



Universidad de Granada

[decsai.ugr.es](http://decsai.ugr.es)

## **Inteligencia Artificial en Telecomunicaciones**

Máster en Ingeniería de Telecomunicaciones

Tema 5: Sistemas Multiagente



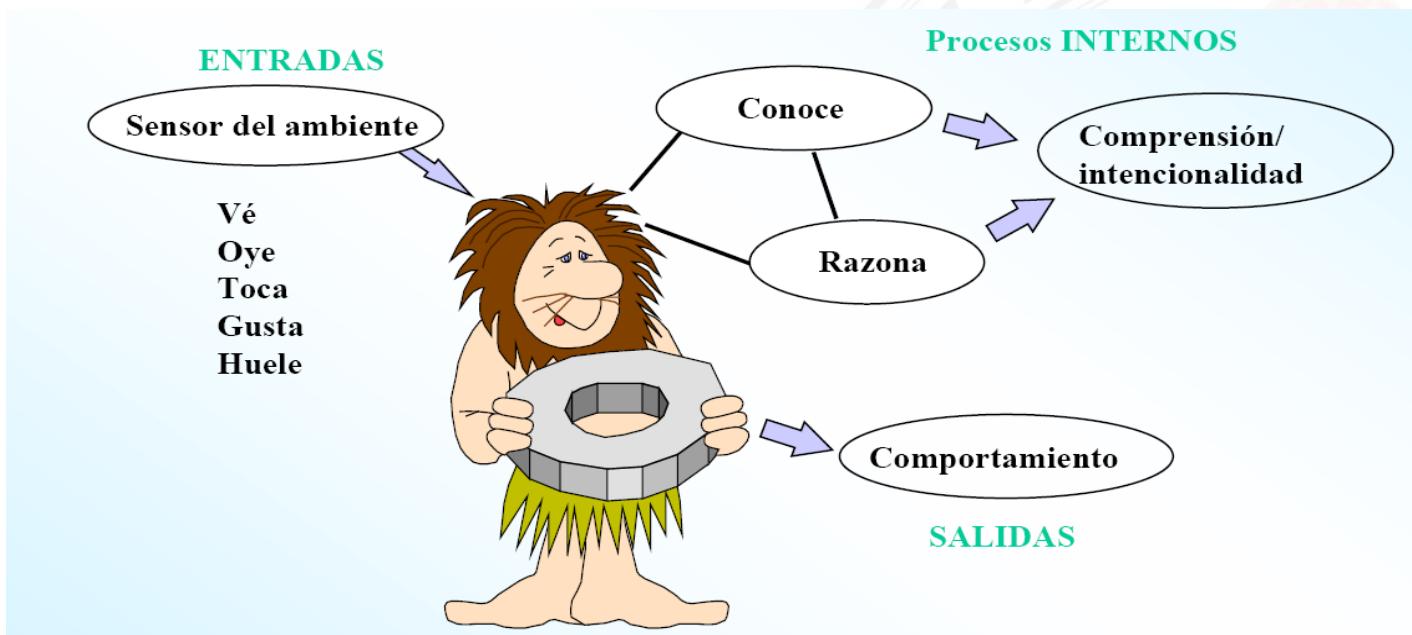
**Departamento de Ciencias de la  
Computación e Inteligencia Artificial**

# Agentes Inteligentes

Un **Agente Inteligente** es una entidad capaz de percibir su entorno mediante sensores (**entradas**), procesa tales percepciones y **actúa de manera racional** en dicho entorno mediante efectores (**salidas**).

Podemos, por tanto, definir la **Inteligencia Artificial** subcampo de la Informática dedicado a la construcción de agentes que exhiben aspectos del comportamiento inteligente

Un agente inteligente puede ser una entidad física o virtual, normalmente se utiliza dicho concepto para referirse a **programas** de la IA pero también puede utilizarse para animales o personas. A los agentes inteligentes implementados en hardware se les suele llamar **robots**.



# Agentes Inteligentes

Existen muchos tipos de agente como veremos pero todos deben tener una serie de características deseables:

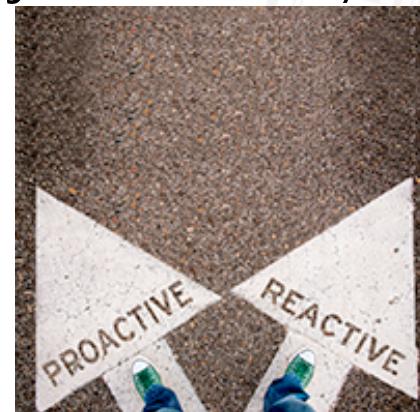
- ▶ **Autonomía:** Debe ser capaz de actuar sin intervención humana y tener el control sobre sus propias acciones y estado interno.
- ▶ **Racionalidad:** Debe actuar con el fin de alcanzar sus objetivos maximizando el rendimiento y sin tomar decisiones (a propósito) que les impidan alcanzar dichos objetivos. Tampoco pueden tener objetivos contradictorios entre sí.
- ▶ **Veracidad:** No deben trasmitir información falsa o inexacta a propósito.
- ▶ **Aprendizaje:** Deben modificar su comportamiento en base a nuevas interacciones con el entorno.



