

# PROYECTO DOCENTE

---

## Concurso de Acceso a Plaza de Catedrático de Universidad

Número de Concurso: 22092-P

- Área de Conocimiento: Química Física
  - Departamento: Química Física
  - Perfil Docente: Química Física
  - Perfil Investigador: Termodinámica
- 

Luis González MacDowell

Profesor Titular de Universidad  
Departamento de Química Física  
Universidad Complutense de Madrid  
Septiembre 2022



Esta memoria contiene el proyecto docente presentado como parte de los requisitos necesarios para participar en el Concurso de Acceso al Cuerpo de Catedráticos de Universidad del Área de Conocimiento de Química Física, Resolución Rectoral de 31 de Mayo de 2022 (BOE 4 de junio de 2022), concurso N° 22092-P, de la Universidad Complutense de Madrid.



## Índice

1. La Universidad Española tras el proceso de Bolonia	1
2. Organización de los Estudios Universitarios	9
3. Aspectos comunes del título de Grado en Química	11
4. El Grado en Química en la Universidad Complutense	12
5. Las asignaturas de Química Física en el Grado de Química	16
6. Propuesta de un Programa de Química Física II	24
6.1. Descripción de la asignatura . . . . .	24
6.2. Programa Docente . . . . .	30
6.3. Prácticas de Laboratorio . . . . .	34
7. Metodología docente	37
8. Bibliografía seleccionada	43



## 1. La Universidad Española tras el proceso de Bolonia

En el año 2006 me encontraba elaborando una memoria docente para las pruebas de habilitación nacional. En aquel entonces el sistema universitario español estaba experimentando una importante transformación, con la finalidad de adaptarse al recién creado Espacio Europeo de Educación Superior. El objetivo principal consistía en el establecimiento de una estructura basada en las titulaciones de grado, máster y doctorado que dotasen al sistema una mayor flexibilidad que la estructura de Licenciatura y doctorado entonces vigente. Con el fin de articular esta estrategia y permitir la equivalencia entre títulos europeos, se establecía también una medida estandarizada de carga lectiva basada en el sistema de créditos ECTS (European Credit Transfer System). Acompañados de estos objetivos, se incluía la necesidad de transformar las metodologías docentes, con un mayor énfasis en la participación activa del alumnado (evaluación continua, exposiciones, trabajo en grupo, seminarios especializados, etc.) que muchos asumimos con gran entusiasmo.

Pasados casi quince años de aquel proceso, y después de un enorme esfuerzo y propuestas voluntariosas, las grandes aspiraciones metodológicas han sido paulatinamente desvaneciéndose. Se aprecian no obstante dos efectos significativos: una subida considerable de las tasas universitarias y un imparable ascenso de las titulaciones en universidades privadas.

Como muestra la gráfica 1, después de una estabilización de las matrículas en universidades privadas en torno al 10% durante la década de 2000 a 2010, el porcentaje de matriculas comienza a incrementar paulatinamente a partir de 2010, justamente coincidiendo con la implementación de la estructura de grado y máster del Plan Bolonia en España. No obstante, la distribución de alumnos es muy distinta en grado y máster, siendo en los estudios de máster donde el crecimiento de las matriculas es más significativo. De acuerdo a los datos del Ministerio de Universidades, el porcentaje de alumnos matriculados en estudios de máster era del 20% en 2010, subió al 32% en 2015 y alcanzaba ya el 40% en el 2020.

Las causas de esta tendencia son complejas, y posiblemente hundan sus raíces en el alejamiento de la tradición universitaria al mundo profesional.

Consideramos no obstante varias otras causas importantes. 1) Antes de acome-

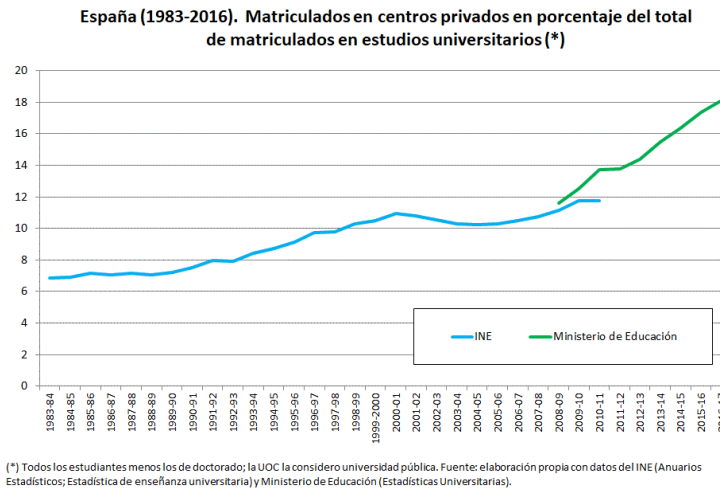


Figura 1: Fuente: Studia XXI

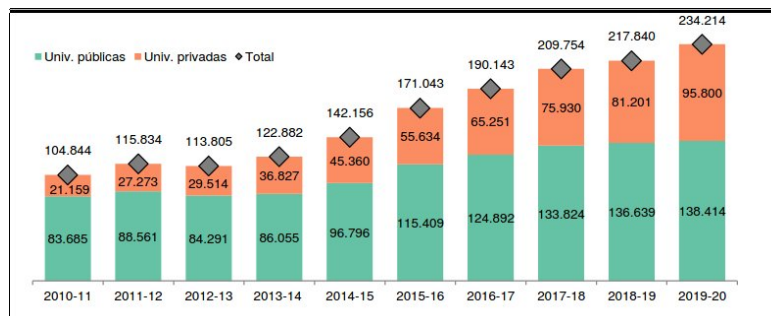


Figura 2: Alumnos matriculados en titulaciones de Máster en universidades públicas y privadas. Fuente: Ministerio de Universidades.

ter el proceso de Bolonia, en España existían unas Licenciaturas de gran prestigio, con una estructura oficiosa basada en estudios generalistas de tres años, o diplomatura, y otros dos más especializados de dos años. En el proceso de adaptación al EEES, lo más fácil hubiese sido convertir la diplomatura en un título oficial de grado, y convertir en un título adicional de Licenciatura los siguientes dos años. Al extinguir las Licenciaturas, el sistema universitario renuncia a su imagen de marca labrada durante décadas, mientras que consagra la imagen de marca de las universidades privadas—el Máster—como El título de posgrado por excelencia. 2)

Al escoger una etapa de especialización de tan solo un año, se devalúan los originales estudios de Licenciatura, con dos años de especialización, lo que facilita la competencia de las universidades privadas. 3) En España el proceso de adaptación ha ido acompañado de un significativo incremento de las tasas universitarias, especialmente en los estudios de máster, lo que ha excluido con frecuencia a posibles candidatos y ha reducido la diferencia de precios con las universidades privadas.

A estas causas, cabe añadir una serie de consideraciones importantes que han condicionado la situación actual de las universidades públicas españolas y dificultan considerablemente la actividad docente del profesorado.

### La estructura de los estudios universitarios

El proceso de regulación de los estudios de Grado en España ha venido acompañado de un marco legislativo cambiante que ha dificultado enormemente el trabajo de las universidades.

La adaptación al EEEES comienza su particular singladura en los Reales Decretos 55/2005 y 56/2005 de 21 de Enero, en los que se estableció un marco relativamente flexible, con una división de los estudios en un Grado de 180 a 240 créditos y un máster de 60 o 120 créditos ECTS, compatibles con los estudios tradicionales de Licenciatura. Un par de años después, se modifica el marco legislativo y se establece una duración obligatoria de cuatro cursos académicos para todos los estudios de grados, según BOE 30/10/2007. La motivación para esta decisión se elaboró en un documento del Ministerio de Educación y Ciencia, llamado *La Organización de las Enseñanzas Universitarias en España*, con algunas reflexiones sobre la duración del grado. En el documento se esgrimen razones para apoyar una estructura obligatoria de cuatro cursos, entre los que cabe destacar la primera:

“Aunque algunos países europeos han fijado la duración de este primer ciclo en 180 para parte de sus títulos [sic], 240 créditos permitirán una **mejor adecuación con otros sistemas universitarios** de gran importancia en el mundo y para España (**EEUU, Latinoamérica, Asia, etc.**).”

Lo cierto es que la estructura de 3+2 vigente oficiosamente en la Universidad Española en las antiguas licenciaturas se mantiene muy mayoritariamente en

Austria, Alemania, Dinamarca, Francia, Holanda, Italia, Noruega, Suecia, Suiza, Reino Unido y Francia; mientras que la estructura de 4+1 ha permitido a nuestra Universidad converger con los planes académicos de Bélgica, Irlanda y Portugal, a los que cabe sumar, presumiblemente, EEUU, Latinoamérica y Asia.

La norma anterior fue modificada en Febrero de 2015, permitiendo la posibilidad de estudios de Grado de tres años. En la práctica, establecidos ya la mayoría de grados en cuatro años, la medida tuvo poco efecto, y ha sido derogada recientemente de acuerdo al Real Decreto 822/2021, donde se consagra de nuevo la duración obligatoria del grado en cuatro cursos, salvo para algunas situaciones excepcionales en las que se puede alargar hasta los cinco cursos académicos.

Es manifiesto por tanto que el proceso legislativo hacia la convergencia del sistema universitario con el resto de países europeos ha caminado justamente en la dirección contraria, alejándonos de la estructura de los planes de los países europeos de mayor población y tradición académica.

En cualquier caso, la falta de un marco legal estable ha ocasionado con frecuencia esfuerzos infructuosos. Como ejemplo, el encargo a las universidades alrededor de 2005 de elaborar planes de Máster de dos años antes de decidir las estructuras de Grado. El Departamento se embarcó entusiasmado en la elaboración de un Máster de Química Física de dos cursos completos que hubo que enterrar al poco de finalizarse, lo que recuerdo como el único esfuerzo colectivo ilusionante en el ámbito organizativo.

### **Régimen de convalidación**

Un aspecto reseñable del proceso de adaptación a los nuevos planes de estudio es el régimen de convalidación de los antiguos estudios de Licenciatura. En efecto, una vez aprobada la estructura de Grado y Máster, con una duración lectiva en general de igual duración que la Licenciatura, el marco legislativo concedió no obstante mayor valor académico al Máster que a la Licenciatura, abundando en la devaluación de la tradición académica de las universidades públicas.

La decisión tuvo un enorme coste para multitud de estudiantes de generaciones anteriores al Plan Bolonia, que se vieron obligados a realizar un nuevo curso de Máster para alcanzar la capacitación profesional o poder proseguir sus estudios de

Doctorado.

Paradójicamente, a efectos simbólicos la devaluación del título de Licenciado dejaba al profesorado en estado de subcualificación, puesto que carecía de la titulación adecuada para ostentar el título de Doctor que los distingue singularmente de otros ámbitos académicos.

Finalizado el proceso oneroso de convalidación de los Licenciados, con frecuencia en Universidades Privadas no presenciales y recaudadas las universidades las consiguientes tasas, el Real Decreto 967/2014 de 21 de noviembre establece la equivalencia entre los actuales Máster y las antiguas Licenciaturas, lo que tranquilizadoramente restituye la cualificación del profesorado universitario.

### **Garantías de calidad**

Una importante novedad en la regulación de las universidades españolas es el establecimiento de un procedimiento de evaluación externa de la calidad de las titulaciones. En España, esta supervisión corre a cuenta de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación, regulada de acuerdo al Real Decreto 1112/2015.

En el ámbito más próximo a la docencia, los sistemas de calidad se plasman en los documentos *Verifica*, que contienen descriptores sobre los planes de estudio de cada titulación, y las *Guías Docentes*, que recogen en detalle los planes, objetivos y normas de evaluación de cada asignatura. En particular, las Guías Docentes proveen de un marco de referencia que es útil a los departamentos para unificar la docencia de una asignatura en los distintos grupos, y sirve de reglamento objetivo de cara a los alumnos.

Desgraciadamente, a pesar de estos avances, la esencial y delicada labor de garantizar la calidad de las titulaciones ha sido suplantada paulatinamente por un conjunto de prolijos procedimientos estandarizados que garantizan en su lugar la disponibilidad de información pormenorizada sobre los programas, los procedimientos docentes, los objetivos de aprendizaje y los métodos de evaluación.

En la práctica, el afán por medir cada uno de los aspectos de la actividad docente se ha constituido en un procedimiento que regula estrictamente lo superfluo pero obvia lo esencial: ¿Qué y cuánto aprenden los alumnos?

