



# Teoría de Sistemas Complejos

*Énfasis en Ciencia de la Información y el Conocimiento*

**ESPACIO ACADÉMICO** (Asignatura): **TEORÍA DE SISTEMAS COMPLEJOS**

**CÓDIGO: #**

- Obligatorio ( X ) : Básico ( X ) Complementario ( )
- Electivo ( ) : Intrínsecas ( ) Extrínsecas ( )

## **COMPETENCIAS EN CIENCIA DE LA INFORMACIÓN Y EL CONOCIMIENTO**

**NÚMERO DE CRÉDITOS:** Cuatro (4)

**TIPO DE CURSO:** **TEÓRICO:** \_\_\_\_\_ **PRÁCTICO:**  X  **TEO-PRÁC:** \_\_\_\_\_

Alternativas metodológicas:

Clase Magistral ( X ), Seminario ( ), Seminario – Taller ( X ), Taller ( ), Prácticas ( ),  
Proyectos tutorados ( ), Otro: \_\_\_\_\_

## *Justificación del Espacio Académico*

Los temas de estudio de la teoría de sistemas complejos son tan amplios y variados como para incluir los mercados de valores, los ecosistemas, el cerebro, el sistema inmunológico, las redes de comunicaciones, la hidrología, etc. Si bien existen diferentes disciplinas para estudiar cada uno de esos sistemas de manera particular, recientemente se ha reconocido que todos ellos tienen características en común que permiten el desarrollo de una nueva teoría, unos nuevos paradigmas y, en fin, una nueva ciencia.

Por ser una ciencia en construcción, aún hay muchas controversias y opiniones divididas sobre qué es y qué no es la teoría de sistemas complejos. Sin embargo, es claro que todos los sistemas mencionados anteriormente están compuestos por elementos que interactúan entre ellos de manera tal que producen un comportamiento global emergente que, en principio, no se puede explicar únicamente a partir del conocimiento individual de sus componentes: La inteligencia colectiva del hormiguero surge del comportamiento “poco inteligente” de cada hormiga individual. Una delicada pila de arena que existe en el borde entre lo líquido y lo sólido surge de depositar granos de arena unos sobre otros.



La memoria, la capacidad de aprendizaje y hasta la conciencia surgen en el cerebro humano de la interconexión de miles de millones de neuronas que simplemente responden a unos estímulos de entrada, retransmitiéndolos o no según su estado individual. Las acciones no coordinadas de los usuarios de una red de comunicación para tratar de obtener una experiencia positiva de ella, hacen que la red entera opere al borde de la congestión, en un estado crítico semejante al punto de transición de fase de la pila de arena... Cuando los biólogos, los neurólogos, los físicos, los sociólogos, los ingenieros, los economistas, etc. deciden comunicarse entre ellos para abordar de manera unificada estos fenómenos, surge la teoría de los sistemas complejos.

Desde hace algunos años se ha empezado a reconocer que el estudio de los fenómenos complejos será la piedra angular de las ciencias y las tecnologías de las próximas décadas, implicando una serie de cambios paradigmáticos que afectarán nuestra experiencia como investigadores en ingeniería. En efecto, ya no basta diseñar con base en suposiciones simplificadoras que tratan de capturar la esencia de los fenómenos subyacentes, como hasta ahora hemos hecho. Estas simplificaciones han sido fundamentalmente exitosas, hasta el punto de habernos traído al estado de desarrollo científico y tecnológico de hoy: consideramos relaciones lineales cuando pueden ser aproximadamente válidas alrededor de algún punto de equilibrio, consideramos componentes homogéneos cuando las diferencias entre ellos no parecen representar fenómenos significativos en el contexto particular en que deseamos interpretar el sistema bajo estudio, consideramos incertidumbres gaussianas cuando ellas surgen de la presencia de muchas incertidumbres pequeñas, etc. Sin embargo, este enfoque reduccionista y mecanicista parece haber cumplido ya con su objetivo al habernos traído hasta las puertas de la teoría de los sistemas complejos, ante los cuales el reduccionismo mecanicista no tiene casi nada más que decir.

Así pues, el estudio de la teoría de sistemas complejos es importante en la formación de un doctor en ingeniería, si queremos que sea protagonista de la investigación científica y la innovación tecnológica del futuro inmediato.