# Clasificación basada en la flexibilidad

Los agentes los podemos clasificar según el modelo de actuación:

- ▶ **Reactivo:** el agente debe percibir el entorno y responder de una forma temporal (rápida) a los cambios que ocurren en dicho entorno
- ▶ **Pro-activo:** Los agentes no deben simplemente actuar en respuesta a su entorno, deben de ser capaces de exhibir comportamientos dirigidos a lograr objetivos que sean oportunos, y tomar la iniciativa cuando sea apropiado, identificando y reconociendo oportunidades.
- ▶ **Social:** los agentes deben de ser capaces de interactuar, cuando sea apropiado, con otros agentes artificiales o humanos para completar su propio proceso de resolución del problema y ayudar a otros con sus actividades. [https://www.youtube.com/watch?v=Xs\\_Y22N1r\\_A](https://www.youtube.com/watch?v=Xs_Y22N1r_A)



# Sistemas Multiagente (SMA)

► Un **Sistema Multiagente** es un conjunto de **agentes autónomos**, que pueden ser **heterogéneos** y potencialmente **independientes**, que **trabajan en común** resolviendo un problema.

► Los sistemas multiagente son utilizados para resolver problemas que son difíciles de resolver para un agente individual.

<https://www.youtube.com/watch?v=uOmRwDLsdXk>

► El estudio de los sistemas multiagente se encuadra dentro de la **Inteligencia Artificial Distribuida**



*"I know, one day this will be known as  
'Distributed Computing'!"*

# Inteligencia Artificial Distribuida

- Rama de la Inteligencia Artificial que estudia la solución de problemas mediante procesamiento descentralizado:
  - **Resolución Distribuida de Problemas:** Se descompone el problema en procesos cooperantes que comparten conocimiento para un problema concreto.
  - **Inteligencia Artificial Paralela:** Desarrollo de algoritmos y aplicaciones paralelas con énfasis en prestaciones.

# Ventajas de Sistemas Multiagente

- ▶ **Conocimiento especializado:** No hace falta que un agente tenga todo el conocimiento complejo sobre un entorno, cada uno de los agentes puede especializarse e intercambiar información.
- ▶ **Distribución:** Se pueden tratar problemas en el que los datos están geográficamente distribuidos.
- ▶ **Reutilización:** Se pueden aprovechar sistemas multiagente construidos previamente al realizar uno nuevo.
- ▶ **Escalabilidad:** Un sistema multiagente distribuido debería funcionar de igual forma tanto para unos pocos agentes como para un conjunto enorme de ellos.
- ▶ **Fiabilidad y eficiencia:** Son robustos ante fallos dado que el trabajo está repartido entre varios agentes y si uno falla, otros toman el relevo o se reparten las tareas, además pueden trabajar todos en paralelo resolviendo el problema a la vez, más rápidamente que si solo lo hiciera un algoritmo centralizado.

# Campos de Aplicación

► Podemos aplicar sistemas multiagente a **dominios en los que podemos descomponer el problema final en varios subproblemas** que se puedan ir resolviendo de forma relativamente independiente, o **dominios donde el conocimiento necesario para su resolución esté distribuido** en distintos sistemas.

- **Computación masivamente paralela, de propósito general y de alta velocidad.**
- **Tolerancia a fallos** (confianza, disponibilidad).
- Respuesta a demandas con requisitos de **tiempo real**.
- **Bases de datos distribuidas.** Fabricación automatizada. Es necesaria la colaboración de muchos procesadores para coordinar las tareas a desempeñar.
- **Supervisión remota y control.** Los puntos (sensores, actuadores, nodos) donde se toman las decisiones de control pueden estar diseminados en diferentes partes de un sistema distribuido.
- **Toma de decisiones coordinada.** Hay muchas aplicaciones donde es necesario que varios procesadores participen en la toma de decisiones, por ejemplo, porque cada uno de ellos tiene una parte relevante de los datos y es necesario fusionarlos en cualquier momento

# Requisitos de los Sistemas Multiagente

- ▶ Los sistemas distribuidos necesitan obligatoriamente un **soporte de comunicaciones**. Este servicio de comunicaciones debe ser fiable y presentar un rendimiento aceptable.
- ▶ En los sistemas multiagente distribuidos aparecen los **problemas clásicos de los sistemas concurrentes**: recursos compartidos y sincronización, entre otros.

# Comunicaciones de los Sistemas Multiagente

- ▶ **Sistema de pizarra:** consiste en una pizarra que proporciona a todos los agentes un área común de trabajo en la que pueden intercambiar datos, información o conocimiento. La información habitual que puede existir en la pizarra suelen ser tareas y/o resultados. Es un sistema simple pero un agente para llegar a encontrar la información que necesita tiene que estar buscando toda la que se encuentra en la pizarra ; nadie avisa a los agentes cuando hay nueva información disponible, por lo que periódicamente cada agente debe ojar la pizarra, provocando cuello de botella. A veces existen el **moderador** (centraliza la gestión de tareas entre los agentes) y el **distribuidor** (agente encargado de avisar a los demás agentes).
- ▶ **Paso de mensajes:** Cuando un agente A se quiere comunicar con otro B, le lanza un mensaje que sólo es legible por el receptor.

# FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents)

► Consorcio industrial fundado en 1996 por varias decenas de compañías de telecomunicaciones e informática

<http://www.fipa.org>

► Objetivos: Acelerar el desarrollo de tecnologías de agentes inteligente mediante la producción de especificaciones acordadas internacionalmente que soporten la interoperabilidad entre agentes y aplicaciones basadas en agentes.

► Cubre todo los aspectos de un entorno de agentes: Arquitectura, Comunicación y Gestión.

# Lenguaje ACL (Agent Communication Language)

- ▶ Lenguaje de comunicación entre agentes propuesto por la FIPA pretende estandarizar la comunicación entre agentes.
- ▶ Basado en la teoría de los actos del habla
- ▶ Un mensaje en ACL representa la intención de realizar alguna acción (acto comunicativo)
  - El primer elemento de la lista es el **identificador** del acto comunicativo (obligatorio)
  - El resto de la lista son **pares parámetros-valor** si un orden predefinido.

```
(ask-one
    :sender pepe
    :content (PRECIO TELEFONICA ?precio)
    :receiver servidor-bolsa
    :reply-with accion-telefonica
    :language LPROLOG
    ontology IBEX
)
```

# Interacción Sistemas Multiagente

Dicha interacción puede ser:

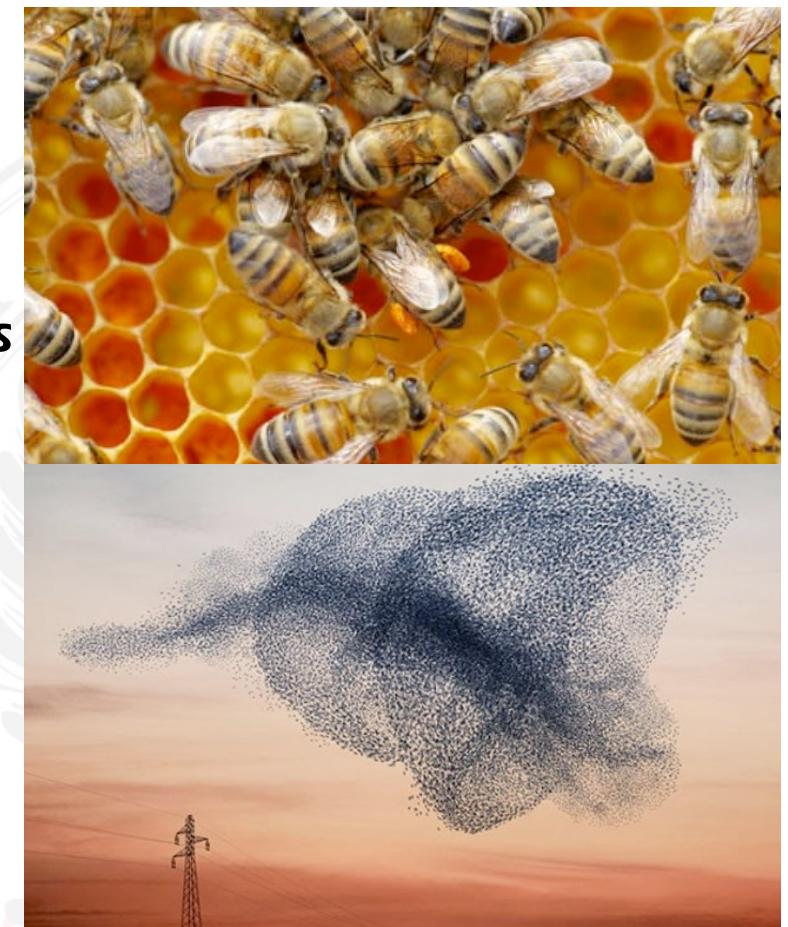
- ▶ **Cooperación:** trabajan juntos para resolver algo, normalmente para resolver problemas que están más allá de las capacidades individuales o del conocimiento de cada agente.
- ▶ **Coordinación:** Los agentes se organizan para evitar las interacciones perjudiciales y explotar las beneficiosas.
- ▶ **Negociación:** los agentes deben llegar a un acuerdo que sea aceptable por todas las partes implicadas
- ▶ **Competición:** un agente o conjunto de agentes intentan maximizar su rendimiento que provoca la minimización del rendimiento de otro u otros agentes (oponentes).

# Problemas de los Sistemas Multiagente

- ▶ Descomposición del problema.
- ▶ Comunicación entre agentes.
- ▶ Coherencia en las actuaciones.
- ▶ Representación del conocimiento de otros agentes
- ▶ Coordinación de acciones
- ▶ Gestionar el uso de recursos.
- ▶ Evitar comportamientos globales no deseados.

# Inteligencia de Enjambre

- ▶ Un ejemplo de sistemas multiagente que goza de gran popularidad es la **Inteligencia de Enjambre (Swarm Intelligence) o Inteligencia Colectiva**.
- ▶ Inteligencia de enjambre es una rama de la Inteligencia artificial que estudia el comportamiento colectivo de los **sistemas descentralizados, auto-organizados, naturales o artificiales**.
- ▶ Inspirados por la naturaleza, especialmente por ciertos sistemas biológicos, los sistemas de inteligencia de enjambre están típicamente **formados por una población de agentes simples que interactúan localmente entre ellos y con su medio ambiente**.
- ▶ Los agentes siguen **reglas simples** y, aunque no existe una estructura de control centralizado que dictamine el comportamiento de cada uno de ellos, las **interacciones locales entre los agentes conduce a la emergencia de un comportamiento global complejo**. Como ejemplo, las colonias de hormigas.

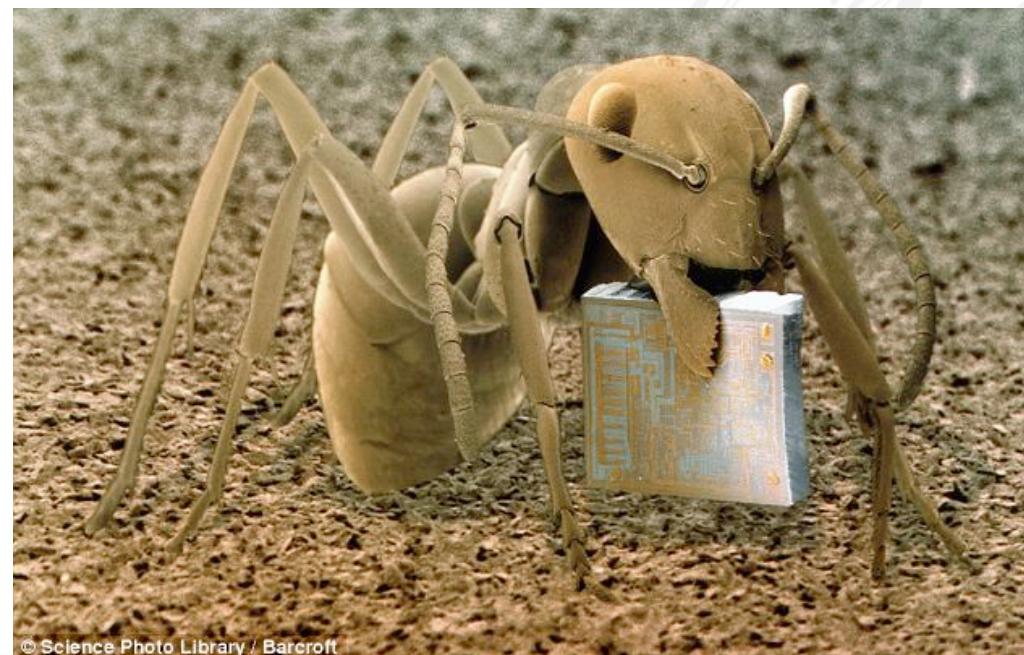


# Propiedades de la Inteligencia de Enjambre

- ▶ Compuestos por **muchos individuos simples** (agentes). Por ejemplo, hormigas, abejas, termitas, luciérnagas.
- ▶ Los individuos son relativamente **homogéneos**.
- ▶ La interacción entre los individuos está basada en **reglas simples de comportamiento** que explotan **solo información local**.
- ▶ La **información** se transmite **directamente** entre los individuos, o bien, **usando el entorno**.
- ▶ El comportamiento general del sistema es resultado de la interacción de los individuos entre sí y con el medio ambiente, es decir, **el comportamiento del grupo de auto-organiza**.
- ▶ El comportamiento de cada individuo del enjambre está descrito en términos probabilísticos: cada individuo tiene un **comportamiento estocástico que depende de su percepción local** de su entorno.

