

Sistemas Artificiales de Abejas

Jose Aguilar

Los insectos sociales

- La mayoría de las actividades en la colonia, son reguladas a través de tomas de decisiones locales y procesos auto-organizados que dependen de las respuestas de las trabajadoras según sus umbrales.
- En las sociedades de abejas, el comportamiento de cada individuo está muy integrado, y de esa integración depende la supervivencia y la reproducción de la colonia.
- Las abejas pueden regular el medio intracolonia, de tal manera, de sobreponerse a fluctuaciones en las condiciones ambientales :
 - Capacidad de control térmico intracolonia,
 - la capacidad de almacenar néctar y polen, entre otras cosas,

Como consecuencia de esta habilidad homeostática, las abejas han sido capaces de colonizar la mayoría de los diversos hábitats existentes en la tierra

Los insectos sociales

- Las colonias de abejas son un excelente ejemplo de cómo un grupo se comporta como una entidad supra-organizacional (enjambre de abejas).
- Aunque muchas de las principales características también se pueden encontrar en otros animales socialmente organizados, como las manadas de lobos, el comportamiento de las colonias de abejas se asemeja más a los organismos multicelulares más primitivos

Características de una entidad supraorganizacional

- *Analogías en la estructura de base.* ambas se componen de unidades individuales, las células y las abejas, respectivamente, que dependen del funcionamiento de ellas para su supervivencia.
- *Analogía en la diferenciación de sus miembros.*
 - Durante el desarrollo de un organismo, las células son extremadamente versátiles, y se especializan en una variedad asombrosa de tareas diferentes.
 - En las colonias de abejas, la única diferenciación es entre las trabajadoras y las reproductoras. Sin embargo, esto no implica que no hay especialización en las abejas trabajadoras. Una colonia de abejas requiere de una variedad de tareas a realizar, pero la especialización de las trabajadoras, no es resuelta a través de castas fenotípicas, sino a través de sus respuestas diferenciadas a umbrales.

Características de una entidad supraorganizacional

- *Analogía estructural entre las trabajadoras en una colonia y las células somáticas en un organismo.* Ambas sacrifican su aptitud física directa en apoyo a otras entidades: las capacidades de reproducción en el caso de las abejas, y el aspecto orgánismico en el caso de las células.
- *Analogía en los mecanismos evolutivos.*
 - Algunos autores señalan que los cuellos de botella genéticos en la transmisión de genes, de generación en generación, son una condición necesaria para la evolución. En las colonias de abejas se cumple esa condición, ya que los genes se transmiten a través del cuello de botella de una reina y de unos pocos zánganos.
 - Otros trabajos sobre la evolución, lo definen como un proceso de selección organística de dos niveles: a nivel de las células y a nivel del organismo (para controlar las tendencias egoístas de sus células). Esto es muy similar a lo identificado en las sociedades de abejas.

Características de una entidad supraorganizacional

- *Analogías en los principios organizacionales.* La organización en los organismos multicelulares, se caracteriza por la cooperación de miles de subunidades, en el cumplimiento de una multitud de funciones diferentes, fundamentales para el bienestar del organismo. Ahora bien, dos principios de organización se pueden observar:
 - una de ellas es la coordinación de las funciones celulares,
 - la otra es la especialización de grupos celulares con diferentes propósitos.
- Esto muestra similitudes sorprendentes con las abejas.
- Además, la coordinación entre células y entre abejas trabajadoras, siguen patrones generales, sorprendentemente similares: auto-organización, decisiones locales, bucles de retroalimentación, interacciones no lineales, etc.

Características de una entidad supraorganizacional

- *Analogía en la coordinación basada en la auto-organización y en decisiones locales.*
 - Las células en los organismos responden a condiciones locales, sin "saber" sobre la condición del organismo.
 - En las colonias, las decisiones son basadas en estímulos locales, resultado del famoso lenguaje de la danza (por ejemplo, una recolectora recluta a otras trabajadoras a nivel local, para visitar la misma fuente de alimento, bailando).
 - En general, existen varios comportamientos similares en las colonias de abejas (en la reina, en el uso del polen y néctar, etc.). En todos ellos, usando reglas muy simples, patrones complejos emergen, que dan lugar a una cooperación, al parecer "inteligente".

Características de una entidad supraorganizacional

- *Analogía en la coordinación basada en bucles/lazos de retroalimentación e interacciones no lineales.* La capacidad homeostática de las sociedades de abejas, no exige ningún tipo de control central. Bucles de retroalimentación simples, pueden emerger de las estructuras auto-organizadas.
 - En un ataque, las abejas liberan un feromona de alarma que atrae a otras abejas, y reducen sus umbrales de respuesta a los ataques (esto genera los consiguientes riesgos, de una masa inmensa de abejas contra-atacando, como el caso de las abejas africanas en los trópicos). Si el estímulo desaparece, se vuelve a los niveles normales de umbral.
- Otros ejemplos basados en bucles de retroalimentación abundan.
- Así, un complejo sistema de división del trabajo emerge, a través de variables y dinámicos umbrales de respuesta de las trabajadoras individuales.

Características de una entidad supraorganizacional

- *Analogía en el papel de las estructuras jerárquicas de control en la coordinación.*
 - Los organismos superiores se caracterizan, por la capacidad de liberar jerárquicamente señales globales controladas, que regulan la actividad celular.
 - En general, las señales globales modifican los patrones existentes creados por la auto-organización y las decisiones locales.
 - En comparación con ese control central de muchos organismos superiores, esto es poco desarrollado en las sociedades de abejas. Un ejemplo de tales señales jerárquicas en las abejas es la reina, cuyo feromona generado por su mandíbula glandular, le señala a los miembros de la colonia su presencia, y genera una variedad de reacciones específicas en las trabajadoras.

Características de una entidad supraorganizacional

- *Analogía en la diferenciación y especialización en la división del trabajo.*
 - Una característica común de los organismos superiores es que sus células se diferencian en varios tipos, con fines diferentes. Por el contrario, la falta de aparentes diferencias entre las trabajadoras que componen las colonias de abejas, es bastante sorprendente.
 - No es el caso de las sociedades de hormigas, que tienen una enorme plasticidad fenotípica, con una gran variabilidad de castas diferentes.
 - Ahora bien, la diversidad en los umbrales de respuesta a los estímulos, en las colonias de abejas, estabiliza la colonia, evitando catástrofes.

Conclusión general

- La principal cualidad de los llamados insectos sociales, hormigas o abejas, es la **de formar parte de un grupo auto-organizado**, cuya palabra clave es la **simplicidad**.
- Estos insectos **resuelven los problemas complejos gracias a la suma de interacciones simples** entre cada individuo.

Algunos comportamientos interesantes

La distribución de las crías y del alimento en un panal de abejas no es al azar.

- La región central en que se sitúan las crías está cerca de una región que contiene polen y de otra que contiene néctar (aportando proteínas y carbohidratos a las éstas).
- La distribución a nivel local está cambiando constantemente debido a la entrada y salida de polen y néctar, pero se mantiene estable a nivel global.

Algunos comportamientos interesantes

- Esto no es resultado de que una abeja esté coordinando el proceso, sino de la **interacción entre ciertas reglas simples** que sigue cada abeja a nivel local:
 - Depositar las crías en celdas cercanas a las que ya tengan crías.
 - Depositar néctar y polen en celdas cualesquiera, pero vaciar antes las celdas más cercanas a donde estén las crías.
 - Extraer más polen que néctar.

Algunos comportamientos interesantes

Las abejas mantienen la estabilidad térmica de la colmena mediante un mecanismo descentralizado en el cual cada abeja actúa subjetiva y localmente.

- Si el calor aprieta, las obreras empiezan a agobiarse y aletean para expulsar del nido el aire caliente. También se agobian cuando refresca, y entonces se apiñan y calientan el nido con la suma de sus cuerpos.
- Una colonia típica proviene de una sola madre (la reina), pero de muchos padres (entre 10 y 30) y por tanto tiene una alta variabilidad genética, y no ocurre que todas las abejas se agobien al mismo tiempo, consiguiéndose una estabilidad térmica.

Algunos comportamientos interesantes

Las abejas son un ejemplo, de cómo una colonia se comporta como un supra-organismo (enjambre de abejas) al decidir su futura casa.

- Los miembros del enjambre trabajan en conjunto para:
 - descubrir cavidades posibles de anidación,
 - evaluar cada una de ellas, elegir entre ellas y,
 - finalmente, trasladarse en masa al sitio elegido.
- Sin embargo, la forma cómo funciona la toma de decisiones colectivas en el enjambre de abejas, sigue siendo desconocida.

Algunos comportamientos interesantes

- El **proceso que se lleva a cabo es de una gran complejidad**, notoria por el gran número de señales a las cuales las trabajadoras son sensibles en el interior de una colmena, y sus impresionantes capacidades para integrar dicha información al momento de decidir cómo comportarse .
- Acciones de una abeja obrera cuando está explorando y ha descubierto un árbol prometedor para hacer un nido.
 1. pasa 20-40 minutos inspeccionando el sitio, adquiere información sobre el volumen de la cavidad, el tamaño de su entrada, su altura desde el suelo, su exposición al sol y al viento, y otras variables más. En resumen, hace una *evaluación multifactorial*.
 2. integra la información que ha adquirido del sitio, para determinar su conveniencia general como un lugar de residencia en el futuro.

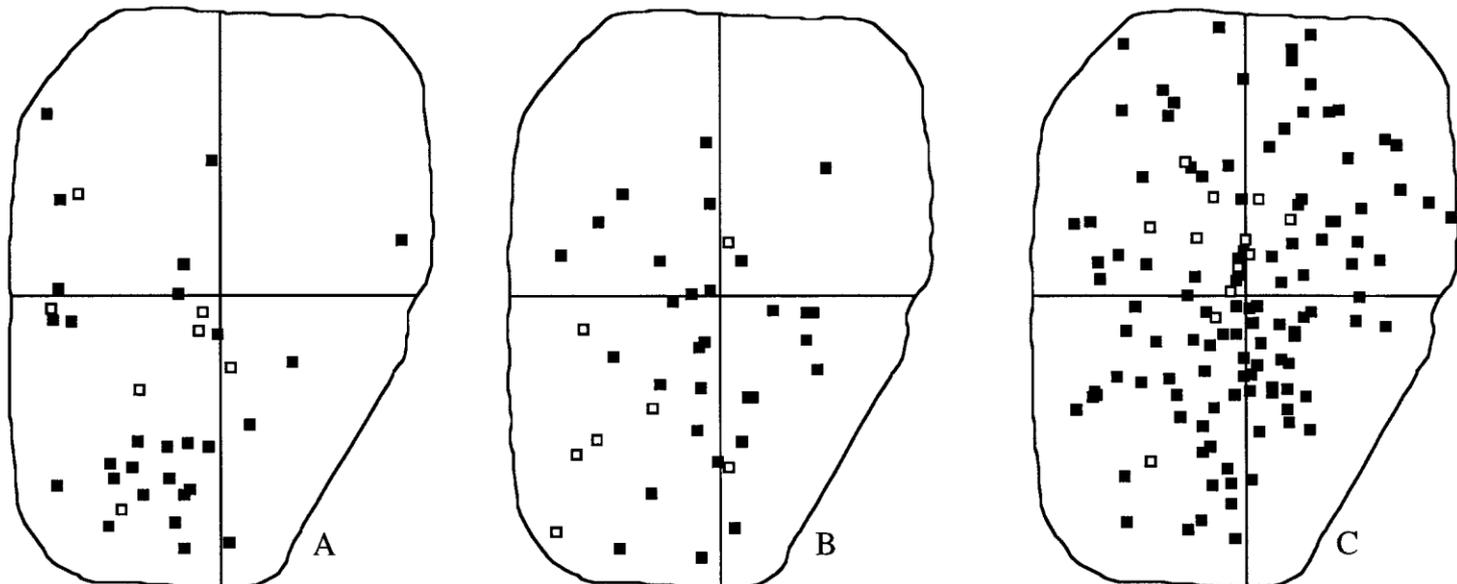
Algunos comportamientos interesantes

3. Después, regresa al enjambre, donde realiza una danza para presentar su sitio a las demás abejas exploradoras. Particularmente, hábilmente ajusta tanto la duración como el ritmo de su baile con la conveniencia de su sitio, lo que determina el número de exploradoras a reclutar. Todos esos comportamientos refinados de danza, son importantes para el proceso de consenso, por el cual las exploradoras de un enjambre colectivamente eligen su nuevo hogar.
4. Una vez que el domicilio del enjambre ha sido elegido, las exploradoras dejan de bailar, y comienzan a producir una señal diferente. Esta señal estimula a las no exploradoras en el enjambre, para calentarse a una temperatura dada (35 °C), para prepararse para el despegue.
5. Una vez que todas las abejas en el enjambre están convenientemente calentadas, las exploradoras detienen esa señal e inician una tercera señal, la cual provoca la disolución de la agrupación para migrar al nuevo sitio.

Algunos comportamientos interesantes

Lugares de baile en el proceso de buscar un nido en tres momentos distintos:

- A) al inicio,
- B) un momento posterior
- C) hacia el final del proceso de selección



Algunos comportamientos interesantes

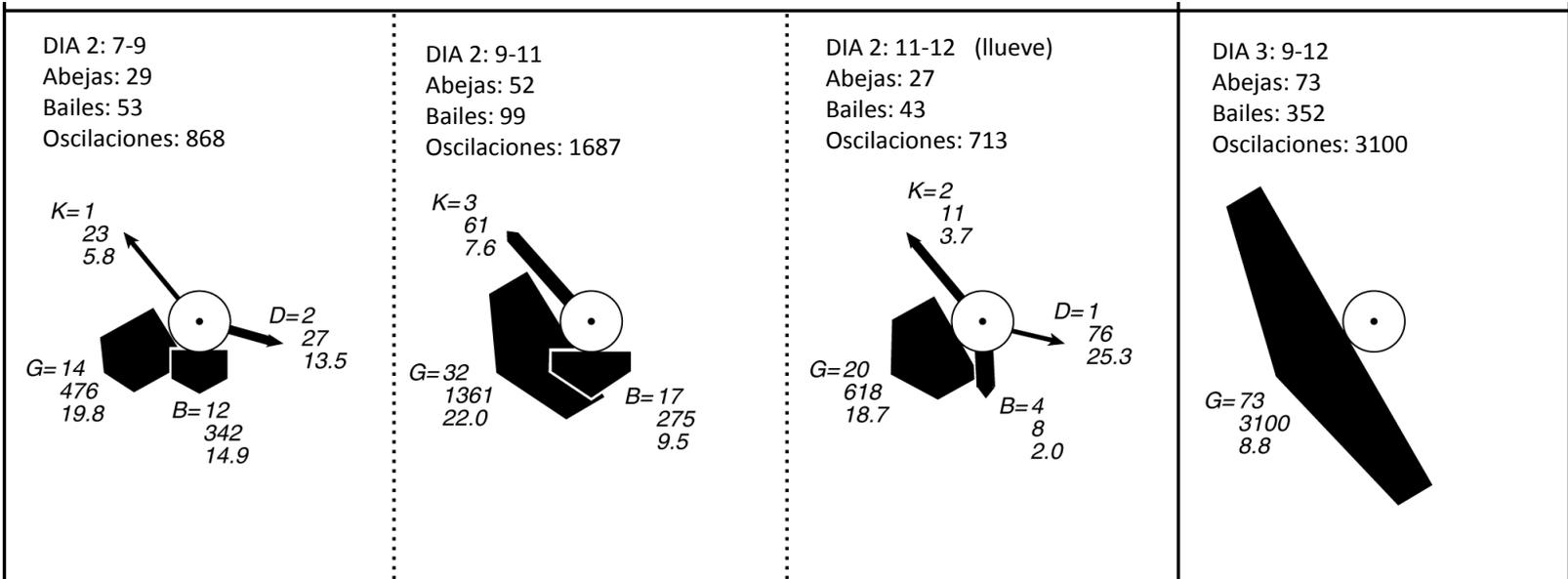
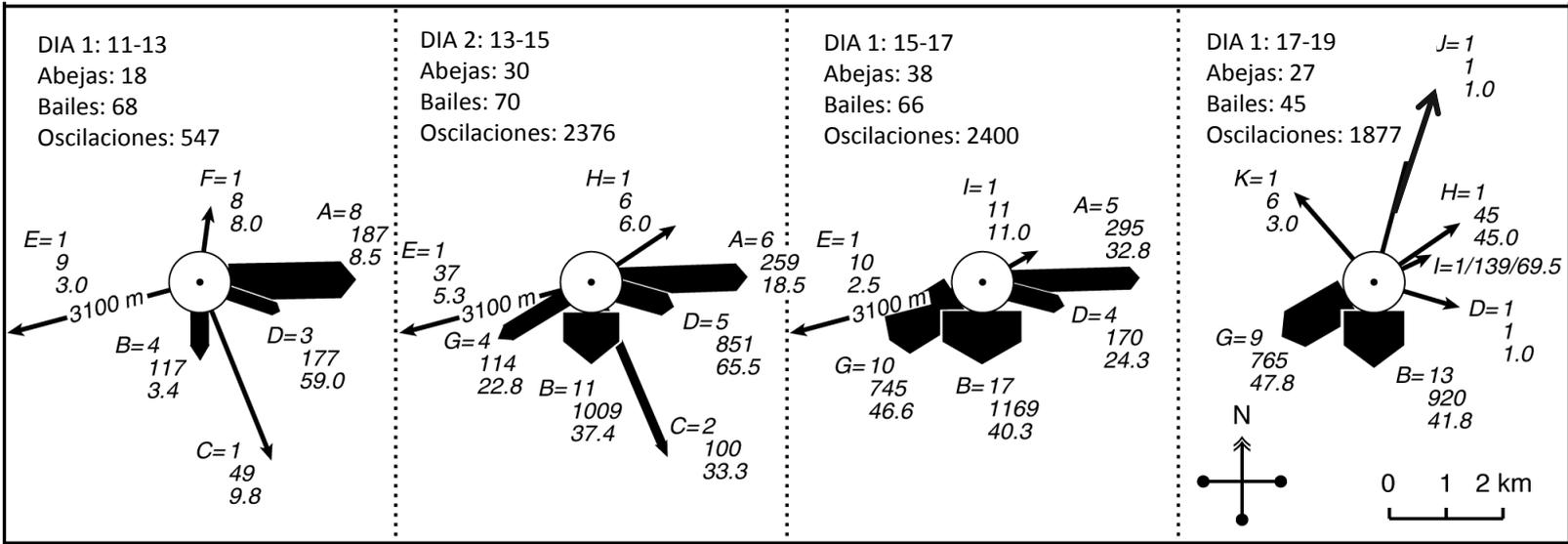
- Hay tres requisitos, que un enjambre de abejas debe cumplir, para tener éxito en esa difícil tarea de elegir una casa .
 - *Debe alcanzar una decisión correcta.*
 - *Debe lograr una decisión rápida.*
 - *Es preciso llegar a una decisión única.*
- Una pequeña minoría de las abejas del enjambre - las abejas exploradoras - participan activamente en el proceso de toma de decisiones. La gran mayoría de los miembros del enjambre permanecen en reposo, hasta que una decisión haya sido hecha, y sea hora de volar al lugar elegido.

Algunos comportamientos interesantes

Las características genéricas del proceso de decisión incluyen:

- Las abejas exploradoras localizan posibles sitios para anidar en todas las direcciones, y a distancias de hasta varios kilómetros del enjambre,
- Las abejas exploradoras anuncian una docena, o más, de potenciales sitios de anidación, pero con el tiempo anuncian un solo sitio,
- Al rato de aparecer la unanimidad entre ellas, el enjambre despega al nuevo sitio.

Historia de toma de decisiones en un enjambre, desde el momento en que el primer sitio potencial fue anunciado al enjambre (Día 1: 11horas), hasta cuando tomaron la decisión de su nueva casa (Día 3: 12).



Búsqueda de Néctar

- En las colonias de abejas, **la danza tiene un papel comunicador** clave para la organización social
 - *Se producen a lo largo de la colmena, no sólo en la zona de descarga*
 - *Se producen en un contexto, donde una señal de comunicación especializada es necesaria.*
 - *Las producen las abejas recolectoras de néctar, no las receptoras de néctar.*
- La danza también tiene un **papel inhibitor, además del de excitación** que acabamos de discutir. Ella permite detener el reclutamiento de abejas recolectoras, en una colonia de abejas

Búsqueda de Néctar

tipos de danzas

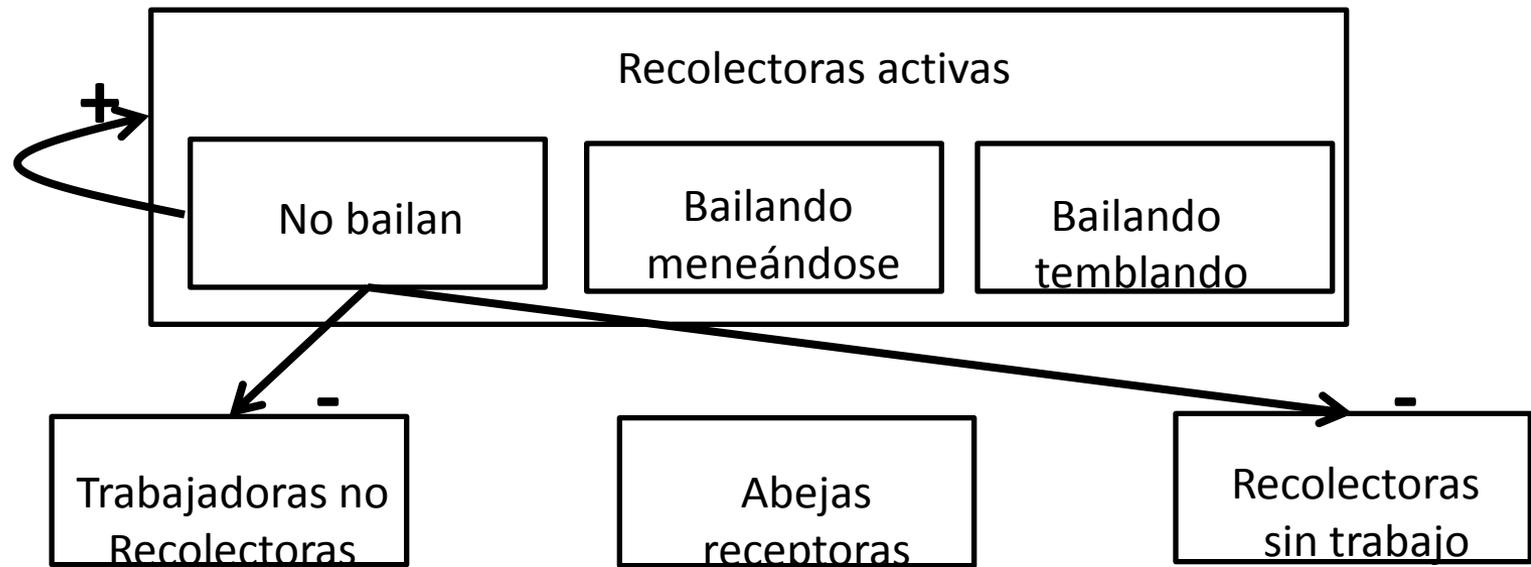
- *La danza de coleteo (meneo)*
- *La danza temblando*
- *Señal de parada*
- *Mecanismo de Abandono*

La danza de coleteo (meneo)

- Es probablemente la más conocida señal de las abejas.
- Se trata de una señal enviada por recolectoras de néctar, y está dirigido a abejas desempleadas, y, posiblemente, trabajadoras que participan en otras tareas (figura 4.20).
- Estas danzas también se utilizan para transmitir información sobre la ubicación del agua, del polen y de sitios potenciales para hacer nidos

La danza de coleteo (meneo)

Retroalimentación en la danza por meneo, para la asignación de tareas (+ excitador, y – inhibidor).



Comportamiento Defensivo

Capacidad de la colonia para localizar y centrar su ataque,
Capacidad de la colonia para caracterizar la intensidad del
ataque.

- Para el cálculo de la probabilidad (P_i), se consideran las características del destino (color, movimiento, etc.) y el número total de picaduras previas (N_i) en el objetivo. Una expresión de P_i es:

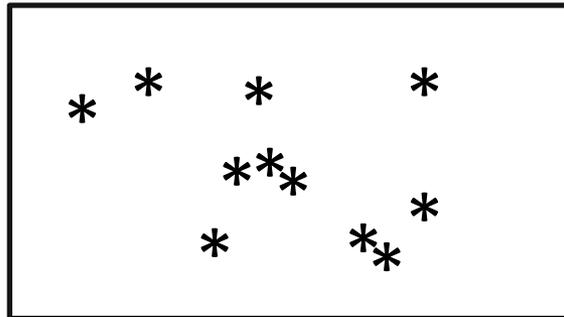
$$P_i = \frac{\gamma_i (a + bN_i^2)}{a' + N_i^2} \quad \forall i = 1, 2$$

- Donde, γ_i es la probabilidad de estar dentro del alcance sensorial del blanco i , y a , a' y b son constantes.

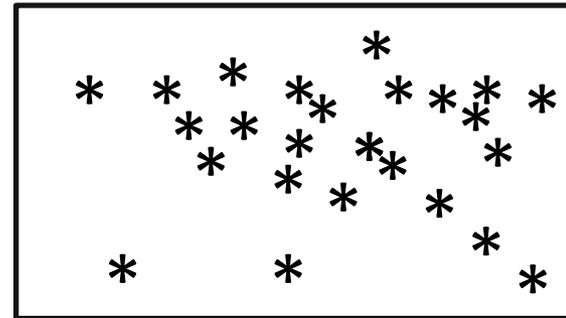
Comportamiento Defensivo

Distribución de las picaduras en un blanco, para diferentes valores de N

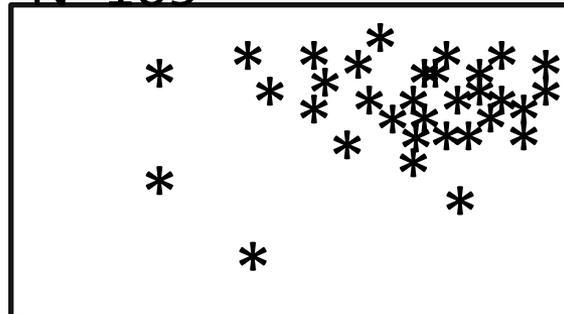
N=17



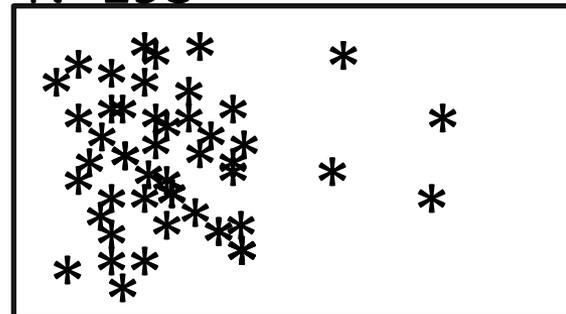
N=80



N=109



N=193



Proceso de auto-Organización

Puede resumirse

1. Inicializar todos los nodos en pequeños valores aleatorios.
2. Seleccionar un punto al azar.
3. Calcular el nodo ganador.
4. Actualizar el nodo ganador y vecinos.
5. Repetir los pasos 2 a 4 para un determinado número de iteraciones.

El algoritmo ABC



El algoritmo ABC (por sus siglas en inglés, Artificial Bee Colony), es uno de los algoritmos más recientes en el área de inteligencia colectiva.



es un **algoritmo de búsqueda basado en la población** inspirado en el comportamiento de alimentación natural de las abejas para encontrar la solución óptima.



El algoritmo realiza una especie de **búsqueda local combinada con búsqueda aleatoria.**

El algoritmo ABC

- La colonia artificial de abejas es un **algoritmo de optimización basado en poblaciones de abejas**, muy efectivo para resolver problemas de búsqueda. ABC tiene varias variantes, las principales son:
 - **Comportamiento de Forrajeo**: se basa en el comportamiento colectivo de las abejas para la selección de fuentes de alimentos. Actualmente, existen muchas propuestas inspiradas en ese comportamiento.
 - **Comportamiento de Unión**: basado en el comportamiento de apareamiento de las abejas.
 - **Comportamiento de la Abeja Reina**: inspirado en los algoritmos genéticos, tal que le permite al mejor individuo de una población generar varios descendientes.

El algoritmo ABC

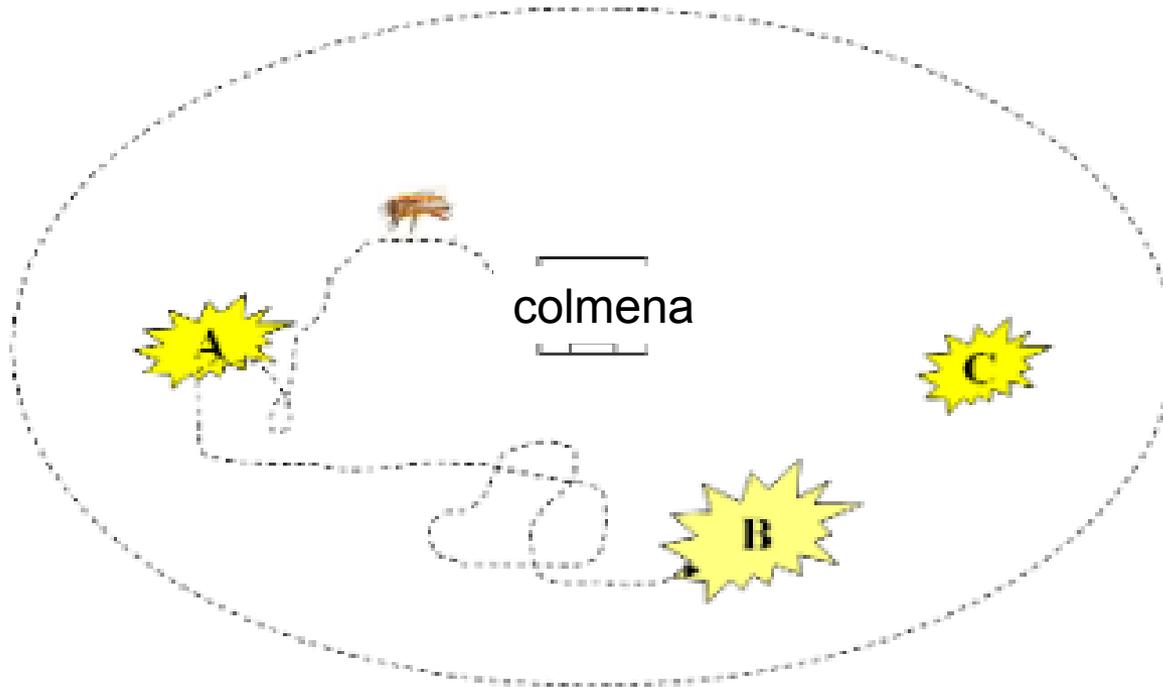
El modelo tiene cuatro componentes principales:

- **Fuente de alimentos:** el valor de una fuente de alimentos depende de muchos factores, como su proximidad a la colmena, riqueza o la concentración de la energía, y la facilidad de extracción de esta energía.
- **Abejas exploradoras:** están en constante búsqueda de fuentes de alimentos. Se encargan de buscar en el entorno que rodea a la colmena, nuevas fuentes de alimentos.
- **Abejas en espera:** buscan una fuente de alimentos, a través de la información que le compartan las recolectoras o exploradoras.
- **Abejas recolectoras:** están asociadas a una fuente de alimentos en explotación. Ellas llevan información sobre esa fuente en particular (su distancia, ubicación y rentabilidad), para compartirla con sus demás compañeras.

El algoritmo ABC



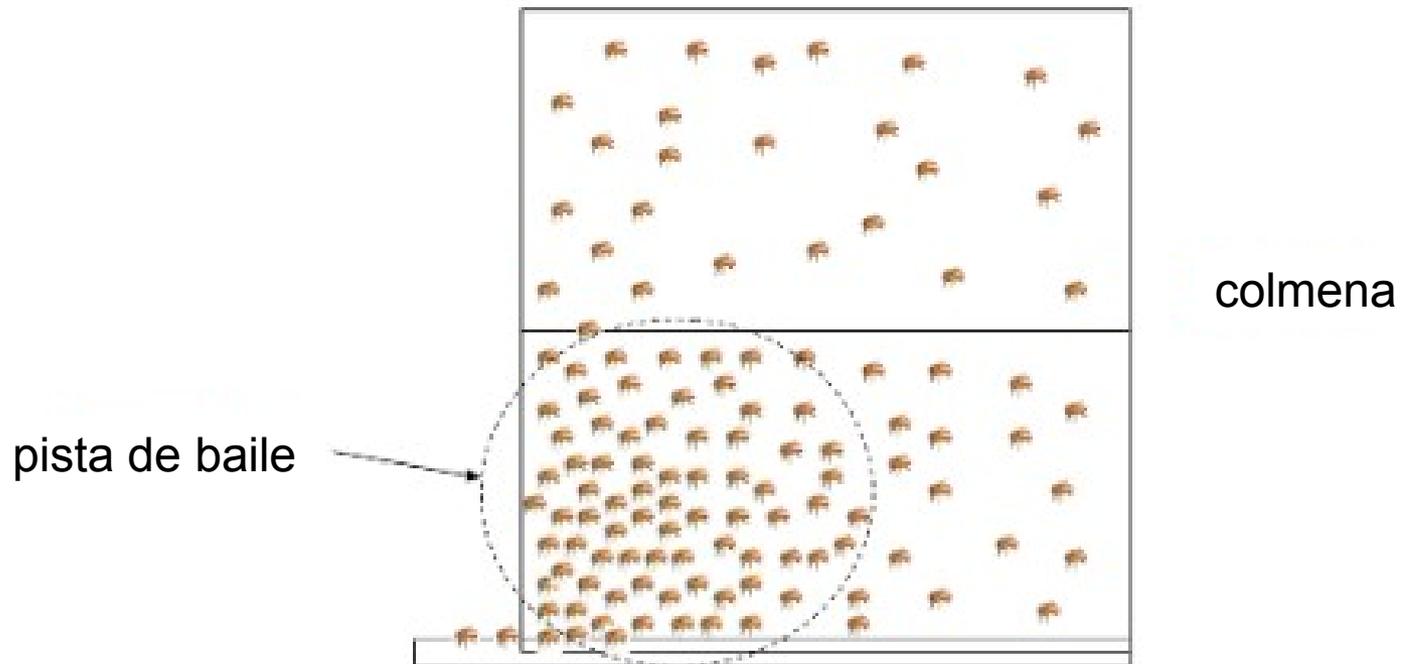
Abejas exploradoras buscan al azar a partir de un sitio



El algoritmo ABC



Depositamos su néctar o el polen y van a la "pista de baile" para llevar a cabo una "danza de la abeja"



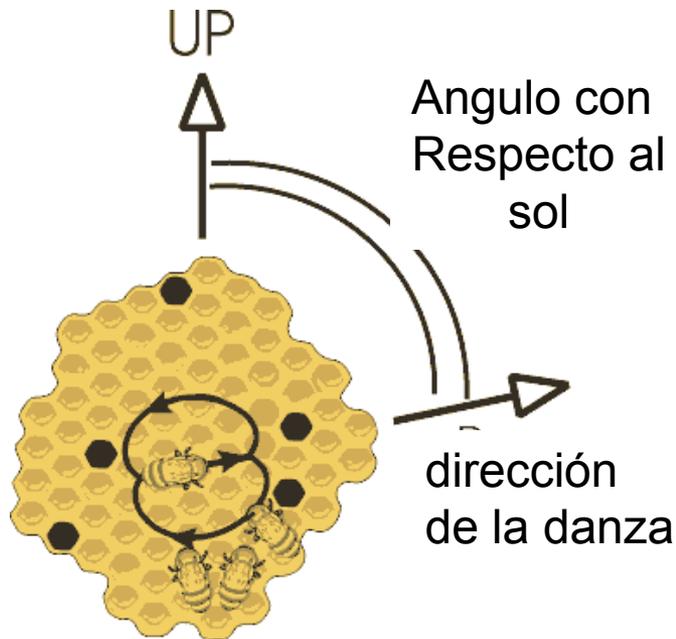
pista de baile

colmena

El algoritmo ABC



Las abejas se comunican a través de la Danza de la abeja que contiene la siguiente información:



1. **La dirección** donde esta la flor
2. **La distancia** de la colmena (duración de la danza)
3. **La calificación de calidad** (fitness) (frecuencia de la danza)

El algoritmo ABC

Tres componentes esenciales de la selección de forraje:

- **Fuentes alimenticias:** El valor de una fuente de alimento depende de muchos factores, como su proximidad al nido, su riqueza o concentración de energía (alimentos), y la facilidad de extracción de esta energía.
- **Recolectoras empleadas:** Se asocian con una fuente de alimento en particular que están actualmente explotando (se "emplean") Llevan con ellos información sobre esta fuente en particular, su distancia y dirección desde el nido, la rentabilidad de la fuente y comparten esa información con una cierta probabilidad.

El algoritmo ABC

- **Forrajeras Desempleadas:** Están continuamente mirando por una fuente de alimento para explotar. Hay dos tipos de recolectoras desempleados:
 - scouts, que buscan en el medio ambiente que rodea el nido por nuevas fuentes de alimentos y
 - curiosos que esperan en el nido y el establecimiento de una fuente de alimento a través de la información compartida por cazadores-recolectores que trabajan.
- El modelo define **dos modos principales de conducta:**
 - reclutamiento a una fuente de néctar
 - abandono de una fuente.

El algoritmo ABC

- *Fase de inicialización*
- *REPITA*
 - *Fase de Abejas Exploradoras*
 - *Fase de Abejas en Espera*
 - *Fase de Abejas Recolectoras*
 - *Memorización de la mejor solución lograda hasta ahora*
- *HASTA (Ciclo=Número de ciclo máximo)*

El algoritmo ABC

- **En la *fase de inicialización***, se establecen las abejas exploradoras, recolectoras, y en espera, y la población de fuentes de alimentos (soluciones).
- **En la *fase de abejas exploradoras***, esas abejas buscan nuevas fuentes de alimentos dentro de su vecindad. Al encontrar una vecina fuente de alimento la evalúan, y realizan una selección aleatoria entre esa fuente y la anterior. Después de eso, las abejas recolectoras comparten su información de fuente de alimentos con las abejas en espera en la colmena, bailando.

El algoritmo ABC

- **En la fase de abejas espectadoras (en espera)**, esas abejas eligen probabilísticamente su fuente de alimentos, en función de la información proporcionada por las abejas recolectoras. Para ello se puede usar una técnica de selección basada en aptitud, como el método de selección de la ruleta.
- **En la fase de abejas recolectoras**, las abejas *exploradoras* cuyas soluciones pueden ser mejoradas a través de un número determinado de pruebas, denominado "límite", se convierten en *recolectoras* y sus soluciones son abandonadas.

Estos tres pasos se repiten hasta que un criterio de culminación se cumple, por ejemplo, un máximo número de ciclos.

El algoritmo ABC

ABC emplea cuatro procesos de selección diferentes:

- un proceso de **selección global** utilizada por los espectadores,
- un proceso de **selección local**, llevado a cabo en una región por las abejas ocupadas y espectadoras,
- un proceso de **selección codiciosa** utilizado por todas las abejas, y
- un proceso de **selección aleatorio** utilizado por los exploradores.

El intercambio de información entre las abejas

- Es lo más importante en la **formación del conocimiento colectivo**.
- La parte más importante de la colmena con respecto al intercambio de información es la **zona de baile**
- La comunicación entre las abejas relacionadas con la **calidad de las fuentes de alimentos** tiene lugar en la zona de baile.

Danza de la abeja.

El intercambio de información entre las abejas

- Forrajeros comparten su información con una **probabilidad proporcional a la rentabilidad de la fuente de alimento**, y la distribución de esta información a través de la danza de la abeja es de **mayor duración**.
- Hay una mayor probabilidad de que los espectadores **elijan las fuentes más rentables** ya que más información se difunde de las fuentes más rentables

Movimiento de los espectadores

- Probabilidad de seleccionar una fuente de néctar :

$$P_i = \frac{F(\theta_i)}{\sum_{k=1}^S F(\theta_k)} \quad (1)$$

P_i : probabilidad de seleccionar la i^{va} abeja ocupada

S : número de abejas ocupadas

ϑ_i : La posición de la i^{va} abeja ocupada

$F(\theta_i)$: valor de adaptación

Movimiento de los espectadores

- Cálculo de la nueva posición:

$$x_{ij}(t+1) = \theta_{ij}(t) + \phi(\theta_{ij}(t) - \theta_{kj}(t)) \quad (2)$$

- x_i : La posición de la abeja espectadora.
- t : número de iteración
- θ_k : a abeja ocupada elegida al azar.
- j : La dimensión de la solución
- $\phi(\bullet)$: Una serie de variables aleatorias en el intervalo. $[-1, 1]$

Movimiento de las Scouts

$$\theta_{ij} = \theta_{j \min} + r \cdot (\theta_{j \max} - \theta_{j \min})$$

(3)

– r : Un número al azar $r \in [0,1]$

Propiedades de Auto Organización

- **Retroalimentación positiva:** Como la cantidad de néctar de las fuentes de alimentos aumenta, el número de espectadores visitándola aumenta, también.
- **Retroalimentación negativa:** el proceso de explotación de las fuentes de alimentos pobres es detenido por las abejas.
- **Fluctuaciones:** Los exploradores llevan a cabo un proceso de búsqueda al azar para descubrir nuevas fuentes de alimento.
- **Múltiples interacciones:** Las abejas comparten su información acerca de las fuentes de alimentos con sus compañeros de nido en la zona de baile.

Parámetros de control del Algoritmo ABC

- El tamaño de enjambre
- número de espectadores: 50% del enjambre
- número de abejas empleadas: 50% del enjambre
- número de exploradores: 1

Exploración vs. Explotación

- Los espectadores y las abejas ocupadas llevan a cabo el proceso de explotación en el espacio de búsqueda
- Los scouts controlan el proceso de exploración