.A.
efectuada por el
Dr. MARIO ARNALDO MARINO
y la Dra. LUCÍA BARCELONA DE GUERRERO
Supervisión a cargo del
Dr. RAÚL ALBERTO PORTA
Profesor adjunto interino de la Cátedra
de Farmacotecnia III de la
Facultad de Farmacia y Bioquímica
de la Universidad Nacional
de Buenos Aires

El uso de partes del texto de USP XX, NF XV y el USAN y el *USP Dictionary of Drug Names* se hace con autorización de la
Convención USP.
La Convención no se hace responsable por ninguna cita inexacta ni por ninguna deducción falsa o incorrecta que pueda derivarse del
extracto de partes del contexto original, como tampoco de la obsolescencia resultante de la publicación de un suplemento.

Nota: Este texto no intenta ser el equivalente o el sustituto de la United States Pharmacopeia (USP) y/o de la National Formulary (NF).
ni debe ser considerado como tal. En caso de que surja alguna diferencia o discrepancia entre los estándares oficiales corrientes de la
USP o de la NF sobre fuerza, calidad, pureza, embalaje o rotulación de las drogas y sus representaciones aquí, prevalecerán el contexto
y el propósito de los compendios oficiales.

ISBN 950-06-1845-1 (Tomo 1)
950-06-1846-X (Tomo 2)
950-06-5019-3 (Obra completa)

IMPRESO EN LA ARGENTINA

Hecho el depósito que dispone la ley 11.723.
Todos los derechos reservados.
Este libro o cualquiera de sus partes
no podrán ser reproducidos ni archivados en sistemas recuperables,
ni transmitidos en ninguna forma o por ningún medio,
ya sean mecánicos o electrónicos, fotocopiadoras,
grabaciones o cualquier otro, sin el permiso previo
de Editorial Médica Panamericana S.A.

© 1987. EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA S.A.
Junín 831, 1º piso - Buenos Aires

Esta edición se terminó de imprimir
en el mes de julio de 1987
en los talleres de Editorial Médica Panamericana S.A.
San José 831, Buenos Aires

VIII

Preparados farmacéuticos y su elaboración

ROBERT E. KING

Preformulación

ROUS J. RAVIN

La atención que se presta en la actualidad a los productos farmacéuticos de fuentes múltiples en cuanto a su equivalencia da mucho énfasis a la formulación de tales productos. En algunos casos la biodisponibilidad de una fórmula de una droga representa un espectro de calidad de enormes proporciones. Es un hecho comprobado que en ciertas drogas, según su formulación, la celeridad con que la sustancia se torna disponible puede variar desde muy grande hasta cero. En consecuencia, la eficacia de estas fórmulas abarca desde la prevista hasta ninguna. Lamentablemente, la mayoría de los ejemplos son menos dramáticos y están en un término medio. La diferencia en la biodisponibilidad de estos productos farmacéuticos es menos considerable, pero no deja de ser real. Esto ha sembrado gran confusión, de modo que una información que el hombre de ciencia entiende, es poco clara y engorrosa para el médico práctico. Además, la información que se recibe ha sido interpretada de distintas maneras por diferentes personas o grupos, muchas veces según la motivación, el punto de vista y la actitud de quienes interpretan.

La verdad es que los productos de drogas son variables en cuanto a sus características de biodisponibilidad y que esta variación, en la mayoría de los casos, se relaciona de modo directo con consideraciones de

formulación. Para obtener un desempeño óptimo de las drogas es menester que se posea un conocimiento completo de las propiedades fisicoquímicas de estas sustancias antes de formularlas en productos farmacéuticos. Obtener una fórmula óptima no es fácil porque son muchos los factores que influyen con facilidad sobre las propiedades de la formulación. Es raro que las sustancias farmacológicas se administren como entidades químicas, porque casi siempre se las prescribe con alguna fórmula. Estas fórmulas pueden variar desde una solución simple hasta un complejo sistema para la entrega de la droga. La complejidad no suele ser intencional, sino que está dada por propiedades que se anticipan de la forma posológica o se introducen en ella y por la composición resultante que se requiere para conseguir estas cualidades.

El alto grado de uniformidad, la disponibilidad fisiológica y la calidad terapéutica que se exige de los modernos productos medicinales suelen ser el resultado de un considerable esfuerzo y pericia de parte del farmacéutico que hace la formulación. Estas cualidades se alcanzan mediante cuidadosa selección y control de la calidad de los diversos componentes empleados, mediante una elaboración apropiada acorde con procesos bien definidos y, lo más importante, prestando la debida consideración a las múltiples variables

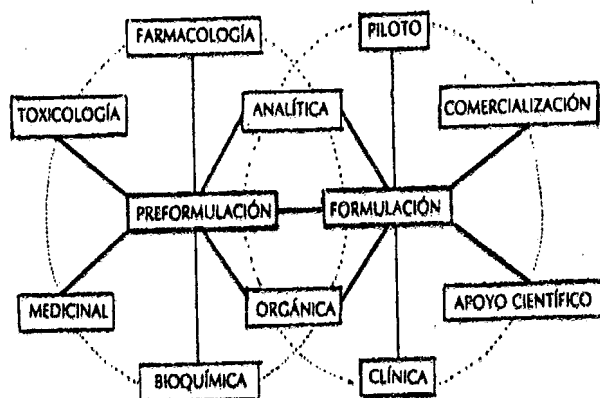


Fig. 76-1. Las ruedas del desarrollo de los productos.

que pueden influir sobre la composición, estabilidad y utilidad del producto. Al encarar la formulación de productos nuevos hubo que aplicar los mejores métodos y recursos de investigación a los efectos de desarrollar, producir y controlar las formas posológicas potentes, estables que constituyen nuestro moderno arsenal médico.

El formulador farmacéutico debe recurrir a áreas especializadas de la ciencia para adquirir información científica sobre la sustancia farmacéutica que hay que convertir en una forma posológica óptima. En la industria farmacéutica estamos en una era en que ya no nos podemos basar en la experiencia del pasado para hacer fórmulas. Debemos poseer un conocimiento cabal de las propiedades fisicoquímicas y del comportamiento farmacocinético y biofarmacéutico de cada droga que desarrollamos. En suma, tenemos que aprender todo lo que podamos sobre la droga al comienzo mismo de su desarrollo. Para esto se requiere un enfoque interdisciplinario en la etapa de preformulación del desarrollo. En la figura 76-1 diagramamos el enfoque multidisciplinario que requiere el desarrollo de todo producto farmacéutico, primero basado en ciencia básica durante la etapa previa a la formulación y después ciencia aplicada en la etapa de desarrollo.

En este capítulo hemos de ocuparnos de la evaluación fisicoquímica que tiene lugar en la etapa de preformulación y además prestaremos consideración a algunos componentes especiales de la formulación que pueden requerir discreción en su selección.

A la preformulación se la puede describir como una etapa del desarrollo en la cual el farmacéutico físico caracteriza las propiedades fisicoquímicas de la droga en cuestión y que se consideran importantes en la formulación de una forma posológica estable, eficaz e inocua. Se evalúan parámetros como tamaño y forma de los cristales, perfil pH-solubilidad, perfil pH-estabilidad, polimorfismo, efecto de partición, permeabilidad para la droga y comportamiento de disolución. En esta evaluación también se consideran las posibles interacciones con diversos componentes inertes destinados a usar en la forma posológica final. Los datos obtenidos de esta evaluación se integran con los datos obtenidos de los estudios farmacológicos y bioquímicos preliminares y proveen al farmacéutico formulador una información que le permite elegir la forma posológica óptima que contenga los componentes inertes más deseables para usar en su desarrollo.

El trabajo de preformulación suele iniciarse una vez que un compuesto ha exhibido suficiente actividad como para merecer ensayos adicionales en humanos. Al tomar esta decisión, las diversas disciplinas empiezan a generar datos esenciales para hacer una evaluación correcta del desempeño de la droga. Es muy importante el método de ensayo analítico para determinar la estabilidad. En vista de que a menudo esto insume un tiempo considerable, a veces hay que recurrir a procedimientos cromatográficos en capa delgada para saber si la molécula de una droga se está degradando. Para promover la degradación del compuesto ensayado se emplean procedimientos de prueba acelerados. Se procura aislar y caracterizar los productos de degrada-

ción para identificar el mecanismo por el cual se produce ésta. De este modo el farmacéutico de desarrollo se orienta en sus esfuerzos por formular el producto.

Durante el estudio de preformulación es imprescindible mantener cierto grado de flexibilidad. Los aspectos que pueden causar problemas se deben identificar tempranamente. Por ejemplo, la elección de una forma salina apropiada tiene una importancia crítica. Los estudios de toxicidad se suelen programar en forma temprana. En consecuencia, si la sal que se tiene en mente tiene algunas deficiencias, es necesario descubrirla para preparar otras y evaluarlas antes de que comiencen los estudios de toxicidad.

Cuando se inician los estudios de preformulación la sustancia química suele escasear. Aunque 25 gramos de la sustancia es suficiente, muchas evaluaciones preliminares se han hecho con menos. La cantidad original suele producirse como exceso de los lotes que preparan los químicos medicinales. Por lo general ellos tienen datos preliminares como punto de fusión, valores espectrales y estructura del compuesto. La dirección que siga la evaluación depende de la estructura y de las formas posológicas que se piensa desarrollar. Por ejemplo, no se pierde tiempo determinando la estabilidad de una solución de un compuesto si no hay interés en una forma posológica líquida. Para cada compuesto se debe hacer una evaluación crítica de muchos aspectos y es fundamental anticipar pronto los posibles problemas porque, de lo contrario, se producen demoras y aflora un problema durante la fase de desarrollo del compuesto. Entre las consecuencias de un mal trabajo de preformulación figuran: 1) posible uso de una sal insatisfactoria, 2) mala estabilidad del componente activo, 3) compuesto para ensayos que tiene una actividad marginal, 4) mayores costos de desarrollo y 5) prolongación del tiempo de desarrollo. Una vez completados los estudios de preformulación se recopilan los datos y se los pasa al farmacéutico de desarrollo, quien, a su vez, emplea esta información para planear su trabajo de desarrollo sobre las formas posológicas terminadas.