# Optimización por Colonia de Hormigas

- ▶ El **algoritmo de la colonia de hormigas, algoritmo hormiga u optimización por colonia de hormigas (Ant Colony Optimization, ACO)** es una técnica probabilística para solucionar problemas que se puedan reducir a **encontrar los mejores caminos en grafos**.
- ▶ Está basado en el comportamiento de una colonia de hormigas, concretamente en cómo las hormigas (agentes simples) encuentran la **mejor ruta desde el hormiguero a la comida**.



© Science Photo Library / Barcroft

# Hormigas e insectos sociales

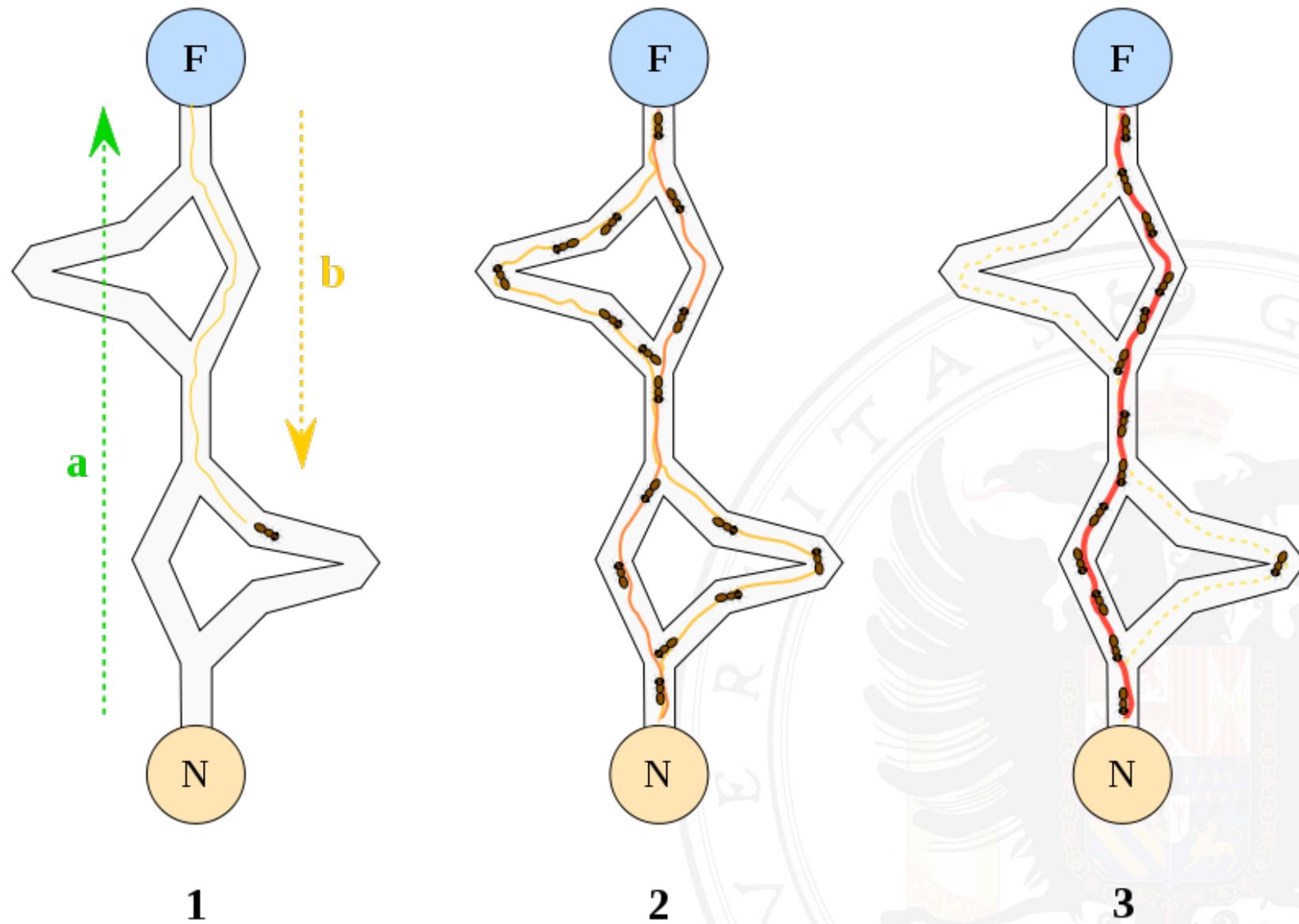
- ▶ La Tierra está poblada, aproximadamente, por  $10^{18}$  insectos. Un 2% son insectos sociales.
- ▶ De todos los insectos sociales, la familia más numerosa es la de las hormigas, que suponen el 50% del total.
- ▶ El peso medio de una hormiga está entre 1 milígramo y 5 miligramos. Haciendo unos simples cálculos nos encontramos con que el peso total del conjunto de hormigas de la Tierra es aproximadamente el mismo que el peso total de la población humana de la Tierra.
- ▶ Se ha estimado que las hormigas habitan la Tierra hace más de 100 millones de años, mientras que nosotros los humanos llevamos caminando por la ella desde hace "sólo" 50.000 años.
- ▶ Las hormigas se agrupan en colonias, que pueden estar formadas por un grupo de sólo unas pocas hormigas (hay colonias de menos de 50 hormigas), hasta enormes sociedades con más de 30 millones.
- ▶ Insectos sociales: Todos los tipos de hormigas y termitas, algunas abejas, algunas avispas.



