

MÓDULO	MATERIA	CURSO	SEMESTRE	CRÉDITOS	TIPO
Física de Sistemas Complejos	Física de Sistemas Complejos	4º	2º	6	Optativa
PROFESORES <sup>(1)</sup>			DIRECCIÓN COMPLETA DE CONTACTO PARA TUTORÍAS (Dirección postal, teléfono, correo electrónico, etc.)		
Miguel Ángel Muñoz Martínez. Matteo Sireci Guillermo Barrios Morales			Departamento de Electromagnetismo y Física de la Materia, Planta baja, Facultad de Ciencias. Despacho 2 Correos electrónicos: <a href="mailto:mamunoz@ugr.es">mamunoz@ugr.es</a> <a href="mailto:msireci@onsager.ugr.es">msireci@onsager.ugr.es</a> <a href="mailto:guillermobm@onsager.ugr.es">guillermobm@onsager.ugr.es</a>		
			HORARIO DE TUTORÍAS Y/O ENLACE A LA PÁGINA WEB DONDE PUEDAN CONSULTARSE LOS HORARIOS DE TUTORÍAS <sup>(1)</sup>		
			Lunes y miércoles, de 11 a 14 horas <a href="https://ergodic.ugr.es/fe/">https://ergodic.ugr.es/fe/</a>		
GRADO EN EL QUE SE IMPARTE			OTROS GRADOS A LOS QUE SE PODRÍA OFERTAR		
Grado en FÍSICA			MATEMATICAS, BIOLOGIA, GEOLOGIA		
PRERREQUISITOS Y/O RECOMENDACIONES (si procede)					
Estar terminando el grado, a ser posible habiendo cursado "Física Estadística". Es muy conveniente y aconsejado haber cursado "Física Computacional" y/o tener conocimientos básicos de programación y resolución de problemas por ordenador.					
BREVE DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS (SEGÚN MEMORIA DE VERIFICACIÓN DEL GRADO)					

<sup>1</sup> Consulte posible actualización en Acceso Identificado > Aplicaciones > Ordenación Docente  
(↪) Esta guía docente debe ser cumplimentada siguiendo la "Normativa de Evaluación y de Calificación de los estudiantes de la Universidad de Granada" (<http://secretariageneral.ugr.es/pages/normativa/fichasugr/ncg7121/>)

Complejidad. No-linealidad. Emergencia. Propiedades colectivas o cooperativas. Cambios de Fase. Ruptura espontánea de simetría. Automatas y sistemas reticulares con interacciones. Puntos críticos. Geometría fractal. Invariancia de escala. Leyes de potencia. Caos. Universalidad. Ruido y fluctuaciones. Ecuaciones de Langevin y Fokker-Planck. Difusión. Redes complejas. Auto-organización. Aplicaciones recientes en física y sus extensiones a biología de sistemas, neurociencia, ecología teórica, etc.

#### COMPETENCIAS GENERALES Y ESPECÍFICAS

##### COMPETENCIAS GENERALES Y ESPECÍFICAS

- o Capacidad de análisis y síntesis
- o Capacidad de organización y planificación
- o Comunicación oral y/o escrita
- o Resolución de problemas
- o Trabajo en equipo
- o Razonamiento crítico
- o Creatividad
- o Estimar órdenes de magnitud para interpretar fenómenos diversos
- o Modelar *fenómenos complejos*, trasladando un problema físico al lenguaje matemático
- o Transmitir conocimientos de forma clara tanto en ámbitos científicos como generales.
- o Aplicar los conocimientos matemáticos en el contexto general de la física y sistemas complejos
- o Utilizar herramientas computacionales para resolver y modelar problemas y para presentar sus resultados
- o Comprender y dominar el uso de los métodos y técnicas matemáticas para extraer información útil de las expresiones básicas de la Física Estadística y de los Sistemas Complejos.
- o Iniciarse en nuevos campos a través de estudios independientes (capacidad de aprender)
- o Modelar fenómenos complejos, trasladando problemas al lenguaje matemático

#### OBJETIVOS (EXPRESADOS COMO RESULTADOS ESPERABLES DE LA ENSEÑANZA)

Los objetivos de la asignatura son:

El alumno, llegado a este curso, ya conoce las descripciones microscópica y macroscópica de la física —tal como son proporcionadas, respectivamente, por las mecánicas clásica y cuántica y por la termodinámica, por ejemplo— y ha contactado con la física estadística, que relaciona con rigor esas descripciones en el caso de sistemas en equilibrio termodinámico. Pero el equilibrio termodinámico es una circunstancia especial que no suele darse en muchos casos de interés en física y en otras ciencias como, por ejemplo, cuando se establece turbulencia en un fluido, o cuando unos compuestos químicos logran formar el primer indicio de vida independiente, o cuando el sistema nervioso consigue funciones del más alto nivel. Es entonces relevante el concepto de *sistema complejo*, capaz de mostrar una rica fenomenología debida a la presencia de efectos colectivos, cooperativos o emergentes. El estudio reciente en física de sistemas complejos ha llevado al desarrollo de potentes métodos de análisis tanto matemáticos como computacionales y ha generado nuevos conceptos y paradigmas. Todo ello ha trascendido las fronteras de la física hasta invadir los fundamentos de otras ciencias, incluyendo biología, la ecología, la neurociencia, etc. Es ésta la situación que se propone describir la asignatura, a la vez que pretende ayudar al alumno a 1) desarrollar sus habilidades para analizar y plasmar mediante algoritmos lo esencial en sistemas y procesos naturales, aprendiendo así a resolver con eficacia y precisión problemas diversos, y 2) usar ordenadores de modo creativo en la modelización de situaciones de interés en ciencia y aplicaciones tecnológicas.

#### TEMARIO DETALLADO DE LA ASIGNATURA



1. Introducción. Complejidad. Orden y entropía en la naturaleza. Efectos cooperativos en física estadística. Escalas y niveles de descripción. No-linealidad. Predictabilidad. Medidas de complejidad.

2. Teoría de sistemas dinámicos. Introducción a la teoría de sistemas dinámicos y caos (Poincaré. Lorenz. May. Feigenbaum). Mapas no lineales. Puntos fijos, ciclos límite y atractores extraños. Teoría de estabilidad en ecuaciones diferenciales unidimensionales y bidimensionales. Teoría de bifurcaciones y catástrofes. Coeficientes de Lyapunov. Universalidad. Integrabilidad y caos hamiltoniano.

3. Invariancia de escala. Leyes de potencia. Mecanismos de generación de leyes de potencias. Geometría fractal. Regularidad, aleatoriedad y auto- semejanza. Dimensión Hausdorff o dimension fractal. (Multifractalidad). Rugosidad y estructuras auto-afines.

4. Teoría de procesos estocásticos. Breve introducción histórica. Movimiento Browniano. Caminante aleatorio. Teoría de Einstein. Experimentos de Perrin. Procesos de Markov. Ecuación maestra. Ecuaciones estocásticas: Langevin y Fokker Planck. Integrales de camino. Vuelos de Levy.

5. Teoría de cambios de fase (I): Percolación. Invariancia de escala en el punto crítico. Introducción al grupo de renormalización. Percolación dinámica (incendios forestales). Percolación dirigida y el proceso de contacto.

6. Teoría de cambios de fase (II): Curva de Guggenheim y universalidad. Modelos reticulares (Heisenberg, XY, etc.). Modelo de Ising. Ruptura espontánea de simetría. Parámetro de orden y parámetro de control. Correlaciones y fluctuaciones. Exponentes críticos y leyes de escala.

Teoría de campo medio. Teoría de Ginzburg Landau. Criterio de Ginzburg. Bloques de Kadanoff y renormalización en espacio real.

7. Auto-organización y criticalidad. Pilas de arena. Terremotos. Criticalidad en biología.

8. Otros conceptos: Introducción a la teoría de redes complejas. Teoría de juegos evolutiva. Aplicaciones: Neurociencia, Ecología teórica y evolutiva, Biología de sistemas, etc.