### **COMPETENCIAS DEL PERFIL A LAS QUE CONTRIBUYE LA ASIGNATURA**

La visión integradora de los problemas de ingeniería que se ofrece en este curso ampliará la mentalidad analítica y crítica del doctorando y mejorará su capacidad para contribuir en el conocimiento científico y tecnológico en áreas interdisciplinarias. En efecto, la naturaleza de los problemas que Bogotá, la ciudad/región y el país le proponen a la ingeniería nacional son de naturaleza compleja, por lo que el doctorando tendrá mejores competencias para su diagnóstico y para la proposición de alternativas integradoras de solución.



### **CONTRIBUCIÓN A LA FORMACIÓN**

El doctorando adquirirá una comprensión de los aspectos conceptuales básicos de la teoría de los sistemas complejos, sabrá leer e interpretar la literatura especializada con mayor propiedad, estará dispuesto a aplicar técnicas de ingeniería de sistemas complejos a sus problemas particulares de investigación y, sobre todo, tendrá del mundo una visión más fresca y dispuesta a la sorpresa. Al reconocer la importancia de las múltiples interacciones que explican el mundo, el doctorando podrá hacer más y mejores contribuciones desde su actividad investigativa.

### **PUNTOS DE APOYO PARA OTRAS ASIGNATURAS**

Este curso se considera fundamental dentro del área de formación básica del plan curricular. En él se apoyan los diferentes cursos electivos de contexto y de profundización que toman los doctorandos.

**PRERREQUISITO** El estudiante que haya ganado la admisión al programa doctoral satisface todos los requisitos para tomar este curso.



## *Programación del Contenido*

Se busca que el estudiante reconozca la utilidad de abarcar sus temas de interés desde la perspectiva de los sistemas complejos, para lo cual se introducen las herramientas y los métodos generales de la teoría de este tipo de sistemas dentro de un marco teórico general que el estudiante podrá adecuar a su propia práctica investigativa.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

En particular, se espera que el doctorando reconozca el tipo de fenómenos emergentes que requieren de la teoría de sistemas complejos para su correcto modelado y comprensión, que conozca los fundamentos matemáticos básicos de la geometría fractal y del análisis de procesos estocásticos fractales, que conozca las herramientas básicas de análisis de sistemas dinámicos no lineales y del Caos que este tipo de sistemas puede llegar a exhibir, que conozca algunos mecanismos típicos de auto-organización en sistemas complejos, ejemplificados mediante autómatas celulares guiados por sistemas de inteligencia computacional, que asocie estos aspectos con los temas de investigación de su interés y que identifique la potencial aplicabilidad de la ingeniería de sistemas complejos en su proyecto de disertación doctoral. En el siguiente programa sintético se especifican objetivos por cada tema tratado.

### **PROGRAMA SINTÉTICO**

Los sistemas complejos evolucionan en el tiempo, formando patrones recurrentes que se describen fácilmente mediante la geometría fractal, por lo que el eje del curso serán los fractales y, desde ellos, se desprenderán los temas principales del curso, como muestra la siguiente figura.



## **PROGRAMA DETALLADO**

### **1. Introducción a los sistemas complejos**

Objetivo: Presentar el curso, su justificación, objetivo, metodología, evaluación y programa. Durante dicha presentación, proponer algunos conceptos básicos fundamentales.

- 1.1. Justificación, objetivo, metodología, evaluación y programa del curso.
- 1.2. Evolución de paradigmas científicos. Reduccionismo, mecanicismo, predecibilidad.
- 1.3. Teoría de sistemas, cibernética, inteligencia artificial
- 1.4. Redes neuronales, lógica difusa, modelos basados en agentes, autómatas celulares, algoritmos genéticos
- 1.5. Geometría fractal, sistemas dinámicos no lineales, teoría del caos
- 1.6. Auto-organización, adaptación, emergencia
- 1.7. Teoría de sistemas complejos

### **2. Fractales determinísticos**

Objetivo: Presentar los conceptos fundamentales de la geometría fractal y mencionar brevemente los problemas computacionales que plantean.

- 2.1. La recursión como modelo matemático de objetos naturales. Transformaciones afines, sistemas de funciones iteradas.
- 2.2. Sistemas L (Lindenmayer). Gramáticas formales y re-escritura. Recursión, computabilidad, decidibilidad y teoremas de incompletitud de Gödel.
- 2.3. Medidas de objetos fractales. Dimensión de auto- semejanza, medida de Hausdorff, dimensión de Hausdorff. Dimensión box-counting.