# Hormigas y comida

- ▶ Inicialmente, las hormigas **vagan de manera aleatoria**, al azar, y una vez encontrada comida regresan a su colonia dejando un **rastro de feromonas**.
- ▶ Si otras hormigas encuentran dicho rastro, es **probable** que estas no sigan caminando aleatoriamente, puede que estas **sigan el rastro de feromonas**, regresando y **reforzándolo si estas encuentran comida** finalmente.
- ▶ Con el paso del tiempo **el rastro de feromonas comienza a evaporarse**. Cuanto más tiempo le tome a una hormiga viajar por el camino y regresar de vuelta otra vez, más tiempo tienen las feromonas para evaporarse. **Un camino corto es marcado más frecuentemente**, y por lo tanto la densidad de feromonas se hace más grande en caminos cortos que en los largos.
- ▶ Por tanto, cuando una hormiga encuentra un buen camino entre la colonia y la fuente de comida, hay más posibilidades de que otras hormigas sigan este camino.

# Hormigas y comida



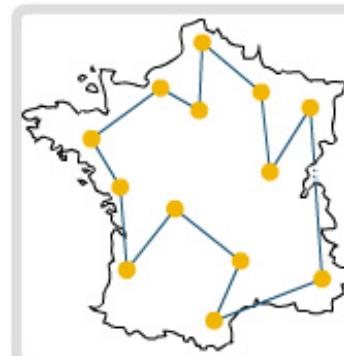
# Características ACO

- ▶ **Flexibilidad:** La colonia de hormigas puede adaptarse a un entorno cambiante.
- ▶ **Robustez:** Incluso cuando uno o más individuos falla, el resto puede seguir realizando sus tareas.
- ▶ **Auto-Organización:** las actividades no son controladas ni supervisadas por un ente central.
- ▶ **Descentralización:** ningún individuo tiene conocimiento total de la información sino que la información se encuentra distribuida entre todos los miembros de la colonia.

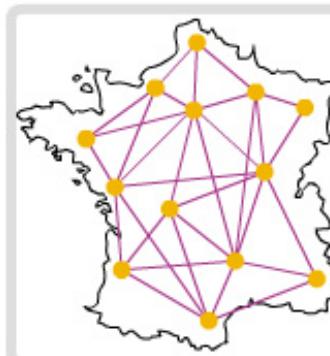


# El Viajante de Comercio (TSP)

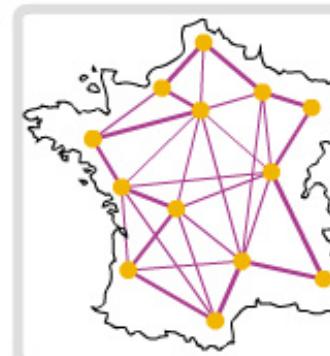
- ▶ El problema del viajante (TSP: Travelling Salesman Problem) consiste en encontrar la ruta más corta, que comenzando por una ciudad de origen visite un determinado y preestablecido conjunto de ciudades y vuelva a la ciudad original, con la restricción de que por cada ciudad sólo pase una vez. Complejidad  $O(n!)$
- ▶ El algoritmo hormiga más básico para resolver este problema consiste en un conjunto de hormigas, cada una realizando cada uno de los posibles recorridos a través de los nodos. (Ejemplo <https://www.runthemodel.com/models/325/>)