Propiedades físicas

Descripción

Como al comienzo de la mayoría de las evaluaciones preliminares la sustancia química escasea, es de extraordinaria importancia notar el aspecto general, color y olor del compuesto porque estas características son la base para comparar con futuros lotes. Durante la preparación de lotes en mayor escala el químico suele refinar o alterar la vía sintética química original, de modo que a veces se modifican algunas de las propiedades físicas. Cuando sucede esto, se pueden hacer comparaciones con lotes anteriores y tomar decisiones sobre los disolventes para recristalización.

El sabor suele merecer alguna consideración, especial si se piensa usar la droga por vía oral en formas posológicas pediátricas. En estos casos hay

que tener en cuenta la preparación de otras sales o la posible evaluación de excipientes que enmascaren el sabor indeseable.

Examen microscópico

Cada lote de una sustancia química, cualquiera que sea su tamaño, se examina con el microscopio y se toma una microfotografía. El examen microscópico ofrece una indicación somera del tamaño de las partículas y de las propiedades características de los cristales. Estas microfotografías son útiles para determinar la constancia del tamaño de las partículas y del modo de cristalización de lote en lote, en particular en los periodos iniciales de la síntesis química. Si se modifica un paso de la síntesis, las microfotografías también reflejan todo cambio que la modificación pudo haber introducido en el modo de cristalización. Téngase en cuenta que la microfotografía sólo ofrece una indicación cualitativa de la distribución del tamaño de las partículas y siempre se debe hacer un análisis del tamaño de las partículas para obtener una noción más exacta de la distribución de las partículas en cada lote de la sustancia química en particular.

Tamaño de las partículas

Los usos de los productos farmacéuticos que vienen en forma finamente dividida son diversos. Merced al conocimiento del tamaño de sus partículas, drogas como griseofulvina, nitrofurantoina, espirolactona, penicilina procaína y fenobarbital han sido formuladas de una manera que se obtiene una actividad óptima. Otras drogas, formuladas en suspensión o en sistemas de emulsiones, en aerosoles inhalatorios y en formas posológicas orales, pueden contener como componentes un material finamente dividido. Una de las propiedades comunes a todas estas sustancias finamente divididas es la distribución del tamaño de las partículas, es decir, la frecuencia con que ocurren partículas de cada tamaño. Lo que reviste interés práctico no suelen ser las características de partículas únicas sino las características promedio de una gran cantidad de ellas. Sin embargo, debemos señalar que el conocimiento de las características de tamaño no es útil si no se establece una correlación adecuada con las propiedades funcionales que interesan en particular en la formulación de la droga. En la bibliografía existen muchas investigaciones que demuestran la importancia del tamaño de las partículas. Se comprobó que el tiempo de disolución, el tiempo de absorción, la uniformidad del contenido, el color, sabor, textura y estabilidad, dependen en grados variables del tamaño y distribución de las partículas. En trabajos de preformulación es importante establecer tempranamente la significación del tamaño de las partículas en relación con la formulación. A veces las observaciones físicas preliminares permiten detectar sutiles diferencias de color. Si esto se puede atribuir a diferencias en la distribución del tamaño de las partículas, es importante definir esta distribución y recomendar que se preste más atención al tamaño de éstas al preparar los

futuros lotes de la sustancia química. Este efecto también se pone en evidencia al preparar suspensiones de materiales poco solubles, pues se notan diferencias de un lote a otro en el color de una suspensión que se pueden relacionar con diferencias en el tamaño de las partículas. En ocasiones, cuando las partículas pequeñas tienden a aglomerarse, puede evidenciarse un cambio sutil en el color o en la textura.

Los tiempos de sedimentación y floculación de las suspensiones son regidos en parte por el tamaño de las partículas. En las soluciones desfloculadas concentradas las más grandes sedimentan con dificultad y la más pequeñas lo hacen más pronto. En las suspensiones floculadas las partículas se unen entre sí en flóculos que sedimentan de acuerdo con el tamaño del flóculo y la porosidad de la masa aglomerada. Se prefieren las suspensiones floculadas porque tienden menos a apelmazarse y se las puede dispersar con mayor rapidez. Así, es evidente que la altura final, H_u , del sedimento a medida que la suspensión se deposita en el fondo, depende del tamaño de las partículas. La relación H_u/H_o , es decir, el grado de suspendibilidad en función del tamaño de las partículas, es una información valiosa para el formulador porque le permite preparar una forma posológica satisfactoria.

La velocidad de disolución de las partículas pequeñas suele ser más rápida que la de las partículas más grandes porque el tiempo de disolución depende de la superficie específica que está en contacto con el medio líquido. Esto se suele describir con la ecuación de Noyes-Whitney modificada para la velocidad de disolución dA/dt .

$$\frac{dA}{dt} = KS(C_s - C)$$

donde A es la cantidad de droga en solución, K la constante de disolución intrínseca, S la superficie, C_s la concentración de una solución saturada de la droga y C la concentración de la droga en el momento t . La superficie de un objeto, cualquiera que sea su forma, es inversamente proporcional a su diámetro y confirma el efecto precedente del tamaño de las partículas sobre la velocidad de disolución. También se observó que la solubilidad depende del tamaño de las partículas. Dittert y col.¹ publicaron datos para la droga experimental carbonato de 4-acetamidofenil 2,2,2-tricloroetilo, que demuestran que el tiempo de disolución y, a su vez la biodisponibilidad, son influidos por el tamaño de las partículas. Aunque la cantidad final de droga disuelta no sea importante en relación con la dosis administrada, el formulador debe tener en cuenta este potencial. En las drogas poco solubles es de una importancia extraordinaria que se consideren estos factores al proyectar la forma posológica.

Las propiedades de escurrimiento de las drogas pueden ser influidas por el tamaño de las partículas y la reducción de éstas a dimensiones muy pequeñas (menos de 10μ) puede ser contraproducente para algunas drogas. A veces el aire adsorbido a la superficie de las partículas y/o las cargas eléctricas superficiales imparten propiedades indeseables a la droga. Por ejemplo,

el aire adsorbido en la superficie de las partículas de la droga puede impedir que ésta sea mojada por el líquido circundante y la aglomeración de partículas finas inducida eléctricamente puede reducir la exposición de la superficie de la droga al medio disolvente circundante. Estos efectos son pasos que limitan la velocidad de disolución porque reducen a un mínimo el contacto entre la superficie de la droga y el líquido.

El crecimiento de los cristales también está en función del tamaño de las partículas. Las más finas tienden a disolverse primero y a recrystalizar y adherirse a las más grandes después. Este fenómeno se conoce como *maduración de Ostwald*. Para suprimir esta nucleación pueden emplearse sistemas coloidales protectores. Los preformuladores pueden generar una información sobre la eficacia de los distintos coloides que reviste una importancia extraordinaria para el formulador cuando se le encomienda preparar una forma posológica en suspensión.

La reducción del tamaño de las partículas puede ser nociva en el caso de algunas drogas. El aumento de la superficie total mediante molienda u otros métodos puede conducir a la rápida degradación de un compuesto y, además, durante el proceso de molienda las drogas pueden sufrir una transformación polimórfica. El preformulador siempre debe estar atento ante estos problemas potenciales y siempre que decide reducir el tamaño de las partículas debe controlar las condiciones y evaluar el perfil de estabilidad. Si se presenta un problema, el preformulador tiene la responsabilidad de detectarlo y de resolverlo antes de pasar la sustancia al farmacéutico formulador.

La absorción gastrointestinal de una droga poco soluble puede ser influida por la distribución del tamaño de las partículas. Si la velocidad de disolución de la droga es menor que la velocidad de difusión hasta el sitio de absorción y que la misma velocidad de absorción, el tamaño de las partículas de la droga es muy importante. Las partículas más pequeñas deben acelerar la disolución y producir así una absorción gastrointestinal más rápida. Una de las primeras observaciones de este fenómeno se hizo con la sulfadiazina. Al determinar los niveles sanguíneos se comprobó que la droga en suspensión que contenía partículas de 1 a 3 μ se absorbía más pronto y con mayor eficiencia que la suspensión que contenía partículas 7 veces más grandes. Los niveles sanguíneos máximos fueron un 40% más altos y ocurrieron 2 horas antes. También se observó una mayor biodisponibilidad con partículas más pequeñas en la griseofulvina. El grado de absorción de una dosis oral aumentó 2,5 veces al aumentar el área superficial unas 6 veces. La griseofulvina micronizada permite reducir la dosis en un 50% para obtener una respuesta clínica satisfactoria.

En cambio, se comprobó que con la nitrofurantoina existe un tamaño de partículas óptimo medio que reduce los efectos colaterales sin influir sobre la respuesta terapéutica. En efecto, existe un producto que contiene partículas grandes. En el cloranfenicol el tamaño de las partículas prácticamente no influye sobre la absorción total pero sí afecta mucho el tiempo de aparición de concentraciones sanguíneas máximas de

la droga. Tras la administración de partículas de 50 μ así como de partículas de 200 μ , ocurrieron niveles máximos en una hora, con partículas de 400 μ en 2 horas y con partículas de 800 μ en 3 horas. Los cuatro preparados tuvieron la misma disponibilidad fisiológica, lo cual significa que la absorción del cloranfenicol es uniforme en una gran porción del tracto intestinal.

La reducción del tamaño de las partículas también puede originar respuestas adversas. Por ejemplo, las partículas finas de la prodroga carbonato de tricloroetilato fueron más tóxicas en ratones que las partículas regulares y gruesas.¹ El aumento de la superficie total para las drogas hidrosolubles y quizá para las drogas básicas débiles sería de escasa utilidad. La absorción de las bases débiles suele ser limitada por el tiempo de vaciamiento gástrico y no por su disolución. Como mencionamos antes, el tamaño de las partículas sólo es importante cuando la velocidad de absorción es limitada por la velocidad de disolución en los líquidos gastrointestinales.

Nos hemos ocupado del efecto del tamaño de las partículas de la droga y su relación con la formulación. El tamaño de las partículas de los componentes inertes merece cierta atención. En los casos en que importa el tamaño de las partículas es necesario evaluar todos los componentes que se utilizan para preparar la forma posológica y formular alguna recomendación sobre su control antes de emprender el desarrollo en gran escala de una forma posológica. Es muy recomendable determinar, optimizar, monitorear y controlar el tamaño de las partículas y su distribución, siempre que sea posible, en particular durante los primeros estudios de preformulación al decidir la forma posológica apropiada. Los métodos más comunes para determinar el tamaño de las partículas de los polvos que se emplean en la industria farmacéutica comprenden tamizado, microscopía, sedimentación y rastreo de corriente.

Tamizado. El tamizado sería uno de los métodos más antiguos para medir partículas y todavía se emplea comúnmente para determinar la distribución de tamaño de los polvos del tamaño de la malla 325 (44 μ) y más. Estos datos suelen ser una guía aproximada para evaluar materiales nuevos en lo tocante a la necesidad de molerlos. Las desventajas básicas del análisis del tamizado son el gran tamaño que debe tener la muestra y la tendencia a que los tamices se bloqueen por cargas estáticas u oclusión mecánica. Las ventajas, en cambio, son simplicidad, bajo costo y poca pericia necesaria para hacerlo.

Microscopía. La microscopía es el método más aceptado y directo para determinar la distribución del tamaño de las partículas de los polvos de tamaño subtamizable. El método es tedioso e insume mucho tiempo. Es importante la preparación del portaobjeto para contar las partículas porque la muestra debe representar la distribución del tamaño de las partículas de la muestra a granel. Óbrese con extrema precaución para conseguir una muestra representativa auténtica de la sustancia a granel. Con la técnica del cono y el fraccionamiento en cuartos se suele conseguir una muestra aceptable. La muestra debe suspenderse, dispersarse y mezclarse muy bien en un líquido que tenga

un índice de refracción distinto al de las partículas. Se monta una muestra representativa en un portaobjeto que tenga un retículo calibrado. El recuento se hace en campos elegidos al azar en el portaobjeto y las partículas se miden y se cuentan. Hay que contar 500 a 1000 partículas para que la estadística de los datos tenga significación.

Sedimentación. En las técnicas de sedimentación se juzga la velocidad de la caída de las partículas de acuerdo con su tamaño. Para esto se aplica la ecuación de Stokes (p. 441) que describe la relación entre la velocidad a la cual una partícula sedimenta en un medio líquido y el tamaño de la partícula. Aunque esta ecuación es para partículas esféricas, se la usa mucho para determinar la distribución peso-tamaño de partículas de forma irregular. Los datos obtenidos con este procedimiento suelen ser confiables, aunque a veces el resultado no concuerda con el obtenido con otros métodos por las limitaciones que impone el factor de la forma.

El método de la pipeta de Andreasen es el que más se usa para estudiar la sedimentación. Se toman volúmenes exactos en los momentos previstos y a una determinada profundidad en el líquido. Se evapora el líquido y se pesa el residuo de polvo. Los datos se utilizan en la ecuación de Stokes y se calcula la distribución del peso-tamaño. Este método requiere precauciones porque hay que conseguir una dispersión correcta, hacer un muestreo constante, controlar la temperatura del medio suspensor y alcanzar una concentración dada.

Rastreo de corriente. El rastreo de corriente es una técnica en la cual una suspensión en líquido pasa por una zona sensora donde las partículas son medidas, contadas y tabuladas electrónicamente. La gran ventaja de esta técnica radica en que se pueden generar datos en un tiempo relativamente breve con una exactitud razonable. Prácticamente se pueden contar millares de partículas en cuestión de segundos y las cifras sirven para determinar la curva de la distribución de tamaños. Los datos consisten en cantidad de partículas por intervalo de clases y se pueden expresar matemáticamente como el diámetro medio aritmético y graficar como corresponda. La figura 76-2 es un diagrama de los datos típicos obtenidos con el Material de Referencia Estándar NBS N° 1003.

El contador Coulter y el contador HIAC se usan mucho para analizar el tamaño de las partículas en la industria farmacéutica. Pueden servir para seguir muy bien el crecimiento de los cristales en las suspensiones. En la figura 76-3 tenemos el cambio del tamaño de las partículas en función del tiempo para una suspensión acuosa en la forma I de una droga experimental. Parece ser que el crecimiento de las partículas disminuye de manera significativa después de las seis horas. La microfotografía de la figura 76-4 revela el aumento importante del tamaño de las partículas a las 6 horas. El tratamiento adicional de los datos, que se ilustra en la figura 76-5, permite establecer los índices de crecimiento de las partículas suspendidas. Basta leer las intersecciones en el sobretamaño del 1, 2 o 3% y diagramar este aumento del diámetro en función del

tiempo, para calcular la velocidad de crecimiento de las partículas en una suspensión. Esto se ilustra en la figura 76-6.

Efecto de partición

Si se agrega un exceso de líquido o sólido a una mezcla de dos líquidos no miscibles, este exceso se distribuirá entre las dos fases, de modo que cada una se satura. Si la sustancia se agrega a los disolventes no miscibles en cantidad insuficiente para saturar las soluciones, la sustancia se distribuirá entre ambas capas en una relación de concentraciones definidas. Si C_1 y C_2 son las concentraciones de equilibrio de la sustancia en el disolvente 1 y el disolvente 2, la expresión del equilibrio es:

$$\frac{C_2}{C_1} = k$$

La constante de equilibrio k se conoce como relación de distribución o coeficiente de partición. Biológicamente, para que ocurra una respuesta farmacológica, es necesario que la molécula de la droga atraviese una membrana biológica. La membrana, que consiste en proteína y material lipídico, actúa como una barrera lipófila frente a la mayoría de las drogas. La resistencia de esta barrera a la transferencia de la droga se relaciona con la lipofilia de la molécula respectiva.

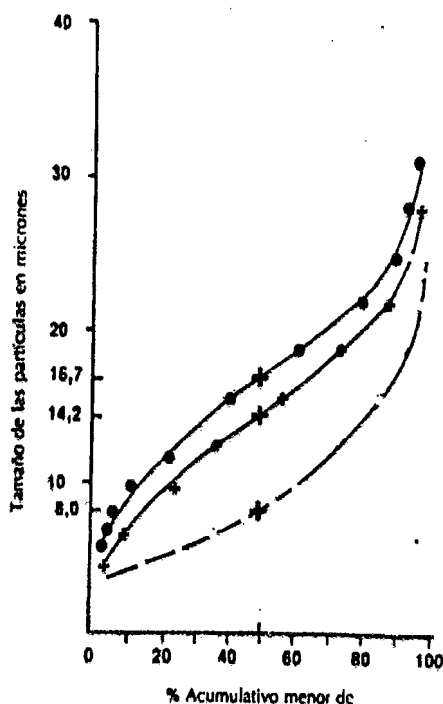


Fig. 76-2. Distribución del tamaño de partículas de cuentas de vidrio NBS expresada en términos de ○ = cantidad de partículas; ● = peso de las partículas; ⊗ = superficie de las partículas.

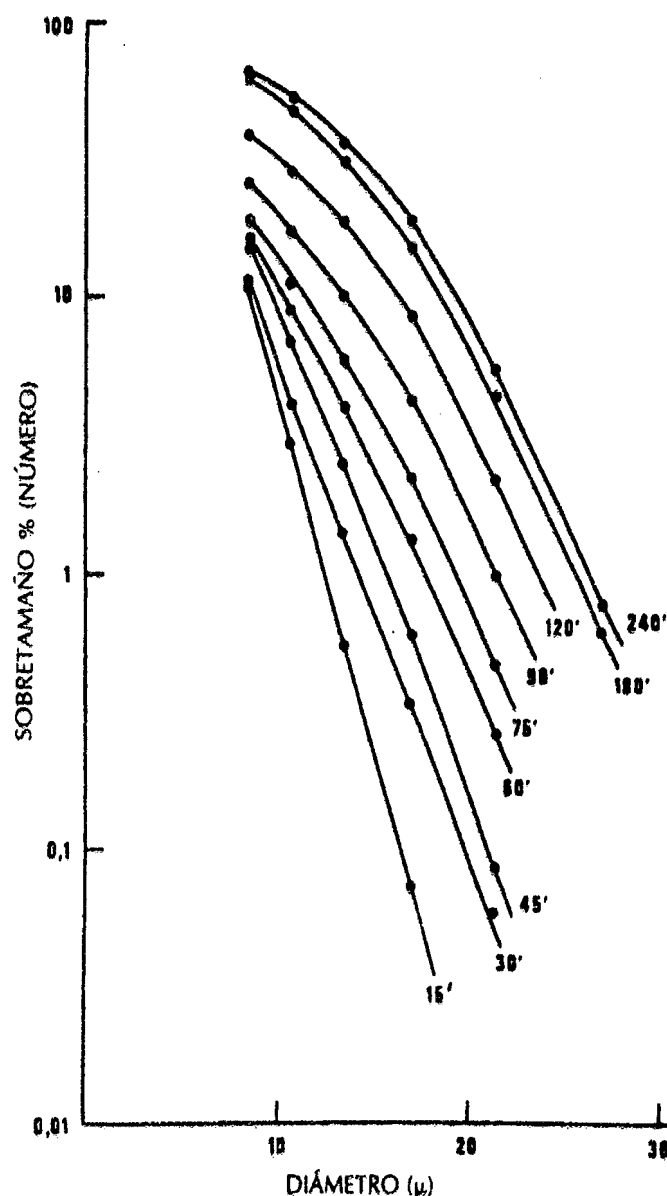


Fig. 76-3. Cambio del tamaño de las partículas en función del tiempo para una suspensión acuosa de la forma I de una droga experimental.

(Véase cap. 37 sobre *Absorción, acción y destino de las drogas*).

Conociendo el efecto de partición y la constante de disociación se puede estimar el sitio de absorción de una nueva entidad química. Presumiendo que en el estómago el pH es 1 a 3 y en el intestino delgado 5 a 8, en la mayoría de los casos las drogas ácidas (pK_a 3) se absorberán más pronto en el estómago y las más básicas (pK_a 8) lo harán más pronto en el tracto intestinal, pero existen excepciones porque algunas drogas tienen bajos coeficientes de partición y/o se ionizan mucho en toda la gama de pH fisiológicos, aunque siempre despliegan una buena biodisponibilidad a pesar de esto.

Polimorfismo

El polimorfo es una fase cristalina sólida de un compuesto dado que se debe a que pueden ocurrir por lo menos dos ordenamientos distintos de las moléculas del compuesto en el estado sólido. La molécula misma

puede ser de distinta forma en los polimorfos pero esto no es necesario y, en efecto, ciertos cambios de forma entrañan la formación de moléculas distintas y, por ende, no constituyen polimorfismo. A los isómeros geométricos o tautómeros, aunque sean interconvertibles y lo hagan en forma reversible, no se los puede denominar polimorfos, si bien pueden comportarse de manera confusamente similar.

Un criterio seguro para clasificar como polimórfico a un sistema es el siguiente: dos polimorfos serán de estructura cristalina distinta pero idénticos en el estado líquido o de vapor. Los isómeros dinámicos funden a temperaturas distintas, lo mismo que los polimorfos, pero los productos fundidos son de composición distinta. Con el tiempo cada uno de estos productos fundidos se convierte en una mezcla equilibrada de los dos isómeros y sus composiciones son termodependientes. Es indudable que algunos casos publicados de polimorfismo son isomerismos dinámicos porque los dos se comportan de manera muy similar.

Polimorfismo es la capacidad de cualquier elemen-



FORMA I
SUSPENSIÓN INICIAL



FORMA I
SUSPENSIÓN A LAS 6 HORAS

Fig. 76-4. Microfotografías del cambio de tamaño de los cristales en una suspensión de la forma I de una droga experimental.

to o compuesto para cristalizar en más de un sistema cristalino, como sucede con el carbono, que en el diamante cristaliza en el sistema cúbico y en el grafito en el sistema hexagonal. En general, los distintos polimorfos de un compuesto dado tienen una estructura y propiedades tan distintas como los cristales de dos compuestos diferentes. Así, la solubilidad, punto de fusión, densidad, dureza, forma de los cristales, propiedades ópticas y eléctricas, presión de vapor, estabilidad, etc., varían según la forma polimórfica. En general, se tendría que poder obtener cristales de formas distintas de una droga y modificar así las propiedades de desempeño de ese compuesto. Para hacer esto hay que conocer el comportamiento de los polimorfos. Se han publicado muchas reseñas sobre el tema del polimorfismo. Además en la bibliografía aparecen muchas indicaciones de la importancia del polimorfismo en productos farmacéuticos. Los trabajos de Kuhnert-Brandstatter y col., con esteroides, barbitúricos y antihistamínicos representarían el estudio más intensivo que se ha hecho sobre polimorfismo y drogas. En Inglaterra, Mesley y col., valiéndose de la espectroscopia infrarroja, describieron el polimorfismo de esteroides, barbitúricos y sulfonamidas. Los estudios de preformulación suelen incluir rigurosos trabajos para determinar la presencia de polimorfos en drogas nuevas a las cuales se prepara para hacer investigaciones preliminares en animales de experimenta-

ción. Entre los parámetros que se investigan como rutina figuran la cantidad de polimorfos que existen, el grado relativo de estabilidad de los diversos polimorfos, la presencia de un estado vídrioso, la estabilización de formas metaestables, las gamas de estabilidad térmica de cada polimorfo, solubilidades, método de preparación de cada forma, efecto de la micronización o tableteo e interacción con los componentes de la formulación.

El cometido inicial del preformulador es determinar si la droga que está evaluando existe en más de una forma cristalina. Por lo general para producir la cristalización de una forma metaestable se siguen los siguientes procedimientos:³

- Fúndase por completo una pequeña cantidad del compuesto en un portaobjeto y obsérvese la solidificación entre polares cruzados. Si luego de la congelación espontánea se produce una transformación espontánea o si se puede inducir ésta mediante sembrado o raspado, es probable que existan por lo menos dos formas polimórficas del compuesto. Es esencial prevenir la nucleación de la forma estable induciendo un superenfriamiento. El superenfriamiento puede inducirse con una muestra pequeña, manteniendo el trozo fundido unos 30 segundos unos 10° por encima del punto de fusión, dejando cuidadosamente el compuesto de lado sin sacudidas físicas antes de observarlo y mediante enfriamiento rápido del compuesto.
- Calíentese una muestra del compuesto sobre una placa

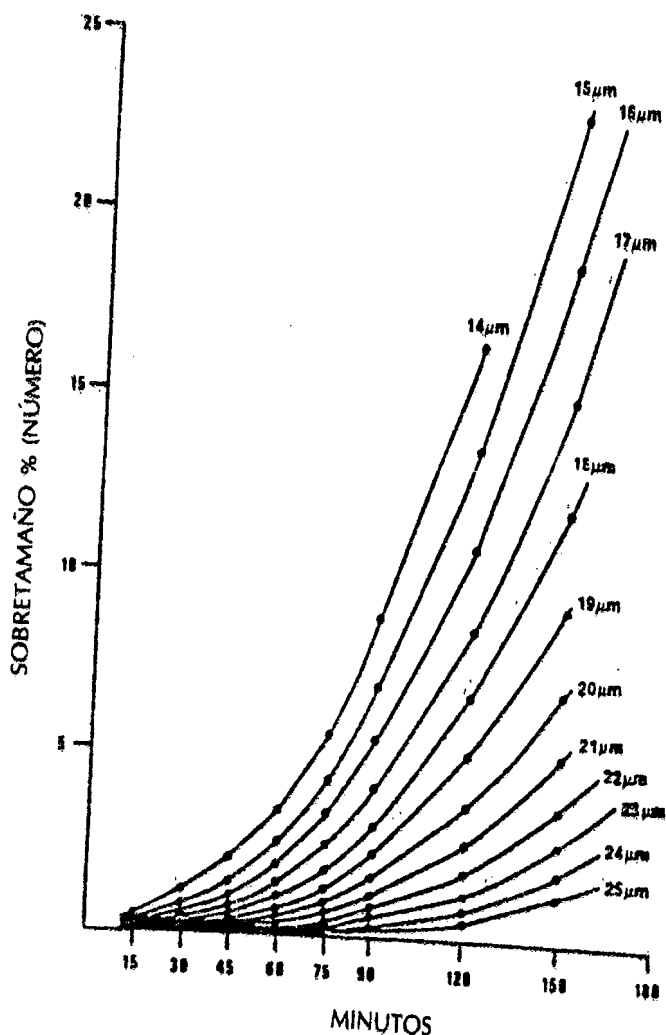


Fig. 76-5. Cambio en el recuento acumulativo en función del tiempo para una suspensión acuosa de la forma I de una droga experimental.

caliente y obsérvese si ocurre una transformación sólido-sólido durante el calentamiento.

c) Sublímbese una pequeña cantidad del compuesto y procúrese inducir una transformación entre el sublimado y la muestra original mezclando ambos en una gota de solución saturada de uno de ellos. Si los dos son polimorfos, el más estable será más insoluble y habrá de crecer a expensas de la

forma metaestable más soluble. Este proceso proseguirá hasta que la forma metaestable se haya transformado por completo en la forma estable. Si las muestras no son polimorfos, una puede disolverse pero la otra no crecerá. Si ambas son formas idénticas, no pasa nada.

d) Manténgase un exceso del compuesto en una pequeña cantidad de disolvente mantenido cerca del punto de fisión

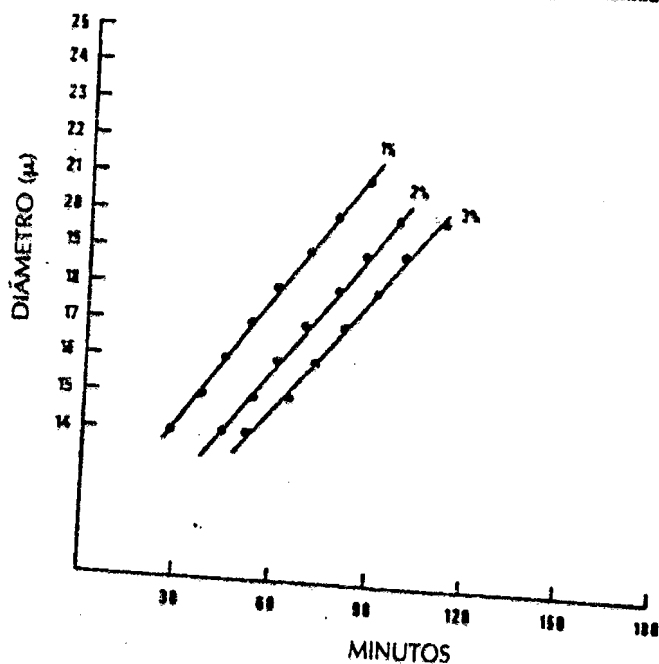


Fig. 76-6. Velocidad del crecimiento de la forma I de una droga experimental en suspensión acuosa.

del compuesto. Aíslese el sólido suspendido. Tómese la precaución de mantener la temperatura mientras se realiza este paso. Ensáyese el material aislado con una muestra original utilizando el procedimiento que se delinea en c).

e) Recrístalícese el compuesto a partir de la solución mediante enfriamiento rápido y obsérvese una porción del material precipitado suspendido en una gota del líquido madre. Luego se puede sembrar la gota con el compuesto original para verificar la transformación de fase de la solución. Si el precipitado es un polimorfo distinto, tiene que tener lugar una transformación de fase en la solución.

Una vez que se ha establecido que ocurre polimorfismo, existen procedimientos con los cuales el preformulador puede preparar las diversas formas en cantidades más grandes para su evaluación adicional y adecuarlas para incorporar en formas posológicas.

Habiéndose comprobado que un compuesto existe en más de una forma cristalina, existen varias técnicas para identificar sus distintas fases polimórficas. Cada una de estas técnicas podría servir para identificar la fase, pero adoptando una combinación de métodos se puede aislar e identificar cada modificación cristalina. A los efectos de confirmar la presencia de más de una

forma cristalina de un compuesto, conviene identificar las modificaciones con más de un método porque a veces si se usa un solo método para confirmar los polimorfismos pueden ocurrir equívocos.

Microscopía. Para identificar polimorfos se usa la cristalografía óptica. En su reseña sobre cristalografía, Biles comenta esta aplicación. Los cristales existen en formas isotrópicas y anisotrópicas. En presencia de cristales isotrópicos la velocidad de la luz es la misma en todas direcciones, en tanto que los cristales anisotrópicos tienen dos o tres velocidades luminosas o índices de refracción. Este método requiere los servicios de un cristalógrafo avezado.

Métodos de etapa caliente. El microscopio polarizante dotado de una platina caliente o fría es muy útil para investigar polimorfos. El microscopista experimentado sabe en seguida si existen polimorfos, el grado de estabilidad de las formas metaestables, las temperaturas de transición y los puntos de fusión, los índices de transición en diversas condiciones térmicas y físicas y si se debe aprovechar el polimorfismo como recurso para mejorar una forma posológica. Kodlers y McCrone hacen un comentario detallado de estos métodos.

Difracción de rayos X en polvos. Los materiales cristali-

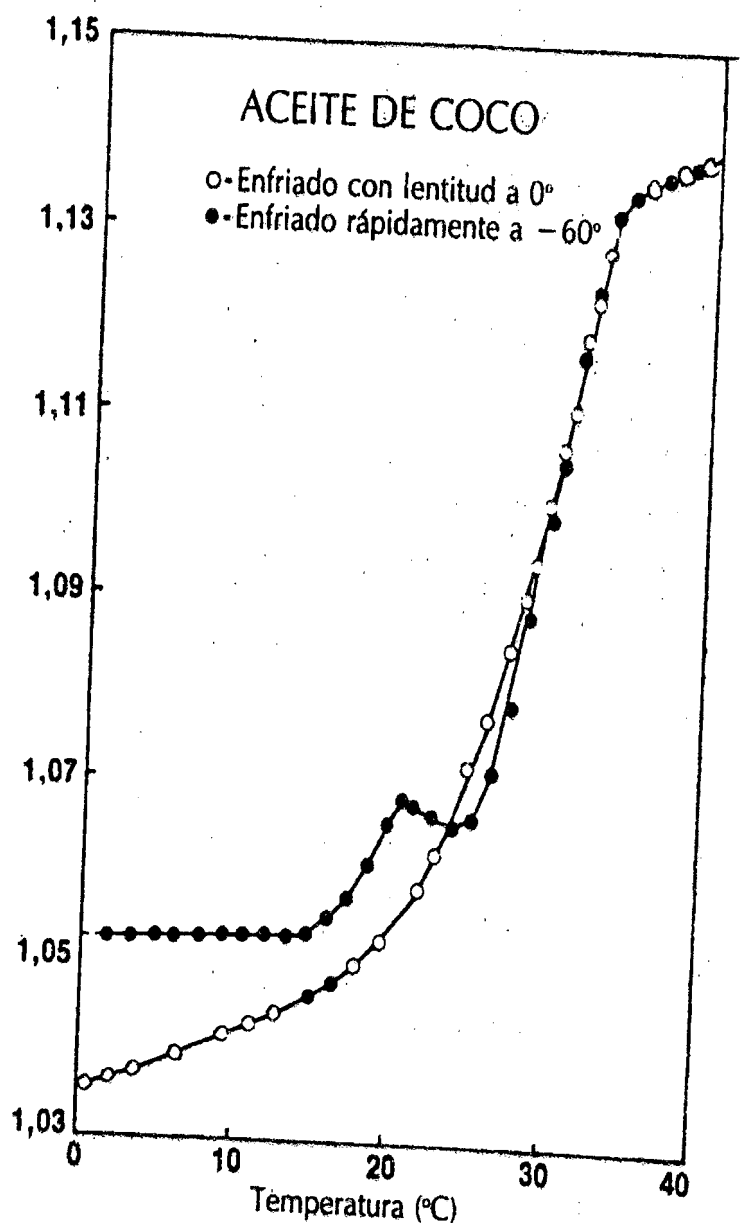


Fig. 76-7. Curvas dilatométricas, aceite de coco (teobroma) enfriado con lentitud y con rapidez.

nos pulverizados producen imágenes de difracción de rayos X características que consisten en picos en determinadas posiciones y de intensidades variables. Cada trazado del retículo cristalino es característica de un determinado polimorfo. Este método tiene la ventaja, sobre otras técnicas de identificación, en que se examina la muestra tal como se presenta. Hay que poner cierto cuidado para reducir y mantener el control del tamaño de las partículas. Se requiere una muestra muy pequeña y el método no es destructivo. Varios investigadores han hecho difracción de rayos X para identificar polimorfos en productos farmacéuticos.

Espectroscopia infrarroja. Este procedimiento es útil para identificar polimorfos. Deben usarse muestras sólidas porque los polimorfos de un compuesto tienen espectros idénticos cuando están en solución. La técnica se puede emplear para hacer identificaciones cualitativas y cuantitativas.

Métodos térmicos. La calorimetría de rastreo diferencial y el análisis térmico diferencial se han usado extensamente para identificar polimorfos. En ambos métodos la pérdida o ganancia calórica debida a los cambios físicos o químicos que ocurren en una muestra, se registra en función de la temperatura al calentar la sustancia a un ritmo uniforme. Las transiciones de fase producen cambios entálpicos endotérmicos y exotérmicos. Por ejemplo, la fusión, sublimación, transición sólido-sólido y la pérdida de agua suelen producir efectos endotérmicos, en tanto que la cristalización produce efectos exotérmicos. El análisis térmico permite calcular los parámetros termodinámicos para los sistemas que se evalúan. Guillory obtuvo el calor de fusión del sulfatiazol y de la metilprednisolona. Ravin y col. utilizaron la calorimetría de rastreo diferencial para seguir el índice de conversión de los polimorfos del sulfatiazol.

Dilatometría. La dilatometría mide el cambio de volumen causado por efectos térmicos o químicos. Ravin e Higuchi⁴ emplearon dilatometría para seguir el comportamiento de fusión del aceite de cacao midiendo el volumen específico de este aceite enfriado rápidamente y con lentitud en función del aumento de la temperatura. La presencia de una forma metaestable se manifestó por una contracción en la gama térmica de 20 a 24° (fig. 76-7). La dilatometría es de gran exactitud, pero es muy tediosa e insume mucho tiempo. No se la usa mucho.

Para estudiar el polimorfismo se usa a veces la resonancia magnética polar, la resonancia magnética nuclear y la microscopía electrónica.

Los polimorfos pueden clasificarse en dos tipos: 1) enantiotrópicos, en que una forma polimórfica puede convertirse de manera reversible en la otra modificando la temperatura o la presión, como el azufre, y 2) monotrópica, en que una forma polimórfica es inestable a todas las temperaturas y presiones, como los estearatos de glicerilo. A una temperatura y presión dadas sólo una forma polimórfica es termodinámicamente estable, pero pueden existir otras formas metaestables en las mismas condiciones. Estas formas metaestables habrán de pasar a las formas de retículo estable con el correr del tiempo. La primera indicación de la importancia de una transformación polimórfica en un sistema farmacéutico se notó con la novobiocina. La droga amorfa se absorbía bien, pero al formularla en suspensión ocurría una reversión de la forma metaestable a otra cristalina más estable, de modo que se absorbía mal.

Habiéndose determinado que una droga existe en más de una forma cristalina, se deben establecer las condiciones en que se puede producir cada una de ellas. De este modo se pueden mantener las condiciones de cristalización apropiadas de lote en lote para asegurar una materia prima uniforme y aceptable. El disolvente de la recristalización, la velocidad de cristalización y otros factores pueden hacer que predomine una forma de cristal. En esta investigación preliminar, para establecer estas condiciones hay que monitorear las formas preparadas. Por ejemplo, durante los trabajos preliminares con un derivado del indol se hizo calorimetría de rastreo diferencial, análisis con rayos X y análisis infrarrojo para establecer la presencia de polimorfos y que se los podría preparar satisfactoriamente. En las figuras 76-8 a 76-10 aparecen los datos respectivos para llegar a esta conclusión. Cuando se demuestra que hay polimorfos se deben preparar experimentos para determinar si las propiedades difieren o no lo suficiente como para alterar su comportamiento farmacéutico o biológico.

Al principio se pueden hacer pruebas de disolución para detectar diferencias en las solubilidades de equilibrio aparentes, siempre que se utilice un sistema de

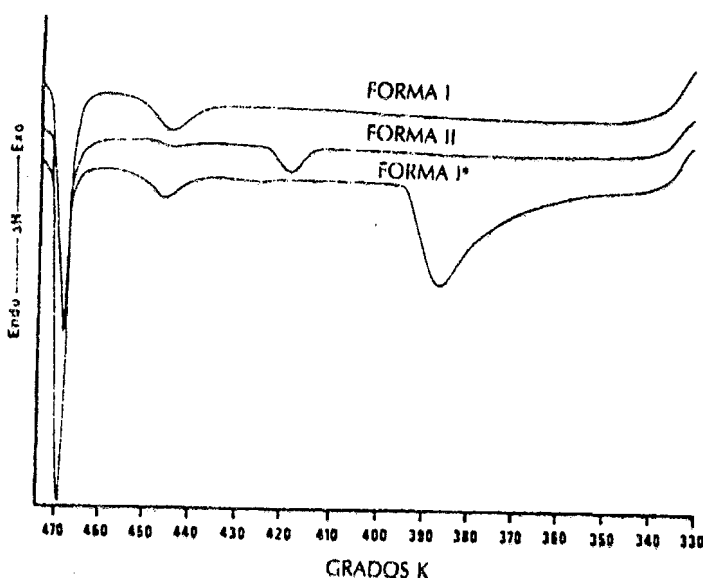
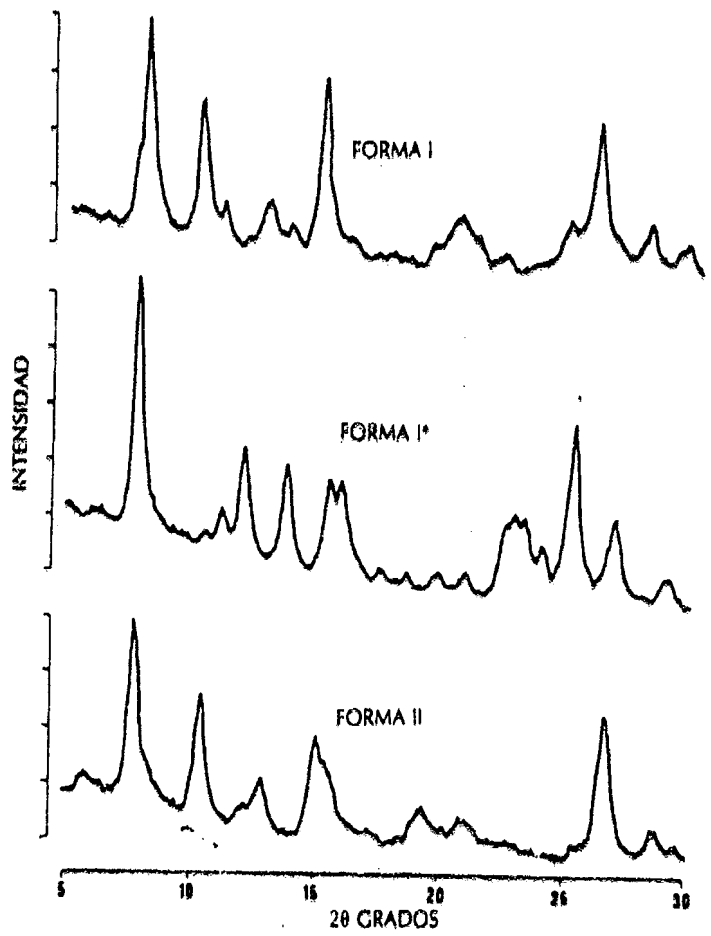


Fig. 76-8. Termogramas para las formas I, I* y II de SK&F 30097.

Fig. 76-9. Difractogramas de rayos X de las formas I, I* y II de SK&F 30097.



disolventes discriminativo. La figura 76-11 ilustra los datos de disolución para dos polimorfos de un derivado del indol que tenían una disolución similar en el medio empleado, pero al emplearse un medio de disolución más discriminativo aparecieron diferencias en sus características de disolución. Esto se representa en la figura 76-12. De acuerdo con los datos presentados para el derivado del indol se llegó a la conclusión de

que no habría ninguna diferencia apreciable en la disponibilidad de las dos formas si se las administrase por vía oral como forma posológica sólida. Esto se confirmó después en animales de experimentación.

La ecuación de Nernst relaciona el índice de aumento de la concentración con la solubilidad de un sólido que se está disolviendo y se la suele escribir así:

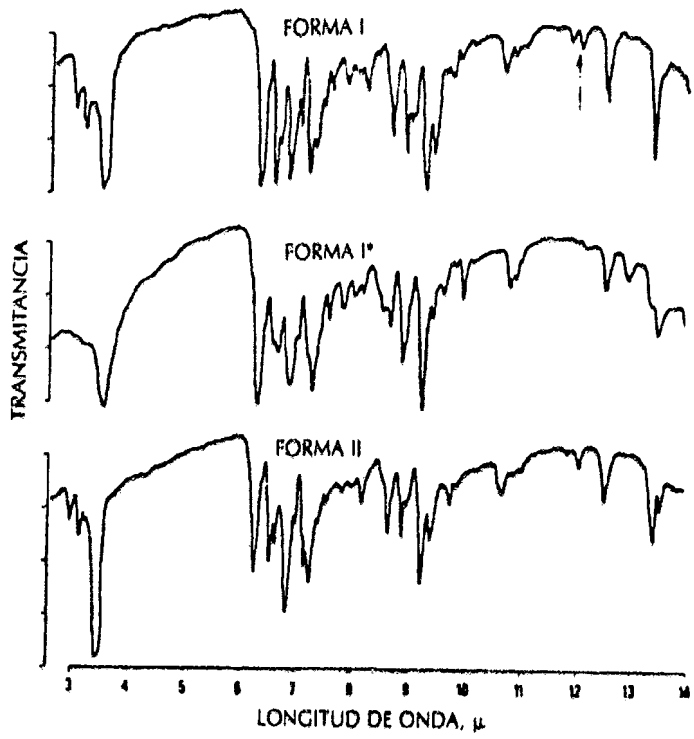


Fig. 76-10. Espectros infrarrojos de las formas I, I* y II de SK & F 30097.

$$\frac{dc}{dt} = \frac{AD}{Vh} (C_s - C_t)$$

donde A es el área de interfase del sólido en vías de disolución, D el coeficiente de difusión del soluto en el disolvente, V el volumen del disolvente, h el espesor de la capa de difusión y C_s y C_t , las concentraciones del soluto a saturación y en el momento t , respectivamente. La ecuación se reduce a:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{AD}{Vh} C_s$$

para las condiciones experimentales donde $C_s > C_t$. Siendo D una propiedad de la molécula de soluto y del disolvente, no depende de la forma en estado sólido. Se pueden seleccionar las condiciones experimentales de modo que A , V y h se mantengan constantes para medir las velocidades de disolución de distintas formas polimórficas. Entonces la velocidad de disolución es directamente proporcional a C_s y la solubilidad de saturación y las diferencias en las solubilidades se pueden relacionar con sus energías libres.

Se ha determinado la solubilidad y el comportamiento de disolución de varios polimorfos del palmitato de cloranfenicol. En las figuras 76-13 y 76-14 se ilustran los datos obtenidos a varias temperaturas. Del comportamiento de disolución se desprende que los

Cuadro 76-1. Valores termodinámicos calculados para los polimorfos A, B, C del palmitato de cloranfenicol

Poli-morfo	Temp. de transición (°C) a la forma A	Calor de disolución kcal/mol	ΔG_T , cal/mol ^a	ΔS_{sol} , e.s.u.	ΔS_{trans} , e.s.u. ^a
A	—	21.8	—	—	—
B	88	15.4	-774	-18	-17
C	50	17.2	-465	-13	-14

^a Calculado para la conversión al polimorfo A.

valores máximos obtenidos fueron buenas aproximaciones de la solubilidad de las diversas formas. En consecuencia, obteniendo datos a varias temperaturas se podrían calcular las cantidades termodinámicas afectadas en la transición de la forma metaestable a la estable. En la figura 76-15 se han diagramado los datos de solubilidad en función de la temperatura en un trazado típico de van't Hoff. La relación rectilínea permite calcular los calores de solución para las diversas formas y también aproximar, mediante extrapolación, las temperaturas de transición para las diversas formas. Estos valores se consignan en el cuadro 76-1^a.

A temperatura y presión constantes se pueden calcular las diferencias de energía libre entre los polimorfos por:

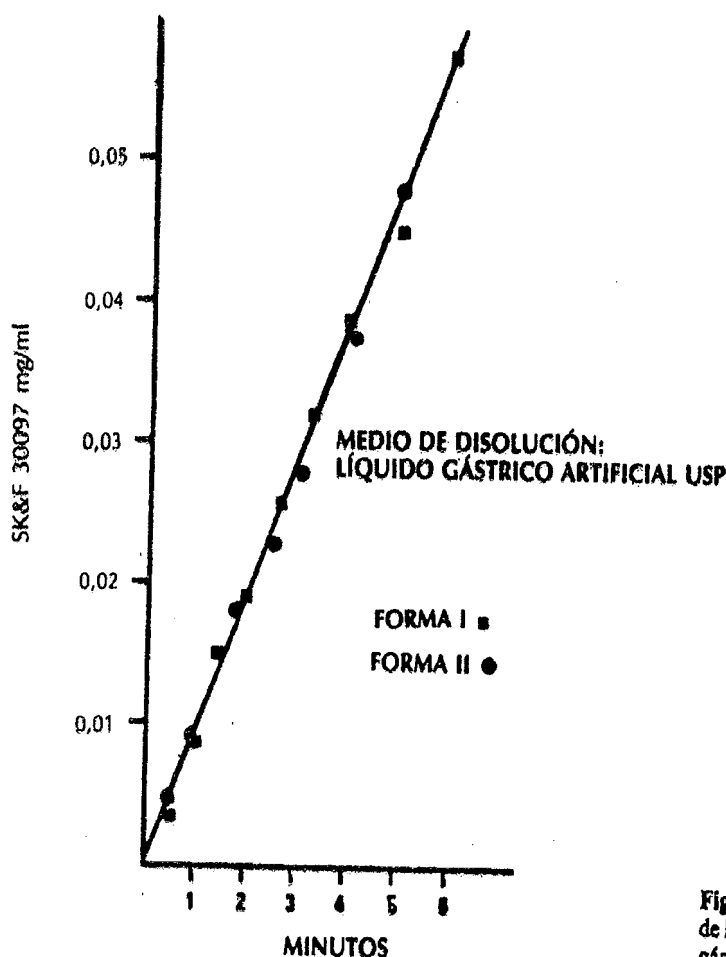


Fig. 76-11. Comportamiento de disolución de las formas I y II de SK&F 30097 en líquido gástrico artificial.

Fig. 76-12. Comportamiento de disolución de las formas I y II de SK&F 30097 en solución de etanol al 50%.

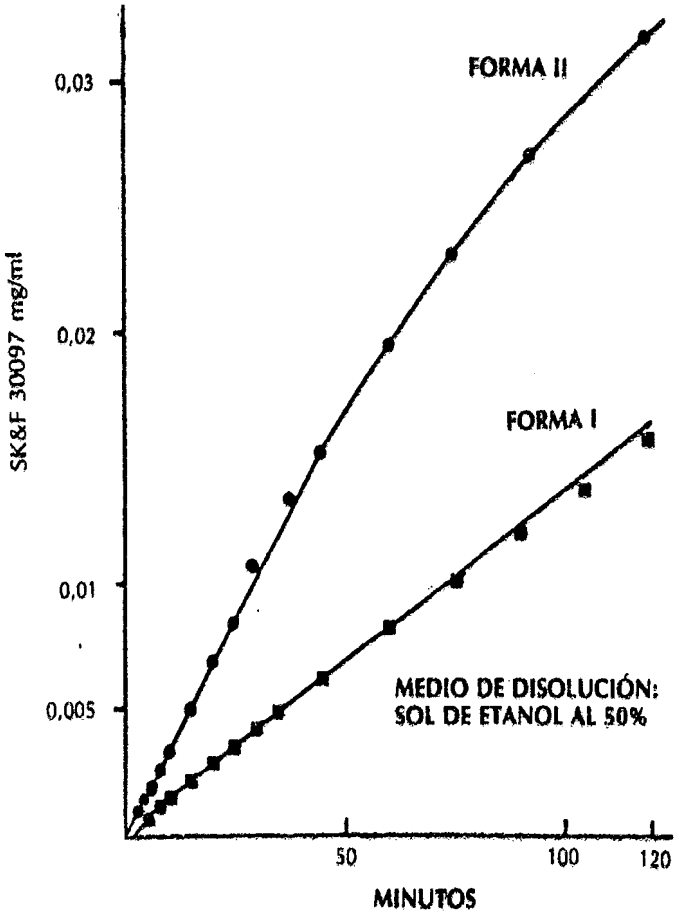


Fig. 76-13. Curvas de disolución del polimorfo C de palmitato de cloranfenicol en alcohol *t*-butílico al 35% y agua a 30, 20, 15 y 6°. Clave: 30°, ○—○; 20°, ■—■; 15°, △—△; 6°, ●—●.

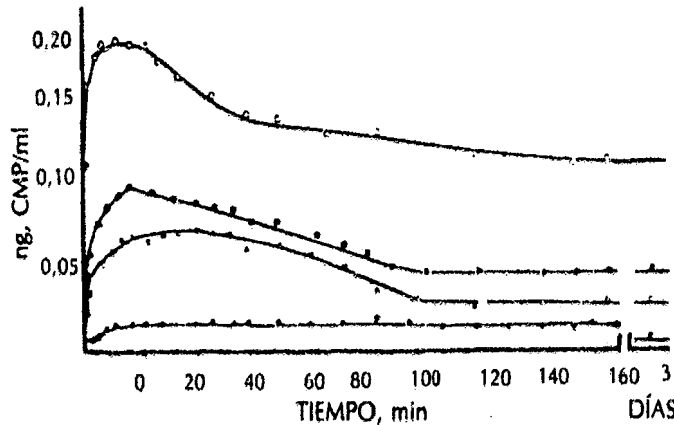
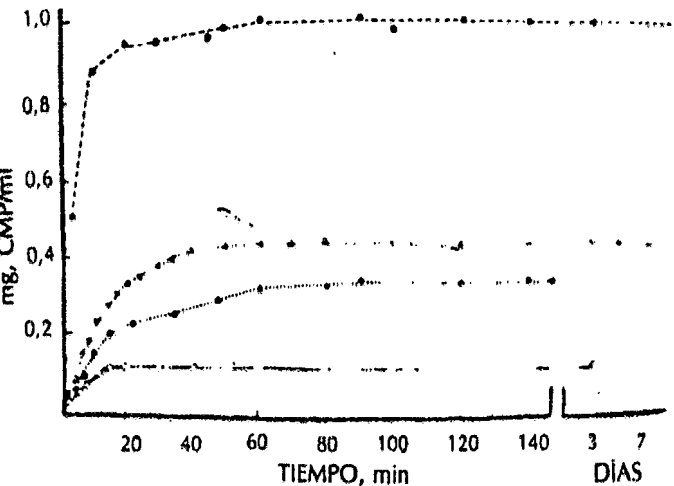


Fig. 76-14. Curvas de disolución de los polimorfos A y B de palmitato de cloranfenicol en alcohol *t*-butílico al 35% y agua 30 y 38°. Clave: Polimorfo A, 30°, ○—○; polimorfo B, 30°, △—△; polimorfo A, 38°, ●—●; polimorfo B, 38°, ●—●.



$$\Delta G_t = RT \ln \frac{C_s \text{ Polimorfo A}}{C_s \text{ Polimorfo B}}$$

Esta ecuación relaciona a la solubilidad C_s de las formas polimórficas a una temperatura dada T , con las diferencias de energía libre ΔG_t . El cuadro 76-1 también contiene las diferencias de energía libre calculadas para los polimorfos. También se pueden determinar los cambios de entalpía para las diversas transiciones restando el calor de solución obtenido para la forma estable del correspondiente a la forma metaestable. Además, a cualquier temperatura en particular T , la entropía para la transición de polimorfos se puede evaluar con la siguiente relación:

$$\Delta S_t = \frac{\Delta H_{B \rightarrow A} - \Delta G_t}{T}$$

En el cuadro 76-1 también se incluyen los valores calculados para las transiciones. A la temperatura de transición el ΔG_t es igual a cero y la entropía se puede calcular despreciando el término de la energía libre en la ecuación precedente.

Las relaciones termodinámicas que acabamos de comentar se basan en la presunción de que se cumple la Ley de Henry. El conocimiento de estas relaciones termodinámicas permite que el preformulador elija de manera más racional la forma polimórfica más energética de la droga que se investiga para estudios farmacológicos adicionales y también tenga una estimación preliminar de su probable estabilidad.

Cuando un grupo de preformulación investiga de manera inadecuada las formas polimórficas de las drogas pueden surgir problemas durante la etapa de desarrollo. El crecimiento de cristales en las suspensiones, con la consiguiente falta de uniformidad, mal aspecto, mala biodisponibilidad, transformaciones que ocurren durante la molienda o granulaciones que alteran las características físicas y biológicas, respuesta farmacológica inadecuada y mala estabilidad química, son problemas típicos que se ponen de manifiesto después.

Solubilidad

Al trabajar con drogas nuevas es de extraordinaria importancia conocer algo acerca de sus características

de solubilidad, en especial en sistemas acuosos, porque deben poseer alguna solubilidad limitada en medios acuosos para suscitar una respuesta terapéutica. Si una droga tiene una solubilidad acuosa menor de 1 mg/ml en la gama de pH fisiológico (1 a 7) puede plantearse un problema de biodisponibilidad y hay que emprender estudios de preformulación para mejorar el problema. La solubilidad de equilibrio de la droga se debe determinar en un disolvente o sistema disolvente que no surta ningún efecto tóxico en el animal de experimentación. Esto se hace colocando un exceso de droga en un frasco ampolla con el disolvente. Se agita el frasco a temperatura constante y se determina periódicamente la cantidad de droga analizando el líquido sobrenadante. No se alcanza el equilibrio hasta que por lo menos dos muestras sucesivas arrojan el mismo resultado. La experiencia con determinaciones de la solubilidad indicaría que se suele alcanzar el equilibrio agitando de un día para otro (unas 24 horas). Las determinaciones de solubilidad se pueden hacer a varias temperaturas porque los productos resultantes de la droga en última instancia estarán sujetos a amplias variaciones térmicas.

Si la solubilidad de la droga es menor que la concentración necesaria para la dosis recomendada, hay que tomar medidas para mejorar su solubilidad. El enfoque que se adopte suele depender de la índole química de la droga y del tipo de producto que se desea preparar con ella. Si la droga es ácida o básica, su solubilidad puede ser influida por el pH. Mediante la aplicación de la ley de acción de masas se puede prever con bastante exactitud la solubilidad de las drogas que son ácidos o bases débiles en función del pH empleando las siguientes ecuaciones para las drogas ácidas y básicas débiles.

<i>Ácido débil</i>	<i>Base débil</i>
$S_t = K_s \left(1 + \frac{K_a}{[H^+]} \right)$	$S_t = K_s \left(1 + \frac{[H^+]}{K_a} \right)$

Existen muchas drogas que no se disuelven aunque se ajuste el pH. Las drogas que son ácidos o bases muy débiles pueden requerir un pH que está fuera de los límites fisiológicos tolerables o causar problemas de estabilidad con los componentes de la fórmula. Por ejemplo, un indol experimental tiene una solubilidad de equilibrio de unos 50 mg/ml a pH 1,2 pero al aumentar el pH de este sistema a cerca de 2, la solubi-

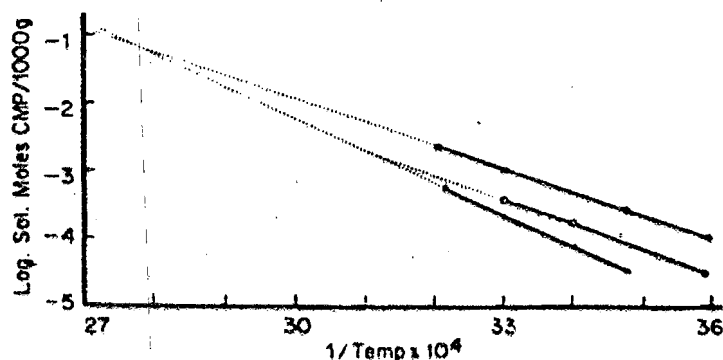


Fig. 76-15. Diagrama tipo van't Hoff para los polimorfos A, B y C de palmitato de cloranfenicol. Clave: Polimorfos A → ; B —●— y C —○—.

724

FARMACOTECNIA TEORICA Y PRACTICA TOMO IV

Dr. José Helman

CIA EDITORIAL CONTINENTAL, S. A. DE C. V., MEXICO

DISTRIBUIDORES:

ESPAÑA-ARGENTINA-CHILE-VENEZUELA-COLOMBIA-PERU

Bolivia — Brasil — Costa Rica — Dominicana — Ecuador — El Salvador
Estados Unidos — Guatemala — Honduras — Nicaragua — Panamá — Paraguay
Portugal — Puerto Rico — Uruguay

Edición autorizada bajo contrato con el autor

Tercera impresión:
noviembre de 1982

ISBN 968-26-0189-4
ISBN 968-26-0204-1

Derechos Reservados © en Lengua Española-1981, Primera Publicación

CIA. EDITORIAL CONTINENTAL S. A. DE C. V.
CALZ. DE TLALPAN NÚM. 4620, MÉXICO 22, D. F.

MIEMBRO DE LA CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA EDITORIAL
Registro Núm. 43

DISTRIBUIDORES PRINCIPALES EN:

CAVANILLES NÚM. 52, MADRID 7, ESPAÑA
AV. CANNING NÚMS. 96, 98 Y 100, ESQ. PADILLA,
1414 BUENOS AIRES, ARGENTINA
MIRAFLORES NÚM. 354, SANTIAGO DE CHILE, CHILE
VEN-LEE, C. A., AV. FUERZAS ARMADAS, ESQ. SAN MIGUEL
EDIFICIO RODRIMER, PISO 6, CARACAS, VENEZUELA
CALLE 11 NÚM. 2-56, BOGOTÁ, COLOMBIA
AV. REP. DE PANAMÁ NÚM. 2199, LA VICTORIA-LIMA 13, PERÚ

IMPRESO EN MEXICO

PRINTED IN MEXICO

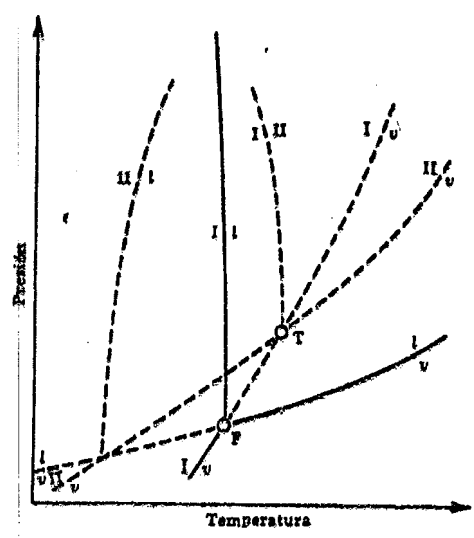


FIG. 30.44. Sistemas monotrópicos.

puede plantearse en términos de la línea de equilibrio líquido-vapor (I-v), según que la misma corte las dos curvas de vapor-sólido (I-v y II-v) por encima o por debajo de su intersección mutua, (punto F), o sea, sistemas enantiotrópicos solamente cuando el punto de transición (punto T) esté por debajo del punto de fusión (punto F).

El punto T se obtendrá en todos los casos como punto de cruce de las curvas de presión de vapor de ambas formas (I-v y II-v).

Resumiendo, la forma estable tendrá puntos de fusión más altos, menor presión de vapor, menor solubilidad y generalmente mayor densidad, a cada temperatura (117).

Los diagramas de t-p se construyen también para sistemas de más de dos componentes y dejando de lado la mayor complejidad, presentan el mismo aspecto que los vistos. También se pueden presentar diagramas de temperatura-concentraciones para las fases estables y metaestables, con formación o no de eutécticos y compuestos de adición molecular (Fig. 30.45).

cristalina, dan la misma fase líquida (la fase vapor también es la misma).

Cada polimorfo presentará su propia curva de puntos de fusión (equilibrio líquido-sólido I-l, II-l) y ahora la curva observable realmente (curva llena) será la del compuesto que a cada presión tenga la temperatura de fusión mayor. Por último tenemos la curva que marca los puntos de transformación de la especie I en la II (I-II).

Comparando los diagramas para ambos tipos de sistemas vemos que la alternativa

C. Métodos Utilizados para Estudiar Polimorfismo

Diversas técnicas fisicoquímicas permiten poner en evidencia la existencia de polimorfismo, identificando las distintas fases presentes en un sistema, posibilitando la determinación de sus propiedades y de sus concentraciones en preparados naturales o de laboratorio y estudiando el curso de las evoluciones de modo de poder predecir la mejor manera de llevar a cabo diversas operaciones tecnológicas (115, 119).

Cristalografía óptica: El uso del microscopio es tal vez la herramienta preferida para el estudio del polimorfismo. Con luz ordinaria o polarizada (118) mediante el microscopio común o electrónico, con agregado de platinas con posibilidad de calentamiento o enfriamiento gradual (113, 114) un observador experimentado no sólo puede indicar si está en presencia o no de polimorfismo, sino que puede llegar a determinar los intervalos de estabilidad de las distintas formas, las temperaturas de fusión y de transición, velocidades de los cambios de estructura, señalando los medios de obtener un polimorfo determinado.

Las mediciones consisten en determinaciones de índices de refracción, comprobación

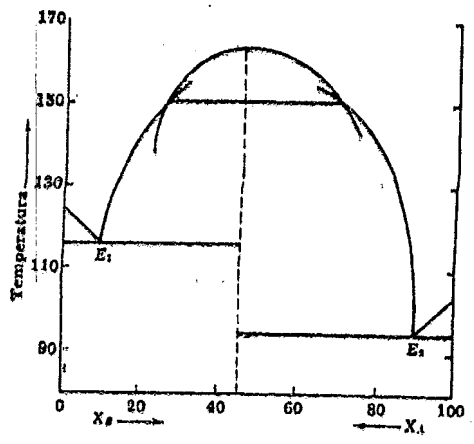


FIG. 30.45. Diagrama de composiciones para 1-3-5-trinitrobenzono (A) y fenantreno (B) mostrando el polimorfismo del compuesto de adición (117).

ción de la existencia de anisotropía o de isotropía (velocidad de transmisión de la luz distinta o la misma en todas direcciones) (119, 120) y lecturas de temperatura.

Difracción de los rayos X: La estructura del reticulado cristalino va a determinar distintos esquemas en los espectros obtenidos por difracción de rayos X en polvos cristalinos. De la intensidad del efecto se puede deducir la proporción de distintos polimorfos en una muestra extremadamente pequeña, con la posibilidad de recuperar la muestra ya que el método es no destructivo (120, 121, 122, 123).

Espectrofotometría infrarroja: Aplicable sólo a muestras sólidas (fundidos o en solución todos los polimorfos darían el mismo espectro) permite determinaciones de tipo cuali y cuantitativas (121, 123, 124).

Análisis térmico diferencial: Sometiendo muestras a calentamientos graduales se pueden medir las cantidades de calor involucradas en distintos cambios de estructura (cambios de fase, transición de un polimorfo a otro, procesos de hidratación o deshidratación, inversiones de estructura cristalina) aportando datos valiosos para la comprensión del proceso en estudio (110).

Dilatometría: Midiendo los cambios de volumen producidos por efectos térmicos se pueden trazar curvas de volúmenes específicos en función de la temperatura y dichas curvas presentarán puntos de inflexión característicos de una transición de un polimorfo a otro (125).

Determinaciones de solubilidades y de velocidades de disolución: Sometiendo muestras a la acción de solventes y determinada la cantidad incorporada a la solución a intervalos de tiempo determinados o bien observando bajo el microscopio la velocidad de traslación de la interfase sólido-líquido, se puede determinar la velocidad de disolución para polimorfos puros o para mezclas de los mismos.

Otros procedimientos: Se conocen otros procedimientos más sofisticados que encuentran limitada aplicación, entre los que se pueden mencionar: anisotropía magnética, resonancia magnética de protones, resonancia magnética en núcleos, etc., y los detalles pueden consultarse en las siguientes referencias: 126, 127, 128, 129.

D. Métodos de Obtención de Polimorfos

Para los sistemas del tipo enantiotrópico, la obtención de las formas metaestables supone colocar cristales de la sustancia bajo condiciones de presión y temperatura que correspondan al intervalo de estabilidad de la forma deseada. La velocidad de la transición se puede acelerar agregando una pequeña cantidad de solvente y mejor aún sembrando pequeños cristales de la forma buscada.

El método anterior no se puede aplicar a sistemas del tipo monotrópico. Los procedimientos desarrollados para estos casos suponen velocidades de transición muy rápidas y muestras muy pequeñas, de modo de conseguir impedir el establecimiento de condiciones de equilibrio termodinámico, que llevarían irremediablemente a las formas estables. La conservación de las formas metaestables es un problema bastante complejo y la variación de supervivencia de los cristales obtenidos es muy grande. Los casos extremos corresponden a sustancias con vidas en forma metaestable de fracciones de segundo y a sustancias cuya duración se cuenta en términos de edades geológicas como son los casos del diamante, aragonita y otros (130).

E. Aplicaciones del Polimorfismo en la Industria Farmacéutica

Considerando que muy probablemente una gran cantidad de drogas de uso medicinal se puedan presentar como diferentes polimorfos y que, según sea el que consideremos, las consecuencias de su aplicación puedan ser distintas, corresponde dedicar al tema especial atención, más de la que está mereciendo hasta el presente. Si al preparar las formulaciones se incluyen formas metaestables de ciertos compuestos, es posible que al someterlos a operaciones como, molienda, calentamiento, disolución, etc., se promueva en el momento o con posterioridad, procesos de transición a formas más estables. Ese pasaje de una especie a otra, lleva implícito modificaciones en la solubilidad, por ejemplo, que se traducirán en formación de precipitados en el seno de soluciones originariamente límpidas con la aparición de turbidez y sedimentos. En suspensiones pueden producirse crecimiento de cristales a tamaños no deseables y pérdida de homogeneidad con imposibilidad de recuperarla. Las cremas

pueden tomar un aspecto no apto y llevar a una desigual distribución de ciertos principios. En supositorios también pueden presentarse complicaciones por el uso de bases no convenientes, ya que la correcta utilización de esta forma farmacéutica en ciertos casos está directamente ligada a su punto de fusión. Alteraciones en los valores de dicho punto de fusión por pasaje de una forma a otra puede llevar a supositorios que se "ablanden", impidiendo su utilización o que, por el contrario, no se fundan en forma adecuada, luego de introducidos. En todo caso, el producto es defectuoso.

Es entonces necesario elegir de manera correcta la forma más conveniente para cada formulación, estudiando rigurosamente el tratamiento a que se la someterá para evitar problemas del tipo señalado y, de ser imprescindible recurrir a formas metaestables, asegurarse por el agregado de estabilizadores adecuados que se impedirán los cambios no convenientes.

Nomenclatura de este Capítulo

a = longitud axial
 A = área superficial cara del cristal
 b = longitud axial
 c = longitud axial; concentración de solución
 c_i = concentración de solución en la interfase (sobre la cara del cristal)
 c_s = concentración de solución saturada
 D_c = diámetro crítico del núcleo
 f = corriente de alimentación, para procesos discontinuos expresado en kilogramos o en moles para procesos continuos expresado como kg/h o moles/h
 g = aceleración de la gravedad; velocidad de crecimiento lineal de cristales
 G = energía libre
 H = entalpía
 k = constante de Boltzman
 K = constante para el proceso de fijación de partícula elemental en la cara del cristal
 K_N = constante del proceso de nucleación
 L = longitud del equipo; longitud característica del cristal
 L_D = longitud dominante

L_m = longitud media respecto al peso
 L_o = longitud inicial del cristal
 L_p = longitud final del cristal
 n = exponente; número de iones por molécula de soluto
 N = número de núcleos
 N_A = número de Avogadro
 N = densidad de población
 N_o = densidad de núcleos
 p = presión de vapor del líquido
 p_r = presión de vapor de gota de radio r
 p_s = presión de vapor en superficie plana; presión de vapor de la solución saturada
 Q = calor; caudal de alimentación
 r = radio de núcleo
 r_c = radio crítico de núcleo
 R = constante de los gases; relación de pesos moleculares de sal anhidra e hidratada
 S = masa de solución; relación de sobresaturación
 S_o = masa de solución inicial
 T = temperatura
 U = coeficiente total de transferencia de calor
 V = volumen de suspensión
 V_m = volumen molar medio
 W = trabajo de formación de núcleos; masa de cristales
 W_o = masa de cristales inicial
 W_p = masa de cristales final
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = ángulos característicos de estructura cristalina
 δ = espesor
 θ = tiempo de retención
 ν = frecuencia de choques entre partículas
 π = número Pi
 ρ = densidad
 ρ_L = densidad de líquido
 ρ_v = densidad de vapor
 σ = tensión superficial; energía superficial

BIBLIOGRAFIA

1. J. Amsler, *Helv. Phys. Acta*, 15, 699 (1942).
2. H. Autenriech, H. Reike y H. Dust, *Chem. Ing. Tech.*, 29, 709 (1957).
3. S. Amelinckx, *J. Chim. Phys.*, 47, 213 (1950).