

24-25

MÁSTER UNIVERSITARIO EN FÍSICA
AVANZADA

GUÍA DE ESTUDIO PÚBLICA



CRECIMIENTO FUERA DEL EQUILIBRIO

CÓDIGO 21580094

UNED

24-25

CRECIMIENTO FUERA DEL EQUILIBRIO

CÓDIGO 21580094

ÍNDICE

PRESENTACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN
REQUISITOS Y/O RECOMENDACIONES PARA CURSAR ESTA ASIGNATURA
EQUIPO DOCENTE
HORARIO DE ATENCIÓN AL ESTUDIANTE
COMPETENCIAS QUE ADQUIERE EL ESTUDIANTE
RESULTADOS DE APRENDIZAJE
CONTENIDOS
METODOLOGÍA
SISTEMA DE EVALUACIÓN
BIBLIOGRAFÍA BÁSICA
BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA
RECURSOS DE APOYO Y WEBGRAFÍA
IGUALDAD DE GÉNERO

Nombre de la asignatura	CRECIMIENTO FUERA DEL EQUILIBRIO
Código	21580094
Curso académico	2024/2025
Título en que se imparte	MÁSTER UNIVERSITARIO EN FÍSICA AVANZADA
Tipo	CONTENIDOS
Nº ETCS	6
Horas	150
Periodo	SEMESTRE 2
Idiomas en que se imparte	CASTELLANO

PRESENTACIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN

Bienvenidos a la asignatura *Crecimiento fuera del equilibrio*.

Se trata de una asignatura de carácter optativo que se imparte en el segundo cuatrimestre, y consta de 6 créditos ECTS.

La asignatura pertenece a la especialidad denominada *Física Computacional*, especialidad en la que se desarrollan habilidades y destrezas propias de aquellas ramas de la física que se fundamentan en el soporte de las tecnologías de la información y en la simulación de procesos físicos mediante computadores para avanzar en el conocimiento.

¿Por qué esta asignatura?

En general se utiliza el término *crecimiento* para hacer referencia a una amplia variedad de procesos en los que una superficie evoluciona dinámicamente ("crece") con el tiempo. Una primera clasificación nos lleva a distinguir entre procesos de crecimiento/desintegración de fase, y procesos de propagación de interfases.

En el primer caso tenemos todos aquellos procesos en los que una fase, por ejemplo un material sólido, crece o se desintegra debido al incremento o pérdida de sus constituyentes. Ejemplos de procesos de crecimiento son el crecimiento de películas delgadas de cristales por deposición de vapor (*vapor deposition*, VD), como la epitaxia molecular (*molecular beam epitaxy*, MBE) o la deposición mediante bombardeo con iones (*ion beam sputter deposition*). También tenemos la formación de nanoestructuras mediante procesos de nucleación y los diferentes mecanismos relacionados (*submonolayer deposition*, DDA, CCA, etc.), el crecimiento de películas finas de metal, aleaciones o capas de óxidos por electrodeposición, la agregación limitada por la difusión (*diffusion limited aggregation*, DLA) y el crecimiento de colonias de bacterias. En el caso de procesos de desintegración de fase podemos citar la erosión (también por *sputtering*), el *etching*, la disolución metálica y la corrosión, entre muchos otros. Podemos encontrar aplicaciones de todos estos procesos en nanotecnología, nanofluídica, en la manufacturación de dispositivos semiconductores, en la protección de materiales y en recubrimientos ópticos.

Por otro lado, tenemos procesos en los que una determinada fase se propaga a través de un medio generando una interfase que evoluciona en el tiempo. Como ejemplos podemos citar el flujo de fluidos a través de medios porosos, el flujo de campos en medios desordenados (por ejemplo el del campo magnético en semiconductores con impurezas), el flujo de electricidad en medios aleatorios (por ejemplo en redes aleatorias de resistores o fusibles), la propagación de fracturas o grietas, la propagación de un frente de llama o de

incendios en bosques, la propagación de epidemias en poblaciones, la difusión de noticias en redes sociales o de comunicación, y la propagación de nuevas ideas o de la tecnología en la sociedad, entre muchos otros.

Resulta bastante evidente que todos estos procesos tienen importantes aplicaciones tecnológicas, industriales y sociales, por lo que son estudiados en diversas áreas de las matemáticas, la física, la química/electroquímica, la biología, la ecología matemática, la ciencia de los materiales, etc.

Los mecanismos que participan en la evolución de estas interfases están sujetos a fluctuaciones aleatorias de diferente naturaleza, lo que los convierte en procesos estocásticos. Como consecuencia de las fluctuaciones, las superficies adoptan geometrías irregulares descritas mediante la geometría fractal. Hablaremos de crecimiento lejos del equilibrio cuando la evolución del sistema no posibilita que la superficie se reestructure en busca del estado de mínima energía. Como veremos, también se puede obtener cierta rugosidad en condiciones de (o muy próximas al) equilibrio. En general, un sistema complejo evoluciona lejos del equilibrio cuando su comportamiento está dominado por las fluctuaciones.

El efecto de las fluctuaciones puede ser modelizado mediante diferentes tipos de ruido (blanco o de color, correlacionado o no-correlacionado, conservado o no-conservado, etc). Podemos distinguir dos tipos principales de ruido. Por un lado tenemos el ruido que depende del tiempo, el ruido temporal, con una naturaleza digamos térmica, y que está mucho más relacionado con los procesos de crecimiento/desintegración. Por otro lado tenemos el ruido "congelado" (*quenched noise*), relacionado con la naturaleza desordenada del medio y que está impreso en el mismo, siendo determinante en la dinámica de la propagación de las interfases. Para entender bien los medios desordenados es fundamental conocer la teoría de la percolación.

Objetivo y estructura de la asignatura

El objetivo principal de esta asignatura es proporcionar al estudiante una amplia visión de estos procesos, centrándonos fundamentalmente en su descripción, análisis y modelización.

El curso está dividido en dos partes, representando cada una el siguiente porcentaje aproximado de la asignatura:

Parte 1. Crecimiento de superficies (70%)

Parte 2. Percolación (30%)

La primera parte presenta una completa revisión de la teoría y fenomenología de los procesos de crecimiento. En ella se estudiarán los principales mecanismos físicos (aunque también los hay de naturaleza química, biológica, social, etc.) que participan en la evolución de las interfases. Se presentarán los conceptos de la mecánica estadística necesarios para describir su estructura y evolución, y las herramientas matemáticas para su modelización: rugosidad cinética, teoría del escalado dinámico, exponentes de escala, simetrías, clases de universalidad, ecuaciones de Langevin, grupo de renormalización, tipos de ruido, modelos discretos, efectos de tamaño finito, etc.

En la segunda parte se estudiará la teoría de la percolación, necesaria para entender los medios desordenados y el efecto del ruido congelado en la propagación de las interfases. La

percolación es, además, un modelo paradigmático en matemáticas y en física. En las matemáticas porque su estudio ha contribuido notablemente al desarrollo de la teoría moderna de la probabilidad. En cuanto a la física, desde el punto de vista teórico la percolación es un modelo paradigmático en mecánica estadística y en física de la materia condensada, por tratarse del modelo más simple de sistema crítico con transición de fase.

REQUISITOS Y/O RECOMENDACIONES PARA CURSAR ESTA ASIGNATURA

Para poder cursar con garantías esta asignatura es:

Recomendable

- Tener conocimientos básicos en mecánica estadística y física del estado sólido.
- Tener conocimientos básicos sobre la teoría de sistemas dinámicos.
- Tener conocimientos básicos en ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales, así como de los métodos analíticos y numéricos para resolverlas. Por ello es muy recomendable haber cursado previamente la asignatura *Métodos Numéricos Avanzados* (obligatoria en el Máster).

Obligatorio:

- Tener conocimientos avanzados sobre procesos estocásticos, teoría de fluctuaciones y ecuaciones diferenciales estocásticas. Si no se tienen es obligatorio haber cursado previamente la asignatura *Complementos de Métodos Matemáticos* (obligatoria en el Máster) .
- Tener conocimientos en programación. Parte del trabajo que el estudiante deberá realizar en la asignatura consistirá en la programación de algoritmos que simulen computacionalmente un modelo, o que resuelvan numéricamente una ecuación. Por lo tanto, es imprescindible que el estudiante domine o esté familiarizado con alguna de estas opciones:
 1. Lenguajes de programación de alto nivel como C, fortran o Python.
 2. Programas de cálculo numérico como Matlab u Octave.
 3. Programas de cálculo simbólico como Maple, Mathematica o Maxima.
- Tener conocimientos de inglés y particularmente habilidades en comprensión lectora, ya que la bibliografía básica y la mayoría de las lecturas recomendadas están editadas en este idioma.

EQUIPO DOCENTE

Nombre y Apellidos
Correo Electrónico
Teléfono
Facultad
Departamento

PEDRO CORDOBA TORRES (Coordinador de asignatura)
pcordoba@ccia.uned.es
91398-7141
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICA MATEMÁTICA Y DE FLUIDOS

Nombre y Apellidos
Correo Electrónico
Teléfono
Facultad

JAVIER RODRIGUEZ LAGUNA
jrlaguna@fisfun.uned.es
91398-7602
FACULTAD DE CIENCIAS

HORARIO DE ATENCIÓN AL ESTUDIANTE

El Equipo Docente ofrecerá una completa tutorización de la asignatura a través de su **Curso Virtual** en la plataforma aLF de la UNED. Este curso virtual será la principal plataforma de comunicación entre el Equipo Docente y el estudiante.

En el curso virtual se encuentran las herramientas de comunicación necesarias, en forma de **foros de debate**, para que el estudiante plantee al Equipo Docente cualquier duda relacionada con la asignatura. Por lo tanto, se recomienda utilizar estos foros para cualquier tipo de consulta. Estos foros son revisados continuamente por el Equipo Docente y permiten una comunicación rápida y directa entre profesores y estudiantes.

Además de esta vía de comunicación ordinaria, los estudiantes podrán contactar con los miembros del Equipo Docente a través de las direcciones de email y los teléfonos indicados en el apartado *Equipo docente* de esta guía.

Horarios de tutoría y datos de contacto

Para cualquier consulta personal o telefónica los profesores del equipo docente estarán disponibles en los días y horas que se indican a continuación, excepto en vacaciones académicas. En caso de que el día correspondiente sea festivo, la tutoría se desplazará al siguiente día lectivo.

Profesor: Pedro Córdoba Torres pcordova@dfmf.uned.es

Tel.: 91 398 71 41.

Lunes de 16 a 20 h.

Profesor: Javier Rodríguez Laguna jrlaguna@fisfun.uned.es

Tel.: 91 398 71 43.

Miércoles de 16 a 20 h.

COMPETENCIAS QUE ADQUIERE EL ESTUDIANTE

COMPETENCIAS

CM1 Poseer la capacidad para el desarrollo de una aptitud crítica ante el aprendizaje que le lleve a plantearse nuevos problemas desde perspectivas no convencionales.

CM2 Adquirir los conocimientos necesarios en Física Avanzada para incorporarse a un grupo de investigación o a empresas.

CM3 Adquirir la capacidad para abordar y resolver un problema avanzado en la física teórica, computacional o de fluidos, mediante la elección adecuada del contexto teórico, la identificación de los conceptos relevantes y el uso de las técnicas matemáticas que constituyen la mejor aproximación para así llegar a la solución.

CM4 Analizar una situación compleja extrayendo cuales son las cantidades físicas relevantes y ser capaz de reducirla a un modelo parametrizado.

CM5 Analizar problemas nuevos en sistemas poco conocidos y determinar similitudes y diferencias con modelos de referencia.

CM6 Analizar críticamente resultados experimentales, analíticos y numéricos en el campo de

la física avanzada.

RESULTADOS DE APRENDIZAJE

CONOCIMIENTOS O CONTENIDOS

CN1 Comprender conceptos avanzados de Física y demostrar, en un contexto de investigación científica altamente especializada, una relación detallada y fundamentada entre los aspectos teóricos y prácticos y la metodología empleada en este campo.

CN2 Conocer y comprender los elementos más relevantes de la física teórica, computacional y de fluidos actual. Profundizar en la comprensión de las teorías que se encuentran en la frontera de estos temas, incluyendo su estructura matemática, su confrontación con resultados experimentales, y la descripción de los fenómenos físicos que dichas teorías explican.

CN3 Conocer los sistemas operativos y lenguajes de programación y herramientas de computación relevantes en el campo de la física avanzada.

CN4 Comprender las propiedades cualitativas de las soluciones a las ecuaciones de la física (sus tipos, estabilidad, singularidades, etc.) y su dependencia de los parámetros que definen un sistema físico.

HABILIDADES O DESTREZAS

H3 Utilizar bibliografía y fuentes de información especializada, propias del ámbito de conocimiento de la física, manejando las principales bases de datos de recursos científicos.

H4 Saber trabajar en equipo y comunicarse con la comunidad académica en su conjunto y con la sociedad en general acerca de la Física Avanzada, tanto en sus implicaciones académicas, productivas o sociales.

H5 Modelizar sistemas de alto grado de complejidad. Identificar variables y parámetros relevantes y realizar aproximaciones que simplifiquen el problema. Construir modelos físicos que describan y expliquen situaciones en ámbitos diversos.

H6 Ser capaz de comunicar oralmente un trabajo en el área de la Física Avanzada, sintetizando y evaluando los resultados de este, mediante juicio de pares en el contexto de simposios científicos y en las especialidades de física teórica, física computacional o física de fluidos.

H7 Resolver problemas algebraicos, de resolución de ecuaciones y de optimización mediante métodos numéricos.

H8 Modelar y simular fenómenos físicos complejos por ordenador.

COMPETENCIAS

CM1 Poseer la capacidad para el desarrollo de una aptitud crítica ante el aprendizaje que le lleve a plantearse nuevos problemas desde perspectivas no convencionales.

CM2 Adquirir los conocimientos necesarios en Física Avanzada para incorporarse a un grupo de investigación o a empresas.

CM3 Adquirir la capacidad para abordar y resolver un problema avanzado en la física teórica, computacional o de fluidos, mediante la elección adecuada del contexto teórico, la

identificación de los conceptos relevantes y el uso de las técnicas matemáticas que constituyen la mejor aproximación para así llegar a la solución.

CM4 Analizar una situación compleja extrayendo cuales son las cantidades físicas relevantes y ser capaz de reducirla a un modelo parametrizado.

CM5 Analizar problemas nuevos en sistemas poco conocidos y determinar similitudes y diferencias con modelos de referencia.

CM6 Analizar críticamente resultados experimentales, analíticos y numéricos en el campo de la física avanzada.

CONTENIDOS

PARTE 1. CRECIMIENTO DE SUPERFICIES

Tema 1. Interfases en la naturaleza

Tema 2. Conceptos de escala

Tema 3. Conceptos de la geometría fractal

Tema 4. Deposición aleatoria

Tema 5. Teoría lineal

Tema 6. La ecuación de Kardar-Parisi-Zhang

Tema 7. Aproximación mediante el grupo de renormalización

Tema 8. Modelos discretos de crecimiento

Tema 9. Interfases en medios aleatorios

Tema 10. Ruido congelado

Tema 11. Experimentos de interfases en medios aleatorios

Tema 12. Fenómenos básicos de la epitaxia por haces moleculares (MBE)

Tema 13. Teoría lineal de la MBE

Tema 14. Teoría no-lineal de la MBE

Tema 15. Modelos discretos para la MBE

Tema 16. Experimentos de MBE

Tema 17. Transición de la rugosidad

Tema 18. Modelos de crecimiento no-local

Tema 19. Fluctuaciones en el equilibrio y polímeros dirigidos

PARTE 2. PERCOLACIÓN

Tema 20. Teoría de la percolación

METODOLOGÍA

La metodología de la asignatura es la de la enseñanza a distancia propia de la UNED. Esta metodología se sustenta fundamentalmente en dos pilares:

1. Texto Básico. Los contenidos de la asignatura serán estudiados utilizando un material didáctico denominado texto básico (véase apartado *Bibliografía básica* para más detalle). En lo que respecta a la *Parte 1. Crecimiento de superficies*, hemos elegido un libro cuyo éxito es proporcionar una visión muy completa del problema del crecimiento, tanto desde el punto de vista teórico como experimental. Esta amplitud en contenidos provoca que muchos resultados teóricos sean presentados sin un desarrollo completo o sin demostración, del

mismo modo que tampoco se presentan los detalles de la mayor parte de los experimentos discutidos. Esto no debe desmotivar, ya que uno de los principales objetivos de esta asignatura es precisamente proporcionar una visión lo más amplia posible del problema del crecimiento. Será a través del trabajo desarrollado en las PECs cuando el estudiante entienda mejor los modelos y profundice en los aspectos más formales de la teoría. En cualquier caso, a lo largo de todo el libro se citan perfectamente las fuentes bibliográficas, de modo que el estudiante puede acudir a ellas en caso de querer profundizar más en algún concepto. Además, al final de cada capítulo se propone bibliografía relacionada con los contenidos del mismo.

Respecto a la *Parte 2. Percolación*, el texto recomendado (un pequeño curso sobre teoría de la percolación) es perfectamente auto-contenido y describe con bastante precisión los conceptos y teoría necesarios para entender el problema de la percolación, y en principio no es necesario más material. Si fuera necesario complementarlo, el Equipo Docente lo comunicará a través del curso virtual.

2. Curso Virtual. El Equipo Docente ofrecerá una completa tutorización de la asignatura a través de su curso virtual, cuyo objetivo es constituirse como aula virtual que permitirá a estudiantes y Equipo Docente realizar el seguimiento del aprendizaje y su evaluación continua. Además, a través del mismo se informará de los cambios, novedades, así como de cualquier otro aspecto relacionado con la asignatura que el Equipo Docente estime oportuno. Por otro lado, en este espacio virtual el estudiante tendrá acceso al material didáctico, a bibliotecas virtuales y foros, enviará los trabajos y se comunicará con los profesores. La modalidad virtual de aprendizaje es una forma de aprendizaje flexible que se adapta a la disponibilidad de cada estudiante, permitiendo compaginar estudios con trabajo o cualquier otra actividad.

Por tanto, el curso virtual de la asignatura será la principal plataforma didáctica y de comunicación entre el Equipo Docente y el estudiante. Es **imprescindible** que todos los alumnos matriculados utilicen esta plataforma virtual para el estudio de la asignatura.

SISTEMA DE EVALUACIÓN

TIPO DE PRUEBA PRESENCIAL

Tipo de examen No hay prueba presencial

CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA PRESENCIAL Y/O LOS TRABAJOS

Requiere Presencialidad No

Descripción

No hay ningún tipo de prueba presencial

Criterios de evaluación

Ponderación de la prueba presencial y/o los trabajos en la nota final

Fecha aproximada de entrega

Comentarios y observaciones

PRUEBAS DE EVALUACIÓN CONTINUA (PEC)

¿Hay PEC?

Si, PEC no presencial

Descripción

La asignatura requiere la realización obligatoria de 3 PECs. Las dos primeras estarán relacionadas con la parte del curso dedicada al estudio del crecimiento de superficies, y la tercera con percolación.

La primera PEC consistirá en una serie de problemas propuestos por el Equipo Docente sobre los que el estudiante deberá trabajar de modo individual utilizando los conocimientos adquiridos en la asignatura. En ella se evaluarán los contenidos de los Temas 1-8 del curso, y será planteada aproximadamente a finales del primer tercio del curso.

La segunda PEC será un trabajo que el estudiante deberá haber propuesto previamente al Equipo Docente para su visto bueno. El tema del trabajo deberá estar relacionado con los contenidos tratados en los Temas 9-19 del curso. Esta PEC será planteada aproximadamente a finales del segundo tercio del curso.

La tercera PEC consistirá en una serie de problemas propuestos por el Equipo Docente y evaluará los contenidos de la parte de percolación (Tema 20 del curso). Será planteada aproximadamente a finales del curso.

En los tres casos, el documento con la memoria del trabajo deberá ser subido al curso virtual. La presentación de los trabajos realizados deberá ajustarse al formato requerido por el Equipo Docente.

El calendario definitivo con las fechas de publicación de los enunciados de las PECs y las fechas límites de entrega será publicado en el curso virtual a comienzos del curso.

Criterios de evaluación

Cada PEC se evaluará sobre 10 puntos. Los criterios de evaluación serán publicados en el curso virtual. En el caso de la PEC2 (trabajo propuesto por el estudiante), se valorarán fundamentalmente 4 aspectos del trabajo: presentación, originalidad, dificultad y resultados.

1. Será necesario obtener una puntuación mínima de 5 puntos para superar cada PEC.

2. Para aprobar la asignatura es obligatorio aprobar cada PEC por separado.

3. La PEC1 y la PEC3 representan un 30% de la nota final, la PEC2 representa el 40% restante.

Ponderación de la PEC en la nota final

30% + 40% + 30% = 100%

Fecha aproximada de entrega

El calendario de realización de las PECs será anunciado en el curso virtual a comienzos del curso

Comentarios y observaciones

- Los enunciados de las PECs serán los mismos para la convocatoria extraordinaria de septiembre.

- **En caso de aprobar una PEC en la convocatoria ordinaria de junio, se guardará la nota para la convocatoria extraordinaria de septiembre.**

OTRAS ACTIVIDADES EVALUABLES

¿Hay otra/s actividad/es evaluable/s? No

Descripción

Criterios de evaluación

Ponderación en la nota final

Fecha aproximada de entrega

Comentarios y observaciones

¿CÓMO SE OBTIENE LA NOTA FINAL?

La calificación final se obtendrá de la siguiente media ponderada de las notas obtenidas en las tres PECs del curso:

$$\text{calificación final} = 0.3 \times \text{PEC1} + 0.4 \times \text{PEC2} + 0.3 \times \text{PEC3}$$

Esta media se aplicará sólo si se han aprobado las tres PECs (nota mayor o igual que 5 en cada una de ellas). En el caso de no aprobar una de ellas, no se habrá superado la asignatura.

Como se ha comentado anteriormente, la nota de aquella PEC superada en la convocatoria de junio se guardará para la convocatoria extraordinaria de septiembre.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

ISBN(13): 9780521483186

Título: FRACTAL CONCEPTS IN SURFACE GROWTH

Autor/es: Stanley, Harry Eugene

Editorial: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS..

Parte 1. Crecimiento de superficies

El texto básico para esta parte del curso es el libro:

Fractal Concepts in Surface Growth

de A.-L. Barabási y H.E. Stanley, Cambridge University Press (1995).

Se trata de un texto de referencia en el campo y cubre completamente esta parte del temario de la asignatura (véase apartado de *Metodología* para más información). Además, contiene otros capítulos de interés que no serán de estudio obligatorio aunque sí que se recomienda su lectura. En el apartado de *Bibliografía complementaria* se proponen otros libros relevantes con los que estudiante podrá complementar y ampliar los contenidos tratados en el curso.

Parte 2. Percolación

El texto básico para esta parte del curso es el documento:

Percolation Theory

elaborado por K. Christensen, del Imperial College London (2002).

Estos apuntes pueden ser descargados a través del siguiente enlace:

<https://web.mit.edu/ceder/publications/Percolation.pdf>

y de nuevo cubren completamente esta parte del temario de la asignatura (véase apartado de *Metodología* para más información). No obstante, en el apartado de bibliografía complementaria se proponen algunos textos de referencia en el campo, con los que estudiante podrá profundizar y ampliar los contenidos tratados en el curso.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

A continuación se proponen y comentan algunos libros con los que el estudiante podrá complementar y ampliar los conocimientos adquiridos con el estudio de la bibliografía básica.

Parte 1. Crecimiento de superficies

- *Fractals, scaling and growth far from equilibrium*, Paul Meakin, Cambridge University Press (1998).

Se trata de un libro escrito con el mismo espíritu que el texto básico propuesto para esta parte, y con el cual comparte un porcentaje muy alto de contenidos, aunque es bastante más extenso. Quizás la estructura no esté tan clara. Puede ser un muy buen libro de consulta en el caso de querer contrastar alguna teoría, modelo o proceso, que no ha quedado muy claro con la lectura del Barabási. Hay un capítulo muy interesante sobre formación de patrones en procesos que evolucionan en condiciones de no-equilibrio.