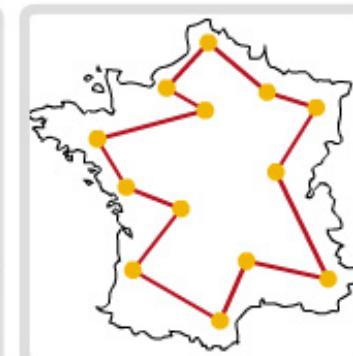
Una hormiga elige un camino y deposita un rastro de feromonas en él.



Todas las hormigas se encuentran recorriendo algún camino, depositando una cantidad de feromonas proporcional a la calidad de la solución parcial.



Cada arista del mejor camino es reforzada con una cantidad superior de feromonas.



La evaporación hace desaparecer los caminos malos.

# El Viajante de Comercio (TSP)

- ▶ En cada fase del algoritmo una hormiga decide moverse de un nodo a otro de acuerdo a las siguientes reglas:
  - Si la ciudad ha sido visitada ya o no, se visita cada nodo una sola vez.
  - Un nodo alejado tiene menos posibilidades de ser elegido (visibilidad).
  - Cuánto más intenso es el rastro de feromonas depositado en una arista entre dos nodos, más probabilidad hay de elegir esa arista.
- ▶ Cuando se ha completado el recorrido, la hormiga deposita más feromonas en todas las aristas que ha visitado, si el camino es corto.
- ▶ Después de cada iteración los rastros de feromonas se evaporan.

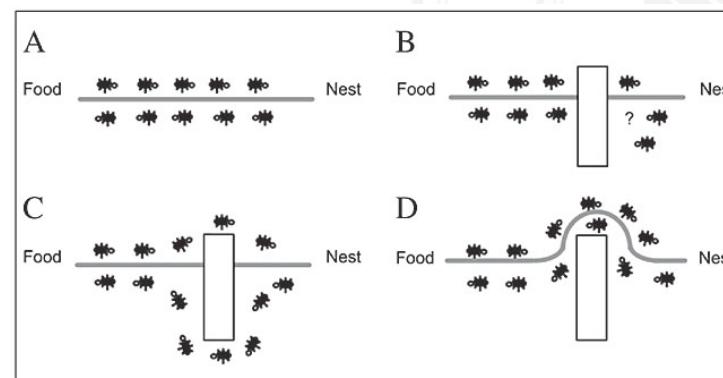


Figure 2. A. Ants in a pheromone trail between nest and food; B. an obstacle interrupts the trail; C. ants find two paths to go around the obstacle; D. a new pheromone trail is formed along the shorter path.

# El Viajante de Comercio (TSP)

- La probabilidad de que la hormiga K vaya de la ciudad i a la ciudad j viene dada por:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\nu_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\nu_{il}]^\beta}$$

- Donde,  $\tau_{ij}$  es la cantidad de feromona entre las ciudades i y j.  $\nu_{ij}$  es la visibilidad de la ciudad i a la ciudad j (la inversa de la distancia).
- $\alpha$  y  $\beta$  son dos parámetros ajustables que controlan el peso relativo de cada una de las medidas en la heurística resultante.
- Si  $\alpha=0$ , las ciudades más cercanas en cada paso son las que tienen mayor probabilidad de ser seleccionadas.
  - Si  $\beta=0$  únicamente interviene la feromona, lo que experimentalmente se comprueba que puede llevar a recorridos no muy buenos y sin posibilidad de mejora.

# El Viajante de Comercio (TSP)

- ▶ Para simular la evaporación de feromona, se introduce un nuevo parámetro,  $0 \leq \rho \leq 1$ , junto con una regla de actualización de feromona como sigue.

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$$

- ▶ Donde,  $m$  es la cantidad de hormigas (normalmente  $n=m$ ),  $\Delta\tau_{ij}^k(t)$  es la cantidad de feromona depositada por la hormiga  $k$  al pasar por ese recorrido.
- ▶ Inicialmente en todas las aristas hay una cantidad pequeña de feromona,  $\tau_0$ .