### **3. Fractales aleatorios**

Objetivo: Presentar conceptos fundamentales de los procesos estocásticos fractales y sus técnicas de análisis.

- 3.1. Procesos estocásticos, distribuciones conjuntas de n-ésimo orden, función de valor medio, autocorrelación y autocovarianza, estacionariedad, ergodicidad, proceso de incrementos.
- 3.2. Movimiento browniano y auto- semejanza estadística.
- 3.3. Movimiento browniano fraccional y algoritmo de desplazamiento del punto medio
- 3.4. Parámetro de Hurst y diagrama varianza-tiempo
- 3.5. Auto- semejanza de segundo orden, dependencia de rango largo, ruido 1/f,
- 3.6. Síntesis mediante filtros lineales
- 3.7. Distribuciones de cola pesada
- 3.8. Otros modelos de procesos estocásticos fractales (FARIMA, M/G/□, MWM).
- 3.9. Análisis wavelet de procesos estocásticos fractales



#### **4. Sistemas dinámicos no-lineales**

Objetivo: Revisar rápidamente los conceptos fundamentales de los sistemas dinámicos caóticos y algunas de sus propiedades.

4.1. Juego del caos.

4.2. Órbitas acotadas de mapas iterados. Conjuntos de Julia y conjunto de Mandelbrot.

4.3. Atractores de sistemas dinámicos y Caos. Bifurcaciones. Mapa logístico. Constante de Feigenbaum.

4.4. Impredecibilidad de sistemas caóticos. "Shadowing lemma".

4.5. Lorenz y el "efecto mariposa". Control de caos.

#### **5. Auto-organización y emergencia**

Objetivo: Mostrar mediante ejemplos algunos mecanismos de auto-organización y la obtención correspondiente de propiedades emergentes. En particular, estudiar los fenómenos de auto-organización y emergencia en autómatas celulares.

5.1. Autómatas celulares y juego de la vida

5.2. Modelos de autómatas celulares en mecánica estadística, reacciones autocatalíticas, regulación genética, colonias y super-organismos, bandadas rebaños y cardúmenes, ecología, economía

5.3. Sistemas de inteligencia computacional: Redes neuronales, algoritmos genéticos, inteligencia de enjambre, sistemas inmunes artificiales

#### **6. Ingeniería de sistemas complejos**

Objetivo: Establecer algunas de las medidas que, desde la teoría de la información, se han propuesto para fenómenos como la auto-organización y la emergencia. Hacer uso de los conceptos aprendidos el diseño de sistemas complejos, que sean capaces de percibir, aprender, evolucionar y adaptarse.

6.1. Entropía y medida de emergencia

6.2. Medida de Auto-organización

6.3. Complejidad como balance entre la entropía y la emergencia

6.4. Medidas de homeóstasis y autopoiesis

6.5. Implicaciones en el diseño de sistemas complejos

6.6. Sistemas dinámicos cognitivos

6.7. Control cooperativo

6.8. Inteligencia colectiva

6.9. Auto-organización guiada

6.10. Algunos ejemplos en redes de comunicaciones: sincronización, cooperación, acceso al medio, balance de carga



### **7. Temas adicionales o extendidos presentados por los participantes**

Objetivo: Lograr que los doctorandos relacionen uno o más temas de la teoría de sistemas complejos (ya sea de los vistos en clase u otros nuevos) con su proyecto de disertación doctoral. Los siguientes son algunos temas potenciales, pero serán los doctorandos quienes propongan los temas en esta parte del curso.

- 7.1. Redes libres de escala
- 7.2. Redes booleanas aleatorias
- 7.3. Modelos de percolación
- 7.4. SOC vs HOT (Criticalidad auto-organizada vs tolerancia altamente organizada)
- 7.5. Mecanismos de generación de leyes de potencia
- 7.6. Autómatas celulares multinivel
- 7.7. Bio-computación
- 7.8. Ingeniería morfogénica
- 7.9. Dinámicas urbanas
- 7.10. Robótica cooperativa
- 7.11. - Sistemas ecológicos



## Estrategias

En la primera parte del curso el profesor hará algunas presentaciones en las que se introducirán los conceptos básicos y se demostrarán con algunas aplicaciones computacionales específicas. En la parte final del curso serán los estudiantes quienes presenten sus avances en el estudio de un tema específico previamente seleccionado, ojalá directamente relacionado con su trabajo de investigación doctoral. Durante el curso se asignarán diferentes lecturas que se discutirán posteriormente en clase.