## BIBLIOGRAFÍA

- ② D. Sornette, *Critical Phenomena in Natural Sciences*, Springer 2009.
- ② J. Sethna, *Entropy, Order parameters and Complexity*. Oxford 2015.
- ② J.J. Binney et al. *The theory of Critical Phenomena*. Oxford. 1999.
- ② E. Ott, *Chaos and dynamical systems*, Cambridge, 2012.
- ② S.H. Strogatz, "Non-linear dynamics and Chaos", Addison Wisley 2012.
- ② A. Fuchs, "Nonlinear dynamics in complex systems", Springer 2013.
- ② H. J. Jensen, "Self-Organized Criticality ", Cambridge Univ. Press 1998.
- ② K. Christensen and N.R. Moloney, "Complexity and Criticality", Imperial College, London 2005.
- ② R.J. Creswick et al., "Introduction to Renormalization Group Methods in Physics", Wiley, NY 1992.
- ② J. Marro and R. Dickman, "Nonequilibrium Phase Transitions in Lattice Systems". Cambridge 2005.
- ② C.W. Gardiner, "Handbook of stochastic methods", Springer Verlag, 2000.
- ② N.G. van Kampen, "Stochastic processes in Physics and Chemistry", Springer, 2004.
- ② M. Newman, "Networks: An introduction", Oxford 2011.
- ② A. Pikovsky et al. *Synchronization: A universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge 2003.
- ② P. Krapivsky, S. Redner, E. Ben-Naim, "A kinetic view of Statistical Physics", Cambridge 2010.



## ENLACES RECOMENDADOS

[mamsager.ugr.es/mamunoz](https://mamsager.ugr.es/mamunoz), <https://ergodic.ugr.es/fe/>

## METODOLOGÍA DOCENTE

**Clases de teoría:** Sesiones para todo el grupo de alumnos en las que el profesor explicará los contenidos teóricos fundamentales y su importancia en el contexto de la materia.

**Prácticas y problemas:** Sesiones para todo el grupo de alumnos en las que éstos trabajarán individualmente o por parejas, en los proyectos relacionados bajo la supervisión del profesor. Los alumnos resolverán de manera autónoma problemas de entre los propuestos durante las clases sobre los contenidos teóricos. Eventualmente, estos problemas serán resueltos en clase.

**Proyectos:** Cada alumno deberá abordar en parejas los proyectos propuestos en sincronía con el temario, para lo cual deberá aplicar los conceptos y técnicas expuestos en las clases de manera creativa, todo ello constantemente tutelado por el profesor.

## EVALUACIÓN (INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN, CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y PORCENTAJE SOBRE LA CALIFICACIÓN FINAL, ETC.)

El alumno ha de acreditar conocimiento uniforme de toda la materia, como se adquiere participando activamente en clase, de modo que la asistencia continuada y la realización de problemas es parte esencial de la evaluación, y ha de profundizar en uno de los temas característicos de la asignatura, lo que puede conseguir haciendo un trabajo personal tutelado. Hay evaluación a lo largo del curso y, al finalizar éste, mediante las exposiciones orales y/o escritas que se determinen entre alumnos y profesor. Valoración: Trabajo de investigación: 2/3 de la nota final: problemas entregados, ejercicios y trabajo continuado 1/3 de la valoración final. El trabajo personal tutelado puede cambiarse, de acuerdo con el profesor, por un examen final que se valorará del mismo modo.

**Evaluación única y extraordinaria:** Para quienes se acojan a la evaluación única final o a la extraordinaria, éstas contendrán las pruebas que el profesor estime oportunas (preferiblemente examen o examen oral) con objeto de acreditar que el estudiante ha adquirido la totalidad de las competencias generales y específicas, pudiendo el alumno alcanzar la calificación máxima.

## DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS QUE FORMARÁN PARTE DE LA EVALUACIÓN ÚNICA FINAL ESTABLECIDA EN LA "NORMATIVA DE EVALUACIÓN Y DE CALIFICACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA"

Elaboración de un estudio práctico teórico y/o computacional. Examen del compendio de la



asignatura.