Parte 2. Percolación

- *Introduction to Percolation Theory* (2nd Edition), D. Stauffer and A. Aharony, CRC Press (1994).

Un texto de absoluta referencia para profundizar más en la teoría de la percolación. De hecho, el documento propuesto en este curso como texto básico para la parte de percolación, es una especie de resumen de los cuatro primeros capítulos de este libro. Además de estos capítulos, en el libro se presentan aplicaciones de la teoría de la percolación, como por ejemplo el estudio de la conductividad eléctrica en circuitos aleatorios. También se estudia en profundidad el transporte dentro de los clústeres, y se presentan otros modelos relacionados muy relevantes como la percolación por invasión.

Otros textos

A continuación se presentan dos textos muy interesantes, en los que se revisan diferentes tipos de procesos estocásticos de gran relevancia tanto desde el punto de vista fundamental como aplicado, que dan lugar a geometrías y patrones irregulares que pueden ser descritos mediante la geometría fractal. Cada capítulo ha sido escrito por uno o varios investigadores de reconocido prestigio en su campo.

- *Fractals and Disordered Systems* (2nd Edition), A. Bunde and S. Havlin (Eds.) Springer (1995).

Los capítulos 2 y 3 están dedicados a la percolación y complementan perfectamente la teoría estudiada en este curso. También hay varios capítulos en los que se estudia el crecimiento de superficies e interfases, de modo análogo (aunque más breve) a como se trata en el Barabási. Además, se estudian otros procesos muy interesantes como los frentes de difusión, el crecimiento y propagación de fracturas, y el transporte a través de interfases irregulares como electrodos, membranas y catalizadores.

- *Fractals in Science*, A. Bunde and S. Havlin (Eds.) Springer-Verlag (1994).

Se trata de un libro con una estructura muy similar al anterior, aunque se interesa más en la propia geometría estocástica que en los procesos que la generan. En él se ilustran diferentes ejemplos de fractales en biología y medicina, y se muestra cómo se utiliza la geometría fractal en el estudio de polímeros, criticalidad auto-organizada, caminantes aleatorios, modelos reactivos y procesos de la química heterogénea, entre otros. En este texto se puede encontrar una presentación más detallada de la teoría de la geometría fractal.

RECURSOS DE APOYO Y WEBGRAFÍA

El principal recurso de apoyo al estudio será el **Curso Virtual** de la asignatura. En él se podrá encontrar:

1. Todo el **material didáctico** que el Equipo Docente pone a disposición de los estudiantes para el estudio de la asignatura: guía de estudio, documentos, artículos de divulgación y científicos, enlaces de interés, etc.
2. Herramientas de comunicación en forma de **Foros de Debate**, para que el alumno pueda consultar al Equipo Docente las dudas que se le vayan planteando así como otras cuestiones relacionadas con el funcionamiento de la asignatura. Estos foros serán la **principal** herramienta de comunicación entre el Equipo Docente y el estudiante. Por consiguiente, se insta a que el estudiante siga de un modo regular el curso virtual ya sea mediante visitas periódicas al mismo, ya sea a través de las herramientas de notificaciones automáticas.
3. Herramientas para la planificación: calendario, avisos, anuncios, etc.
4. Herramientas para la entrega de trabajos y la evaluación a distancia.

El estudiante también tendrá a su disposición el conjunto de facilidades que la Universidad ofrece a sus alumnos (equipos informáticos, bibliotecas, etc.), tanto en los Centros Asociados de la UNED como en la Sede Central.

IGUALDAD DE GÉNERO

En coherencia con el valor asumido de la igualdad de género, todas las denominaciones que en esta Guía hacen referencia a órganos de gobierno unipersonales, de representación, o miembros de la comunidad universitaria y se efectúan en género masculino, cuando no se hayan sustituido por términos genéricos, se entenderán hechas indistintamente en género femenino o masculino, según el sexo del titular que los desempeñe.