Tipo de Curso	Horas			Horas profesor/ semana	Horas Estudiante/ semana	Total Horas Estudiante/ semestre	Créditos
	TD	TC	TA	(TD + TC)	(TD + TC +TA)	X 18 semanas	
	4	2	3	6	9	144	4

**Trabajo Presencial Directo (TD):** trabajo de aula con plenaria de todos los estudiantes.

**Trabajo Mediado-Cooperativo (TC):** Trabajo de tutoría del docente a pequeños grupos o de forma individual a los estudiantes.

**Trabajo Autónomo (TA):** Trabajo del estudiante sin presencia del docente, que se puede realizar en distintas instancias: en grupos de trabajo o en forma individual, en casa o en biblioteca, laboratorio, etc.)

## Recursos

### RECURSOS FÍSICOS REQUERIDOS

- Disponibilidad de las Presentaciones de las clases teóricas en medio magnético.
- Ayudas audiovisuales: Diapositivas y presentación de imágenes de computador

### BIBLIOGRAFÍA

El texto principal es el de la referencia 1. La referencia 11 es, en realidad, muchas referencias muy ilustrativas pero informales. Hay decenas de excelentes libros como estos (y centenas de malos libros).

- M. Alzate "Presentaciones de la clase de sistemas complejos", disponible para los participantes en el curso.
- Claudius Gros, "Complex and Adaptive Dynamical Systems: A Primer" 3rd edition, Springer, 2013
- Kenneth Falconer. "Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications", John Wiley & Sons, 2003
- P. Doukhan, G. Oppenheim, M. Taqqu, "Theory and applications of long-range dependence", Birkhauser, 2003





- Didier Sornette, "Critical Phenomena in Natural Sciences: Chaos, Fractals, Selforganization and Disorder: Concepts and Tools", Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
- Steven Strogatz, "Nolinear dynamics and chaos", Perseus book publishing, 1994.
- Andries Engelbrecht, "Computational Intelligence: An Introduction", Wiley & Sons, 2007
- A. Hoekstra, J. Kroc and P. Sloot "Simulating Complex Systems by Cellular Autómata", Springer 2010
- Simon Haykin "Cognitive Dynamic Systems", Cambridge University Press, 2012
- Mokhail Prokopenko, "Guided Self-Organization: Inception", Springer, 2014
- Jeff Shamma, "Cooperative Control of distributed Multiagent systems". Wiley, 2007
- Lecturas de divulgación científica:
  - Mellanie Mitchell, "Complexity: A guided tour", Oxford University press, 2009
  - John H. Holland, "Emergence: From chaos to order" Basic Books, 1998
  - Neil Johnson, "Simply Complexity: A clear guide to complexity theory", OneWorld, 2007
  - John Holland, "Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity" Helix Books, 1995
  - P. Coveney and R. Highfield "Frontiers of Complexity: The search for order in a chaotic world", Fawcett, 1995
  - Douglas Hofstadter, "Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid", Basic Books, 1979

## Organización / Tiempos

Programa sintético	Semanas académicas															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Introducción a los sistemas complejos	■	■														
2. Fractales determinísticos			■	■												
3. Fractales aleatorios					■	■										
4. Sistemas dinámicos no-lineales							■	■								
5. Auto-organización y emergencia									■	■						
6. Ingeniería de sistemas complejos											■	■				
7. Temas propuestos por los participantes													■	■	■	■



## *Evaluación*

Para medir el aprovechamiento del curso se asignarán no menos de cinco tareas que involucran la solución de algunos problemas propuestos con el uso de MATLAB®, una poderosa plataforma de computación científica para ingeniería. Durante el curso, los participantes estudiarán un tema de interés, ojalá relacionado con su disertación doctoral, y al final escribirán un resumen a manera de artículo de revisión y harán una presentación ante sus compañeros y otros invitados. Las tareas se usarán para calcular el 50% de la calificación final, y el artículo y la presentación tendrán un peso del restante 50%.

## *Datos Docente*

Nombre:  
Pregrado:  
Postgrado:  
Correo Electrónico: