

Auto-organización, Emergencia e Inteligencia Colectiva en SMA

Jose Aguilar
CEMISID

Auto-organización

- La auto-organización ha sido usada para explicar fenómenos:
 - Biológicos (por ejemplo, la organización de las sociedades de insectos),
 - Físicos (por ejemplo, la formación de tornados),
 - Químicos (por ejemplo, la formación de estructuras disipativas),
 - Incluso matemáticos (como los producidos con autómatas celulares).

Sistemas que pueden organizarse sin una dirección, manipulación o control externo

Sistemas en el cual sus elementos interactúan para alcanzar dinámicamente una organización espontánea, con el fin de cumplir una función o generar un comportamiento global.

Proceso en el que la organización interna de un sistema, generalmente abierto, aumenta de complejidad sin ser guiado por ningún agente externo.

- un sistema auto-organizado no sólo regula o adapta su comportamiento, sino que crea su propia organización

Auto-organización

Proceso en el que el patrón (arreglo organizado particular de objetos en espacio o tiempo) en el nivel global de un sistema emerge solamente desde las numerosas interacciones entre los componentes del nivel inferior del sistema

- Esta definición es muy cercana a la de emergencia, donde se puede ver la confusión entre los dos términos,
- Pero la emergencia y la auto-organización consideran diferentes propiedades en un sistema, representan aspectos diferentes de un sistema, entre otras cosas.
 - La esencia de la emergencia es la existencia de un comportamiento global nuevo, diferente de los elementos constitutivos del sistema.
 - La esencia de la auto-organización es un comportamiento adaptable que de forma autónoma adquiere y mantiene un orden

Características de un sistema auto-organizado

- Aumento del Orden
- Autonomía.
- Adaptación (aprendizaje, evolución).
- Robustez.
- Anticipación (cognición).
- Dinámico.

SMA: auto-organización y emergencia

Auto-organización, auto-adaptación y auto-equilibrio son propiedades fundamentales de los **SMA con propiedades emergentes**, que ninguno de los agentes individuales tiene

- La sinergia tiene que ser considerada una propiedad emergente: una mejor sinérgica hace la diferencia entre la resolución de una tarea o no.
- Otras propiedades específicas a los sistemas auto-organizados
 - toma de decisiones a nivel local,
 - Escalables, flexibles,
 - de baja observabilidad y
 - pobre controlabilidad.

Insumos para un sistema auto-organizado

- *Retroalimentación Positiva*: permite la creación de estructuras.
- *Retroalimentación Negativa*: se combina con la retroalimentación positiva para estabilizar un patrón colectivo.
- *Amplificación de las Fluctuaciones (Aleatoriedad)*: No sólo las estructuras emergen, a pesar de la aleatoriedad, sino que la aleatoriedad es normalmente fundamental ya que permite que nuevas estructuras se desarrollen.
- *Múltiples Interacciones*: la auto-organización generalmente requiere de una densidad mínima de elementos/individuos capaces de hacer uso de los resultados de sus actividades, como también de las de los otros.

Mecanismos que Generan Comportamiento Colectivo

A. Retroalimentación

— Retroalimentación Positiva:

- Reclutar
- Reforzar

— Retroalimentación Negativa:

- Saturación
- Competición
- Exhausto

Mecanismos que Generan Comportamiento Colectivo

Interesante: Interacción indirecta

- Mínima comunicación directa entre agentes
- Flexibilidad para responder a perturbaciones
- Coordinación de actividades a través del ambiente

Qué produce la Auto-organización?

Estructuras espacio-temporales

Múltiples estados estables

Bifurcaciones

Auto-organización y SMA

- Los sistemas multiagente pueden manifestar auto organización, así como otros comportamientos complejos, incluso cuando las estrategias individuales de todos sus agentes son simples.
- Casos interesantes:
 - Los agentes, así como los sistemas, sean adaptativos,
 - el sistema sea auto-similar: propiedad de un objeto en el que el todo es exacta o aproximadamente similar a sus partes,



Auto-organización y SMA

- interacción entre los agentes como la base del entendimiento de un sistema (su funcionalidad y evolución).
- Los agentes interactúan (comunican, coordinan, negocian) con cada uno, y con su ambiente.
- Usualmente, en un SMA la interacción no está predefinida, y no hay objetivos globales para el sistema.

Las dinámicas de interacción entre un agente y su ambiente originan una estructura o funcionalidad emergente.

Ejemplos de auto-organización en los SMA

- Cooperación entre los agentes
- Distribución de tareas y recursos,
- Coordinación de acciones,
- Resolución de conflictos, entre otros.

**Agrupamiento
de especialistas,**

**Formación de
Formas
geométricas**

Auto-organización y SMA

- Es necesario entender la relación entre el comportamiento local y global:
¿cómo el comportamiento colectivo surge de muchos agentes que interactúan a nivel local, y cómo podemos programar las Interacciones de los agentes locales simples para lograr los comportamientos globales que queremos?
- Paradigmas que inspiran la auto-organización en los SMA:
Algoritmos (muchos producen inteligencia colectiva), sobre todo de la biología multicelular y los insectos sociales.

Auto-organización y SMA

Ejemplo de corrientes de SMA Bio-inspirados.

- **Modelos y teoría de SMA Bio-inspiradas**
 - Se basan en modelos inspirados por la auto-organización y auto-reparación de comportamientos en la biología.
 - El objetivo es mostrar cómo los principios biológicos de diseño puede ser formalmente capturado, generalizado, y analizado teóricamente desde los SMA.
- **SMA Bio-inspirados para robótica y redes de sensores**
 - Programación de sistemas integrados que se basan en un gran número de agentes relativamente barato y simple, por ejemplo, robots modulares reconfigurables, robótica de enjambre, y redes de sensores.
 - Diseño, análisis e implementación de algoritmos descentralizados, como base para la relación global-local
- **Sistemas Multi-celulares**
 - Modelos matemáticos y computacionales de comportamiento de las células para investigar cómo a nivel del sistema surgen propiedades en el desarrollo multicelular.
 - Dilucidar la relación entre los programas de celulares locales y los resultados globales a nivel de los tejidos durante el desarrollo y la enfermedades.

El papel de los patrones en la emergencia de los sistemas

- ¿Cómo podemos diseñar el comportamiento del agente a fin de dejar que la propiedad deseada surja? => **hacer frente a la dimensión individual**
 - Elaborar una estrategia de descomposición del problema específico y de interacción entre las partes descompuestas
 - Observar sistemas que consiguen resultados similares, y aplicar ingeniería inversa de la estrategia:.

Un patrón conocido muestra las propiedades deseadas emergentes.

- *Los patrones* proporcionan efectivas soluciones reutilizables a problemas recurrentes,

El papel de los patrones en la emergencia de los sistemas

- *Los patrones* no sólo especifican la estructura, sino también la dinámica,

Es muy poco probable encontrar un patrón que encaja completamente un problema dado.

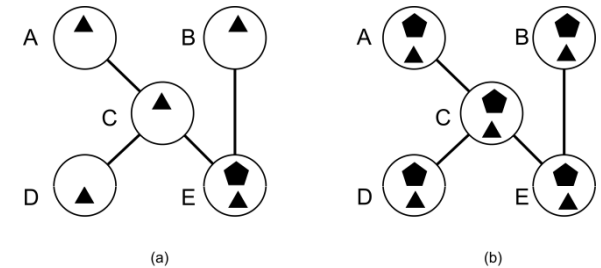
Debido a las complejas interacciones de los sistemas las pequeñas modificaciones puede dar lugar a resultados inesperados.

Verificación automática , al ser los modelos estocásticos. se hace más difícil (**MASOES, etc.**)

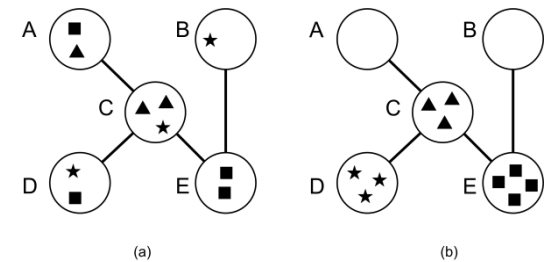
El papel de los patrones en la emergencia de los sistemas

- **Patrón de réplica:** Los sistemas naturales por lo general cuentan con mecanismos de replicación con el fin de aumentar la seguridad y robustez. Por ejemplo cada célula del cuerpo humano posee una copia local del ADN: esto permite la recuperación de mutaciones menores. Además, la replicación reduce el tiempo requerido para acceder a un recurso, ya que:

- (i) copias locales son más fáciles de alcanzar y
- (ii) varias copias se pueden usar al mismo tiempo,

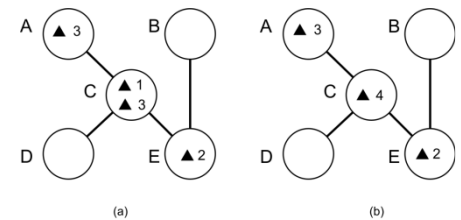
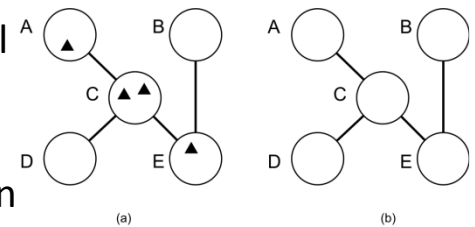


- **Patrón de tipo colectivo:** Los insectos sociales tienden a organizar los elementos en su entorno de acuerdo a criterios específicos, por ejemplo: las crías, y las larvas en las colonias de hormigas



El papel de los patrones en la emergencia de los sistemas

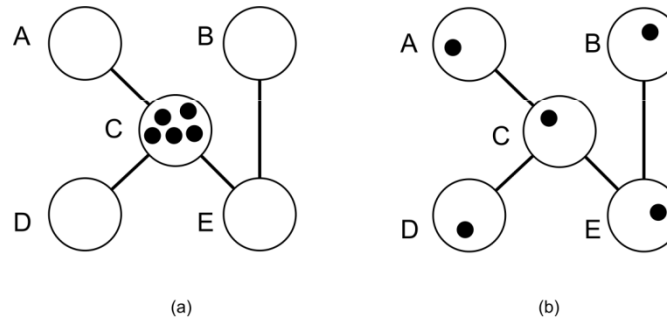
- **Patrón de evaporación:** En insectos sociales coordinación de las colonias a menudo se logra por el uso de sustancias químicas (feromonas), que actúan como marcadores para actividades específicas (por ejemplo búsqueda de comida). Específicamente, estas sustancias están reguladas por los procesos ambientales de agregación, difusión en el espacio y evaporación a través del tiempo. La evaporación es un proceso observado en la vida cotidiana, aunque con implicaciones diferentes: por ejemplo, de la intensidad de un aroma es posible deducir cantidad y distancia de su fuente, su concentración rastrea actividades: p.e. su ausencia implica ninguna actividad.
- **Patrón de agregación:** feromona depositada en el medio ambiente es espontáneamente agregados. La agregación es un mecanismo de refuerzo y es también observable en humanos en las tareas sociales. El mecanismo de ranking es un ejemplo típico: cuando se navega por Internet alguien encuentra un hecho interesante, él / ella puede dejar un comentario (refuerzo) que suele ser anónima y automáticamente se agrega con los comentarios de otros usuarios.



la evaporación es impulsado por el medio ambiente y la agregación es impulsado por un usuario. Cuando se utilizan combinadas se permite un lazo cerrado de retroalimentación positivo / negativo, lo que permite auto-regular al sistema autónomico auto-organizado

El papel de los patrones en la emergencia de los sistemas

- **Patrones de difusión** : Cuando la feromona se deposita en el entorno espontáneamente tiende a difundirse a los lugares vecinos. Este proceso, llamado de difusión, es omnipresente en la naturaleza con nombres diferentes, por ejemplo, osmosis en la química. A partir de un estado arbitrario, la difusión eventualmente distribuye la información por igual en todos los nodos



Si bien los procesos de agregación y la evaporación son a menudo utilizados en combinación y actúan localmente, la difusión se puede utilizar sola y requiere una noción de topología.

Con respecto a replicación, en la difusión la cantidad inicial de información se extienden espacialmente: aunque, otras formas de difusión puede ser concebida para producir gradientes estables

Reconocimiento de Patrones

- Aprendizaje no dependen siempre de la conciencia
- También se aprende de forma inconsciente, depende de:
 - Almacenar una información y saber donde encontrarla
 - Reconocer y responder a patrones
- Patrón en el tiempo es uno de los milagros de la emergencia: barrios, etc.

Reconocimiento de Patrones

- Es inteligente la web?
- Cerebro de la colonia es la suma de miles de decisiones de las hormigas
 - Tiene la colonia personalidad
 - Neurona=hormiga Feromona=neurotransmisores
- Web cada vez interconecta mas a seres concientes
- Inteligencia requiere tanto conectividad como organización (p.e patrones) y como se estructuran.
 - Ciudades= barrios
 - Cerebro= zonas
- Portales y buscadores surgen por desorganización de la web

Reconocimiento de Patrones

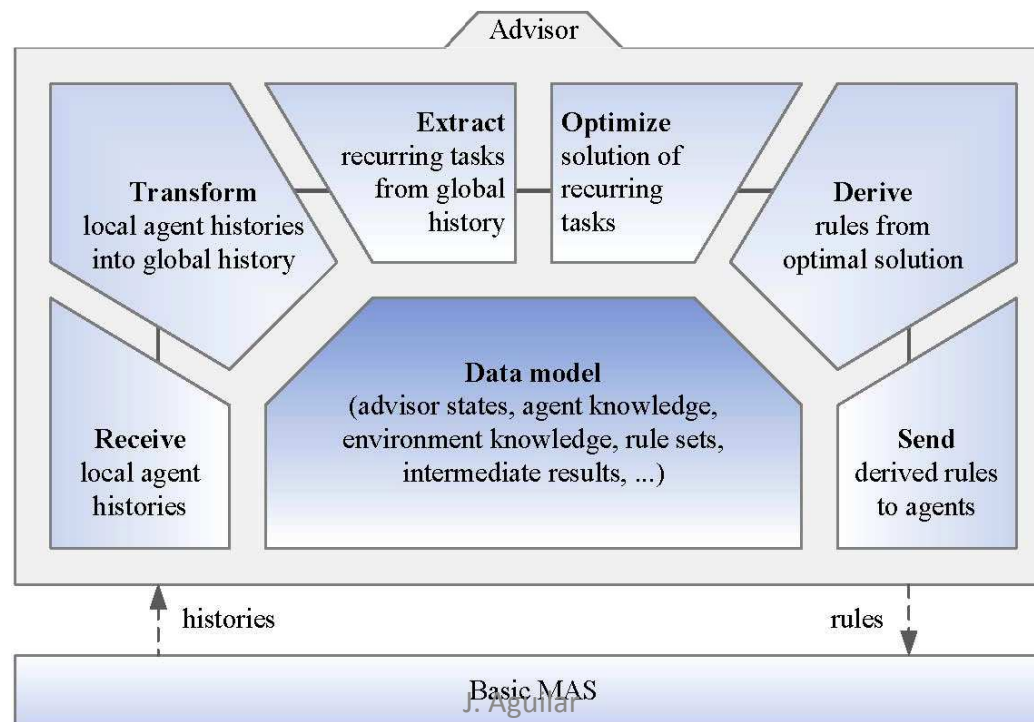
- Organización sirve para seguir fines:
 - Mover músculos para alcanzar objetivos
- Web: genio con la conexión y pésimo con la estructura
- Pero ya empiezan a aparecer macro-patrones:
 - Distribución de sitios web y su publico
 - Pero es más como una bola de nieve que como un barrio
- Auto-organización requiere energía creativa, pero debe canalizarse para producir inteligencia

Algoritmos que buscan patrones generan capacidades emergentes

Ejemplo SMA auto- organizado y emergente

Ejemplo SMA auto-organizado y emergente

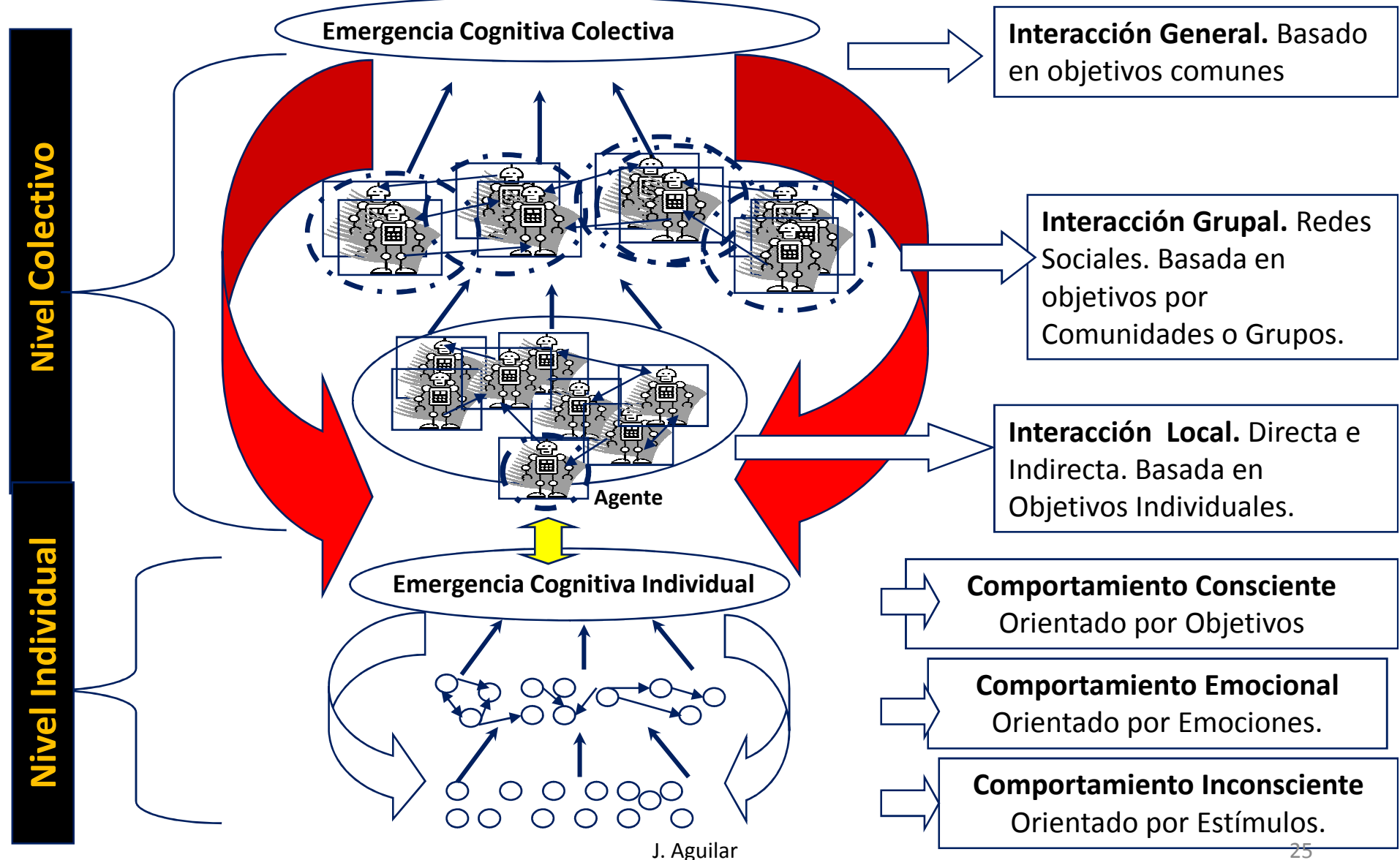
- Introducir un **asesor**, un miembro del equipo de agentes que recoge información sobre los problemas que un sistema auto-organizado emergente resuelve con el tiempo,
- El asesor identifica el comportamiento ineficiente del sistema y aconseja a los otros agentes para evitar comportamientos ineficientes en el futuro.



Ejemplo SMA auto-organizado y emergente

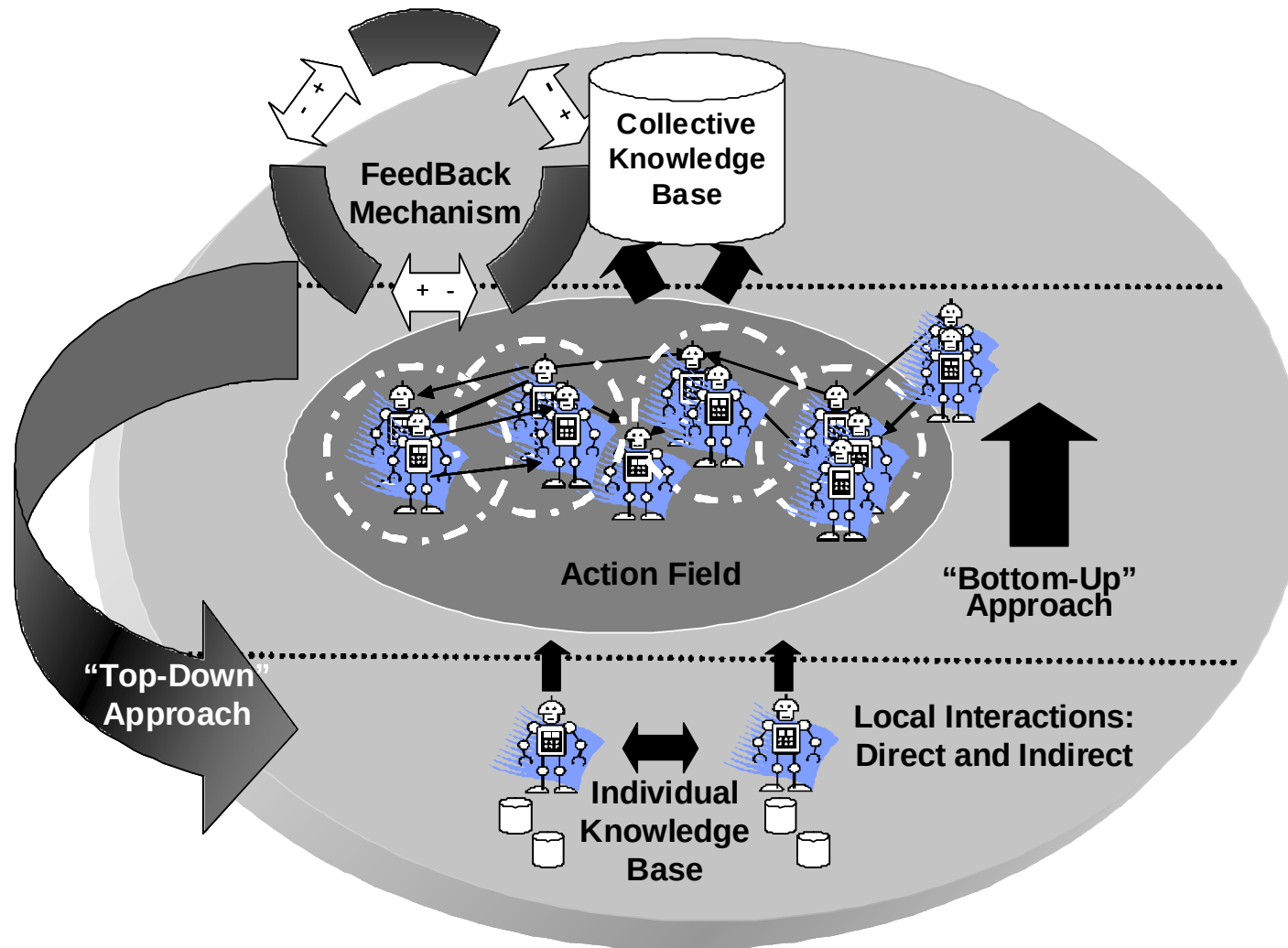
- Para usar un asesor las instancias de los problemas que el sistema resuelve deben contener un buen número de tareas repetitivas que el asesor es capaz de identificar y utilizar como base para su asesoramiento.
- Los consejos que él da pueden ser definidos como reglas de excepción para el agente que se quiere ayudar a ser más eficiente.
- Dos ejemplos de tipos de consejos:
 - *ignorar una regla* : es decirle a un agente que no considere hacer una determinada tarea, dejándola para un agente más adecuado (esperar)
 - *regla pro-activas*: le dice a un agente hacer los preparativos para hacer una tarea antes que el agente ni siquiera sepa que la tarea hay que hacerla (eso se hace en un momento oportuno).

Ejemplo SMA auto-organizado y emergente: MASOES (Multiagent Modeling for Self-Organizing and Emergent Systems)



MASOES

Componentes en el Nivel Colectivo



Diapositiva 26

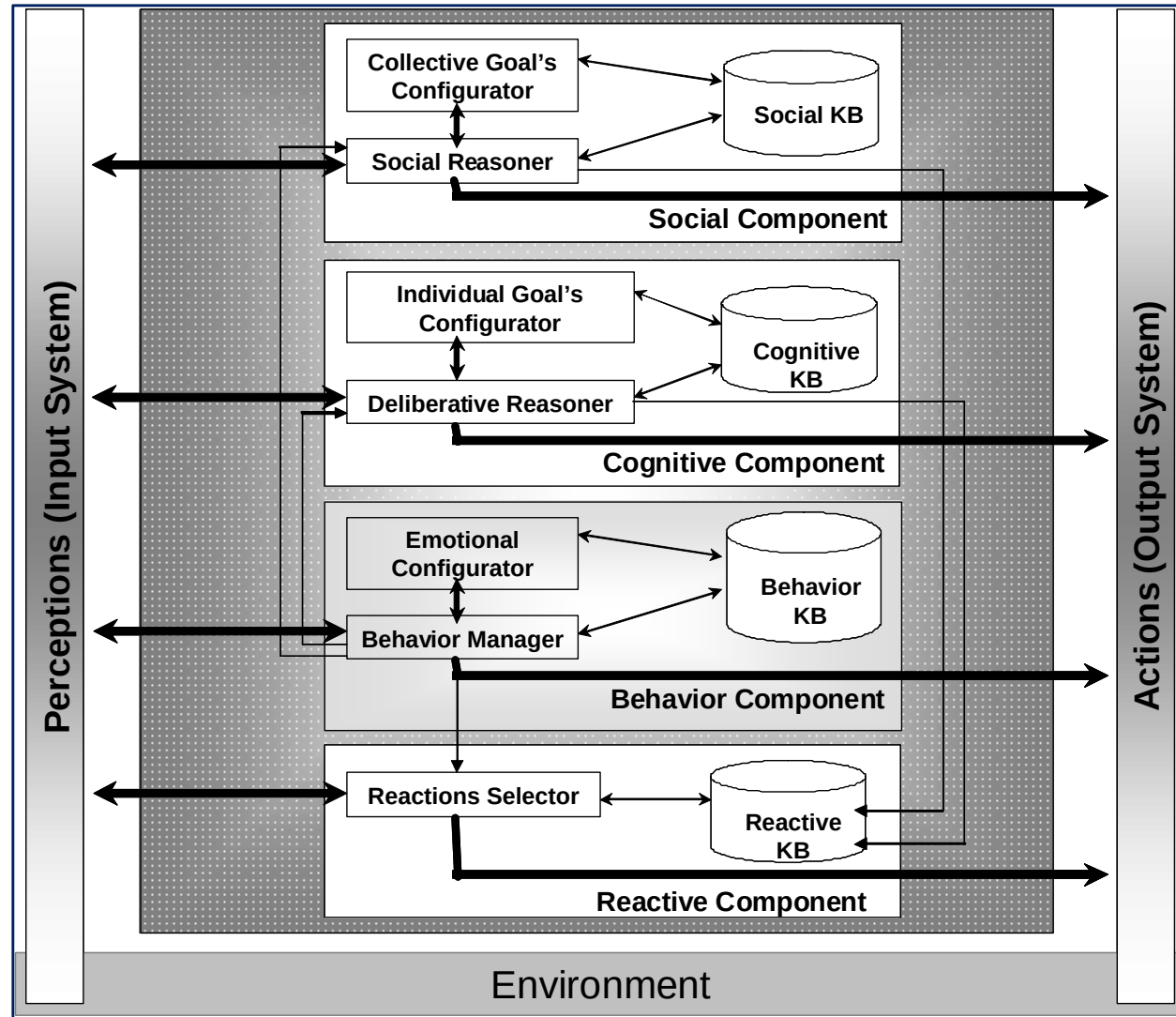
VAC2

coloca aqui de manera explicita donde se da la general y grupal (ya e lo habia comentado antes

Valued Acer Customer, 29/09/2011

MASOES

Componentes en el Nivel Individual



Metodología para modelar sistemas reales con MASOES

Fases

- 1. Análisis.**
- 2. Diseño.**
- 3. Integración.**
- 4. Evaluación.**

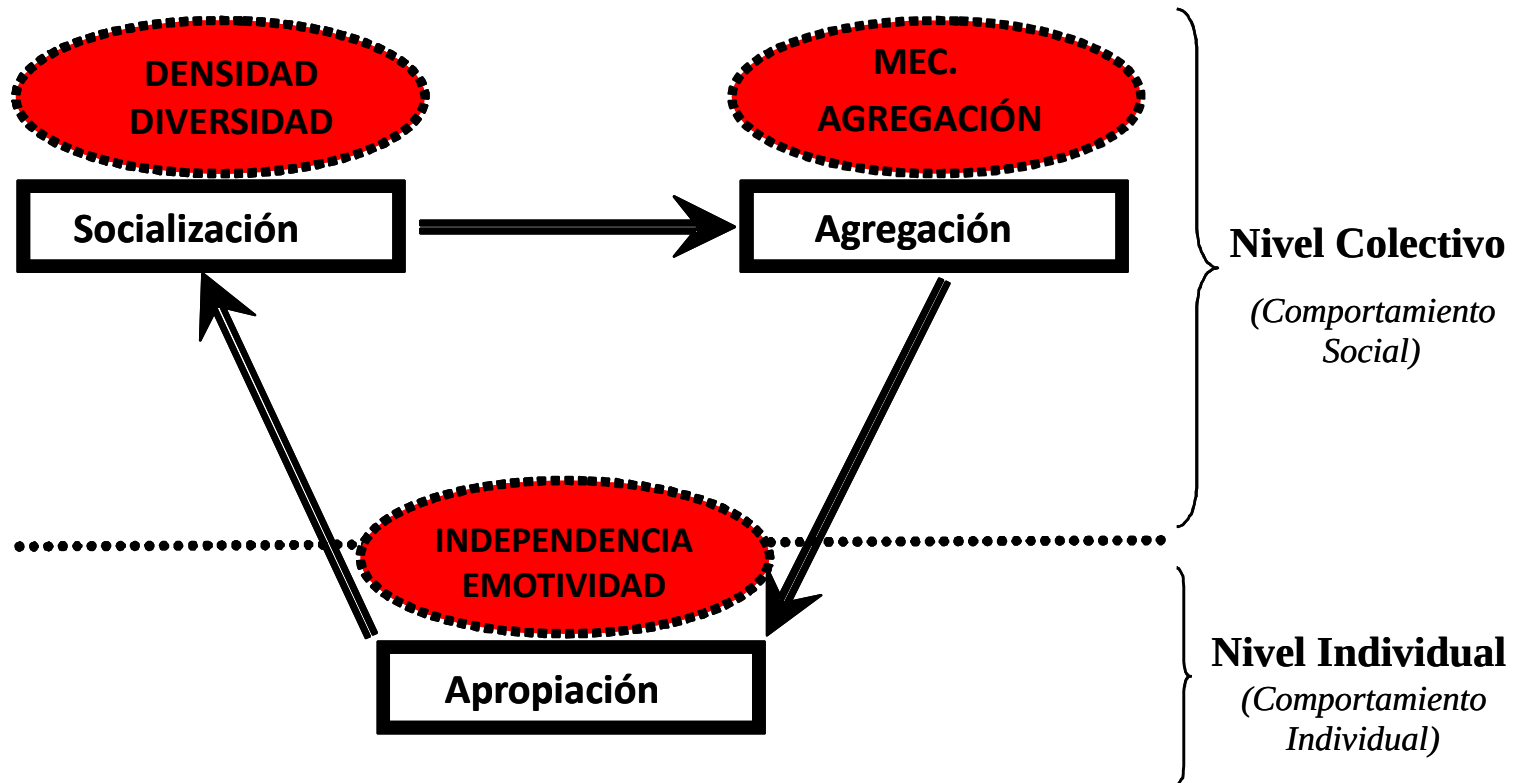
Metodología para usar MASOES

FASE	DESCRIPCION
Análisis	Describe agentes, tareas e interacciones en cada nivel y entre ellos (local, grupal y general).
Diseño	Nivel Individual: • Representar componentes reactivos, cognitivos, sociales y comportamentales • Asociar un comportamiento o grupo de ellos (reactivo, cognitivo, or imitativo) a c/agente Nivel Colectivo: • Describir el conjunto de reglas de interacción; Campo de Acción o Mecanismo de Agregación; Bases de conocimiento; Objetivos Colectivos. • Describir los procesos colectivos, incluyendo: formación de Redes Sociales mecanismos de retroalimentación, etc..

Metodología para usar MASOES

FASE	DESCRIPCION
Integración	Juntar el conocimiento individual y colectivo de agentes a través de la fase de gestión de conocimiento: Socialización, Agregación y Apropriación.
Evaluación	Probar las capacidades emergentes y auto-organizadas del sistema modelado a través del metodo de Verificación.

MASOES: fase de Integración



- Socialización (Conversión de conocimiento implícito a explícito),
- Agregación (Depuración del conocimiento explícito) y
- Apropiación (Aprendizaje de los individuos desde el colectivo)

METODO DE VERIFICACION

BASADO EN

Paradigma de la Multitud

Mapas Cognitivos Difusos (FCMs)

DEFINICION

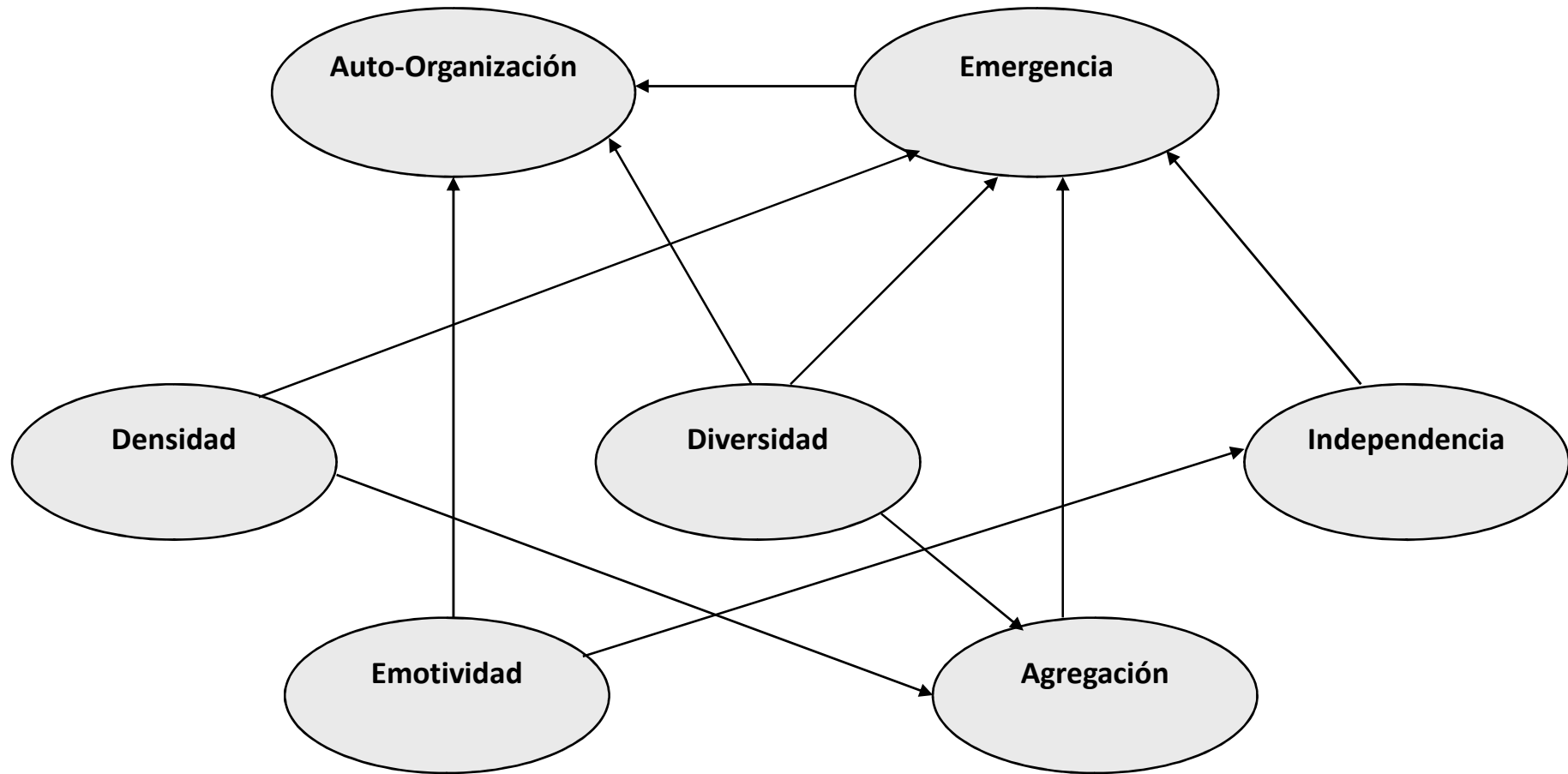
Conceptos vinculados a las propiedades de auto-organización y emergencia

Conceptos Arquitectonicos

Componentes Comportamentales del Individuo

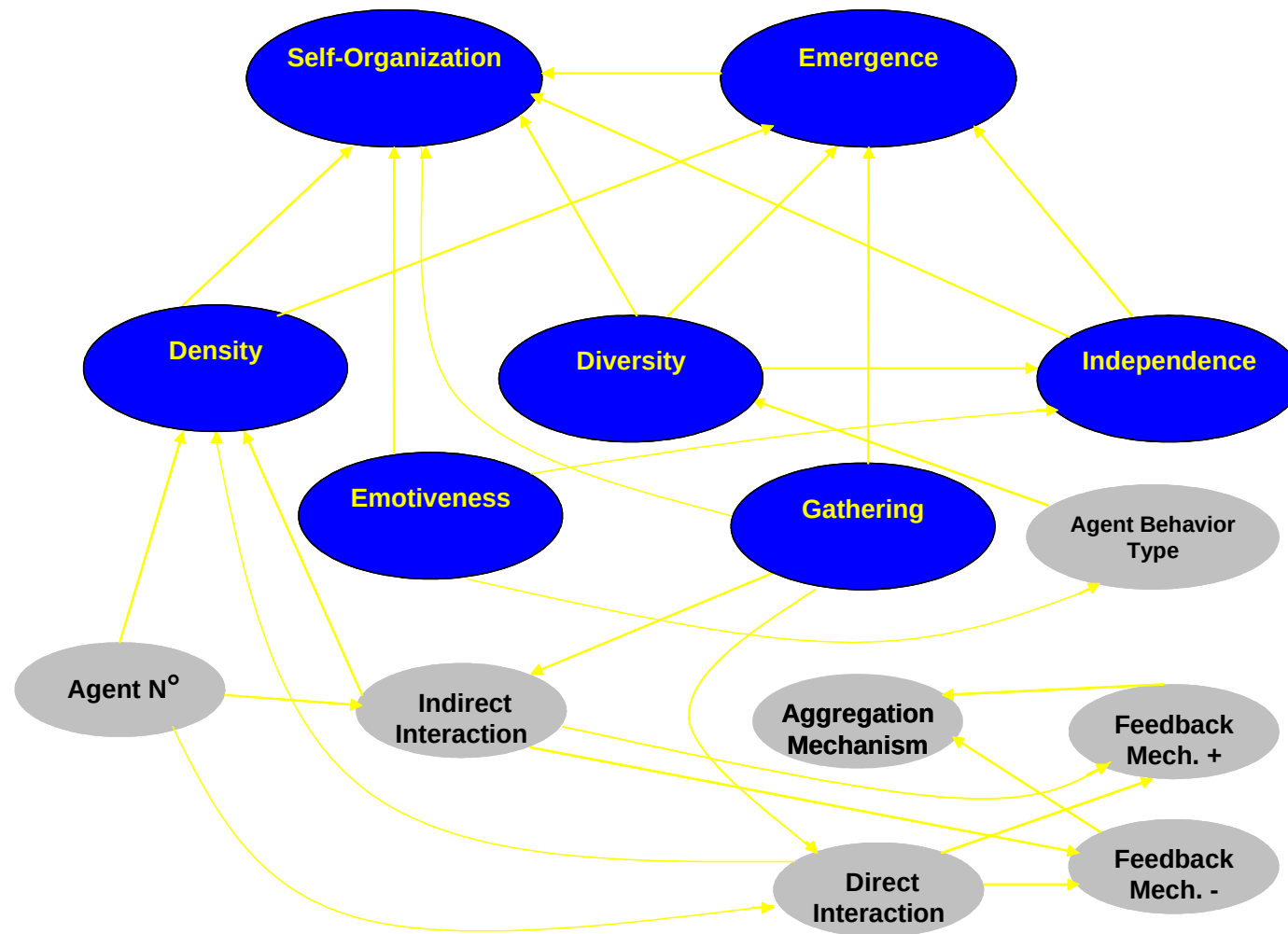
3 FCM s

Nivel I : Conceptos vinculados a las propiedades de auto-organización y emergencia



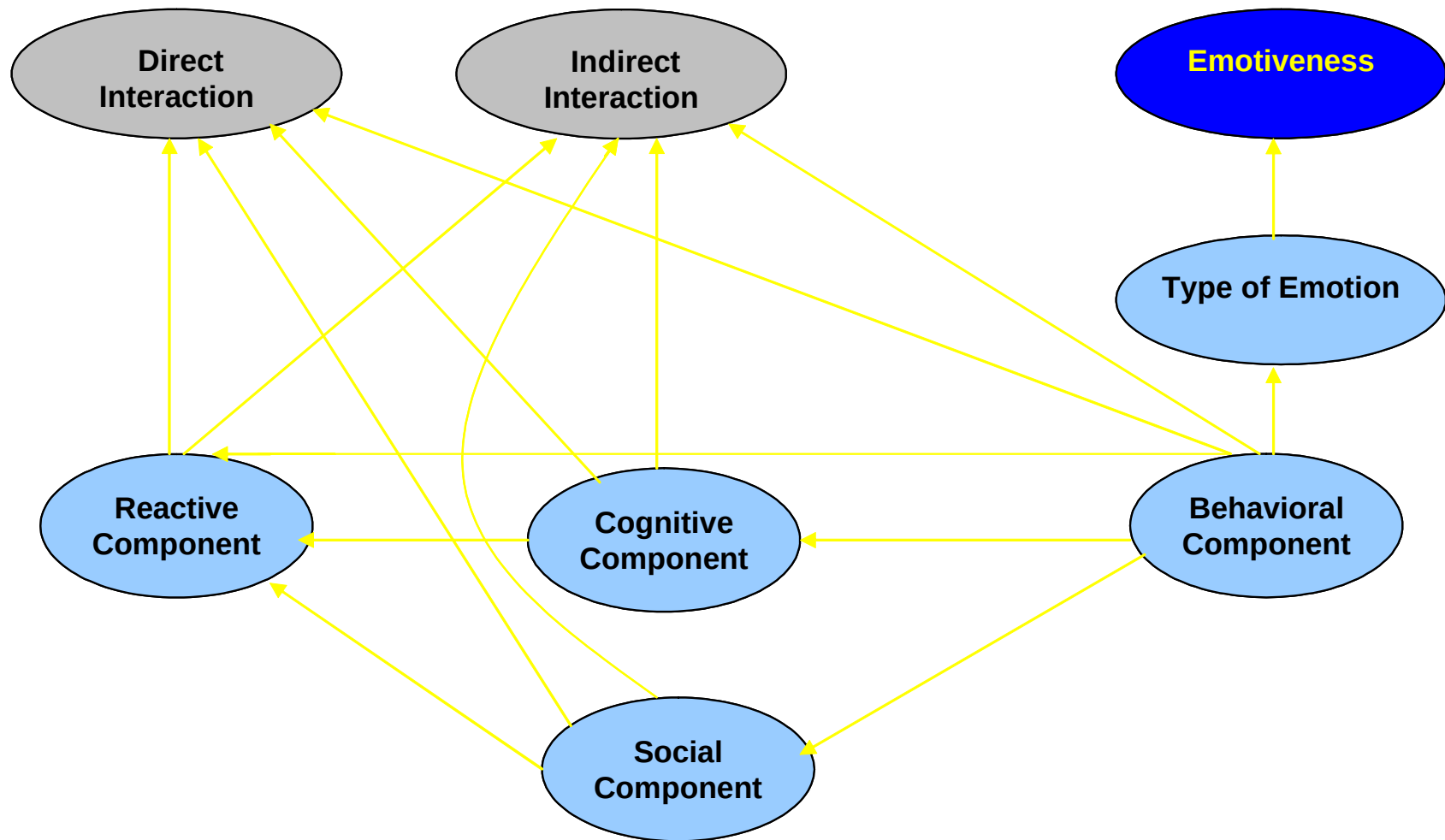
METODO DE VERIFICACION

Nivel II: Conceptos Arquitectonicos



METODO DE VERIFICACION

Nivel III: Componentes Comportamentales del Individuo



METODO DE VERIFICACION

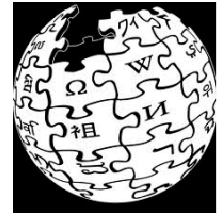
Fases

Inicialización	Ejecución
1. Definir todos los conceptos y sus estados iniciales (por expertos)	1. Mientras el sistema no converge en un estado estable : 2. Obtener los valores de las relaciones causales. a. Obtener estado actual de los conceptos . usar FCM Designer.
2. Ajustar las relaciones causales	
3. Definir los escenarios hipotéticos	
	2. Interpretar los Resultados.

CASO de ESTUDIO: WIKIPEDIA

Generalidades

Wikipedia es una enciclopedia libre que cualquiera puede editar. Esta enciclopedia es el resultado del trabajo colectivo donde cada artículo es el producto de muchas contribuciones derivado de las mejoras y extensiones de un borrador inicial.



1

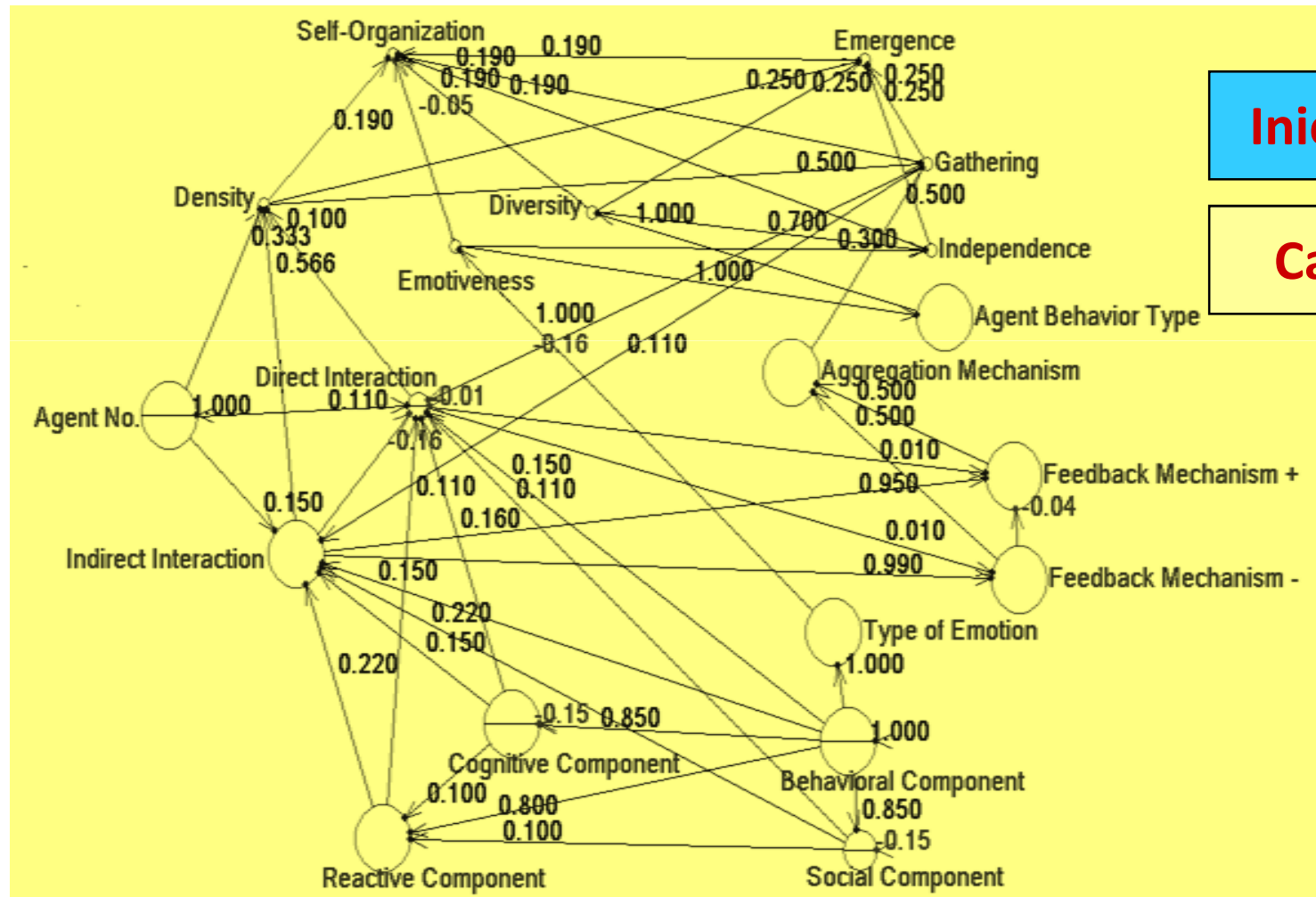
**Instanciar a los
componentes y procesos
de los niveles individuales
y colectivos de Wikipedia**

2

**Verificar la auto-
organización y
comportamiento
emergente en
Wikipedia**

Inicialización

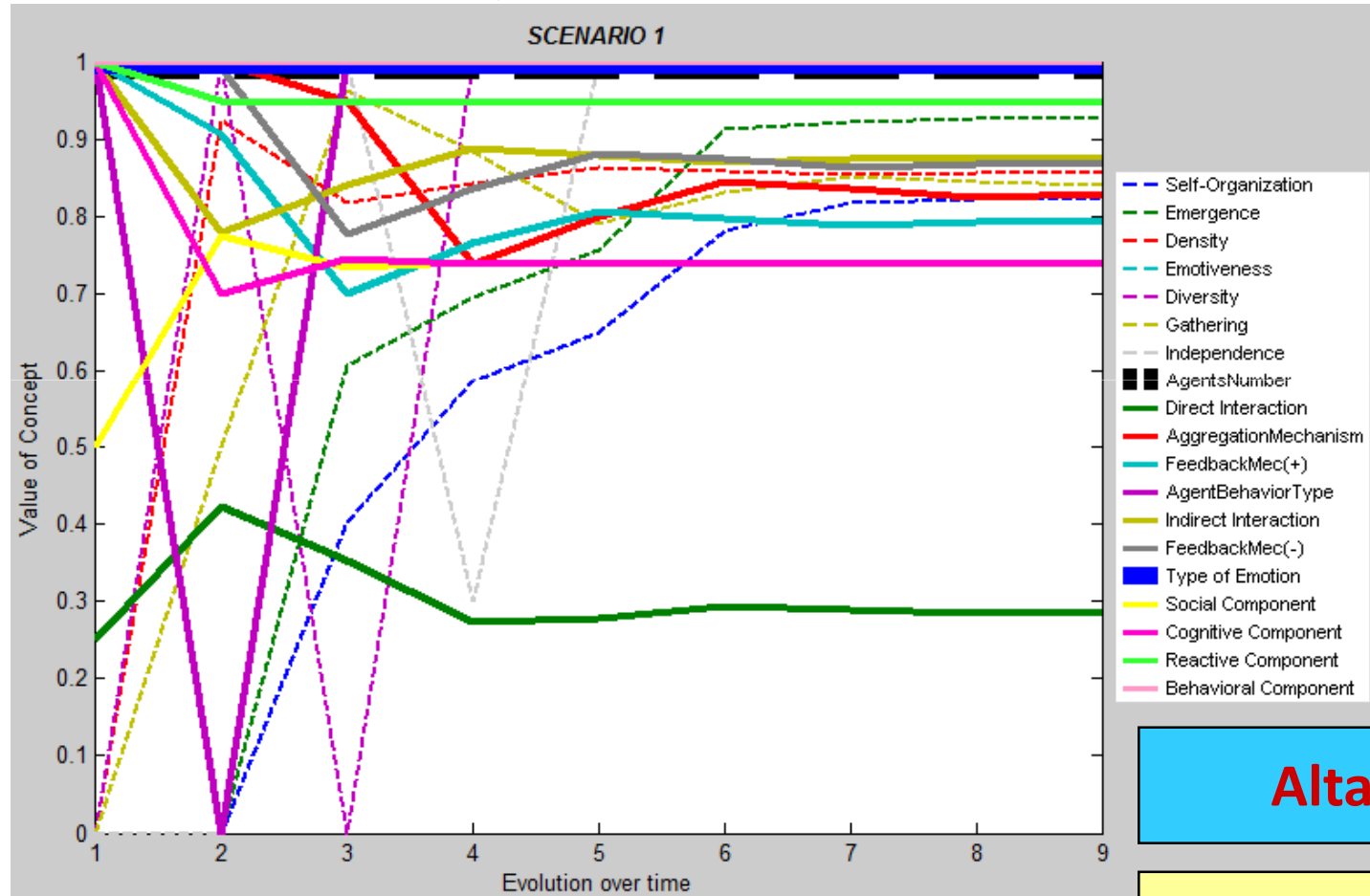
Caso Ideal



CASOS de ESTUDIO: WIKIPEDIA

Fase de Evaluación

Resultados para escenario 1

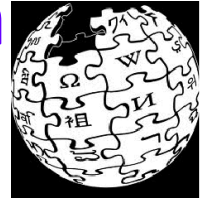


Alta A.O. y E.

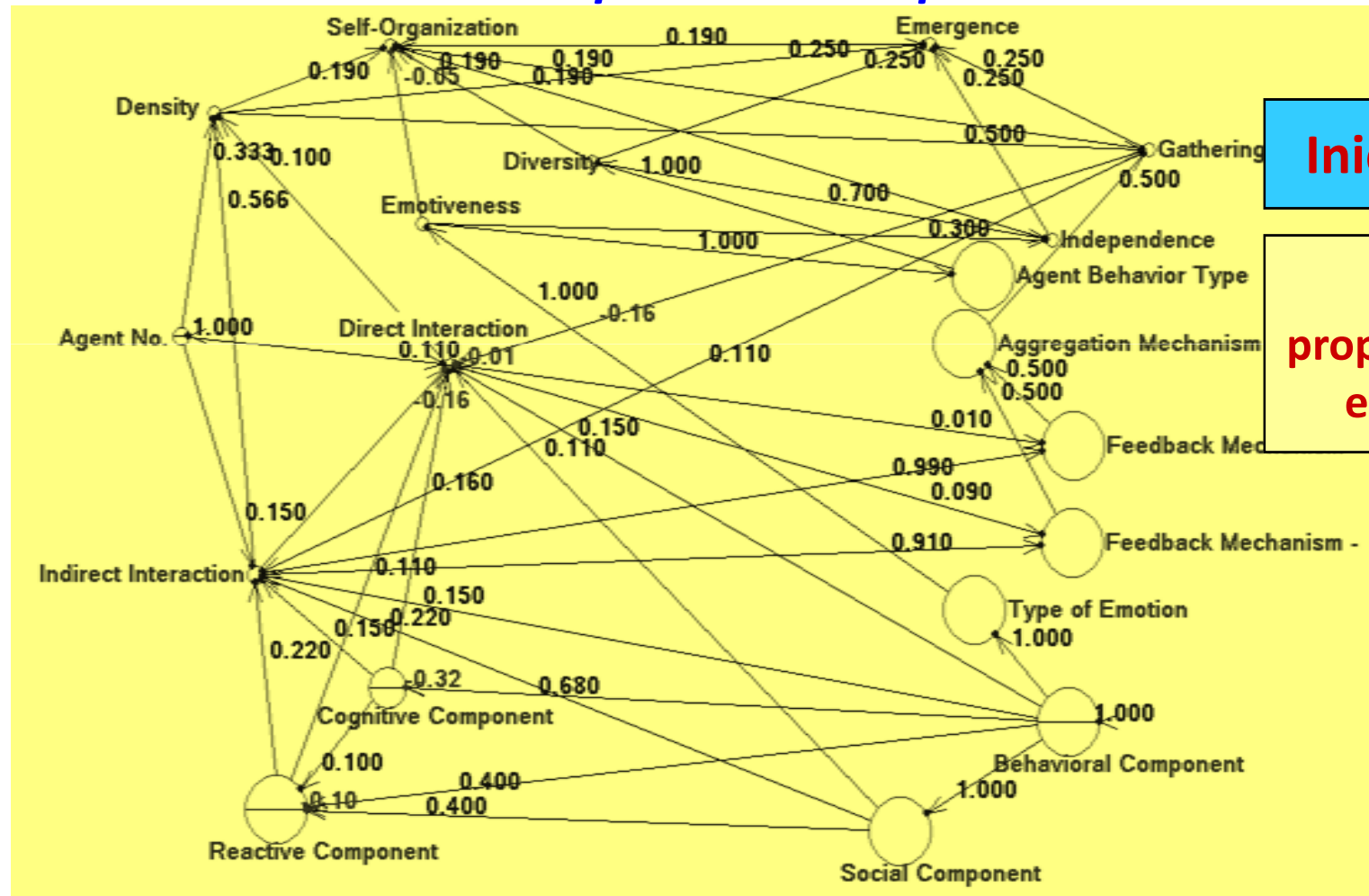
Comportamiento Social

CASOS de ESTUDIO: WIKIPEDIA

Fase de Evaluación



Escenario 2: Wikipedia en el Español



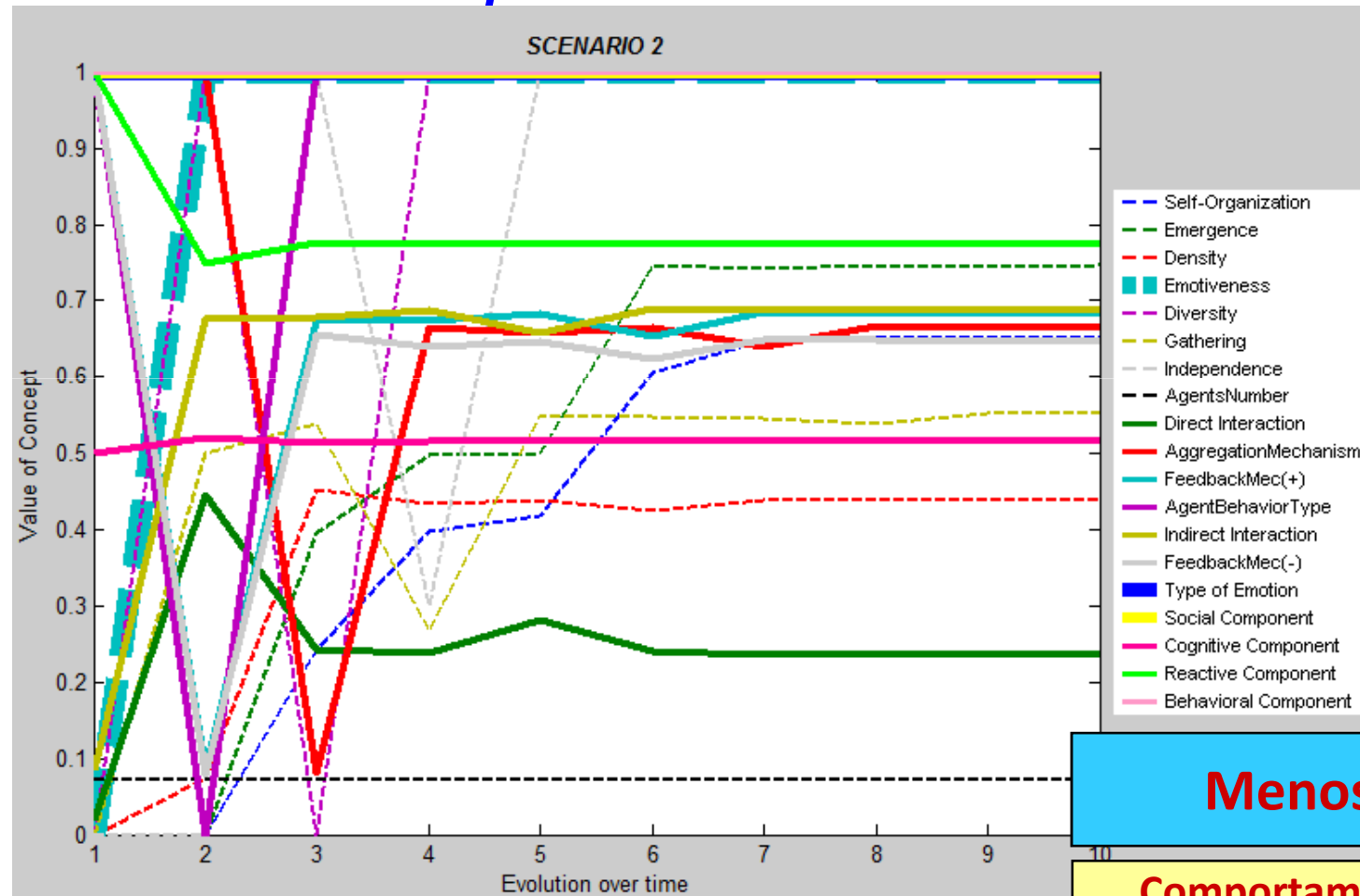
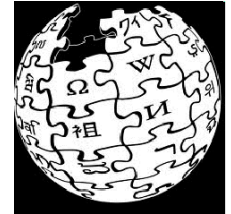
Inicialización

**Valores
proporcionales a
escenario 1**

CASOS de ESTUDIO: WIKIPEDIA

Fase de Evaluación

Resultados para escenario 2



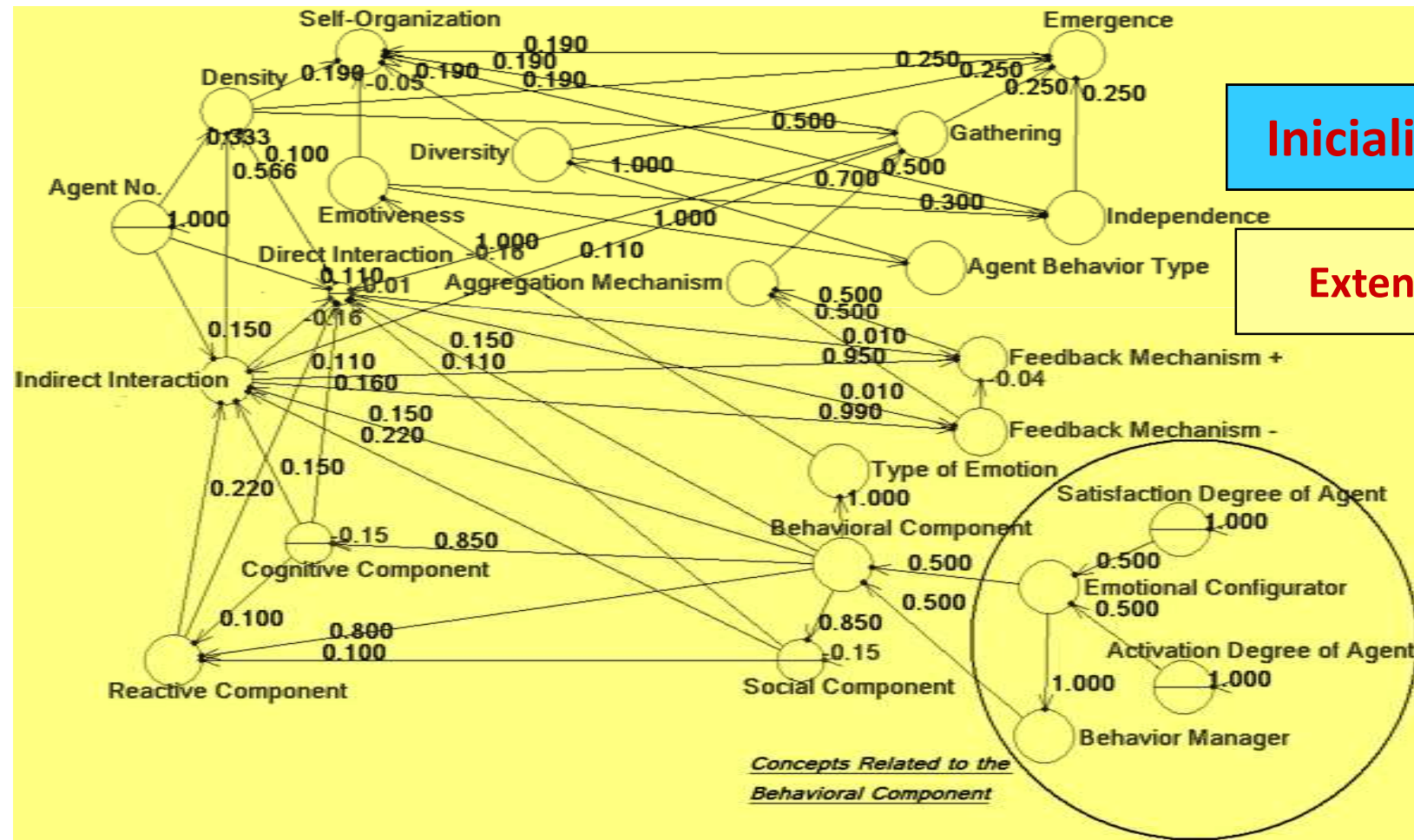
Menos A.O. y E.

**Comportamiento Individual
más que Social**

CASOS de ESTUDIO: WIKIPEDIA

Fase de Evaluación

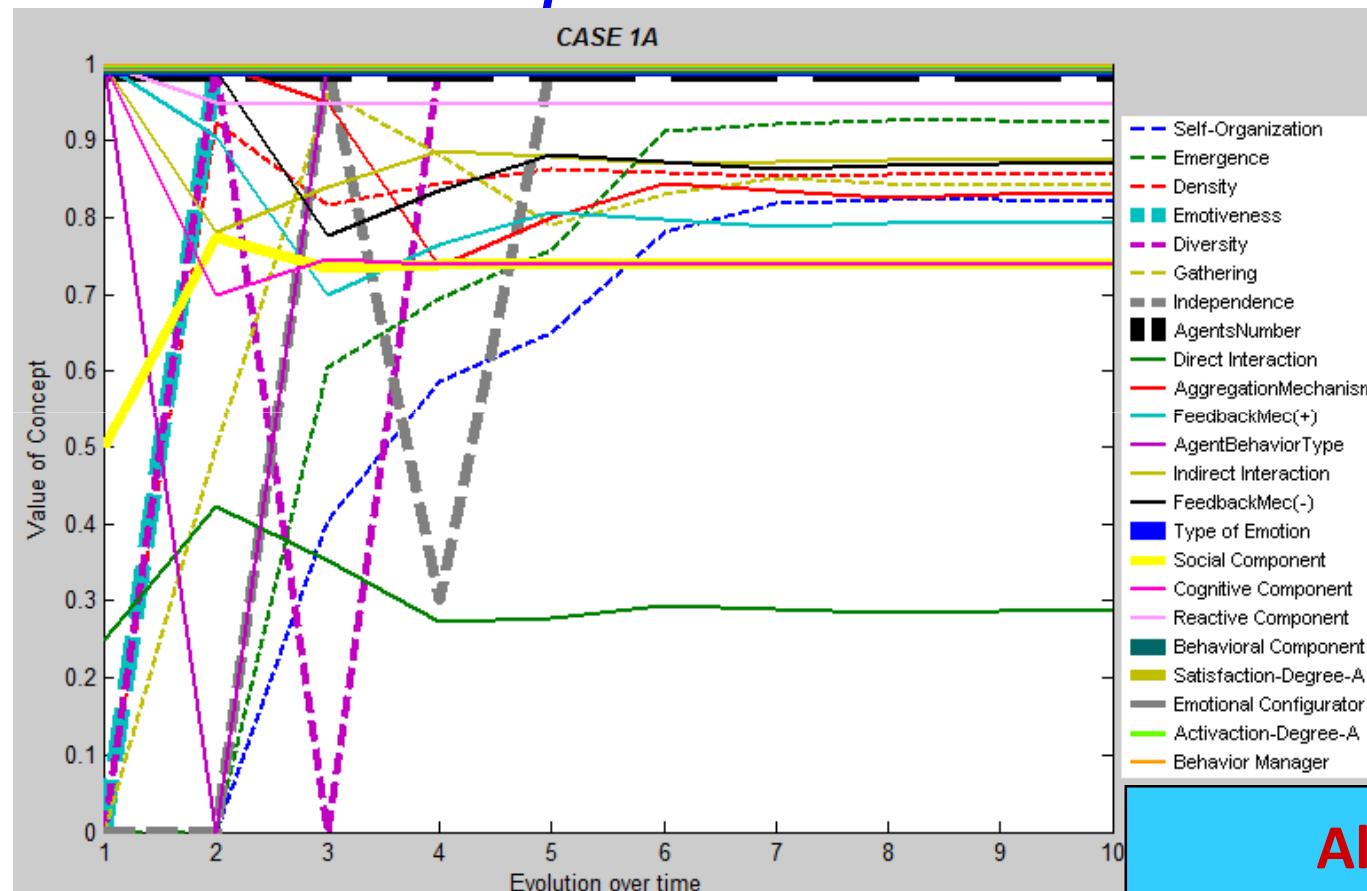
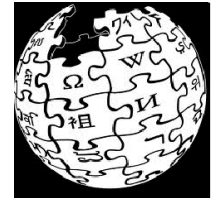
Escenario 3: Regulación Social y Emocional en Wikipedia



CASOS de ESTUDIO: WIKIPEDIA

Fase de Evaluación

Resultados para escenario 3



Alta A.O. y E.

Grado Satisfacción Alto
Emociones Sociales e Individuales

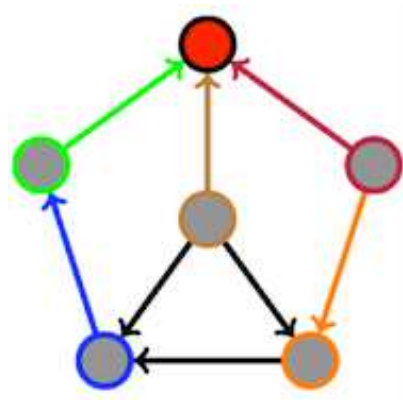
Sistemas Dinámicos como Redes Computacionales de Agentes para la evaluación de sus Propiedades Emergentes

2. Ampliar la visión de los Sistemas Dinámicos (**SD**) desde la perspectiva de sus propiedades emergentes:

- **A**uto-organización (Orden auto-impuesto)
- **H**omeostasis (Auto-regulación, Equilibrio Dinámico)
- **A**utopoiesis (auto-mantenimiento, auto-producción)

(Enfoque **AHA'**)

Agente
(Nodo)



Enlace de
Información
(Arista)

Sistema Multi-Agentes

$$SMA \langle W, \Gamma, \Lambda, Op, rp \rangle$$

W es el conjunto de los estados del **Ab** que rodea a los **Ags** , representado por las variables de estado del **SD** , así $W = \{w_i, \dots, w_n\}$, donde w_i : es variable de estado.

Γ_{Ag} es el conjunto de influencias de cada **Ag** para generar nuevos eventos

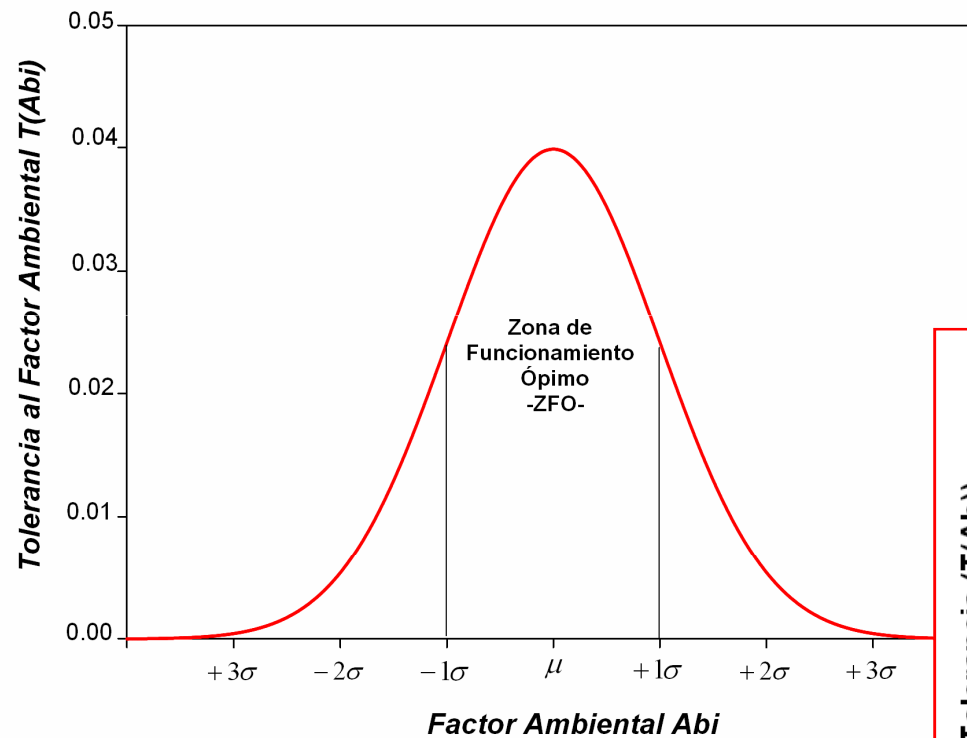
Λ son las leyes que rigen al **SMA** .

Op es un conjunto de operadores del **Ag** para generar influencias.

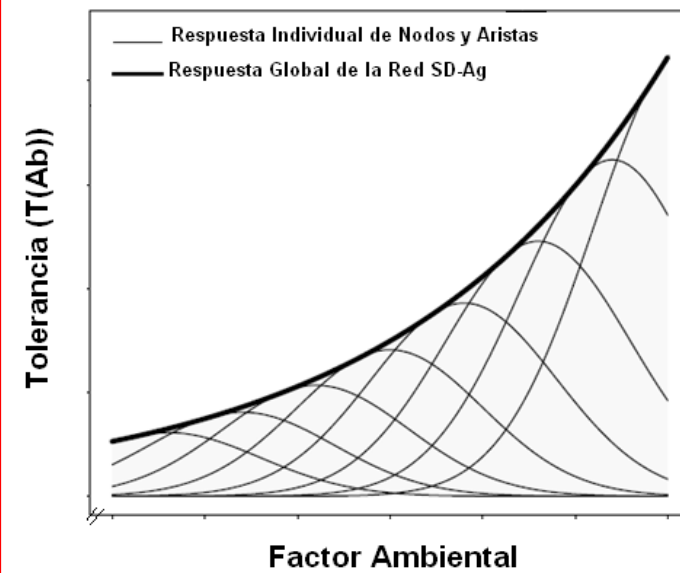
rp_{SD-Ag} : tasa de reparabilidad autopoiesica

Homeostasis

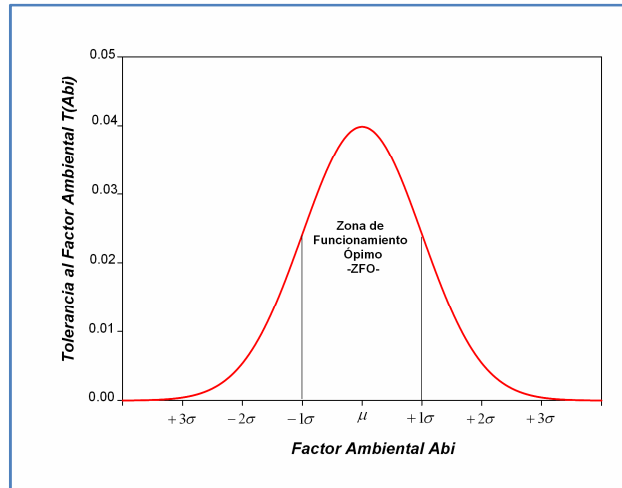
Tolerancia Global



Tolerancia Local



Funciones Relativas a la Homeostasis



Función de Tolerancia

$$T(FAb) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

X_i = Valor del Factor Ab
 μ = Promedio del Factor Ab

Rango de Tolerancia

$$RX_i^j = X_{\max} - X_{\min}$$

$X_{\max}$ = Valor Máximo de Ab
 $X_{\min}$ = Valor Mínimo de Ab

Función de Homeostasis

$$Hm_i = g(T(Ab_i), RX_i)$$

Función compuesta de la tolerancia y el rango

Función de Homeostasis con Autopoiesis A

$$Hm_{Ai} = g(T(Ab_i), RX_i, A_i)$$

Diapositiva 47

VAC18 hay varias aqui no las defines en ningun lado

quien es Xi? mu?. ...

Valued Acer Customer, 27/04/2012

Tasa de Reparabilidad Autopoiesica

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dS}{dt} - \frac{dD}{dt}$$

El número de nodos es una función del cambio entre su:

$$\gamma N$$

Síntesis

$$\lambda N^g$$

Degradación



$$\frac{dN}{dt} = \gamma N - \lambda N^g = N(\gamma - \lambda) = Nrp$$

rp: Tasa de reparabilidad

rp > 0 incremento de la capacidad auto-regenerativa

rp = 1 mantenimiento

rp < 0 decremento de la capacidad auto-regenerativa

Diapositiva 48

VAC19

falta decir porque desde las nociones de síntesis y degradación medido la capacidad de autoreparación y que significan esas nociones

Valued Acer Customer, 27/04/2012

Para Enlaces de Información

$$\frac{dK}{dt} = \gamma K - \lambda' K^1 = K(\gamma' - \lambda') = K r p'$$

El promedio de la rp (*nodos*) y rp' (*enlaces*) dará la tasa de reparabilidad de la red $SD-Ag$ o rp_{SD-Ag}



Bases para una Medida de la Auto-organización

At (auto-organización en el tiempo): estima el grado de incertidumbre acerca de un estado q , en términos de una distribución de probabilidad $P(q)$.

$$Hc_t = - \sum_{c \in C} P(c_t) \log P(c_t)$$

Gershenson y Heylighen (2003).

Puede ser vista como una función de la homeostasis y la incertidumbre.

$$A_t = g(Hc_t, Hm)$$



Función para los Patrones

C= coeficiente de agrupamiento (clustering):
fracción media de vecinos que son vecinos entre sí.

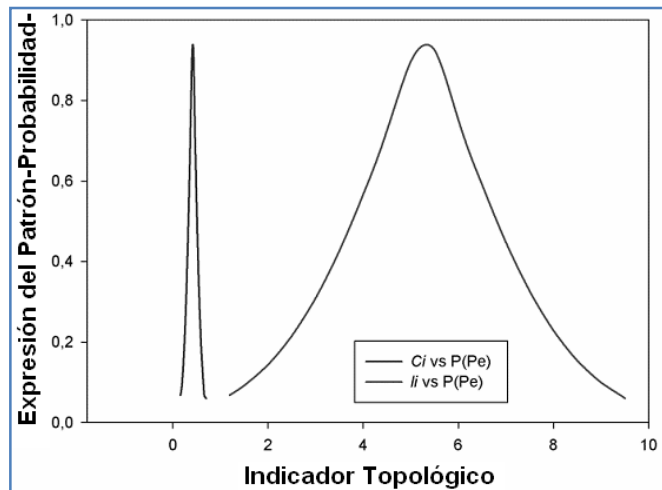
L= longitud característica:
distancia promedio entre dos elementos.

red de pequeño mundo:
C grande, **L** pequeño ($L \ll N$)

Valores Esperados

Parámetro	Longitud (L)	Coef. Agrup (Ca)
Promedio	5,2971	0,411

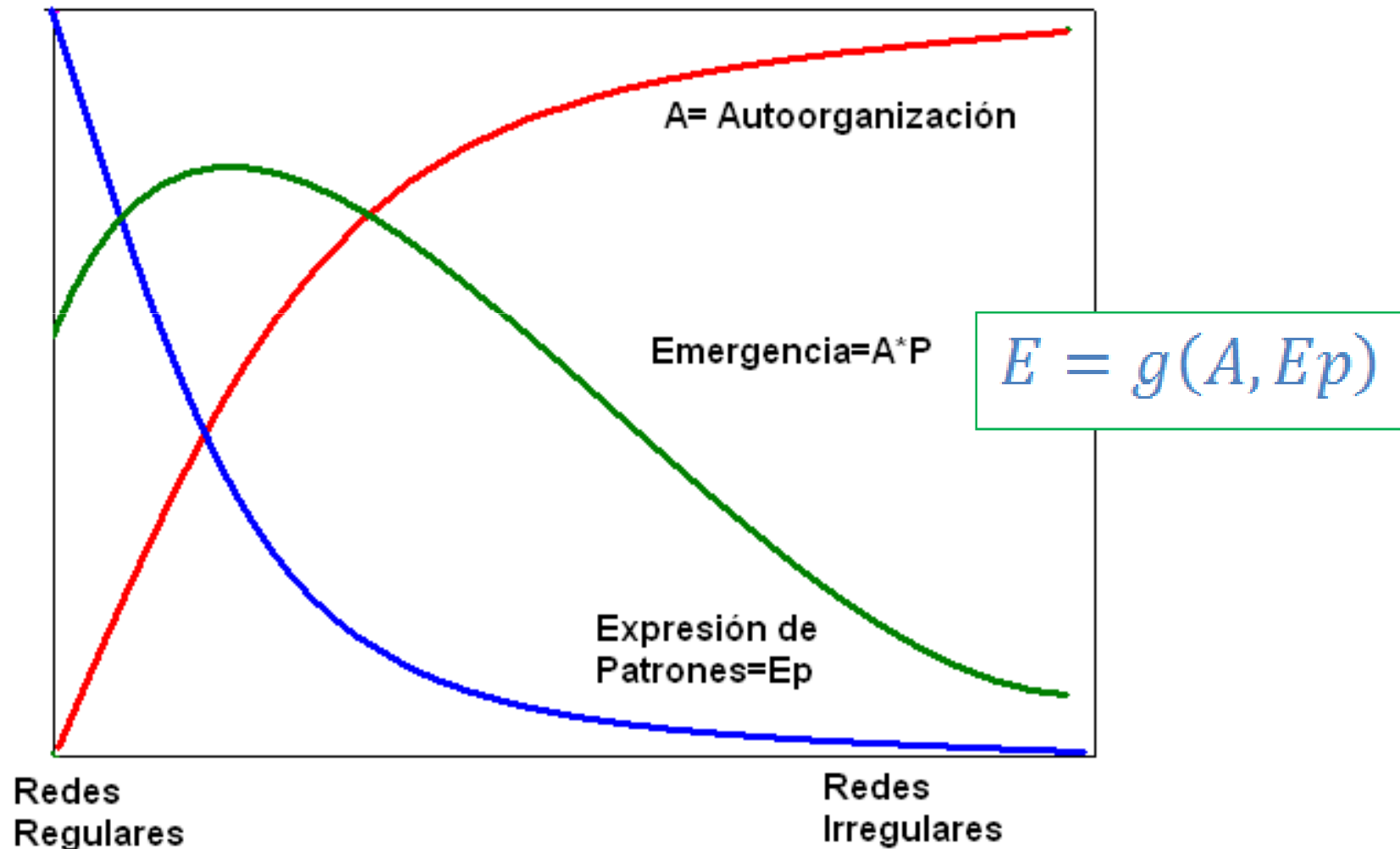
Redes de pequeño mundo (SW): entre el orden y el desorden



Cosenza (2011)

$$Ept = \frac{(Ca_{obs} - Ca_{esp})^2}{Ca_{esp}} + \frac{(L_{obs} - L_{esp})^2}{L_{esp}}$$

La Emergencia como Función Compuesta



Diapositiva 52

VAC20 por que mayor auto-organizacion en redes irregulares??

Ademas, por que E inverso a A??, no creo!!!

deberia ser mas lineal

No veo la justificacion clara

Por otro lado, deberias hacer un comentario de como determinar ese g en un caso real concreto (no solo las curvas generales)

Valued Acer Customer, 27/04/2012

La Inteligencia Colectiva en la Inteligencia Artificial Distribuida

Lógica del enjambre

- Principios del Sistema donde la *macro inteligencia* y la adaptabilidad derivan del conocimiento local:
 - Requiere de una *masa critica*.
 - La *ignorancia es útil*, no un defecto. Es mejor un sistema de elementos simple densamente interconectado (ej. Neurona conciente)
 - *Alentan los encuentros casuales*, ya que sistema depende de fuertemente de las interacciones
 - *Buscan patrones en los signos*: dependen de los patrones que detectan (meta información)
 - *Prestan atención a los vecinos*: información local produce sabiduría global

Sociedades de Insectos

Autonomía vs. Control

Emergente vs. Programado

Distribuido vs. Centralizado

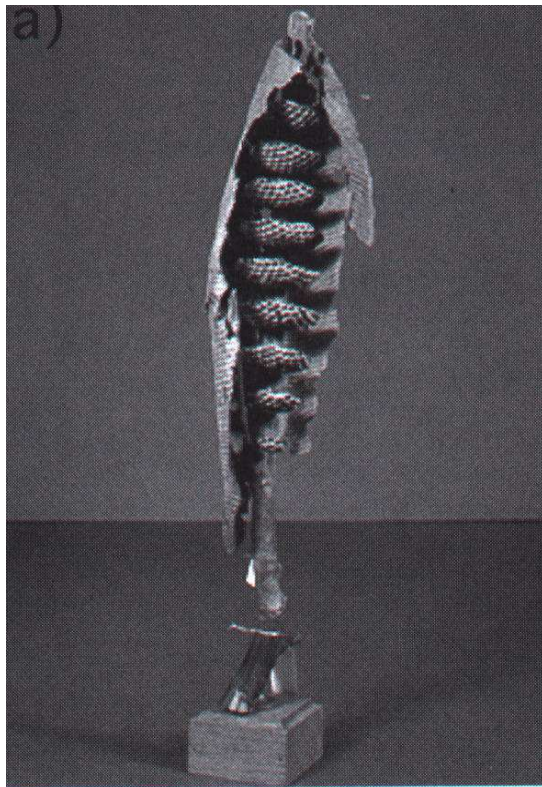
Sociedad de Insectos

Comportamiento Individuos vs. Rendimiento Colectivo

- Ejemplos:
 - Buscar alimentos
 - Construir nidos
 - Transportar objetos

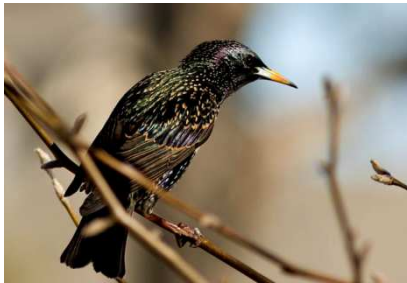
Ejemplos

- Construcción de nidos (*Parachartergus*)
- Transportar objetos (*Atta*)



INTRODUCTION

Otros ejemplos



Pajaros y peces

Ideas Claves

- Especies Polimorfas
- Plasticidad
- Robustez
- Flexibilidad
- Comportamiento Colectivo

Objetivo

Modelar sociedades de insectos

=> Sistemas Colectivos Inteligentes

=> Modelar individuos y sus interacciones

=> Colección de simples agentes para resolver problemas

Comportamiento de las Hormigas

Comportamiento de las Hormigas

- División del Trabajo y Asignación de Tareas
- Ordenamiento y Agrupamiento
- Auto-organización y Patrones
- Construcción de Nidos y Auto-Ensamblaje
- Transporte Cooperativo

Comportamiento como forraje de las Hormigas

Auto-organización:

- Deposito de *feromona*
- Seguimiento de los *feromona*

Caso 1: Puente Binario (*Linepithema*, Deneubourg et al.)

$$P_A = 1 - P_B = \frac{(k + A_i)^n}{(k + A_i)^n + (k + B_i)^n}$$

A_i : Numero de hormigas que toman camino A después de i veces

k : grado de atracción

n : grado de no linealidad

Comportamiento como forraje de las Hormigas

Caso 2: Los Patrones de ataque de armadas de hormigas (*Eciton, Deneubourg et al.*)

Probabilidad de moverse:

$$P = \frac{1}{2} \left[1 + \tan \left(\frac{F_i + F_d}{100} - 1 \right) \right]$$

$F_d(i)$: cantidad feromona a la derecha (*izquierda*)

Probabilidad de moverse a la izquierda:

$$P_i = \frac{(4 + F_i)^2}{(4 + F_i)^2 + (4 + F_d)^2}$$

Comportamiento como forraje de las Hormigas

- Sistemas Reales
- Simulaciones



Sistemas Artificiales de Hormigas

Regla de Transición (*Dorigo et al.*):

$$P_{rs}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\gamma_{rs}(t)]^\alpha [\eta_{rs}]^\beta}{\sum_{u \in J_r^k} [\gamma_{ru}(t)]^\alpha [\eta_{ru}]^\beta} & \text{Si } s \in J_r^k \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$\gamma_{rs}(t)$: Cantidad de feromona,
 $J_k(r)$: nodos aun no visitados,

η_{rs} : inverso de la distancia
 β y α : parámetros

Regla de actualización de las trazas:

$(1-\rho)$: tasa de evaporación, m : numero de hormigas
 $\Delta\gamma_{rs}^k(t)$: cantidad de traza que se deja por unidad de longitud

$$\gamma_{rs}(t) = (1-\rho)\gamma_{rs}(t-1) + \sum_{k=1}^m \Delta\gamma_{rs}^k(t)$$

Sistemas Artificiales de Hormigas

Cantidad dejada de *feromona*

$$\Delta\gamma_{rs}^k(t) = \begin{cases} 1/L_k(t) & \text{Si arco } (r,s) \in \text{tour completado por hormiga } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$L_k(r)$: longitud del recorrido de la hormiga k

Extensiones

- Exploración vs. Explotación
- Regla Actualización global vs. local

Sistemas Artificiales de Hormigas

- Retroalimentación positiva
 - Reforzar buenas soluciones
- Retroalimentación negativa
 - Evaporación
- Comportamiento colectivo paralelo
- Apropiado para problemas dinámicos y espacialmente distribuido

Sistema Combinatorio de Hormigas

(Aguilar et al.)

1. Construir grafo de las hormigas
2. Definir ecuaciones de la *función de transición* y de *actualización de feromona* según función objetivo del problema

$$Tf(\gamma_{rs}(t), Cf_{r-s}^k(z)) = \gamma_{rs}(t)^\alpha / Cf_{r \rightarrow s}^k(z)^\beta$$

$$\Delta\gamma_{rs}^k(t) = \begin{cases} 1 / C_f^k(t) & \text{Si arco (r,s) ha sido visitado por hormiga } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Sistemas Artificiales de Hormigas

- Viajero de Comercio

Grafo	CAS	ACS	GA	Optimo
ry48p	14430	14422	14422	14422
kro124p	36230	36230	36230	36230
ftv170	2755	2755	2755	2755

- Partición de Grafos

Grafo	Mejor	RRTS	CAS
G500.2.5	49	49 (2)	49 (74)
G500.05	218	218 (2.5)	218 (64)
G1000.05	445	445 (6.5)	445 (73)
G1000.20	3382	3382 (14.7)	3384 (91)
U500.05	2	2 (1.7)	2 (65)
U500.40	412	412 (10.2)	412 (65)

Aplicación en Problemas Dinámicos: búsqueda de rutas

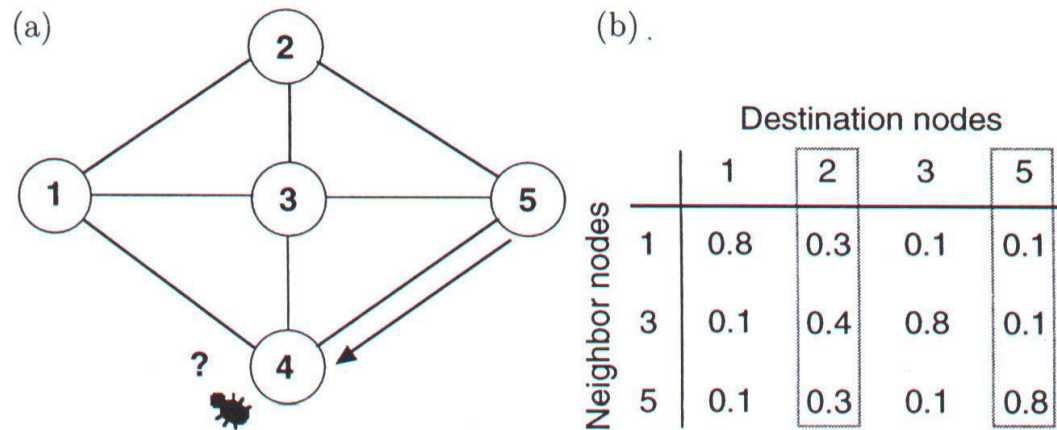
- Problema de optimización distribuido y cambiante en el tiempo
- Selección de caminos optimizando objetivos
- Construir tablas de búsqueda de rutas (*Schoonderwoerd*)

$$R_i = \left[r_{n,d}^i(t) \right]_{k_i N-1}$$

$r_{n,d}^i(t)$: probabilidad de que una hormiga cuyo destino es d sea enviado desde el actual sitio i a su sitio vecino n

k_i filas (nodos vecinos a i) $N-1$ columnas: numero de sitios

Aplicación en Problemas Dinámicos: búsqueda de rutas



Se debe conservar:

$$\sum_n r_{n,d}^i(t) = 1$$

Aplicación en Problemas Dinámicos: búsqueda de rutas

- *Reforzamiento* de la Probabilidad

$$r_{i-1,d}^i(t+1) = \frac{r_{i-1,d}^i(t) + \delta r}{1 + \delta r}$$

- *Debilitamiento* de la Probabilidad

$$r_{n-1,d}^i(t+1) = \frac{r_{n-1,d}^i(t)}{1 + \delta r}$$

δr : parámetro de reforzamiento

$$\delta r = \frac{a}{T} + b$$

a, b: parámetros T: tiempo pasado en la red

División del Trabajo y Asignación de Tareas

División del Trabajo y Asignación de Tareas

- Elasticidad del comportamiento de los individuos
- Reacción a estímulos asociados a tareas (plasticidad)
- Especialización (ejemplo: reproducción)

Modelo de Umbral de Respuesta y Aprendizaje

Mecanismo de División del Trabajo

- Trabajos Temporales (castas por edad)
- Trabajadores Polimorfológicos (castas morfológicas)
- Variabilidad Individual (castas por comportamiento)

Umbral de Respuesta

- Cada Individuo:

umbral de respuesta por tarea

- Caso individuo que hace una tarea desaparece:

estimulo asociado a la tarea aumenta en intensidad en el resto de los individuos

- Tarea hecha por un individuo:

reduce intensidad del estimulo asociado a esa tarea

Especialización

Probabilidad que individuo i haga tarea j

$$T_{\theta_{ij}}(s_j) = \frac{s_j^n}{s_j^n + \theta_{ij}^2}$$

Actualización de θ_{ij} es

$$\theta_{ij} = \theta_{ij} - x_{ij}\beta\Delta t + (1 - x_{ij})\lambda\Delta t$$

β : tasas de aprendizaje

λ : tasa de olvido

Aplicación: Asignación de Tareas Adaptativa

- Probabilidad que individuo i localizado en la zona $z(i)$ responda a la demanda s_j en zona j

$$P_{ij} = \frac{s_j^n}{s_j^n + \alpha \theta_{ij}^2 + \beta d_{z(i),j}^n}$$

β, α : coeficientes positivo

$d_{z(i),j}$: distancia entre la zona $z(i)$ y j (o cualquier factor como embotellamiento)

- Actualización del Umbral de Respuesta

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j} - \xi_0$$

$$\theta_{i,n(j)} = \theta_{i,n(j)} - \xi_1 \quad \forall n(j)$$

$$\theta_{i,k} = \theta_{i,k} + \lambda \quad \forall k \neq j \text{ y } k \notin n(j)$$

ξ_0, ξ_1 : coeficientes de aprendizaje

λ : coeficiente de olvido

$n(j)$: conjunto de zonas alrededor de j

JJ Aguilar

Ordenamiento y Agrupamiento

Ordenamiento y Agrupamiento

- Comportamientos en sociedades de insectos:
 - Agrupar cadáveres para formar cementerios
 - ordenar larvas para formar pilas
- Posible uso:

Agentes caminan aleatoriamente y depositan objetos
según información local

Ordenamiento y Agrupamiento

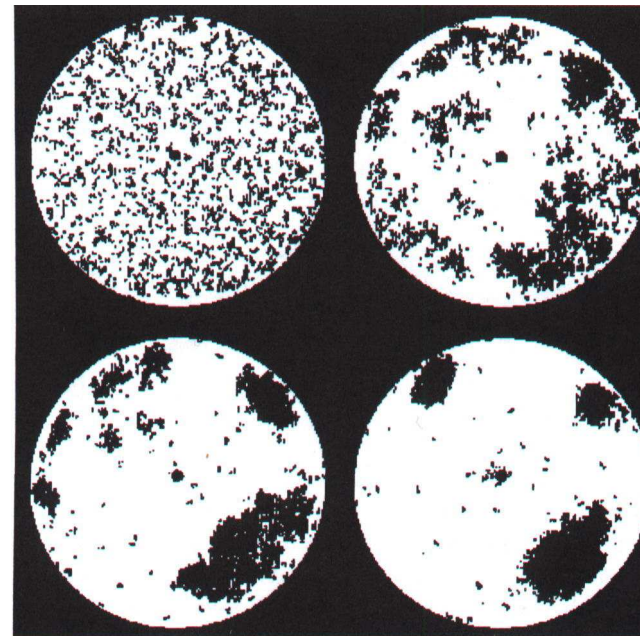
- Agrupar cadáveres
 - cadáveres distribuidos aleatoriamente
 - retroalimentación positiva
 - => feromona de agregación
- Ordenar larvas
 - Trabajadores depositan larvas según tamaños:
 - Larvas grandes en la periferia y pequeñas en el centro
 - Diferente cantidad de espacio es asignado a cada tipo de larva

Ordenamiento y Agrupamiento

- Ordenamiento
Leptothorax



- Agrupamiento
Messor sancta



Agrupamiento

- **Objetivo:** Objetos aislados deben ser recogidos y depositados en sitios donde hallan mas del mismo tipo
- **Modelo para un solo tipo de objeto** (*Deneubourg et al.*)
 - Probabilidad para un agente sin carga recoja un objeto

$$P_R = \left(\frac{K_1}{K_1 + f} \right)^2$$

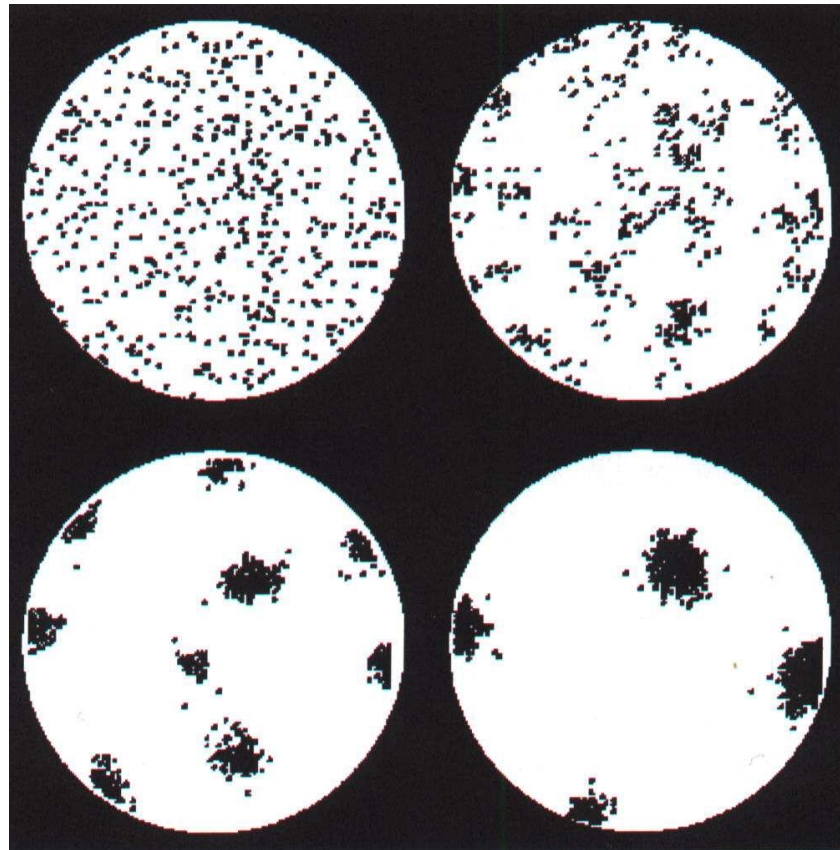
- Probabilidad para un agente con carga deposite un objeto

$$P_d = \left(\frac{f}{K_2 + f} \right)^2$$

K_1, K_2 : umbrales pequenos (constante)

f : fracción de objetos percibidos en la vecindad del agente

Agrupamiento: Resultados Simulaciones



Ordenamiento

- Suponga dos tipos de elementos A y B

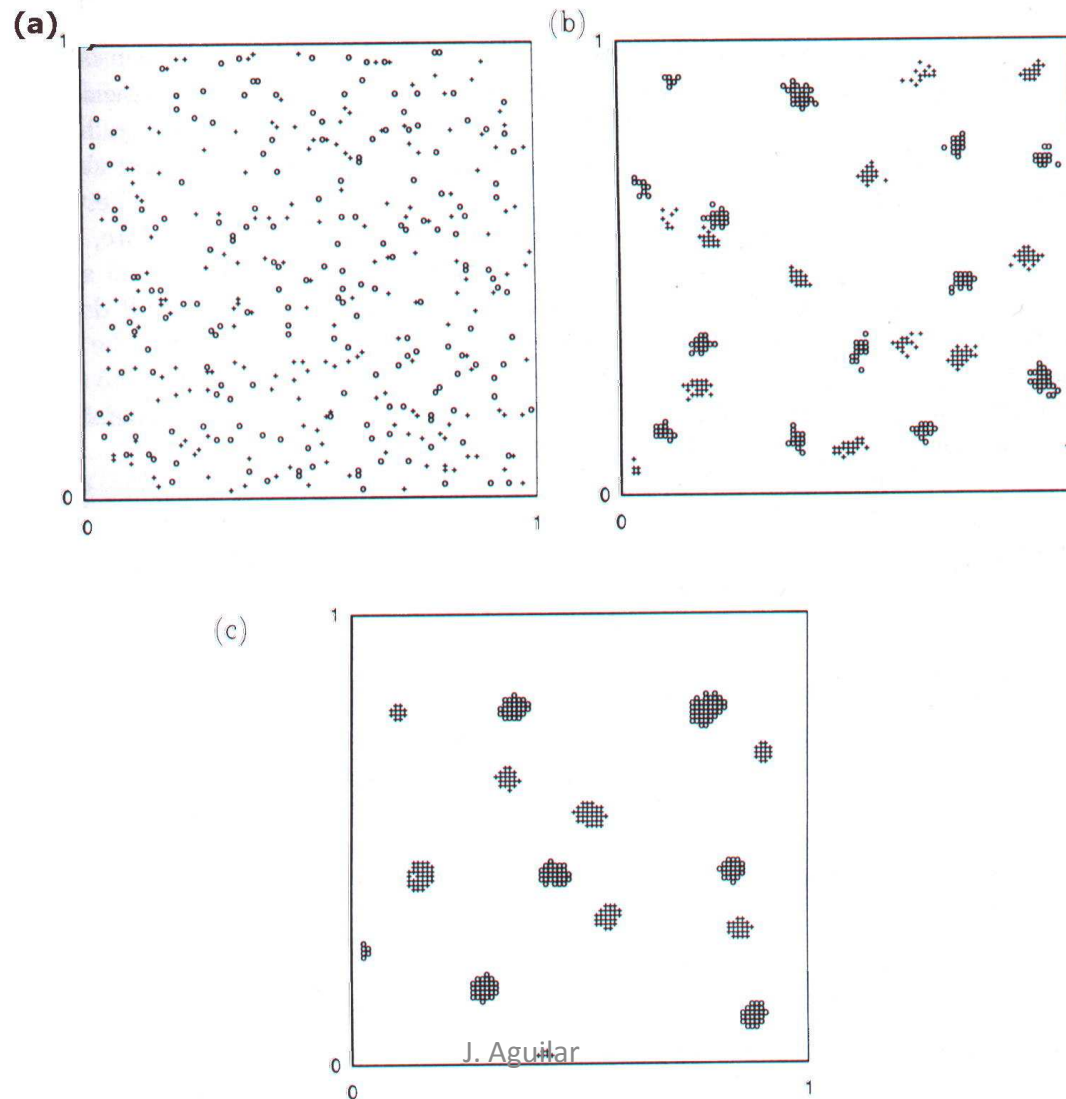
$$P_R(A) = \left(\frac{K_1}{K_1 + f_A} \right)^2$$

$$P_R(B) = \left(\frac{K_1}{K_1 + f_B} \right)^2$$

$$P_d(A) = \left(\frac{f_A}{K_2 + f_A} \right)^2$$

$$P_d(B) = \left(\frac{f_B}{K_2 + f_B} \right)^2$$

Ordenamiento: Resultados Simulaciones



Aplicación: Análisis de Datos *(Lumer et al.)*

- Probabilidad de Recolección y Deposito

$$P_R(o_i) = \left(\frac{K_1}{K_1 + f(o_i)} \right)^2 \quad P_d(o_i) = \left(\frac{f(o_i)}{K_2 + f(o_i)} \right)^2$$

$f(o_i)$: similaridad promedio del objeto o_i con otros objetos o_j presentes en la vecindad de o_i (densidad local)

$$f(o_i) = \begin{cases} \frac{1}{s^2} \sum_{o_j \in \text{Vecino}_{(sxs)}(r)} \left[1 - \frac{d(o_i, o_j)}{\alpha} \right] & \text{si vecindad no vacia} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$d(o_i, o_j)$: distancia entre objetos o_i y o_j

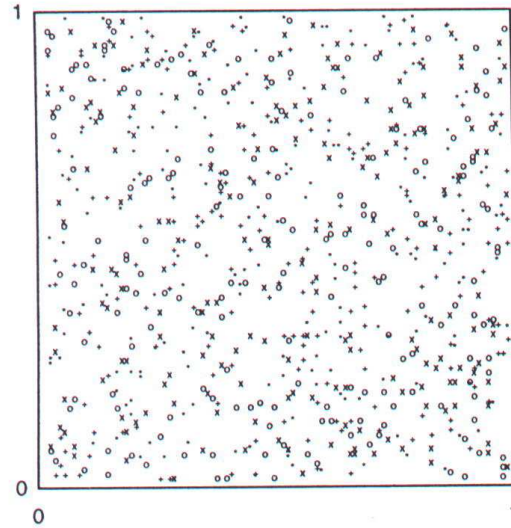
(distancia inter-grupo >> distancia intra-grupo)

α : factor de disimilaridad r : sitio donde esta agente

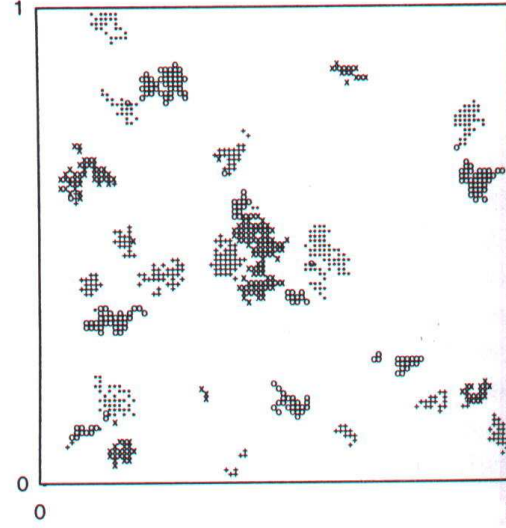
s^2 : sitios alrededor de r

Aplicación: Análisis de Datos

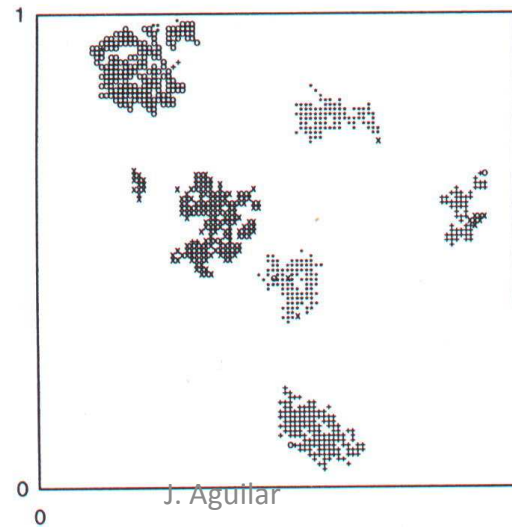
(a)



(b)



(c)



Aplicación: Partición de Grafos

- Objetivo:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^n a_{ij} (x_{im} - x_{jm})$$

a_{ij} : matriz de adyacencia

x_{im} : coordenadas vértice i en $\mathbb{R}^n$

- Distancia:

$$d(v_i, v_j) = \frac{\sum_{k=1}^N |a_{ik} - a_{jk}|}{\sum_{k=1}^N |a_{ik}| + \sum_{k=1}^N |a_{jk}|}$$

- Densidad Local

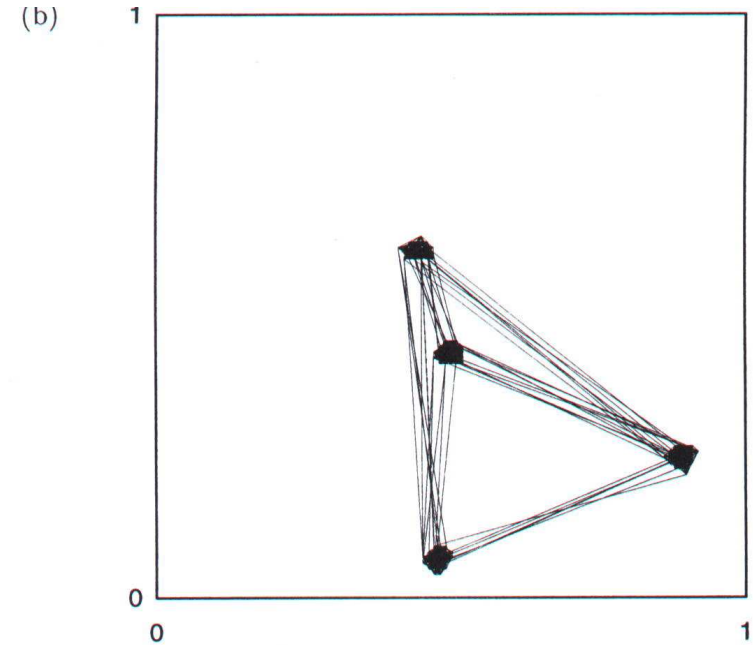
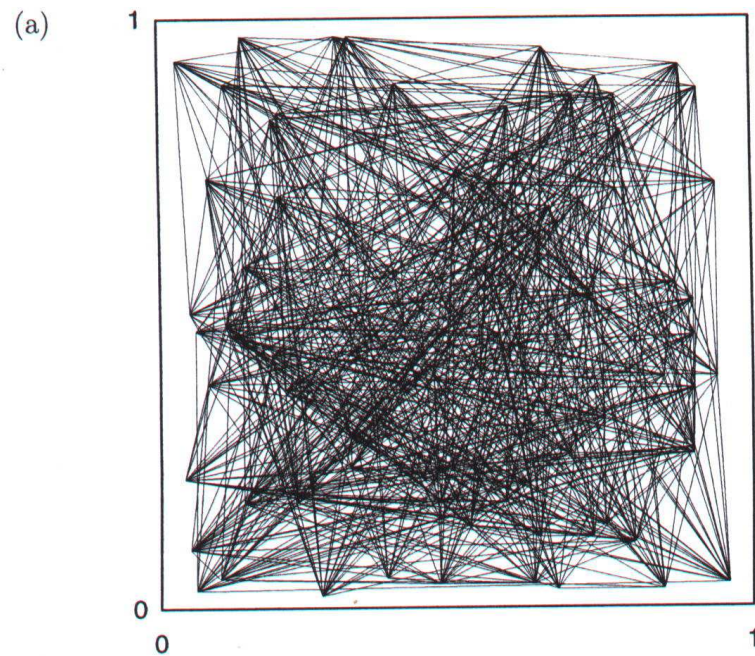
$$f(v_i) = \begin{cases} \frac{1}{s^2} \sum_{v_j \in \text{Vecino}_{(sxs)}(r)} \left[1 - \frac{d(v_i, v_j)}{\alpha} \right] & \text{si vecindad no vacia} \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

- Probabilidad de tomar o depositar

$$P_R(v_i) = \left(\frac{K_1}{K_1 + f(v_i)} \right)^2$$

$$P_d(v_i) = \left(\frac{f(v_i)}{K_2 + f(v_i)} \right)^2$$

Aplicación: Partición de Grafos



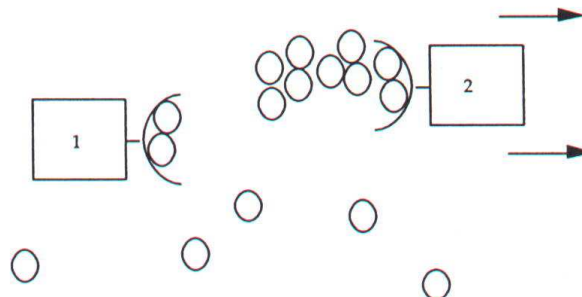
Aplicación: Robótica

- Agrupamiento Distribuido

=> forma descentralizada

- Movimientos

- Movimiento en línea hasta conseguir obstáculo
- Al detectar obstáculo, gira aleatoriamente y comienza de nuevo mov. en línea
- Cuando Robot tiene 3 o mas objetos, robot se vacía, retrocede, ejecuta un giro aleatoria y comienza mov. en línea vacío



Auto-organización y Patrones en las hormigas

Auto-organización y Patrones

- **Plantilla:** patrón para construir otro patrón. Usado por insectos para organizar sus actividades
- **Dinámica Auto-organizativa restringida por plantilla**
- **Ejemplo en la construcción de muros:**
 - Cuerpo de las reinas termitas para el aposento real
 - Pila de crías de hormigas para el nido

Auto-organización y Patrones

- Mezcla de ambos generan:
 - Efecto bola de nieve
 - Multi-estabilidad
 - Perfecto patrón predecible que sigue a la plantilla
- Aplicación
 - Problemas de agrupamiento donde el numero de grupos y la localización de los mismos son definidos desde el inicio

Auto-organización y Patrones

- **Plantilla:** gradientes (de temperatura, de humedad, etc.), cuerpos de un animal
- **Efecto bola de nieve:** mas grande es un grupo, este es mas atractivo para atraer a mas objetos
- **Elementos de reclutamiento, coordinación, orientación y forma de la construcción:**
 - Ventana de concentración (umbral)
 - Feromona de construcción de la reina (plantilla química)
 - Estimulo táctil y otros feromonas (de cementación, etc.)

Auto-organización en Construcción del aposento de la reina

- $H(r,t)$: concentración feromona de cementación emitido por P en sitio r en el momento t

$$\partial_t H = k_2 P - k_4 H$$

k_2 : cant. feromone emitido/unid. dep. k_4 :taza evaporación

- Densidad termitas cargadas (C)

$$\partial_t C = \Phi - k_1 C$$

k_1 : taza de descarga por termita Φ : flujo constante termitas cargadas

- Material depositado (P)

$$\partial_t P = k_1 C - k_2 P$$

Auto-organización y Patrones

- Plantilla de feromona creado por reina en sitio x, y

$$T(x, y) = e^{-\left[\left((x-x_0)/\lambda_x\right)^2 + \left((y-y_0)/\lambda_y\right)^2\right]}$$

x_0, y_0 : centro geométrico reina λ_x, λ_y : distancia para el decaimiento de la
plantilla del feromona

.

- Densidad termitas cargadas (efecto de atracción del feromona de cementación)

$$\partial_t C = \Phi - Fk_1 C$$

v : fuerza de atracción de la plantilla del feromona de la reina $F(x, y) = 1 - T(x, y)$

- Material depositado

$$\partial_t P = Fk_1 C - k_2 P$$

Aplicaciones

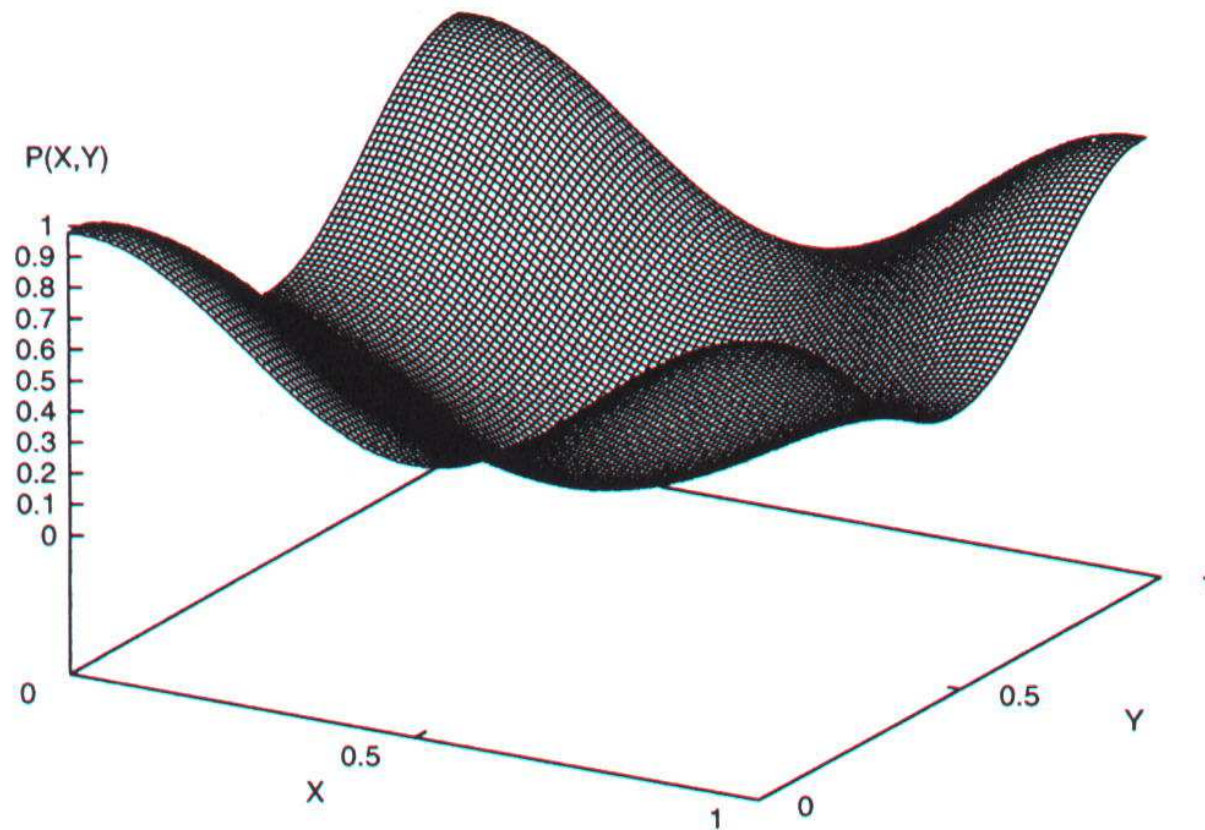
- Convierte a problemas anteriores (Partición de Grafos y Análisis de Datos) parametrizables
- Para introducir plantillas
 - $P_t(x,y)$: probabilidad de la plantilla
 - x,y : coordenadas actuales del agente
 - Espacio agrupamiento $[0,1]*[0,1]$

$$P_t(x,y)=a \left[e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{(x-1)^2+y^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{(x-1)^2+(y-1)^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{x^2+(y-1)^2}{\sigma^2}} - b \right]$$

a, b : parámetros a optimizar

σ^2 : paso de la plantilla

Aplicaciones



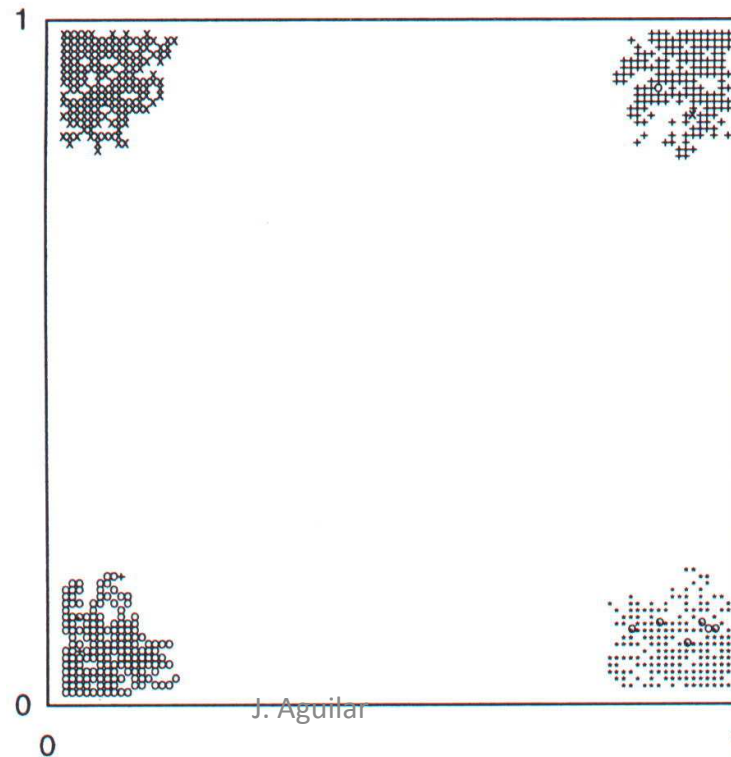
Funci3

1

Aplicaciones: Análisis de Datos

$$P_R(o_i) = 0.7 \left(\frac{K_1}{K_1 + f(o_i)} \right)^2 + 0.3(1 - P_t(r_i)) \quad P_d(o_i) = P_t(r_i) \left(\frac{f(o_i)}{k_2 + f(o_i)} \right)^2$$

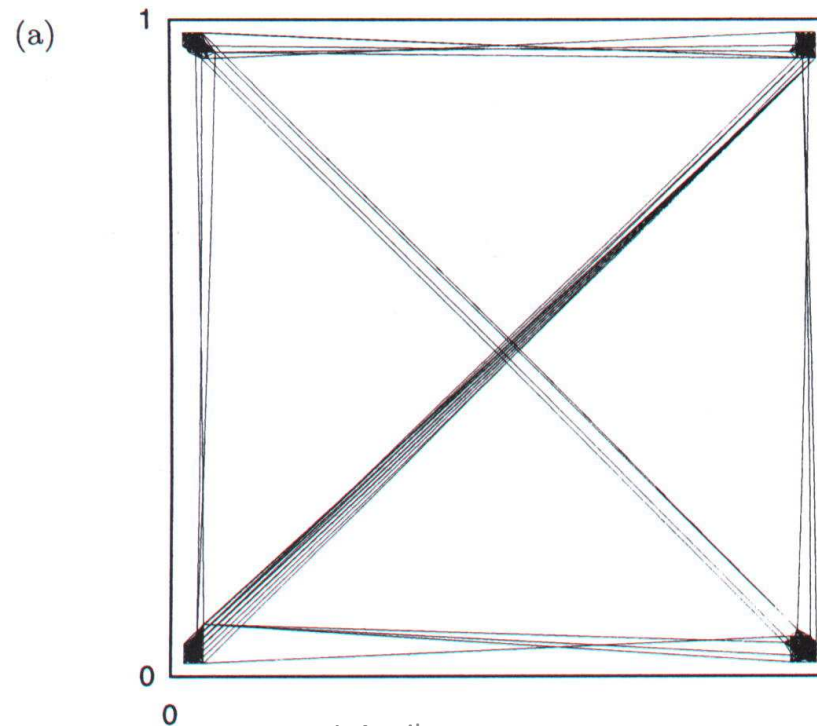
$$r_i = (x_i, y_i)$$



Aplicaciones: Partición de Grafos

$$P_R(v_i) = 0.7 \left(\frac{K_1}{K_1 + f(v_i)} \right)^2 + 0.3(1 - P_t(w_i)) \quad P_d(v_i) = P_t(w_i) \left(\frac{f(v_i)}{k_2 + f(v_i)} \right)^2$$

w_i : localización del vértice v_i en el plano



Construcción de Nidos y Auto- Ensamblaje

Construcción de Nidos y Auto-Ensamblaje

- Coordinación de actividades a través del ambiente:
 - Cuantitativo o Continuo (Termitas)
 - Cualitativo o Discreto (Avispas)
- Usado para construir complejas arquitecturas que cubren requerimientos
 - Funcionales
 - Adaptativos
- Construcción de Nidos: demuestra una de las mas grandes diferencias entre comportamiento individual o colectivo

Construcción de Nidos y Auto-Ensamblaje

- Conjunto de estímulos no estacionarios
se va formando un ambiente estimulador cada vez mas rico
- Estímulos provienen del ambiente o de sus compañeros
- Estímulos afectan comportamiento insectos dependiendo de la intensidad y contexto
- Construcción: como se organizan los estímulos en el espacio y tiempo para producir una robusta y coherente construcción?

Construcción de Nidos

- Dos Mecanismos:
 - Coordinación de actividades a través del ambiente
 - Auto-organización
- Principales elementos de la auto-organización
=> múltiples interacciones
- Interacciones:
 - Directas
 - Indirectas
- Coordinación ambiental: implica indirectas interacciones a través del ambiente
- Combinación auto-organización y coordinación ambiental
=> Coordinación Cuantitativa

Coordinación Cualitativo

- Diferentes tipos de estímulo
=> diferente respuesta
- No positiva retroalimentación
=> evita amplificar intensidad del estímulo
- Ejemplo: Construcción en las avispas

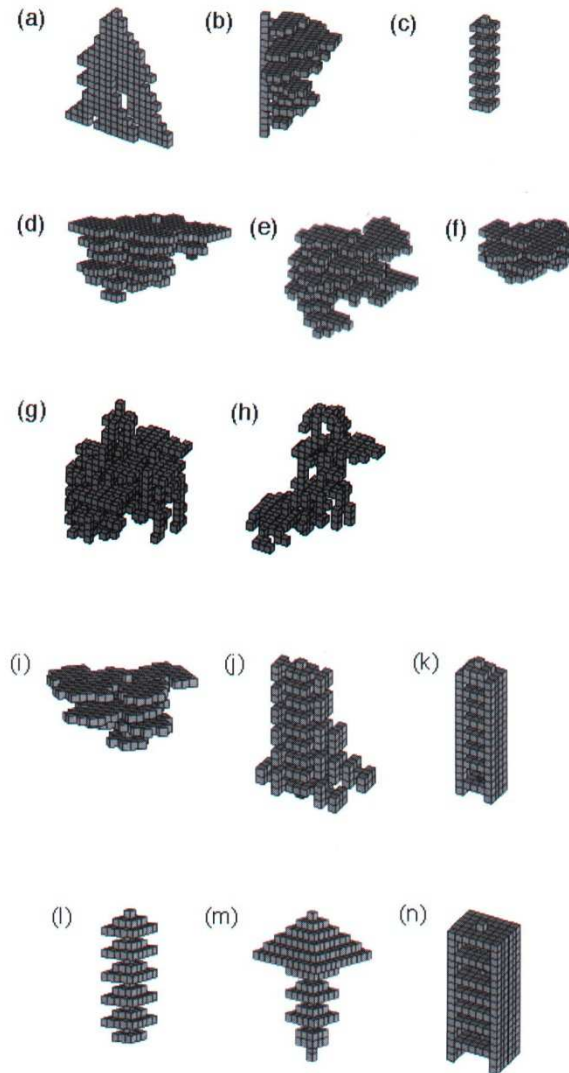
Construcción en las avispas

- Mas de 60 tipos de arquitecturas de nidos
- Pueden ir desde una celda a millones de ellas
- Modular: una estructura básica es repetida
- Algoritmo de construcción individual: serie de lazos de decisión si-entonces
- Varias acciones de construcción en paralelo
- Arquitectura impone restricciones para evitar conflictos: no aleatoria adición de celdas (a mas muros mayor probabilidad de ser añadido)
- Decisiones construcción: locales según configuración percibida

Modelo de Auto-Ensamblaje

- Autómatas asíncronos en un espacio tridimensional
- Comportamiento basado en sistema de estímulo-respuesta local en espacio y tiempo
- Cuando configuración estimulante (micro-reglas) se encuentra, se deposita objeto
- Algoritmo construcción: conjunto de micro-reglas compatibles
- Micro-reglas de diferentes etapas de la construcción no deben solaparse (Coordinación)

Modelo de Auto-Ensamblaje

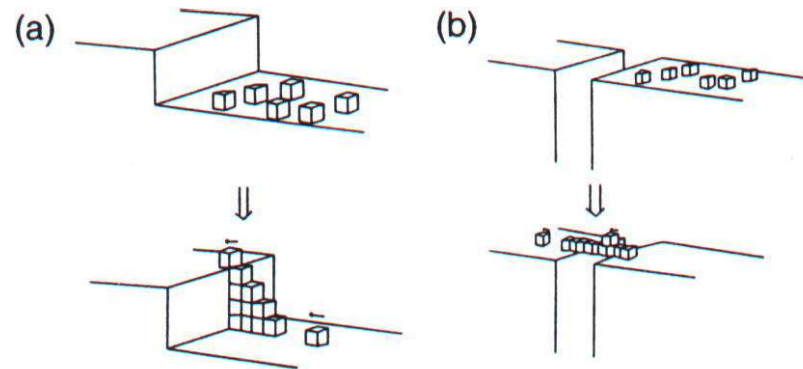


Aplicaciones Auto-Ensamblaje

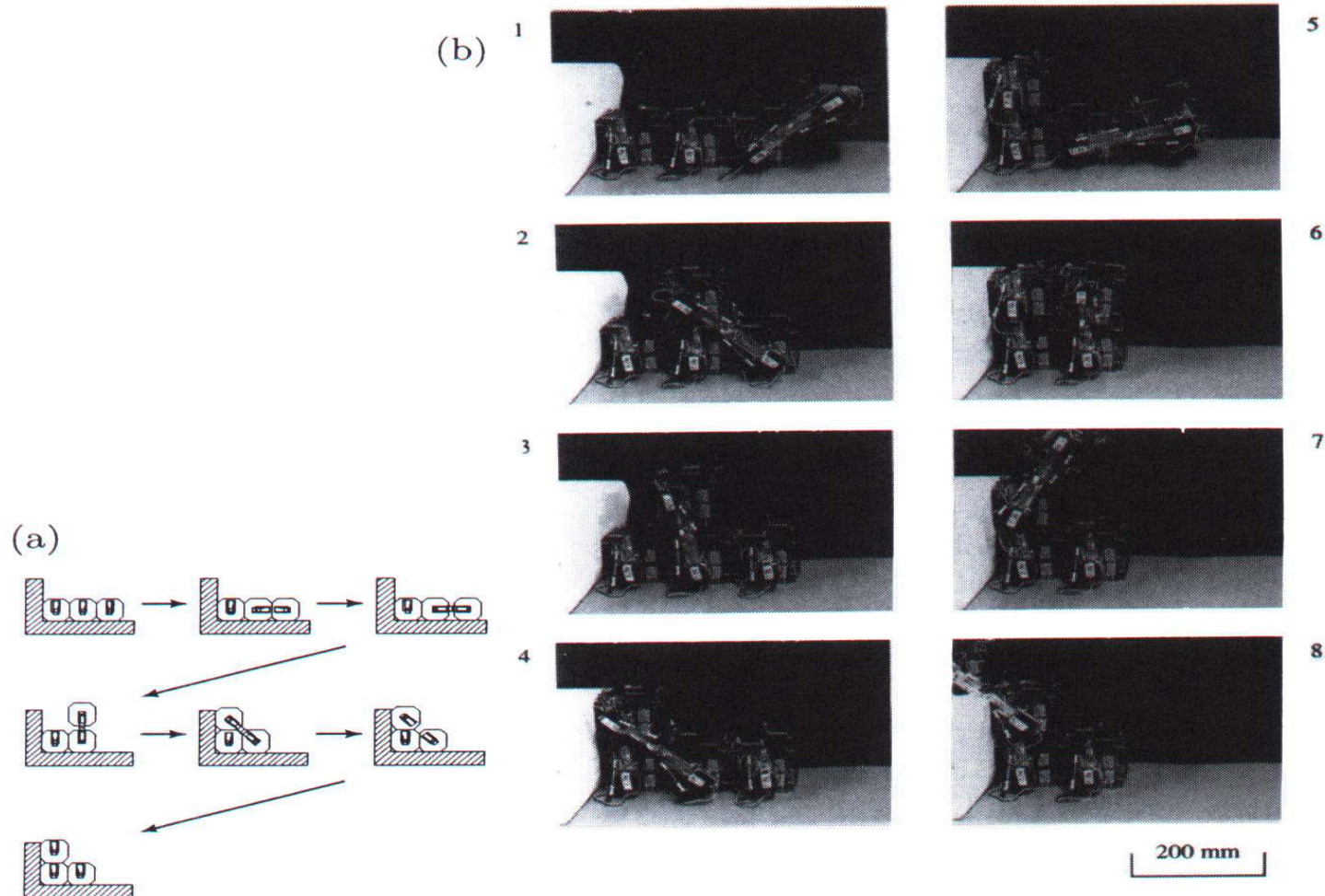
- Dado un cuerpo deseado, encontrar el algoritmo que pueda generarlo bajo algunas restricciones materiales
- Mecanismos generativos basados en la computadora: el usuario toma algunos patrones desde todos los generados por el computador según que tan atrayente es
- Evolucionar exitosos sistemas de auto-ensamblaje o formas de atractivas

Aplicaciones: Sistema Robótica de Auto-Ensamblaje

- Robots simples:
 - cubos con brazos para rotar o extenderse.
 - Comportamiento depende de su estado y el de los vecinos
- 2 Posibles Tareas
 - Construir Escaleras
 - Construir Puentes
- Movimiento de los Robot
 - Moverse hacia arriba
 - Moverse a la izquierda



Aplicaciones: Sistema Robótica de Auto-Ensamblaje



Aplicaciones: Diseño Evolucionario

- Creación de nuevos diseños con el computador usando técnicas evolucionarias
- 2 mecanismos:
 - Generativo
 - Evolución Artificial
- Definición de la Función Adaptativa:
 - Requerimientos Funcionales
 - Estéticos

Transporte Cooperativo

Transporte Cooperativo

- Una Hormiga consigue un botín/presa
 - Si puede mover lo lleva al nido
 - de lo contrario recluta a otras
- Mecanismo cooperativo:
 - cuando y como las hormigas se organizan para mover el botín/presa?
- No existe aun una descripción formal del fenómeno biológico

Transporte Cooperativo

- Hay alguna ventaja en el transporte colectivo con respecto al solitario?
- Cuando y como una hormiga reconoce que no puede cargar un objeto solo?
- Como las hormigas cooperan y coordinan sus acciones?
- Como son reclutadas?
- Como las hormigas saben que tiene el numero correcto de ellas para el transporte

Transporte Cooperativo

- Aumento peso (P) que puede cargar una hormiga en un grupo de N hormigas (Moffet, 1980)

$$P = N^{1.044}$$

- *Realineación y Reposición* alrededor de los objetos para ver si pueden moverlos
- Reclutamiento de dos tipos
 - Corto Rango (segregación en el aire)
 - Largo Rango (rastro químico)

Transporte Cooperativo

- Coordinación: pareciera que fuera a través del ambiente
- Numero de Hormigas

$$N = P^{0.489}$$

- Bloqueo
 - Obstáculos o fuerzas opuestas
 - Realineamiento o Reposicionamiento

Aplicación: Robótica

- **Objetivo:** Localizar una caja y llevarla a un dado sitio
- **3 sensores:**
 - Obstáculos
 - Objetivo
 - Robots
- **1 Actuador:** define dirección
- **4 comportamientos:**
 - Evitar
 - Objetivo
 - Seguir (se necesitan 2 robots para mover caja)
 - Encontrar
- **1 Mecanismo de Recuperación de Bloqueo**
 - Realineación y Reposición según umbrales