## ESCENARIO A (ENSEÑANZA-APRENDIZAJE PRESENCIAL Y NO PRESENCIAL)

### ATENCIÓN TUTORIAL

**HORARIO**  
(Según lo establecido en el POD)

Miguel Ángel Muñoz Martínez.  
Matteo Sireci  
Guillermo Barrios Morales

Lunes y miércoles, de 11 a 14 horas  
<https://ergodic.ugr.es/fe/>

**HERRAMIENTAS PARA LA ATENCIÓN TUTORIAL**  
(Indicar medios telemáticos para la atención tutorial)

En escenario semipresencial, salvo excepciones, se atenderán las tutorías por videoconferencia (Skype, Google Meet o similar) o correo electrónico oficial. Las tutorías individuales tendrán lugar previa petición del estudiante.

### MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DOCENTE

- La proporción entre clases virtuales y presenciales dependerá del centro y circunstancias sanitarias. En las clases virtuales (síncronas o asíncronas) se concentrará preferentemente la enseñanza de índole teórica, mientras que en las presenciales se primará la impartición de problemas, seminarios y/o resolución de dudas.
- Las clases virtuales síncronas se impartirán utilizando la plataforma Google Meet o similar, o la que dicte la UGR en su momento, en el horario usual o acordado.
- Las clases virtuales asíncronas consistirán en vídeos previamente grabados por parte del profesor, y/o la grabación de clases presenciales o virtuales síncronas, que serán compartidas por Google Drive, Consigna UGR, Prado o similar, y se podrán complementar con actuaciones de seguimiento y retorno formativo específicas para ese fin (tutorías, tareas, entregas, ...)
- Las plataformas descritas (Prado, Google Meet, Consigna UGR, Google Drive a través de cuenta @go.ugr.es, correo institucional, ...) son las actualmente autorizadas por la UGR. Podrían verse modificadas si las instrucciones de la UGR al respecto cambiasen durante el curso.
- Como medida adicional, se prestará especial atención en facilitar a los estudiantes posible material docente adicional (resolución de problemas por escrito, nuevos de apuntes de teoría, etc.) a través de las plataformas Prado, Consigna UGR y/o Google Drive

### MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE LA EVALUACIÓN (Instrumentos, criterios, porcentajes sobre la calificación final)

#### Convocatoria Ordinaria

Los porcentajes y criterios de evaluación se mantienen. La evaluación de la parte de trabajo de investigación personal del alumno (2/3 de la nota final) se mantiene sin cambios (la entrega de estos materiales se hará online) y se realizarán entrevistas personales por videoconferencias. Igualmente la parte de evaluación continua (ejercicios y problemas, 1/3 de la nota final) se mantiene inalterada. Se enviarán online y serán evaluados del mismo modo.

#### Convocatoria Extraordinaria

Los porcentajes y criterios de evaluación se mantienen. La evaluación de la parte de trabajo de investigación personal del alumno (2/3 de la nota final) se mantiene sin cambios (la entrega de estos materiales se hará online) y se realizarán entrevistas personales por videoconferencias. Igualmente la parte de evaluación continua (ejercicios y problemas, 1/3 de la nota final) se mantiene inalterada. Se enviarán online y serán evaluados del mismo modo.



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

**INFORMACIÓN SOBRE TITULACIONES DE LA UGR**  
[grados.ugr.es](https://grados.ugr.es)

## Evaluación Única Final

Los porcentajes y criterios de evaluación se mantienen. La prueba tendrá lugar, si la situación lo permite, de forma presencial. Si no es posible, el examen presencial se podrá reemplazar por la entrega online de múltiples pruebas objetivas (resolución de problemas, cuestiones teóricas, etc.) a realizar en un plazo temporal restringido a través de la plataforma Prado, Prado Examen, o similar, y/o por la realización de un examen oral con formato de entrevista personal profesor-alumno por videoconferencia (mediante Google Meet o similar). Para posibilitar la interacción alumno-profesor en caso de entrega online de múltiples pruebas objetivas, así como su correcto desarrollo, estas pruebas serán monitorizadas por videoconferencia, a través de Google Meet o similar, de acuerdo a las directrices de la UGR al respecto.

## ESCENARIO B (SUSPENSIÓN DE LA ACTIVIDAD PRESENCIAL)

### ATENCIÓN TUTORIAL

#### HORARIO

(Según lo establecido en el POD)

Miguel Ángel Muñoz Martínez.

Matteo Sireci

Guillermo Barrios Morales

Lunes y miércoles, de 11 a 14 horas

<https://ergodic.ugr.es/fe/>

#### HORARIO

(Según lo establecido en el POD)

En escenario B, se atenderán las tutorías por videoconferencia (Google Meet) o correo electrónico oficial. Las tutorías individuales tendrán lugar previa petición del estudiante.

### MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DOCENTE

- Todas las clases serían virtuales, pudiendo ser síncronas o asíncronas, dependiendo de las circunstancias.
- Las clases virtuales síncronas se impartirán utilizando la plataforma Google Meet o similar, o la que dicte la UGR en su momento, en el horario usual o acordado.
- Las clases virtuales asíncronas consistirán en vídeos previamente grabados por parte del profesor, y/o la grabación de clases virtuales síncronas, que serán compartidas por Google Drive, Consigna UGR, Prado o similar, y se podrán complementar con actuaciones de seguimiento y retorno formativo específicas para ese fin (tutorías, tareas, entregas, ...)
- Las plataformas descritas (Prado, Google Meet, Consigna UGR, Google Drive a través de cuenta @go.ugr.es, correo institucional, ...) son las actualmente autorizadas por la UGR. Podrían verse modificadas si las instrucciones de la UGR al respecto cambiasen durante el curso.
- Como medida adicional, se prestará especial atención en facilitar a los estudiantes posible material docente adicional (resolución de problemas por escrito, nuevos de apuntes de teoría, etc.) a través de las plataformas Prado, Consigna UGR y/o Google Drive.

### MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE LA EVALUACIÓN (Instrumentos, criterios porcentajes sobre la calificación final)

#### Convocatoria Ordinaria

Los porcentajes y criterios de evaluación se mantienen. La evaluación de la parte de trabajo de investigación personal del alumno (2/3 de la nota final) se mantiene sin cambios (la entrega de estos materiales se hará online) y se realizarán entrevistas personales por videoconferencias. Igualmente la parte de evaluación continua (ejercicios y problemas, 1/3 de la nota final) se mantiene inalterada. Se enviarán online y serán evaluados del mismo modo.



UNIVERSIDAD  
DE GRANADA

INFORMACIÓN SOBRE TITULACIONES DE LA UGR  
[grados.ugr.es](https://grados.ugr.es)

#### Convocatoria Extraordinaria

Los porcentajes y criterios de evaluación se mantienen. La evaluación de la parte de trabajo de investigación personal del alumno (2/3 de la nota final) se mantiene sin cambios (la entrega de estos materiales se hará online) y se realizarán entrevistas personales por videoconferencias. Igualmente la parte de evaluación continua (ejercicios y problemas, 1/3 de la nota final) se mantiene inalterada. Se enviarán online y serán evaluados del mismo modo.

#### Evaluación Única Final

Los porcentajes y criterios de evaluación se mantienen. La prueba tendrá lugar, si la situación lo permite, de forma presencial. Si no es posible, el examen presencial se podrá reemplazar por la entrega online de múltiples pruebas objetivas (resolución de problemas, cuestiones teóricas, etc.) a realizar en un plazo temporal restringido a través de la plataforma Prado, Prado Examen, o similar, y/o por la realización de un examen oral con formato de entrevista personal profesor-alumno por videoconferencia (mediante Google Meet o similar). Para posibilitar la interacción alumno-profesor en caso de entrega online de múltiples pruebas objetivas, así como su correcto desarrollo, estas pruebas serán monitorizadas por videoconferencia, a través de Google Meet o similar, de acuerdo a las directrices de la UGR al respecto.

Siguiendo las recomendaciones de la CRUE y del Secretariado de Inclusión y Diversidad de la UGR, los sistemas de adquisición y de evaluación de competencias recogidos en esta guía docente se aplicarán conforme al principio de diseño para todas las personas, facilitando el aprendizaje y la demostración de conocimientos de acuerdo a las necesidades y la diversidad funcional del alumnado.