# Colonias de Abejas

- ▶ Las abejas en busca de alimento tratan de localizar la región del espacio con mayor densidad de flores, ya que es allí donde presumiblemente existe más cantidad de polen.
- ▶ Cada abeja vuela de modo errático por el espacio, recordando en todo momento cuál es la región donde ha visto más flores. A su vez, el enjambre sabe colectivamente cuál es la región del espacio, de entre todas las exploradas, donde se han encontrado más flores.
- ▶ Cada abeja variará individualmente su movimiento con arreglo a estas dos direcciones, volando hacia algún lugar intermedio.
- ▶ Es posible que la abeja durante ese sobrevuelo encuentre una región con más densidad de flores que la conocida hasta entonces (óptimo local), o incluso que la conocida por el enjambre (óptimo global); en este último caso, todo el enjambre orientará la búsqueda hacia esa nueva dirección.
- ▶ Pasado un tiempo, si se descubre otra región con mayor densidad floral, el enjambre reorientará nuevamente la búsqueda hacia allí, y así sucesivamente.
- ▶ Las abejas se comunican con una danza <https://www.youtube.com/watch?v=tnL3R8CzBkU>

# Colonias Artificiales de Abejas (ABC)

- ▶ El algoritmo de colonia de abejas (o Artificial Bee Colony -ABC-) simula el comportamiento de alimentación de las abejas melíferas.
- ▶ El algoritmo define una colmena artificial formada por una zona de comunicación (zona de baile) y tres tipos de abejas: obreras, observadoras y exploradoras.
- ▶ Hay un sólo tipo de abeja obrera por fuente de comida. Este tipo de abeja va hacia la fuente de comida, la explota y vuelve a la colmena para “danzar”.
- ▶ Cuando una fuente de comida se agota, la obrera se convierte en exploradora. En esta fase las soluciones que no son beneficiosas para el progreso de la búsqueda se abandonan, y nuevas soluciones se insertan en lugar de ellos para explorar nuevas regiones del espacio de búsqueda. El algoritmo tiene una capacidad equilibrada de exploración-explotación.
- ▶ Las abejas observadoras miran la danza de los empleados y elige las fuentes de comida en base a dicha comunicación.

# Optimización por enjambre de partículas

- ▶ Este método ha sido desarrollado a partir de la simulación de modelos sociales simplificados, como las bandadas de pájaros y los bancos de peces
- ▶ Trabaja con una población (llamada nube o enjambre) de soluciones candidatas (llamadas partículas). Dichas partículas se desplazan a lo largo del espacio de búsqueda conforme a ciertas reglas matemáticas
- ▶ El movimiento de cada partícula depende de su mejor posición obtenida, así como de la mejor posición global hallada en todo el espacio de búsqueda. A medida que se descubren nuevas y mejores posiciones, éstas pasan a orientar los movimientos de las partículas.

<http://madflame991.blogspot.com.es/p/particle-swarm-optimization-demo-1.html>

- ▶ Ha sido comparado con los algoritmos genéticos por su eficiencia, pero este algoritmo escoge el sendero de cooperación sobre el de la competencia.



# Tipos de Inteligencia de Enjambre

- ▶ Optimización de colonia de hormigas
  - ▶ Optimización enjambre de partículas
  - ▶ Optimización de múltiples enjambres
  - ▶ Algoritmo de colonia de abejas
  - ▶ Algoritmo de altruismo
  - ▶ Sistemas inmunológicos artificiales
  - ▶ Algoritmo murciélagos
  - ▶ Búsqueda de sistema cargado
  - ▶ Búsqueda Cuckoo
  - ▶ Algoritmo de búsqueda diferencial
  - ▶ Algoritmo Firefly
  - ▶ Optimización Enjambre de Luciérnagas
  - ▶ Algoritmo de búsqueda gravitacional
  - ▶ Caída inteligente de gotas de agua
  - ▶ Algoritmo de optimización magnética
  - ▶ Búsqueda de difusión estocástica
- ▶ [https://es.wikipedia.org/wiki/Inteligencia\\_de\\_enjambre#Ejemplos\\_de\\_algoritmos](https://es.wikipedia.org/wiki/Inteligencia_de_enjambre#Ejemplos_de_algoritmos)

# Aplicaciones a las Telecomunicaciones

- ▶ Enrutamiento basado en hormigas, donde cada "hormiga" es un paquete de control pequeño (aplicado en redes de cables, redes inalámbricas, redes de satélites).
- ▶ La ubicación de la infraestructura de transmisión para redes inalámbricas de comunicación (usando colonias artificiales de abejas) para maximizar la cobertura.
- ▶ Asignación de canales en redes inalámbricas.
- ▶ Asignación distribuida de recursos.
- ▶ Predicción de comportamiento de clientes.
- ▶ Redes autoorganizativas (Self-Organized Networks -SON-)
- ▶ Balanceo de carga en redes
- ▶ Gestión descentralizada de redes IP