No es esto especialmente lo más problemático del sistema de evaluación. Independientemente del seguimiento más o menos estricto de las directrices de la agencia de evaluación, la calidad de las universidades y las titulaciones descansa en la trayectoria académica de la institución, y especialmente en la categoría académica de su personal docente, y es poco más que esto lo que es indispensable valorar, ya que es esto lo único que puede garantizar realmente la calidad de una institución. Por el contrario, el problema principal del afán regulatorio ha sido el establecimiento de un marco inflexible para la práctica docente, que dificulta enormemente cualquier iniciativa o modificación de los contenidos de las asignaturas.

En particular, los procedimientos de acreditación de las titulaciones son tan prolijos en detalles y estrictos en su procedimiento, que han convertido los planes de estudio en documentos completamente inflexibles que hacen inviable cualquier intento de cambio o mejora. Baste un ejemplo elocuente: Desde su aprobación por Resolución en el BOE de 28 Mayo de 2010, el Grado en Química de la Universidad Complutense no ha sufrido ninguna modificación. En ese mismo periodo de tiempo, el Real Decreto 1393/2007 encargado de legislar la ordenación de los títulos universitarios sufrió nueve modificaciones, antes de ser derogado definitivamente y sustituido por el Real Decreto 822/2021. Es decir, fue más fácil modificar en sede parlamentaria por diez veces consecutivas la ley de ordenación de planes universitarios que modificar el contenido de los planes de estudio supervisados por la ANECA.

Simultáneamente, durante este periodo cualquier profesor de química física puede constatar una disminución muy considerable de las competencias de los alumnos en las asignaturas de su ámbito, además de lagunas inadmisibles en las competencias matemáticas, sin que esto haya suscitado ningún comentario relevante de la agencia de calidad.

La propia normativa de calidad universitaria conlleva también un procedimiento de control interno, que en la Universidad Complutense recibe el nombre de *Programa Docentia*. Por supuesto, el fomento de una buena práctica docente es un fin muy necesario. La evaluación efectiva de la calidad por el contrario, es un objetivo que se demuestra polémico y difícil. La solución inocua a este problema es el establecimiento de una medida cuantitativa y acumulativa de méritos, como la

realización de cursos o la asistencia a congresos docentes que no garantiza en absoluto la calidad por si mismas, pero redundan en una valoración y un reconocimiento institucional.

De entre los elementos de valoración más sensibles y delicados, se encuentra la cuantificación de la calidad docente en términos de la tasa de aprobados. Esta es una política totalmente aceptable si simultáneamente se estableciese una norma estricta en relación a los requisitos docentes, o los exámenes son corregidos por expertos independientes. En ausencia de este procedimiento, alcanzar los objetivos de tasas de aprobados es una tarea tan sencilla como disminuir la dificultad de los exámenes o las exigencias de la evaluación. En este sentido, recordemos que las evaluaciones favorables del programa Docentia influyen en la consecución de quinquenios docentes y son requisito para la promoción de los profesores no permanentes. Así pues, el actual programa de evaluación de la calidad docente está instaurando una serie de incentivos perversos que puede redundar, al contrario, en un empobrecimiento de la calidad con el pleno beneplácito de los sistemas de evaluación y el reconocimiento institucional de los profesores más complacientes.

En esta misma dirección, la del empobrecimiento de la calidad, operan varias otras dinámicas:

**Exámenes de acceso.** La Universidad es responsable de las pruebas de Evaluación para el Acceso a la Universidad, o examen EvAU, tras la finalización del bachillerato. El establecimiento de un listón adecuado para el aprobado es un elemento indispensable para garantizar la calidad de la enseñanza en el bachillerato. Sin embargo, una política educativa complaciente ha avocado a una tasa de aprobados del orden del 95 % sobre presentados, que acaso puntue como un gran logro de la docencia en algunas hojas de cálculo, pero que desgraciadamente los profesores constatamos con mucha frecuencia que no obedece a la superación de requisitos académicos suficientes para el ingreso en la universidad.

**Tasas de aprobados.** En la Universidad se valora como objetivo docente la consecución de una tasa de aprobados del 70 % en las distintas asignaturas. Esta es una medida muy discutible, por tanto que se establece como un listón universal independiente de la asignatura. Presuponer que los contenidos conceptuales y exi-

gencias son los mismos en todas las asignaturas parece una apreciación alejada de la realidad. En cualquier caso, con los presentes incentivos, se hace fácil alcanzar el objetivo a costa de los requisitos académicos.

**Régimen de extinción de asignaturas y programas.** Como es natural un buen plan de estudios debe tener un número considerable de asignaturas optativas. La naturaleza de esta clase de asignaturas es tal que se considera importante mantener en los planes los conocimientos avanzados en alguna disciplina, aunque se reconoce que tales conocimientos son innecesarios de aprender para todos los alumnos del correspondiente plan. La elección por parte del claustro de cuales son dichas asignaturas obedece a un criterio académico. Por el contrario, desde los rectorados se imponen regímenes estrictos de extinción de las asignaturas optativas en cuanto el número de alumnos matriculados es menor que cierto umbral. Esto conlleva dos problemas graves. 1) Por supuesto, la universidad debe asumir la pérdida de importancia de algunas disciplinas científicas con el tiempo y ahorrar el coste social de formar a un gran número de personas en una disciplina de poca vigencia, pero reconociendo que el coste social de extinguir por completo una tradición científica de carácter histórico puede ser todavía mayor. 2) Se constata con mucha frecuencia que la demanda de las asignaturas optativas no está condicionada por el interés de sus contenidos, sino por la facilidad para superar sus requisitos académicos. Ante la amenaza de desaparecer una asignatura por falta de alumnos, el régimen de extinción genera un incentivo en la dirección de la devaluación académica en el que compiten por los alumnos precisamente aquellas asignaturas con más dificultades, y por lo tanto con menos demanda. Esta competición nada tiene que ver con el interés social de los contenidos, y perjudica no solo a las más amenazadas de extinción sino a todas las demás.

Esta problemática es todavía más grave cuando el régimen de extinción no aplica a una asignatura en particular sino a todo un título de máster. De esta manera, y visto con frecuencia que la mayor motivación para cursar estudios no es la adquisición de unos conocimientos sino la obtención de un título, esta misma competencia entre asignaturas de una misma titulación se puede establecer entre titulaciones enteras. En su grado más preocupante, se solapa el interés de los alumnos en adquirir una titulación sin esfuerzo junto con el interés del profesorado

en evitar la extinción del título, con implicaciones que han trascendido del mundo académico al ámbito de la esfera pública en nuestro país recientemente.

En definitiva, el establecimiento de una serie de incentivos perversos en los que es la demanda por el mero título en lugar de los conocimientos lo que condiciona la calidad de los estudios universitarios tiene como riesgo patente la merma paulatina de la calidad de la enseñanza. La solución no es la desaparición de los sistemas de calidad, por supuesto, sino el establecimiento de sistemas de calidad eficientes dirigidos a promover incentivos académicos adecuados.

Este es el reto que tiene la Universidad Pública de Calidad ante sí. Trascender la cultura de la evaluación cosmética. Mantener el nivel de requisitos académicos de acuerdo a un criterio docente y no a la demanda externa por el mero título. Solo así la universidad puede cumplir su papel social como último eslabón del proceso de transmisión de conocimientos y garantizar la capacitación y el prestigio de sus egresados.

## 2. Organización de los Estudios Universitarios

El marco general de los planes de estudio en las universidades españolas se regula actualmente de acuerdo al Real Decreto 822/2021, de 8 de Septiembre por el que se establece la organización de las enseñanzas universitarias.

En las titulaciones oficiales de grado y posgrado dentro del Sistema Europeo de Educación Superior, la medida de la carga docente se realiza mediante el Sistema Europeo de transferencia de Créditos (ECTS), que tiene por finalidad medir el tiempo empeñado en todas las actividades docentes necesarias para superar el grado, incluidas horas lectivas y trabajo personal; dentro del marco legislativo español, el sistema ECTS está regulado mediante el Real Decreto 1125/2003, que establece una horquilla de 25 a 30 horas de carga docente por cada crédito; y un total de 60 ECTS por curso académico, repartidos en un mínimo de 36 y un máximo de 40 semanas por curso académico.

De acuerdo al ordenamiento vigente, los estudios universitarios se dividen en tres ciclos académicos que son el Grado, el Máster y el Doctorado.

Los estudios de Grado tienen como objetivo fundamental la formación básica y generalista en las correspondientes disciplinas, con un contenido suficiente

para el desarrollo de actividades de carácter profesional. La ley vigente establece la duración obligatoria de los Grados en 240 créditos ECTS, o cuatro cursos académicos. Adicionalmente, se establecen ciertos requisitos comunes a todos los planes de grado. En particular: “Los planes de estudios de 240 créditos incluirán un mínimo de 60 créditos de formación básica. De ellos, al menos la mitad estarán vinculados al mismo ámbito de conocimiento en el que se inscribe el título, y el resto estarán relacionados con otros ámbitos del conocimiento diferentes al que se ha adscrito el título y deberán concretarse en materias o asignaturas con un mínimo de 6 créditos cada una, que asimismo deberán ser ofertadas en la primera mitad del plan de estudios. Los créditos restantes, deberán estar configurados por otras materias o asignaturas que refuercen la amplitud y solidez de competencias y conocimientos del proyecto formativo que es el Grado”. Adicionalmente, se establece la obligatoriedad de un Trabajo Fin de Grado con una duración de entre 6 y 24 créditos y unas prácticas académicas externas con una duración máxima de 60 créditos.

Los estudios de Máster suceden a los estudios de Grado y tienen como objetivo la formación avanzada y la especialización en una o varias áreas de conocimiento. El marco legislativo vigente establece una duración de 60, 90 o 120 créditos ECTS como máximo, que se distribuyen en materias obligatorias y optativas, así como un trabajo Fin de Máster de 6 a 40 créditos y optativamente unas prácticas académicas externas.

Los estudios de Doctorado conforman el tercer y último ciclo de la enseñanza universitaria y están regulados de acuerdo al Real Decreto 99/2011 de 28 de Enero. Su finalidad es la adquisición de las competencias y habilidades relacionadas con la investigación científica de calidad. Los estudios de doctorado a tiempo completo tienen una duración máxima de tres años, con posibilidad de una extensión de un año adicional y excepcionalmente dos años más con permiso de la comisión académica. Los estudios de doctorado deben estar organizados en el contexto de un Programa de Doctorado, si bien no siguen un requisito obligatorio en cuanto a créditos ECTS.

Los contenidos de los planes de estudio deben ser verificados por la agencia de calidad y son objeto de seguimiento según se regula en el Real Decreto 822/2021.

### 3. Aspectos comunes del título de Grado en Química

De acuerdo a la legislación vigente los programas oficiales del Grado en Química en la Universidad Española tienen una duración de cuatro cursos académicos, y fueron diseñados en su mayoría hace algo más de una década, durante el proceso de adaptación al Espacio Europeo de Educación Superior.

El marco de referencia para la elaboración de los planes de Graduado en Química fue el modelo de Eurobachelor del Proyecto Tuning, con una duración de tres cursos. Sin embargo, en España las directrices propuestas para la elaboración de los planes de Grado en Químicas se recogieron en el llamado Libro Blanco de la ANECA, elaborado por una red de universidades españolas y publicado en el año 2004. El libro recogía detalladamente la mayoritaria aceptación del grado de tres años en toda Europa y los consejos del proyecto Tuning, pero no obstante propuso un plan de 240 créditos y cuatro cursos académicos antes de que el propio Real Decreto plasmase la obligatoriedad de esta estructura.

El incremento de créditos de la propuesta del Libro Blanco no corresponde a un aumento de la optatividad, sino que aumenta la carga docente con módulos obligatorios de asignaturas de Ingeniería Química, Ciencia de los Materiales y contenidos especializados de las restantes disciplinas, integrando la casi totalidad de los estudios de Licenciatura dentro del grado.

A pesar de la divergencia con las directrices de las universidades europeas, el Libro Blanco se ha mostrado por tanto altamente influyente, no solo en lo que se refiere a la duración de los estudios sino a la elaboración de los planes, hasta el punto de que existe el mito de que las directrices de este informe son vinculantes. Lo cierto es que se trata de un documento sin valor legislativo que pretende proponer “directrices útiles” en el diseño de los grados y que explícitamente recoge su carácter no vinculante. No obstante, siendo un documento asumido por la ANECA, en la práctica sus propuestas se siguen con obediencia religiosa en las universidades españolas. De hecho, consultando los planes de estudio de universidades representativas como la de Barcelona, Salamanca, o Granada se constata una enorme uniformidad en la estructura de los Grados en Química en toda España.

#### 4. El Grado en Química en la Universidad Complutense

El grado de química de la Universidad Complutense es un título de carácter oficial según BOE 05/01/2010, cuyo plan de estudios está publicado en el BOE 21/06/2010.

El título consta de un módulo básico, de 60 créditos, de carácter obligatorio que se imparte íntegramente en el primer curso. Además tiene otro módulo fundamental, también de carácter obligatorio, de 120 créditos, que se imparte en los dos siguientes cursos. Finalmente, el cuarto curso consta de un módulo avanzado, con 6 créditos obligatorios y 36 créditos de asignaturas optativas, que se completan con el Trabajo Fin de Grado, de 18 créditos.

PRIMER CURSO		SEGUNDO CURSO		TERCER CURSO		CUARTO CURSO	
SEMESTRE 1	SEMESTRE 2	SEMESTRE 1	SEMESTRE 2	SEMESTRE 1	SEMESTRE 2	SEMESTRE 1	SEMESTRE 2
FÍSICA GENERAL (9)		QUÍMICA FÍSICA I (12)		QUÍMICA FÍSICA II (12)		REDACCIÓN Y EJECUCIÓN DE UN PROYECTO EN QUÍMICA (6)	
QUÍMICA GENERAL (12)		QUÍMICA INORGÁNICA I (12)		QUÍMICA INORGÁNICA II (12)		TRABAJO FIN DE GRADO (18)	
BIOLOGÍA (6)	ESTADÍSTICA APLICADA Y CÁLCULO NUMÉRICO (6)	QUÍMICA ORGÁNICA I (12)		QUÍMICA ORGÁNICA II (12)		* Elegir asignaturas optativas hasta completar 60 ECTS.	
MATEMÁTICAS (9)	GEOLOGÍA (6)	QUÍMICA ANALÍTICA I (9)		QUÍMICA ANALÍTICA II (9)	QUÍMICA ANALÍTICA III (6)		
OPERACIONES BÁSICAS DE LABORATORIO (6)	INFORMÁTICA APLICADA A LA QUÍMICA (6)	CIENCIA DE MATERIALES (6)	INGENIERÍA QUÍMICA (9)	BIOQUÍMICA (9)			

Figura 3: Plan del Grado en Química de la Universidad Complutense

En el módulo básico, los alumnos tienen asignaturas de Química General, Biología y Geología, además de cursos de Matemáticas, Física y Estadística Aplicada.

En el módulo fundamental, de carácter obligatorio, los alumnos tienen, además de las asignaturas tradicionales de Química Orgánica, Inorgánica y Analítica, asignaturas de Ingeniería Química, Bioquímica y Ciencia de los Materiales.

Dentro del módulo fundamental, el Departamento de Química Física tiene asignada la impartición de dos asignaturas anuales de Química Física, mientras que en el módulo avanzado de cuarto curso se imparten las asignaturas optativas de Modelización Molecular y Métodos de Simulación, Química Física Aplicada y Métodos Espectroscópicos Aplicados a la Química.

Con el fin de discutir las bondades de la estructura vigente del Grado en Química de la Universidad Complutense, resulta interesante compararlo con otros grados de cuatro años de universidades prestigiosas.

El grado de Química en la Universidad de Oxford consta de tres cursos anuales con asignaturas básicas y especializadas, y un cuarto curso integramente dedicado a la realización de un trabajo de Fin de Grado. En primero los alumnos tienen como asignaturas obligatorias cursos anuales de Química Inorgánica, Química Orgánica, Química Física y Matemáticas. En segundo, además de asignaturas obligatorias de Síntesis Química y Química Biológica ven cursos obligatorios de Química Teórica y Espectroscopía Molecular. El tercer curso consta de asignaturas principalmente optativas.

El grado de Química en la Universidad de Berkeley tiene diversos itinerarios, pero el itinerario recomendado tiene un primer curso con asignaturas obligatorias de Química General, Matemáticas y Físicas. Un segundo curso abunda con la formación matemática y física, además de una asignatura de Química Orgánica. El tercer curso tiene asignaturas obligatorias de Química Inorgánica y Química Física; mientras que el cuarto es mayormente optativo salvo por otra asignatura obligatoria más de Química Física.

Undergraduate Chemistry Program <i>A suggested sequence</i>							
Freshman		Sophomore		Junior		Senior	
Fall	Spring	Fall	Spring	Fall	Spring	Fall	Spring
4A <sup>F</sup> General/Quant Analysis	4B <sup>S</sup>	12A <sup>F</sup> Organic	12B <sup>S</sup> Intro to Research	104A <sup>F</sup> Inorganic	104B <sup>S</sup>	125 or C182 Physical Lab****	105, 108, 115, or 146 <sup>S</sup>
<b>Mathematics</b> 1A*    1B*    53    54 <sup>S</sup>				<b>Chemistry</b> 120A*** Physical		120B**** Physical	
FR Seminar (1 unit)	<b>Physics</b> 7A**    7B**		Foreign Language		Research	Breadth Elective	Other
Reading and Composition		Breadth Electives		<b>Chem</b> Elective†		Allied Subjects‡	

Figura 4: Plan del Grado en Química de la Universidad de Berkeley

Comparados con los planes de otras universidades, destacamos las siguientes diferencias:

- La formación en matemáticas es significativamente menor.
- El peso de las asignaturas de química física es relativamente menor.

- El contenido de asignaturas obligatorias ajenas a la disciplina tradicional de la química es mayor.
- El número de asignaturas por curso es mayor.

La comparativa muestra que los contenidos de química física del módulo fundamental del Grado UCM son parecidos en cantidad a los de otros programas. La diferencia importante es un contenido significativamente menor en Matemáticas, además de una carga lectiva mayor en asignaturas obligatorias como Geología, Ingeniería Química o Ciencia de los Materiales que no se encuentra en otros programas, limitan la optatividad y aumentan la carga lectiva.

Especialmente significativo es el contenido muy reducido en Matemáticas, que se limita a un cuatrimestre y sobre el que se imponen unos requisitos de aprovechamiento muy limitados. En la práctica, los conocimientos de matemáticas de los alumnos son manifiestamente incompatibles con la consecución de una buena parte de las competencias y objetivos formativos que figuran actualmente en las Guías Docentes de las asignaturas de Química Física.

Este problema se debe a una falta de estrategia real sobre la formación en Química Física. Las únicas vías coherentes en este sentido serían:

- Aumentar significativamente la formación en matemáticas y mantener los planes actuales.
- Mantener el nivel de matemáticas actual y adaptar los planes a esta situación.

Desgraciadamente, esta última estrategia es seguramente la más viable, pero reduce la química física en el grado a un papel de servicio auxiliar del resto de las asignaturas.

Esto conlleva una discusión sobre el papel del propio Departamento de Química Física. Sin la suficiente formación formal y teórica en Química Física, la posibilidad de contribuir a la generación del conocimiento en el área resulta en entredicho, y con ello el papel del propio departamento. Acaso no sea casualidad que una buena parte de los jóvenes doctores contratados recientemente tengan una formación en Ciencias Físicas, en lugar de en Ciencias Químicas. A medio plazo, esta situación generará posiblemente mayor brecha todavía entre las expectativas de los profesores y las capacidades de los alumnos. Ocurre no obstante, que esta tendencia tiene

mucho que ver con el cambio significativo en la investigación moderna, que han ido trasladándose desde el énfasis en los principios al énfasis en los sistemas y las aplicaciones. Esta tendencia, que es universal, posiblemente tiene todavía mayor pujanza en el ámbito de la química. A futuro, es posible que la investigación asociada a los principios de la Química Física se vaya trasladando hacia las facultades de Física, mientras que las líneas más aplicadas de los Departamentos de Química Física se vayan trasladando a Departamentos de Bioquímica, Materiales o Inorgánica. En definitiva, las nuevas tendencias en investigación ponen en cuestión la estructura departamental tradicional de la universidad moderna.

Se trata de una discusión muy compleja y profunda que no podemos acometer en esta memoria, pero que ahonda en la necesidad insoslayable de hacer una reflexión sobre las estructura universitaria y los planes de estudio. En lo que sigue nos conformamos con hacer algunas mejoras posibilistas en el plan de estudios con repercusiones positivas en la docencia de la Química Física y en el Grado en Química en general:

- Es indispensable aumentar el contenido de matemáticas. Una forma viable es eliminar la asignatura de Estadística y Cálculo Numérico, con muy poco aprovechamiento, para crear una asignatura anual de matemáticas con contenido en Cálculo y Álgebra.
- Es indispensable aumentar los requisitos académicos en las asignaturas de matemáticas y físicas. Las tasas de aprobado de alrededor del 80 % son completamente incongruentes con los conocimientos de matemáticas que constatamos los profesores de Química Física en el ejercicio de nuestra labor docente.
- Es deseable la reducción de carga docente en asignaturas que no forman parte de la química fundamental. Por ejemplo, se podrían transformar las asignaturas de Biología, Geología e Ingeniería Química en una sola asignatura optativa.
- Es deseable fusionar la asignatura de Biología General con la de Bioquímica. En la actualidad, es un acierto incluir una asignatura de contenido biológico entre las asignaturas fundamentales del Grado, pero la existencia de 15

créditos, casi la mitad de toda la optatividad del Grado parece excesivo.

- Es aconsejable la obligatoriedad de un nivel de inglés suficiente y la posibilidad de cursarlo al precio de la matrícula como una asignatura optativa o adicional al Grado.

Reduciendo el contenido de asignaturas obligatorias, sería posible reducir el número de asignaturas impartidas por cuatrimestre. En la actualidad, los alumnos estudian simultáneamente cinco asignaturas, además del consiguiente número de prácticas de laboratorio, lo que deja poco tiempo para el estudio personal. Una posible solución a este problema, reduciendo el número de asignaturas, sería una carga de tres asignaturas semanales de 4 horas por semana, dejando el día libre para las prácticas de laboratorio. Salvando algunos problemas logísticos de disponibilidad en los laboratorios docentes, de este modo se podría tratar de sincronizar las prácticas realizadas con los contenidos teóricos correspondientes.

## **5. Las asignaturas de Química Física en el Grado de Química**

De acuerdo a la vigente Memoria Verifica, los contenidos específicos de Química Física se imparten en el Módulo Fundamental y el Módulo Avanzado. En el primer módulo, la Memoria Verifica establece los siguientes contenidos:

Química cuántica y espectroscopía. Termodinámica química y termodinámica estadística. Teoría cinética y cinética química. Fenómenos superficiales. Electroquímica. Polímeros y coloides.

Los primeros dos descriptores, Química Cuántica y Espectroscopía, se corresponden a la asignatura de Química Física I, impartida en el segundo año, con los siguientes descriptores:

Orígenes de la teoría cuántica. Ecuación de Schrödinger. Aplicación a sistemas sencillos. Estructura atómica. Estructura molecular y enlace químico. Moléculas diatómicas. Moléculas poliatómicas. Modelización molecular. Teoría de grupos y simetría. Interacción materia-radiación.

Fundamentos de Espectroscopía. Espectroscopías de microondas, infrarroja, Raman y visible-ultravioleta. Fluorescencia y fosforescencia. Espectroscopias de resonancia magnética (RMN y RSE).

La asignatura consta además de un laboratorio muy completo con prácticas de espectroscopía, cálculos de estructura electrónica y una introducción a la teoría de grupos y simetría.

El resto de descriptores del módulo fundamental se imparten íntegramente en la asignatura de Química Física II, con los siguientes contenidos:

Complementos de Termodinámica. Termodinámica estadística. Fuerzas intermoleculares. Gases reales y fases condensadas. Teoría cinética y fenómenos de transporte. Cinética química. Mecanismos de reacción. Aproximaciones moleculares. Catálisis homogénea. Superficies e interfases. Tensión superficial. Sistemas multicomponentes. Fisorción y quimisorción. Cinética electroquímica. Catálisis heterogénea. Polímeros y coloides. Síntesis y caracterización. Materiales poliméricos.

La asignatura cuenta también con una interesante colección de prácticas que incluye medidas de equilibrio de fases, cinética química, tensiones superficiales, viscosidades o concentración micelar crítica.

Los conocimientos de Química Física se pueden completar en el módulo avanzado, impartido íntegramente en cuarto curso con tres asignaturas optativas :

**Química Física Aplicada.** Esta asignatura aborda y profundiza diversos temas tratados en la asignatura de Química Física II. En primer lugar se estudia el equilibrio de fases en fluidos puros y disoluciones; Prosigue con el estudio de materiales poliméricos, y aborda también la química coloidal y supramolecular. El curso finaliza con la ampliación de temas de catálisis, electroquímica y corrosión. La asignatura tiene un laboratorio con alrededor de una práctica por cada bloque temático.

**Métodos Espectroscópicos Aplicados a la Química.** Se trata de una asignatura avanzada de espectroscopía, donde se profundiza en los fundamentos de la

interacción radiación-materia, con énfasis en los procesos de transición electrónica y fotofísica. El curso prosigue con una descripción de técnicas espectroscópicas avanzadas, incluidas las técnicas de Transformada de Fourier y la espectroscopía láser y finaliza con aplicaciones en cinética y dinámica molecular de la reacción química. La asignatura se complementa con un ciclo de tutorías y prácticas de espectroscopía.

**Modelización Molecular y Métodos de Simulación.** Se trata de una asignatura que entra de lleno en el ámbito de la especialización en Química Física. Incluye una extensa descripción de métodos de estructura electrónica, incluidos método Hartree-Fock y post Hartree-Fock, además de una introducción a los métodos DFT. El curso prosigue con una introducción a los métodos de simulación clásica, que incluye los métodos de Mecánica Molecular, Monte Carlo y Dinámica Molecular. La asignatura tiene también un módulo de prácticas donde se ilustran cálculos de estructura electrónica con el programa Gamess y cálculos de simulación molecular con el programa Gromacs.

Los conocimientos en química física se pueden profundizar en la Universidad Complutense en el Máster de Ciencia y Tecnología Químicas, con 60 créditos de carga lectiva, de los cuales únicamente 18 de carácter optativo entre los que es posible escoger las asignaturas de Nanoquímica (un curso principalmente de química coloidal y supramolecular) y de Química Láser (se imparten fundamentos del láser, y sus aplicaciones en espectroscopía y fotofísica) en las que se constata cierto grado de solapamiento con las asignaturas optativas de Química Física Aplicada y Métodos Espectroscópicos.

Vemos que el programa de Química Física en el Grado en Química de la Universidad Complutense es francamente extenso. En el Módulo Fundamental incluye los cursos básicos tradicionales de la Química Física, junto con algunos otros conceptos más avanzados como la electroquímica cinética o la teoría de grupos. A esta formación, hay que añadirle un grado muy considerable de especialización en el Módulo Avanzado.

A propósito del carácter avanzado de las asignaturas de cuarto curso, cabe recordar que, de acuerdo a la estructura de los planes de estudio de la universidad, “Las enseñanzas oficiales de Grado, como ciclo inicial de las enseñanzas universi-

tarias, tienen como objetivo fundamental la formación básica y generalista en las diversas disciplinas del saber científico”.

Según esta definición, acaso las asignaturas del Módulo Avanzado correspondan más a la docencia especializada en Química Física, y tuviesen mejor cabida en una titulación de Máster. Esta problemática tendría fácil solución con la estructura de 3+2 adoptada en la mayoría de los países europeos, ya que permitiría trasladar dichas asignaturas a un máster y evitar los solapamientos en contenidos entre el Grado de Química y el Máster de Ciencia y Tecnología Químicas que se produce actualmente.

A este respecto, es interesante recordar que durante el proceso de elaboración de planes de máster, se valoró que no estaba garantizada la viabilidad de un Máster especializado en Química Física. Sin embargo, tras varios años de singladura el Máster generalista de Ciencia y Tecnología Química tampoco marcha olgadamente, y deja insatisfechas las aspiraciones de especialización de numerosos alumnos. En particular, los alumnos interesados por la investigación en Química Teórica, Mecánica Estadística o Simulación están paulatinamente optando por abandonar el Máster generalista de la Universidad Complutense y escogen titulaciones impartidas en otras universidades, y especialmente, en la Universidad Autónoma. Buena parte de estas dificultades, cabe achacarlas a la propia política de la Universidad Complutense, que escogió en su momento la decisión estratégica equivocada de renunciar a la participación en titulaciones interuniversitarias, lo que ha supuesto una grave merma en la posibilidad de ofrecer estudios especializados en diversas disciplinas. Aunque esta decisión se ha revocado recientemente, las universidades ya han tomado posiciones ventajosas, los programas de máster ya están elaborados y resulta complejo una década después adaptarse provechosamente en el competido mercado de titulaciones actual.

En cualquier caso, la práctica de la docencia de Química Física en el Grado de Química plantea considerables dificultades. El contenido formalmente es muy avanzado, pero desgraciadamente los conocimientos de los alumnos en matemáticas se muestran muy limitados. Esto tiene dos vertientes: los alumnos carecen de conocimientos suficientes en cálculo de varias variables, en ecuaciones diferenciales y en álgebra, y con frecuencia muestran dificultades con manipulaciones propias del bachillerato como la diferenciación, la integración inmediata o las operaciones

con funciones elementales. Por otro lado, carecen de una comprensión del potencial simbólico de las matemáticas como lenguaje para describir la naturaleza. Para la mayoría de los alumnos, las ecuaciones solo tienen sentido en tanto que fórmulas algorítmicas con las que calcular un número, y no como una expresión lógica con la que interpretar el comportamiento de los fenómenos en términos de sus variables. Este se traduce en una falta de interés acusada por la comprensión del formalismo y las deducciones.

Parte de estas dificultades están asociadas al programa del Grado en Química por su falta de profundidad en conocimientos básicos de matemáticas, pero otra parte está asociada a una formación deficiente durante el bachillerato y una gran laxitud en los requisitos de admisión a los estudios universitarios.

Estos problemas causan dificultades especialmente entre los alumnos poco interesados pero son también patentes en la minoría de alumnos que muestra interés por los fundamentos de la Química Física. Por esta causa, las calificaciones en las asignaturas de Química Física son muy mediocres, y rara vez superan el 7,5/10. Como muestra sirva la experiencia personal de este profesor, que ponía regularmente una o dos Matrículas de Honor por curso en la antigua Licenciatura en Química, y apenas he puesto alguna en la última década en la que ha impartido ininterrumpidamente un cuatrimestre de la asignatura de Química Física II. Atendiendo al Servicio de Calidad de la Universidad, esta disminución en la calificación es un reflejo de la pérdida de calidad docente y la disminución de las prestaciones del profesor. Desgraciadamente el diagnóstico correcto está fuera del alcance del baremo incremental y superficial de los Servicios de Calidad de la universidad.

Posiblemente el único contenido en Química Física del que adolece gravemente el Grado en Química es la formación en Termodinámica Clásica, cuyos fundamentos se trasladaron en el plan de estudios al curso de Química General. Esto supone un problema importante en la práctica docente de la asignatura de Química Física II, en la que se reservan unas pocas lecciones para plantear el formalismo de la termodinámica y pasar a continuación al estudio del equilibrio material y de fases en disoluciones donde se precisa articular el formalismo con una solvencia que no ha sido posible adquirir en tan poco tiempo. Por supuesto, a estas dificultades contribuye la falta de habilidades en el cálculo de varias variables impartido en la asignatura de matemáticas de primer curso de Grado.

En cualquier caso, en relación a los antiguos estudios de Licenciatura, el programa de Grado plantea ciertos problemas adicionales, ya que la docencia de los cuatro primeros cursos se traslada a los tres primeros, sobrecargando los contenidos. En particular, la química cuántica se traslada a segundo, donde se incluyen además computación cuántica y teoría de grupos. Los conceptos de fotoquímica y de cinética electroquímica se trasladan a tercero, y se imparte la termodinámica de disoluciones sin un bagaje previo suficiente de termodinámica. Todo ello, con una reducción importante de los contenidos de matemáticas y física, y con un nivel de bachillerato que con frecuencia no alcanza los objetivos deseables. El plan de estudios actual por tanto adelanta prácticamente todos los contenidos de química física en relación a las antiguas licenciaturas, lo que ocurre simultáneamente con la reducción de contenidos en matemáticas y una disminución en la madurez de los alumnos. Esto ha resultado en una merma considerable del aprovechamiento de los cursos. La universidad necesita replantear su estrategia y elevar las condiciones de admisión a la carrera. La alternativa es adaptar los contenidos a los requisitos de admisión vigentes. Por el contrario, resignarse a la presente situación conlleva una gran merma en el rendimiento del proceso educativo.

Otro aspecto importante que influye en la sobrecarga de contenidos descansa en la asignación del trabajo presencial y no presencial de los créditos ECTS. En el Grado en Química, cada crédito de teoría se corresponde a una carga lectiva de 25 horas de trabajo, de las cuales 10 son presenciales y 15 no presenciales. Esta distribución es razonable para asignaturas de naturaleza descriptiva. Sin embargo, en las asignaturas de Química Física, con un alto contenido conceptual, una gran abstracción y un elaborado formalismo, esta asignación es discutible. El dominio de las técnicas de la química física exige un proceso de reflexión arduo y mucho tiempo de práctica, por lo que posiblemente sería más adecuada una distribución de dos horas de trabajo personal por cada hora de docencia presencial. De hecho, la distribución de una hora y media personal por cada hora presencial es poco congruente con el objetivo metodológico de aprendizaje activo de los alumnos, que naturalmente solo es posible llevar a cabo con disponibilidad de tiempo personal de reflexión, trabajo y estudio en detrimento del número de horas en aula.

De esta discusión, se traduce que actualmente **la docencia de Química Física sufre de un grave problema de origen estructural**, que coyunturalmente

se puede maquillar con la disminución del nivel de exigencia en los exámenes o el aumento de los porcentajes de aprobado con el beneplácito de la ANECA y los servicios universitarios de calidad, pero que en el fondo **supone una grave merma en los conocimientos de los graduados y por lo tanto, inevitablemente, de su competencia profesional.**

Con la esperanza de errar, es posible desgraciadamente que este diagnóstico sea más general y se extienda en buena medida a otros ámbitos de la formación en ciencias.

Vistas las distintas dificultades docentes que se plantean en la docencia de la Química Física en el Grado en Química, proponemos las siguientes posibles modificaciones, encaminadas a reducir la sobrecarga de contenidos y alinear las exigencias académicas con las posibilidades reales de los estudiantes.

- Química Física I:
  - Trasladar los conceptos avanzados de cálculo de estructura electrónica a la asignatura optativa de Modelización Molecular.
  - Química Física I: Trasladar los conceptos de Teoría de Grupos y Simetría a la asignatura de Espectroscopía Molecular.
- Química Física II:
  - Recuperar contenidos de Termodinámica Clásica para hacer más gradual la introducción de los conceptos de la Termodinámica de Sistemas Multicomponentes.
  - Reducir algunos de los contenidos más avanzados y trasladarlos a asignaturas de cuarto curso. En cualquier caso, sería muy deseable realizar al menos dos de los siguientes posibles cambios:
    - Trasladar los contenidos de Fotoquímica a la asignatura de Espectroscopía Molecular.
    - Trasladar los contenidos de caracterización de polímeros a la asignatura de Química Física Aplicada.
    - Trasladar la Termodinámica de Superficies al curso de Química Física Aplicada.

- Trasladar la Electroquímica al curso de Química Física Aplicada.
- Trasladar los contenidos de transporte a la asignatura de Química Física Aplicada.
- Trasladar los contenidos de Cinética Química en Disolución a la asignatura de Química Física Aplicada.
- Trasladar alternativamente algunos de estos contenidos a programas de Máster.

Una alternativa a estas propuestas de modificación sería hacer los recortes de contenidos, no por la vía de la reducción de número de temas tratados, sino por la vía de la reducción de las herramientas metodológicas, y en particular, mediante la reducción del aparato formal de la química física.

En esta lógica, se podrían abarcar integralmente los temas cubiertos en los descriptores mediante una descripción cualitativa de los contenidos y una presentación sin demostración de las ecuaciones operativas más importantes.

Aunque esta estrategia permitiría abarcar todos los temas, deja sin duda a los alumnos sin las competencias asociadas al uso de los procedimientos formales, incluidas las virtudes docentes de una demostración, o la articulación elaborada del formalismo con el fin de deducir resultados específicos; en definitiva, la generación de conocimiento a partir de los fundamentos y leyes de la química física.

Siendo realistas, esta estrategia podría ser beneficiosa para los alumnos de grado que no aspiran a especializarse en la química física, que son la mayoría, pero limita por completo las aspiraciones de los alumnos interesados en entender los fundamentos de la química, que es en definitiva la esencia de la química física.

El problema tendría solución una vez más bajo una estructura de 3+2, en la que un grado de tres cursos sirviese para transmitir conocimientos básicos de química física sin aparato formal, a lo que se pudiese continuar con un grado de química física en el que adquirir los fundamentos metodológicos y formales de la química física.

Por el contrario, en el presente contexto de 4+1, con másteres de carácter generalista, adoptar esta estrategia equivaldría esencialmente a la desaparición de la química física como un área signficiativa de las Facultades de Química.

## 6. Propuesta de un Programa de Química Física II

### 6.1. Descripción de la asignatura

Como se mencionó anteriormente, dentro del Módulo Fundamental del Grado en Química, los contenidos "fundamentales" de la química física se imparten en dos asignaturas. La primera, Química Física I, corresponde al estudio de moléculas individuales, llamémosla Química Física Microscópica, y trata de la Química Cuántica y la Espectroscopía. La segunda, Química Física II, trata de propiedades de las sustancias, concebidas como colectivos de moléculas individuales, llamémosla, Química Física Macroscópica.

En esta memoria, se propone un programa para la denominada asignatura de Química Física II, donde se imparten los fundamentos de la Química Física Macroscópica anteriormente referida.

Las principales características de la asignatura vigente se pueden encontrar en la Guía Docente, que incluye contenidos pormenorizados, así como la distribución de los doce créditos asignados. De estos, 84 se corresponden a clases presenciales en el aula, divididas formalmente entre clases teóricas, tutorías y seminarios; y otras 42 horas presenciales de prácticas de laboratorio,

De acuerdo al documento *Verifica*, esta asignatura de modo genérico debe incluir los siguientes descriptores:

Termodinámica química y termodinámica estadística; Teoría cinética y cinética química; Fenómenos superficiales; Electroquímica; Polímeros y coloides.

De entre estos descriptores, podemos distinguir por un lado, aquellos referidos a las herramientas metodológicas esenciales de la Química Física, como son la Termodinámica, la Termodinámica Estadística y la Teoría cinética; por otro lado, aquellos referidos a sistemas Químico Físicos de principal interés, como son las superficies, los polímeros o los coloides (a los que podríamos añadir en principio por su interés también los líquidos y los sólidos, además de los cristales líquidos).

Todos estos son por supuesto conocimientos deseables para el químico físico. Desgraciadamente, en el plan vigente del grado en química, la química física, que se encarga del estudio de sistemas importantes, pero también de todos los

fundamentos de la química, tiene asignados exactamente los mismos créditos que las demás disciplinas clásicas como la inorgánica, la orgánica o la analítica. Por este motivo, se dispone de tan solo una asignatura anual para la impartición de todos los descriptores mencionados, lo que en la práctica docente se demuestra un tiempo insuficiente.

El problema se profundiza si revisamos de nuevo los descriptores específicos a la asignatura de Química Física II, que son:

Complementos de Termodinámica. Termodinámica estadística. Fuerzas intermoleculares. Gases reales y fases condensadas. Teoría cinética y fenómenos de transporte. Cinética química. Mecanismos de reacción. Aproximaciones moleculares. Catálisis homogénea. Superficies e interfases. Tensión superficial. Sistemas multicomponentes. Fisisorción y quimisorción. Cinética electroquímica. Catálisis heterogénea. Polímeros y coloides. Síntesis y caracterización. Materiales poliméricos.

La relación, por supuesto, especifica en más detalle los descriptores del módulo fundamental, pero vemos además que a los ya de por sí amplios contenidos le añade algunos otros no incluidos, como los fenómenos de transporte, la cinética electroquímica, o un epígrafe específico adicional sobre materiales poliméricos.

Estos objetivos son tan ambiciosos, que en realidad algunos de ellos se omiten por completo (Materiales Poliméricos), y otros se imparten testimonialmente (Coloides). A pesar de ello, el programa detallado amplía estos descriptores para incluir temas específicos de fotoquímica y cinética química en disolución.

La sobrecarga de contenidos resulta en un gran número de problemas docentes, entre los cuales destacamos:

- Resulta difícil realizar clases introductorias de los distintos temas en los que discutir su importancia o contexto histórico, que son aspectos importantes para dar una finalidad al estudio y motivar a los alumnos.
- Resulta difícil reservar espacios de reflexión o trabajar competencias transversales (trabajo en grupo, discusión, crítica) durante las clases.
- Hay muy poco margen para atender dudas sobre la asignatura en clase.

La falta de un margen adecuado para tratar estos problemas hace de la docencia de esta asignatura una carrera sin pausa donde se encadenan los contenidos sin tiempo suficiente para contextualizarlos y con grandes dificultades de los alumnos para asimilarlos.

Solo parecen posibles dos alternativas para mejorar esta situación:

- Modificar la estructura del grado, aumentando los créditos asignados a estos contenidos.
- Mantener la estructura del grado y renunciar a algunos de los contenidos asignados a la asignatura.

Desde la perspectiva de un químico físico, es seguramente la primera la alternativa más deseable. En la práctica, solo la segunda parece viable a corto plazo.

En esta memoria se propone un plan para la asignatura congruente con la segunda alternativa.

Reconocida la conveniencia de reducir los contenidos, queda por supuesto la desagradable tarea de escoger cuales sacrificar. A este respecto, viene a cuento la naturaleza de los descriptores antes discutidos, que se pueden clasificar de modo natural entre aquellos referidos a herramientas fundamentales de la química física y aquellos otros referidos a sistemas específicos. En este sentido, tendremos en cuenta que la asignatura de Química Física II está incluida en el módulo fundamental, y que por tanto, deben primar los conceptos más fundamentales que los más avanzados. Dicho esto, hay un gran margen para la elección de los contenidos a reducir que depende mayormente de los intereses particulares de cada docente o departamento. La elección de uno u otro contenido no debería ser particularmente importante en este sentido, ya que en cuarto curso disponemos de la asignatura de Química Física Aplicada, cuya naturaleza es precisamente incluir aquellos complementos avanzados de la química física que no se hayan podido impartir en el módulo fundamental. Realizando por tanto un esfuerzo coordinado de planificación de ambas asignaturas, se podría dar cuenta de todos los contenidos importantes y además limitar cierto solapamiento de contenidos que se constata en el plan vigente.

A estas consideraciones, le debemos añadir también un problema común y de difícil solución, que es la fragmentación de los contenidos de química física en

varias asignaturas, de las cuales hay varios ejemplos como la electroquímica, la fotoquímica o la catálisis que se imparten en al menos dos asignaturas distintas. Esto permite conferir quizá una perspectiva amplia de las distintas áreas de la química física, pero a veces es a costa del solapamiento o la pérdida del contexto. Por ese, pensamos que es deseable en la medida de lo posible escoger temas con suficiente entidad como para que se pueda apreciar tanto su contexto como su finalidad y potencial de aplicación.

En este sentido, un problema muy importante del actual Grado en Química, con especial repercusión en la asignatura de Química Física II que nos ocupa es la división de los contenidos de Termodinámica en dos asignaturas. De hecho, los fundamentos de la termodinámica se imparten en la asignatura de Química General, de primer curso, mientras que la aplicación de la termodinámica al estudio de las mezclas y disoluciones se retoma, sin el contexto adecuado, en la asignatura de Química Física II. Al margen de la renuncia del departamento a asumir como propia el área de Termodinámica Fundamental, esta situación conduce a un cortocircuito docente considerable.

En efecto, los alumnos han visto en Química General una introducción a la termodinámica sin el uso de las herramientas del cálculo diferencial de varias variables. Sin embargo, se retoma el contenido de la termodinámica en *tercer curso*, es decir, dos cursos después, asumiendo que el alumno tiene asimilado el manejo de dicho cálculo. Lo cierto es que entre medias ha pasado el segundo curso sin que los alumnos hayan aplicado los conocimientos de termodinámica, ni hayan visto ningún curso adicional de matemáticas. En definitiva, los alumnos no están al comienzo de la asignatura en disposición de asimilar los contenidos que les esperan. Esto ocurre en mayor o menor medida en cualquier asignatura, pero en la asignatura de Química Física en particular ocurre prácticamente desde el primer día de clase, lo que merma el aprovechamiento y produce una gran desafección y abandono.

Vistas las distintas problemáticas que plantea el programa de la asignatura, a continuación proponemos una modificación posibilista, encaminada a reducir algunos de los problemas de la asignatura de una manera viable y teniendo en cuenta las grandes dificultades que presentan los cambios estructurales del plan de Grado en Química. La propuesta por tanto, solo necesita de una reasignación de aquellos

descriptores asociados a la Química Física, sin cambios en el número de créditos o asignaturas. En cualquier caso, no nos es posible proponer modificaciones relevantes si no es mediante un cambio, aunque sea pequeño del documento *Verifica* vigente en la actualidad, lo que deja las modificaciones al criterio de la ANECA a cuyo patrón nos encomendamos.

A la hora de elaborar el plan propuesto y reducir sus contenidos hemos tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se priorizan las herramientas fundamentales de la química física sobre los sistemas específicos.
- Se priorizan los temas de suficiente extensión sobre los contenidos fragmentados.
- Se eliminan en prioridad contenidos no incluidos expresamente en los descriptores del documento *verifica*.

Atendiendo a estos criterios, y a la discusión anterior, proponemos a continuación un temario de la asignatura que implica una mínima modificación del vigente documento *Verifíca* y que obedece a los siguientes descriptores generales:

Termodinámica. Termodinámica estadística. Fuerzas intermoleculares. Gases reales y fases condensadas. Teoría cinética y fenómenos de transporte. Cinética química. Mecanismos de reacción. Aproximaciones moleculares. Catálisis homogénea. Superficies e interfases. Tensión superficial. Sistemas multicomponentes. Fisorción y quimisorción. Cinética electroquímica. Catálisis heterogénea. Polímeros y coloides.

En relación al plan en vigor, las únicas modificaciones consisten en transformar el descriptor “Complementos de Termodinámica” por el de “Termodinámica”, y suprimir los últimos dos descriptores de “Síntesis y caracterización” y “Materiales poliméricos”.

En relación a la primera modificación, el cambio del descriptor “Complementos de Termodinámica” a “Termodinámica” obedece a la propuesta de exponer los fundamentos metodológicos de la termodinámica antes de entrar en sus aplicaciones al estudio de las disoluciones y los sistemas multicomponentes.

Por el contrario, las dos últimas modificaciones en los descriptores son más cosméticas que reales. En primer lugar, porque el programa propuesto contiene tanto el estudio de las disoluciones de polímeros como su síntesis. En segundo lugar, porque el descriptor de “Materiales Poliméricos” que consta formalmente en el plan vigente no se trata en el curso más que testimonialmente. En este sentido, el único cambio significativo es que se elimina el tema de caracterización de polímeros, que no obstante se puede abordar parcialmente como un resultado de la teoría de disoluciones poliméricas de Flory-Huggins.

Al igual que en el plan vigente, mantenemos el descriptor de “coloides” si bien su presencia es mínima. En el plan vigente, se incluye dentro de una práctica sobre agregación micelar. En el presente programa, proponemos abundar sobre el concepto de los coloides en los temas de Sistemas Interaccionantes (Tema 13) y el de Termodinámica de la Interfase Fluida (Tema 24).

Adicionalmente, y sin necesidad de cambios en los descriptores de la asignatura, se elimina el tema de fotoquímica y el tema de cinética química en disolución.

Esta modificación no pretende en absoluto restarle interés a estos temas en relación a otros, sino que es una decisión tomada con el ánimo de hacer hueco a los contenidos adicionales de termodinámica, así como para desahogar ligeramente el apretado temario. La fotoquímica puede encontrar fácil ubicación en la asignatura de Espectroscopía molecular, e incluso, dentro del tema de espectroscopía ultravioleta-visible de la asignatura fundamental de Química Física I. El tema de cinética química en disolución, que contiene el efecto cinético salino y las reacciones controladas por difusión, podrían encontrar acomodo en la asignatura de Química Física aplicada. No obstante, el efecto cinético salino es una aplicación combinada de los temas de teoría del complejo activado y de coeficientes de actividad de electrolitos que se puede plantear como un ejercicio avanzado, mientras que el tema de las reacciones químicas controladas por difusión pensamos que es una aplicación especializada que no corresponde a un módulo de química física fundamental.

## 6.2. Programa Docente

### I. Termodinámica Clásica (23 h)

#### Tema 1: El primer principio (2 h).

Definición de calor y capacidad calorífica; Definición de trabajo y trabajo hidrostático. Primer principio.

#### Tema 2: El segundo principio (2 h).

Espontaneidad e irreversibilidad. Definición de entropía y su cálculo. Segundo principio.

#### Tema 3: Condiciones de equilibrio (5 h).

Repaso de cálculo de varias variables. Diferencial total, derivadas parciales y teorema de Schwartz. Ecuación fundamental de la termodinámica. Potenciales de Entalpía, Helmholtz y Gibbs. Ecuaciones de Gibbs y Relaciones de Maxwell.

#### Tema 4: Equilibrio material (2 h).

Condición de equilibrio material. Potencial químico. Serie del virial y potencial químico de gases. Sistemas incompresibles y potencial químico de líquidos y sólidos. Definición de actividad. Equilibrio químico homogéneo y heterogéneo.

#### Tema 5: Equilibrio de fases (3 h).

Condiciones de equilibrio de fases. Regla de las fases. Ecuación de Clapeyron. Aplicación al equilibrio entre un gas y una fase incompresible. Aplicación al equilibrio entre dos fases incompresibles.

#### Tema 6: Propiedades de las Mezclas (2 h).

Mezclas de gases ideales. Propiedades molares parciales. Propiedades de Mezclado.

#### Tema 7: Disoluciones modelo (3 h).

Mezclas de líquidos. Equilibrio de fases en disoluciones binarias. Disoluciones ideales y ley de Raoult. Disoluciones ideales y ley de Henry.

**Tema 8: Disoluciones reales (2 h).**

Coefficiente de actividad. Referencia Raoult y criterio simétrico. Referencia Henry y criterio asimétrico. Propiedades de exceso.

**Tema 9: Disoluciones de electrolitos (2 h).**

Teoría de Debye-Hückel. Aplicación al equilibrio químico.

**II. Termodinámica Estadística (19 h)****Tema 10: La distribución de Boltzmann (3 h).**

Distribuciones de energía. El postulado de Boltzmann y el colectivo canónico. Función de partición y valores medios de la energía.

**Tema 11: Sistemas no interaccionantes (4 h).**

Función de partición molecular. Partículas indiscernibles. Funciones de partición en gases monoatómicos y diatómicos.

**Tema 12: Mezclas de sistemas no interaccionantes (3 h).**

Función de partición multicomponente. Entropía de mezcla y equilibrio químico.

**Tema 13: Sistemas interaccionantes (6 h).**

Fuerzas intermoleculares y potenciales empíricos. Coeficientes del virial. Límites de baja y alta temperatura. Agregación molecular y coloidal. Ecuación de van der Waals. Diagrama de fases.

**Tema 14: Disoluciones de polímeros (3 h).**

Modelos de red. Teoría de Flory Huggins. Coeficiente del virial osmótico.

**III. Teoría Cinética, Cinética Química y Transporte (25 h)****Tema 15. Teoría Cinética de los Gases (4 h).**

Distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann. Colisiones con una pared y ecuación del gas ideal. Frecuencia de colisiones.

**Tema 16. Teorías de la constante cinética (4 h).**

Teoría de Arrhenius y energía de activación. Teoría de colisiones. Teoría del Complejo Activado. Formulación termodinámica de la teoría del complejo activado.

**Tema 17. Cinética Química Formal (2 h).**

Velocidad de reacción. Ley diferencial de velocidad. Cinéticas de orden 0, 1, 2 y  $n$ . Leyes integradas.

**Tema 18. Reacciones complejas (3 h).**

Reacciones reversibles. Reacciones paralelas, control cinético y control termodinámico. Reacciones consecutivas.

**Tema 19. Mecanismos de reacción (3 h).**

Mecanismos de reacción. Aproximaciones de etapa limitante y estado estacionario. Reacciones unimoleculares. Reacciones termoleculares. Reacciones en cadena. Principio de balance detallado.

**Tema 20. Síntesis de Polímeros (3 h).**

Peso molecular de polímeros y polidispersidad. Cinética de polimerización. Polimerización por etapas. Polimerización por adición.

**Tema 21. Catálisis Homogénea (2 h).**

Introducción a la catálisis. Mecanismo general de catálisis. Teoría de Michaelis-Menten. Catálisis ácido-base. Reacciones autocatalíticas.

**Tema 22. Transporte (2 h).**

Caracterización de los sistemas fuera de equilibrio. Coeficientes de transporte y leyes constitutivas. Movimiento Browniano, desplazamiento cuadrático medio y ecuación de Stokes-Einstein.

**Tema 23. Transporte de electrolitos (2 h).**

Conducción de electrolitos. Teorías microscópicas de la conductividad. Movilidades iónicas y ley límite de Ostwald.

#### IV. Superficies e interfases (17 h)

**Tema 24. Termodinámica de la interfase fluida (3 h).**

Interfases. Tensión superficial. Ecuación de Laplace. Ecuación de Kelvin. Ecuación de adsorción de Gibbs. Isoterma de Langmuir. Agregación y dispersiones coloidales.

**Tema 25. Fenómenos capilares (3 h).**

Trabajo de cohesión y adhesión. Ángulos de contacto. Ecuación de Young-Laplace. Ascenso capilar.

**Tema 26. La interfase sólida (4 h).**

Superficies sólidas. Tipos de adsorción. Modelos de recubrimiento. Modelo de Langmuir. Modelo BET. Calores de adsorción.

**Tema 27: Catálisis Heterogénea (2 h).**

Modelo de Langmuir disociativo. Mecanismos de Langmuir-Hinselwood y Eley Rideal.

**Tema 28: Electroquímica (5 h).**

Electroquímica electródica. Estructura de la doble capa. Electroquímica cinética.

Como hemos dicho, este programa no pretende en modo alguno ser irremplazable o de mayor valor que otras permutaciones de los contenidos potencialmente interesantes, sino una combinación de temas de suficiente interés general y moderadamente congruentes con la asignación de créditos y las capacidades de los alumnos. Los cambios realizados además constituyen un programa posibilista y alineado con la tradición docente de los última década en el grado pero realizado con la intención de mejorar algunas de las dificultades observadas en la actual asignatura de Química Física II.

En el apartado 5 se discuten algunas otras alternativas para reducir los contenidos de la asignatura. Como ejemplo, es posible eliminar los Temas 22 y 23 sobre transporte y conducción de electrolitos para incluir un tema explícito sobre coloides. En efecto, una vez estudiada la estructura de la doble capa en el Tema

28, además de las interacciones de van der Waals en el tema 13, hay suficientes elementos para introducir los coloides y describir por ejemplo el potencial DLVO. En este caso, sería posible mover los Temas 14 y 20 junto con los coloides en un nuevo epígrafe de Polímeros y Coloides.

### 6.3. Prácticas de Laboratorio

La asignatura de Química Física II cuenta con una interesante colección de ocho prácticas que totalizan 42 horas presenciales repartidas en sesiones de tres horas y media en el laboratorio:

- Propiedades Molares Parciales (dos sesiones).
- Gases reales (dos sesiones).
- Conductimetría.
- Cinética de reacción por espectrofotometría.
- Catálisis Homogénea.
- Tension superficial de disoluciones (dos sesiones).
- Caracterización de disoluciones poliméricas por viscosimetría (dos sesiones).
- Determinación de Concentraciones Micelares Críticas.

Aunque por causas organizativas las prácticas se reparten en dos sesiones intensivas, una por cada cuatrimestre, sería de gran valor didáctico repartir la realización de las prácticas a lo largo del curso, para que los contenidos tratados estén lo mejor sincronizados posibles con las clases de teoría. Esta sincronización facilita la comprensión de la práctica, por un lado, y sirve de refuerzo motivador para la comprensión de la teoría, por el otro. Por supuesto, este formato requiere de más medios y mayor esfuerzo logístico, pero tiene suficientes ventajas docentes como para hacer quizá una valoración prospectiva de su viabilidad. Por supuesto, de ser el caso, debería hacerse en coordinación con la asignatura de Química Física I, y dar cuenta de otras tareas docentes que ocupan el laboratorio, como las prácticas de la asignatura de Termodinámica y Cinética Química, del Grado en Ingeniería

Química. Así mismo sería necesario coordinar el esfuerzo con el resto de las asignaturas de tercer curso, por lo que implicaría un cambio a nivel de coordinadores de curso.

A pesar de su considerable valor didáctico, las prácticas de la asignatura no son aprovechadas por los alumnos en todo su potencial. En particular, se constata que con frecuencia los alumnos no han entendido el objetivo de las prácticas, ni conocen su procedimiento antes de empezar. Una vez tomadas las medidas, ocurre en ocasiones que tampoco están en disposición de proceder a su análisis. En ocasiones, se ha tratado de resolver este problema con un breve cuestionario a realizar antes del comienzo de la práctica, que si bien surte cierto efecto, no resuelve los problemas de fondo y ocasiona con frecuencia importantes retrasos.

En este sentido, proponemos aquí una forma de organizar las prácticas de laboratorio que nuevamente presenta sin duda problemas logísticos, pero que con medios suficientes podría resolverse con efecto positivo. Como ventaja, se garantizaría un mayor aprovechamiento de la sesión práctica, y una mayor comprensión de los métodos instrumentales utilizados, así como un aumento de la madurez de los alumnos. El proceso además se acerca mucho más a lo que supone un experimento de investigación.

Con el fin de alcanzar este objetivo, podríamos dividir la práctica en varias sesiones parcialmente tutorizadas:

Sesión 1: Seminario. En una primera sesión en aula, se imparte un seminario detallado de la teoría, de los principios instrumentales en los que se basa la medida y de la descripción del experimento a realizar.

Sesión 2: Examen. En la siguiente sesión, que tendría lugar algunos días después del seminario, se realiza un examen breve de los contenidos teóricos y los procedimientos experimentales, para garantizar que los alumnos los conocen antes de comenzar la sesión experimental. En el mejor de los casos, el laboratorio podría estar disponible para que los alumnos lo visitaran y se familiarizaran con los instrumentos.

Sesión 2bis: Informe. Junto con el examen, los alumnos deberían entregar la primera parte integral del informe del laboratorio, que incluiría los objetivos, la introducción, el procedimiento experimental y una relación de las medidas

experimentales a tomar durante la sesión práctica, además de la forma de analizarlos.

Sesión 3: Práctica experimental. Los alumnos que superasen la sesión 2, tendrían autorización para realizar la práctica experimental y la toma de medidas, que sería idealmente un proceso con poca supervisión. Finalizada la sesión, podrían realizar el análisis con los datos medidos y realizar el informe final como parte de los créditos de trabajo personal.

Desde luego que este esquema organizativo es muy exigente y de complicada logística, pero a cambio maximiza el aprovechamiento de la sesión experimental, fomenta la responsabilidad y la autonomía del alumno y en definitiva, promueve una mayor madurez que la que se constata habitualmente en las sesiones de prácticas, en las que un gran número de alumnos operan por imitación sin tener claro el propósito de su trabajo.

Entre otras cosas, vemos que solo es viable si fuese posible distribuir las prácticas a lo largo de todo el curso, que ya de por sí entraña ciertas complicaciones y mejora de los medios disponibles. Suponiendo que esto último fuese viable, no obstante, se podría llevar a cabo el método docente propuesto con la ayuda de herramientas telemáticas. Por ejemplo, el seminario práctico podría consistir en un video docente, que los alumnos pudiesen consultar durante un periodo de tiempo tantas veces como desearan. La evaluación en la sesión de examen se podría realizar mediante una prueba de respuestas breves también telemáticamente, mientras que la revisión del informe de laboratorio podría llevarse a cabo someramente antes de iniciar la sesión tutorizada de la práctica.

Atendiendo al gran valor docente de realizar las prácticas de este modo, se podría simplificar la logística reduciendo el número de prácticas a realizar, o alternativamente, exigiendo la realización de un mínimo de seis prácticas sobre las ocho disponibles para aprobar la asignatura.

Por supuesto, de plantear esta organización de un curso para otro nos encontraríamos con un importante atasco de alumnos sin autorización para comenzar la sesión práctica, y como resultado, un gran número de suspensos. No obstante, imponiendo esta dinámica durante varios cursos, los alumnos asimilarían los verdaderos requisitos necesarios para aprovechar el laboratorio, y se elevarían los

niveles de calidad docente del grado.

El nivel máximo de calidad se alcanza solo realmente cuando los alumnos que ingresan en una titulación tienen aceptado de antemano los altos requisitos académicos necesarios para superarla y entienden que es precisamente eso lo que da valor a sus estudios.

## 7. Metodología docente

La enseñanza es un proceso de transmisión y recepción del conocimiento. Como cualquier proceso de comunicación, tiene dos elementos esenciales, que son la transmisión, de la que se encarga el docente, y la recepción, que incide en el estudiante.

Al margen de técnicas y detalles específicos, por lo tanto, la reflexión del método docente debe partir de este presupuesto, teniendo en cuenta que la transmisión del conocimiento no puede resultar efectiva si no se cumplen dos requisitos *simultáneamente*:

- El docente debe poseer la voluntad de enseñar. A lo que debemos añadir otros requisitos: los conocimientos adecuados, el afán y la capacidad para transmitirlos y la sensibilidad para percibir si la transmisión es efectiva.
- El estudiante debe tener la voluntad de aprender. Esto implica los conocimientos previos suficientes y el decidido esfuerzo necesario para adquirir los nuevos.

Desde hace más de una década, la universidad se encuentra involucrada en un proceso de reflexión sobre los distintos métodos y técnicas de aprendizaje. Se fomentan los congresos docentes, los cursos de formación y la investigación de nuevas técnicas docentes, lo que sin duda podría redundar en una mejora del proceso de enseñanza. No obstante, es preciso señalar que de acuerdo al análisis anterior, el proceso de una de las dos partes es irrelevante realmente si no se alinea simultáneamente con la otra.

En este sentido, una parte de la reflexión sobre el proceso de enseñanza se centra recientemente en cómo conseguir que los alumnos alcancen la motivación necesaria para aprender unos conocimientos con elevada carga conceptual. La necesidad de

este análisis parte de la constatación de una significativa falta de interés de un número elevado de alumnos y suscita una reflexión profunda sobre el papel de la universidad y dos formas distintas de afrontar el problema:

- Desde una lógica social, el papel de la universidad es formar titulados, y por ello es necesario hacer todos los esfuerzos posibles para garantizar que los alumnos matriculados alcancen el interés suficiente, por cualquier medio, incluidas técnicas docentes más o menos lúdicas para motivarlos.
- Desde una lógica académica, los estudios universitarios no constituyen una enseñanza obligatoria, y el papel del docente es formar a los alumnos con capacidad e interés suficiente.

La lógica social prolonga los procesos de la enseñanza primaria—de carácter indispensable y obligatorio—hasta la edad madura en plena universidad. La lógica académica fomenta la promoción de la madurez y la responsabilidad como proceso ineludible para la adquisición de conocimientos avanzados.

La cuestión importante es si la universidad se puede inhibir de la creciente falta de vocación de los alumnos, prolongando el ciclo de formación de enseñanzas obligatorias, o si, por el contrario, este problema social debe resolverse incidiendo en la formación previa de los alumnos y la oferta de las titulaciones.

Sea como sea, consideramos que en efecto, el proceso de aprendizaje debe ser activo, y no puede resultar de la mera escucha del profesor. Esto quiere decir que es preciso, además de los procesos de reflexión del docente, fomentar también en los alumnos un proceso de reflexión sobre sus motivaciones y sus intereses, teniendo en cuenta que como requisito ineludible necesitamos la decidida intención del alumno de aprender, que es una clase de actitud muy distinta al deseo abstracto de aprobar.

El deseo de aprobar en su forma más consciente conlleva unos pocos hábitos rutinarios, como asistir a clase, frecuentar la biblioteca, ojear los apuntes de clase, y presentarse a alguna tutoría ocasionalmente. Todo ello son un conjunto de rutinas que en su vertiente habitual de baja intensidad sirven con frecuencia como técnica inconsciente de autoengaño y pretexto de omisión del verdadero esfuerzo. En este caso se trata de un proceso en espiral asociado a una falta de autoestima que impide iniciar el proceso de esfuerzo necesario y en su forma más aguda conlleva un largo periodo de maduración con elevadas dosis de tiempo y dinero mal aprovechados.

La decisión de aprobar es una cosa muy distinta a lo anteriormente descrito, y en su variante mejor entendida entraña la decisión de aprender los conceptos que son requisito para aprobar. En definitiva, entre la decisión de aprobar y la de aprender solo se distinguiría el interés del alumno por la asignatura. El alumno vocacional decide aprender como meta, y el alumno responsable decide aprender como medio. Las rutinas asociadas pueden ser exactamente las mismas que las llevadas a cabo por el alumno con deseo de aprobar, pero practicadas no como pretexto autocomplaciente, sino como decisión firme de aprender y por tanto, decisión firme de realizar el esfuerzo intelectual intenso que conlleva.

Esta reflexión sobre el papel de los alumnos en el proceso de aprendizaje parece importante, puesto que el énfasis creciente en la implementación de metodologías encaminadas a fomentar la participación activa no es posible si no se involucran en el proceso los propios alumnos.

Bajo esta condición, la enseñanza se basa en la alternancia en proporciones adecuadas de sesiones presenciales y trabajo personal del alumno. Las sesiones presenciales pueden constar de clases magistrales, pero en la idea de la participación activa, deberían contar con una proporción significativa de aulas de seminario. Las sesiones no presenciales son indispensables para que el alumno asimile a su propio ritmo los contenidos de la asignatura y ejercite los requisitos básicos para poder seguir con aprovechamiento las sesiones presenciales. En este sentido, la asignación de una hora y media de trabajo personal por cada hora de sesión presencial es insuficiente, al menos para las asignaturas de Química Física. En cualquier caso, el fomento de las actividades de seminario, trabajo en grupo, presentación por los alumnos de temas o ejercicios resueltos son técnicas interesantes que requieren de una adecuada proporción entre créditos disponibles y contenidos a impartir. En los actuales planes de estudio, la elevada carga de contenidos ha hecho en la práctica inviable un diseño de las clases basado en la participación. El énfasis de los organismos de calidad en la planificación detallada del curso también es un problema, ya que no es posible realizar actividades participativas sin un margen considerable de flexibilidad. La forma de mejorar esta situación sin cambios significativos del programa exigiría que el alumno se involucrase decididamente en su formación, mediante la lectura previa de los temas en fuentes bibliográficas o material docente. Con este grado de compromiso, se podría alcanzar una

organización óptima mediante el siguiente proceso:

1. Clase magistral dedicada a contextualizar el tema de estudio.
2. Encargo de lectura docente a los alumnos con contenidos concretos.
3. Aula de seminario para repasar contenidos y problemas.
4. Aula de tutoría dirigida para discutir contenidos avanzados.

En este algoritmo, sin duda el cuello de botella se encuentra en el segundo punto, que precisa como requisito para aprovechar las sesiones de seminario y tutoría que los alumnos hayan podido involucrarse en la lectura de contenidos y seguir el ritmo de aprendizaje. En cualquier caso, vemos que si de modo habitual se consumen dos sesiones de puesta en práctica de los conocimientos (seminario y tutoría) por cada sesión magistral, los contenidos de las asignaturas tienen que estar diseñados para incorporar este proceso de aprendizaje activo.

En ausencia de tiempo o compromiso de los alumnos, el algoritmo anterior se lleva a cabo en la práctica sustituyendo las aulas de seminario y tutoría por clases mixtas de exposición y resolución de problemas por parte del profesor, lo que nos retrotrae a un modelo clásico de docencia con poca intervención de los alumnos. En la práctica habitual, se constata que la necesidad de exponer el elevado número de contenidos ni siquiera deja espacio para realizar introducciones históricas, contextualizar la importancia de los temas en la sociedad, o discutir las aplicaciones; y tan solo un limitado espacio de tiempo para atender preguntas.

La reflexión en este sentido es que la retórica sobre la participación del alumnado no puede realizarse de modo independiente a la preparación de un temario proporcionado y el fomento de una cultura del esfuerzo y la corresponsabilidad entre los alumnos.

Una alternativa interesante a la organización temporal tradicional, en la que las asignaturas se distribuyen durante un cuatrimestre entero, simultaneando varias otras, sería la de concentrar unas pocas asignaturas intensivamente durante un periodo más corto. Este procedimiento puede ser especialmente interesante para las asignaturas de química física por dos motivos:

- La asimilación de un formalismo abstracto y complicado exige un esfuerzo

sostenido e intenso que se dificulta si el proceso debe simultanearse con varias asignaturas.

- El régimen intensivo permitiría sesiones docentes prolongadas, digamos, de dos horas. De esta forma se podría implementar el moderno proceso de enseñanza que consiste en desmenuzar las largas exposiciones tradicionales en pequeños fragmentos de 10 o 15 minutos, a los que les sigue un proceso de ejercitación y reflexión de otros tantos minutos por parte del alumno. En presencia del profesor, estas mini sesiones de reflexión estarían además tutorizadas.

Con esta idea, la rutina de trabajo se podría transformar de la siguiente manera:

1. Clase magistral dedicada a contextualizar el tema de estudio.
2. Sesión doble tutorizada de exposición breve + ejercicios de los métodos y procedimientos.
3. Aula de tutoría dirigida para discutir contenidos avanzados.

Como alternativa, observar que la sesión doble tutorizada presencial se podría transformar en una sesión no presencial, elaborada con videos cortos de 10 o 15 minutos, acabados con propuestas para la realización de ejercicios breves. Lo cierto es que, con la evolución de la sociedad actual y el gran énfasis de la juventud en el mundo audiovisual, no parece descartable que en un futuro cercano los alumnos puedan más fácilmente prestarle atención a un video que al profesor en el aula, por muy desconcertante que nos pueda parecer. Son elementos que hay que tener en mente de cara al futuro, pero que en cualquiera de los casos, exigirán la atención y compromiso del alumno en aprender.

En relación a la conveniencia de dividir las sesiones metodológicas en pequeños fragmentos y la realización a continuación de ejercicios breves cabe destacar que en la tradición del Departamento de Química Física ha habido una dificultad en distinguir el concepto de *Ejercicios*, del de *Problemas*. La docencia del departamento en efecto ha ido dirigida tradicionalmente a la solución de problemas, con frecuencia largos y complejos, pero se ha omitido la necesidad de plantear Ejercicios, entendidos como enunciados breves en los que se trabaja un solo concepto elemental y que son indispensables para la asimilación gradual de los contenidos.

Los actuales medios telemáticos facilitan enormemente la posibilidad de realizar ejercicios de respuesta múltiple por vía del campus virtual, lo que permitiría a los alumnos poner en práctica los conceptos de la asignatura individualmente y a su propio ritmo. Esta posibilidad, de gran potencial docente, está desgraciadamente infrautilizada. Entre otras cosas, se podrían poner sesiones obligatorias de ejercicios de respuesta múltiple que incidiesen en los conceptos más básicos y más elementales. Con una batería suficiente de preguntas, se podrían dejar abiertos los cuestionarios durante todo un cuatrimestre, y poner como requisito la superación de los mismos para realizar el examen, basado en problemas.

En todos estos procedimientos docentes propuestos, es el papel activo del alumno lo que es el elemento más indispensable para la adquisición de conocimientos. El papel del profesorado debe ser imponer un listón académico de forma decidida y sistemática, que sostenida en el tiempo genere una tradición de trabajo y esfuerzo, **hasta alcanzar el umbral de la excelencia, cuando el éxito de la universidad no descansa sobre la calidad de sus docentes, sino sobre las aspiraciones de sus alumnos.**

## 8. Bibliografía seleccionada

A continuación presentamos una relación bibliográfica de referencias seleccionadas. Esta compilación no pretende ser en modo alguna exhaustiva, sino sencillamente llamar la atención sobre distintos libros dignos de destacar, bien por su popularidad entre los alumnos, bien por su buena u original presentación de aspectos concretos de la Química Física.

A la selección de libros de consulta de Química Física, debemos señalar la profusión de textos digitales de gran calidad disponibles en la red, lo que constituye una fuente de recursos inagotables que no pretendemos abarcar. Basta aquí mencionar que hay gran cantidad de entradas en la Wikipedia que son de excelente calidad, y que el sitio Libre Texts proporciona también compilaciones o versiones de libros en edición digital de libre acceso.

- Atkins P. y de Paula, J.,(2006). *Physical Chemistry*, Oxford University Press, Oxford (8ª edición.)

Como en el caso del *Levine*, cuando hablamos de este libro tenemos que extender la mención a toda una industria dedicada a la docencia de la Química Física (y en el caso de Peter Atkins, a la química en general), con revisiones continuas de los libros y desarrollo de materiales didácticos en la red. Con la inclusión de Julio de Paula al tradicional texto de Atkins (primera edición de 1978), han aumentado las menciones al mundo de la biología, pero el libro sigue reuniendo las características que lo han hecho una referencia en la docencia de la química física. Uno de sus grandes aciertos es la inclusión de viñetas con detalles que pueden ser de gran interés, como ciertas demostraciones, digresiones sobre la interpretación molecular de distintas observaciones macroscópicas, recomendaciones sobre notación y unidades o resúmenes con las ideas claves. Sin embargo, quizá la más interesante y relevante, incluso para el profesor, es la de situar las distintas ideas explicadas en su contexto social, con aclaraciones muy útiles sobre su trascendencia en campos como la bioquímica, la nanotecnología, la ciencia de los materiales, etc. Estructurado en tres grandes bloques de equilibrio, estructura molecular y aspectos cinéticos, el contenido se plantea con el mínimo aparato matemático necesario

para explicar la química física con rigor. En el caso de la mecánica cuántica, por ejemplo, se evita la resolución de la ecuación de onda incluso para el caso de la partícula libre, optándose por presentar las soluciones directamente y demostrar que obedecen la ecuación de Schrödinger. Desgraciadamente, la minimización de dificultades matemáticas tiene claro está sus inconvenientes, lo que resulta en el capítulo de mecánica cuántica en un tratamiento algo superficial (por ejemplo, apenas se describe el concepto de onda ni se motiva la ecuación de Schrödinger). Por este motivo, el libro de Atkins y de Paula puede ser el libro de texto ideal para aquellos planes de estudio que opten por presentar un primer curso obligatorio de química física con la intención de evitar los tropiezos de tantos alumnos con mayor interés en los aspectos cualitativos de la química, al que habría que complementar con cursos opcionales de mayor profundidad para una especialización en química física. Esta filosofía, la de que la docencia de la química física de primer ciclo debe orientarse en nuestros días hacia la explicación de las ideas claves sin entrar en los detalles, es decir, entendida como un servicio hacia las disciplinas más aplicadas, como la orgánica, inorgánica y sobre todo, bioquímica, está ganando muchos adeptos, y desde luego queda claro en sus libros que Peter Atkins la comparte. La edición de 1998 contiene un libro de problemas resueltos (P.W. Atkins, *Student's solutions manual*, Oxford University Press, Oxford).

- Bertrán Rusca, J. y Nuñez Delgado, J. (coords.), (2002), Química Física. Ariel, Barcelona (dos volúmenes).

Este libro es un ambicioso proyecto encaminado a recopilar básicamente todo el contenido de la Química Física de una licenciatura, incluidas asignaturas generalmente optativas como los Polímeros. Coordinado por Bertrán Rusca y Nuñez Delgado, reúne contribuciones de un gran número de expertos nacionales en cada tema. La extensión de los temas cubiertos es generalmente muy amplia, y corresponde a la de un libro extenso de química física junto con otros de temas más especializados, cubiertos con mucho menos detalle en otros libros. El inconveniente de contar con tal número de autores es la profundidad del tratamiento, que es bastante inhomogénea. En algunos

temas se incorporan temas relativamente modernos de investigación (transición vítrea, estados metastables) mientras que en otros casos el tratamiento es bastante básico (termodinámica estadística). El número de problemas es reducido y la edición es muy pobre, entre otras cosas por la falta de un índice por volúmenes y apartados, y por la mala calidad del papel utilizado.

- Castellán, G. W. (1987) *Fisicoquímica*, Addison–Wesley Iberoamericana, Wilmington (2ª edición en español).

El libro de Castellán presenta con claridad y rigor un amplio abanico de temas, cubriendo al menos toda la Química Física que se aborda durante el primer ciclo de una licenciatura de química. Esto incluye aspectos interesantes que quedan fuera de otros libros, como son los temas de electroquímica, propiedades de transporte o polímeros. Aunque su presentación es tradicional y dista de parecerse a las ediciones más modernas de otros libros, incluye apéndices útiles con aspectos importantes de matemática y física que suele ser necesario repasar, así como un apéndice con detalles sobre el sistema internacional de unidades. Sirvase para ilustrar la calidad de la presentación sin detrimento alguno en la concisión el tema de simetría molecular, superior a otros libros básicos de consulta.

- Berry, R. S., Rice, S. A y Ross, J. (2002), *Physical Chemistry*, Oxford University Press, Nueva York (2ª Edición).

Este extenso tratado de Química Física escrito por ilustres químicos físicos en activo de las universidades de Chicago y Stanford es una de las obras más completas y profundas disponibles y una delicia para el lector con tiempo. Al igual que en la primera edición, la estructura está basada en tres grandes bloques de Cuántica, Termodinámica y Cinética (en sentido amplio). En su segunda edición encontramos excelentes revisiones actualizadas en diversos campos, que lo convierten no ya en un libro de consulta básica, sino en una referencia útil para cualquier investigador. En el ámbito en el que tiene experiencia este cronista, podemos encontrar excelentes introducciones al cálculo funcional, teoría termodinámica de funcionales de la densidad, o fenómenos críticos, que difícilmente pueden encontrarse en obras de estas característi-

cas. Igualmente incorpora avances destacados en el campo de la simulación molecular y la teoría de líquidos de las últimas décadas, incluyendo aspectos muy avanzados sobre interfases electrificadas y estructura del agua en disoluciones de electrolitos. Por si fuera poco, se han añadido artículos monográficos de expertos de primera línea en sus campos, incluidos los premios Nobel A. Zewail (femtoquímica) y R. Marcus (reacciones de transferencia de electrones) y otros tales como D. Truhlar, editor del Journal of the American Chemical Society (teoría del estado de transición), H. Schaefer (superficies de energía potencial) o Chidsey (electrocinética), no obstante todos ellos claramente sesgados hacia el área de la cinética química. En comparación con otros muchos libros, destaca por la profundización en las ideas y la calidad de las exposiciones, generalmente muy elaboradas. Precisamente este aspecto y otros como la elevada dificultad que presenta en ocasiones, lo hace inadecuado para un estudiante, que buscará seguramente una mayor economía de conceptos en su preparación. Por el contrario, supone siempre una excelente forma de profundizar en los temas básicos. Hay que señalar en cualquier caso que su fama de duro es solo parcialmente cierta, ya que comienza de un modo relativamente accesible en su primera parte (química cuántica), para hacerse progresivamente más difícil. El último gran apartado sobre cinética es claramente demasiado exigente para un curso introductorio de química física, pero puede ser de gran utilidad en un segundo curso sobre la materia. Otro aspecto muy interesante de este libro es la inclusión de un apéndice sobre búsquedas bibliográficas con consejos prácticos para no perderse en esta ingrata tarea cotidiana del investigador.

- Diaz Peña, M. y Roig Muntaner, A., *Química Física*, Alhambra Universidad, Madrid (Vol I y II).

Este libro tiene el indudable valor de ser una de las primeras obras de consulta de química física escrita por autores españoles. Cubre con profundidad una extensa cantidad de material que sirve como base para impartir la química física de todo un primer ciclo, e incluso más. La exposición es generalmente bastante clara y elaborada, e incluye un tratamiento formal y matemático equilibrado. No obstante, se echa en falta material docente adicional, como

apéndices matemáticos, y especialmente una lista de problemas al final de cada capítulo.

- Eisenberg, D. y Crothers, D. (1979) *Physical Chemistry with applications to the Life Sciences*, Benjamin/Cummings, Menlo Park.

La filosofía de este libro es dotar a estudiantes con carreras claramente dirigidas hacia la biología los conceptos básicos de química física necesarios para su aplicación en ese ámbito, eludiendo en la medida de lo posible los detalles matemáticos. En este sentido, presenta una exposición muy didáctica y clara, que siempre se orienta en dirección a la resolución de problemas con motivación biológica, y no tanto a la justificación detallada de los fundamentos. Para el alumno de ciencias químicas el tratamiento es bastante menos riguroso de lo que es habitual, y no resulta tan útil como libro de consulta básico, pero sí puede ser valioso para poner en práctica los conocimientos adquiridos a problemas de interés biológico.

- H. Kuhn y H.D. Försterling (2000) *Principles of Physical Chemistry*, Wiley, Chichester.

Este libro presenta un curso completo de química física, articulado con una organización de temas bastante original, muy lógica y con un sesgo hacia la biofísica. Además, tiene como gran acierto una presentación sencilla y accesible pero no exenta de rigor. Otro acierto es la presentación recurrente de estimaciones y cálculos aproximados usando modelos simplificados. Entre otros, por ejemplo, las dimensiones del átomo de hidrógeno se calculan para abrir boca usando el modelo de partícula en la caja sujeto a una aproximación variacional. El libro comprende un bloque de mecánica cuántica y espectroscopía, con una selección de temas convencional que acaba acertadamente con un capítulo sobre las fuerzas intermoleculares. Esto abre las puertas a un bloque termodinámico, que comienza con la teoría cinética de los gases y sigue con un bloque en el que se articulan simultáneamente la termodinámica estadística y la termodinámica clásica. Como material original además se abunda con detalle en reacciones de transferencia de protones, transferencia de electrones y bioenergética. El libro finaliza con un bloque de

principios de química supramolecular, en la que se incluyen las organizaciones complejas de los polímeros, las micelas o los coloides, y finaliza con un capítulo muy interesante sobre nanomotores.

- Levine, I. N. (2004) *Fisicoquímica*, McGraw–Hill, Madrid (5ª edición, volúmenes I y II).

Este libro es una obra clásica de referencia en la química física desde sus primeras ediciones y el libro más empleado por este autor durante sus tiempos de estudiante. La presentación se realiza con rigor y claridad, haciendo un uso equilibrado de las matemáticas y proponiendo argumentos intuitivos con frecuencia. La notación es muy coherente a lo largo de todo el libro, aunque esto lleva en ocasiones a un exceso de superíndices y subíndices que dificulta la lectura del estudiante. Esto es especialmente aparente en algunos temas de termodinámica. En la última edición se ha llevado a cabo una revisión significativa y se ha añadido nuevo material. La ampliación lleva a cabo una clara modernización en cuanto al contenido didáctico, que ahora incluye aplicaciones con hojas de cálculo, algoritmos en texto y referencias a páginas de internet. Por otro lado, el contenido se amplía sobre todo en el apartado de cuántica, que incluye referencias a los numerosos avances en el campo computacional, así como también diversas aplicaciones al ámbito de la biología. Por lo demás en libro mantiene los aciertos de ediciones anteriores, como la clarificación del grado de aproximación junto a cada ecuación, los asteriscos sobre las ecuaciones más importantes y un acertado resumen al final de cada capítulo. Otra importante consideración es la actualización de las traducciones, mucho más frecuente que en otros libros. Existe un libro de problemas resueltos a parte (Levine, I. N. (2005) *Problemas de Fisicoquímica*, colección Schaum, McGraw–Hill, Madrid).

- McQuarrie, D. A. y Simon, J. D. (1997), *Physical Chemistry, A Molecular Approach*, University Science Books, Sausalito.

Este libro, escrito con posterioridad a la mayoría de los libros clásicos de química física se ha hecho un hueco en un campo con reputados libros mejorados en sucesivas ediciones durante varios lustros. A aquellos que estén

familiarizados con el excelente libro de termodinámica estadística de Donald McQuarrie, de gran reputación entre los investigadores del área, este hecho seguramente no sorprende, ya que abunda y mejora en los aciertos didácticos. La presentación y diseño es un compromiso entre los austeros libros de texto de antaño y otros recientes donde la presentación gráfica poco menos que exuberante es a veces un impedimento para fijar la concentración en el texto. La realidad es que en este sentido se queda con todo lo mejor de ambas clases. Una exposición sobria, que incorpora no obstante útiles apartados fuera de texto para mostrar ejemplos de resolución de problemas, viñetas bibliográficas con inclusión de relevantes científicos contemporáneos, así como claros y acertados apéndices matemáticos oportunamente emplazados. Sin embargo, seguramente el acierto más original y significativo del libro está en el título de las distintas secciones, escrito como concisa conclusión de su propio contenido. La lectura detenida del índice sirve perfectamente como conclusión más relevante de cada capítulo, al margen de todo detalle matemático. Por este motivo, puede resultar un excelente libro de consulta para aquellos estudiantes menos entusiastas con las matemáticas, sin por ello renunciar en absoluto al rigor de las presentaciones en el propio texto. Acompañado además de una amplísima relación de problemas (es conocido que algunos de los problemas de su ‘Statistical Mechanics’ ha dado para varios artículos en revistas especializadas), la única pero significativa pega es la elección del contenido, en el que llama la atención la ausencia de la electroquímica, la termodinámica de disoluciones, las propiedades de transporte o los coloides y macromoléculas. Bien es cierto que esta omisión no es accidental, sino que responde a una selección del contenido, ideado para un curso de un año. Aunque algunas de las decisiones de los autores puedan estar justificadas, es posible que con la importancia creciente de las pilas de combustible no se haya acertado ignorando la electroquímica. Incluye libro de solución de problemas (Cox, H. (1997) *Physical Chemistry—Problems and Solutions*, University Science Books, Sausalito).

- Moore W. J. (1974), *Physical Chemistry*, Longman, Londres (5ª edición).

Este es un libro clásico en la docencia de la química física. Trata práctica-

mente todos los contenidos obligatorios de la química física, Termodinámica, Estadística, Cinética, Electroquímica, Cuántica, Enlace, Simetría, Sólidos, Fuerzas Intermoleculares e incluso macromoléculas, menos habitual en otros libros. El autor busca siempre el rigor y la profundidad en el tratamiento, documenta buena parte del contenido con referencias e incluye una buena colección de problemas. Existe traducción al español de 1978, *Química Física*, editorial Urmo, Bilbao.

- Snieder R. (2004), *A Guided Tour of Mathematical Methods for the Physical Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge.

Cuando uno lee este libro le queda la impresión de que podría haber comprendido todas las matemáticas de la licenciatura sin necesidad de profesores, divirtiéndose, aprendiendo física y deduciendo todos los resultados personalmente. Cada capítulo presenta una breve introducción sobre el tema matemático en el contexto de un problema concreto de física, y guía al lector paso a paso mediante ejercicios hasta la solución completa. El contenido en física no es un estorbo sino todo lo contrario, permite comprender y concretar el significado real de las operaciones matemáticas realizadas. Un curso de la licenciatura de Químicas basado en este libro cubriría prácticamente todos los contenidos de matemáticas y físicas que se necesitan en una licenciatura de Química con mayor provecho que los cursos formales de matemática pura.