

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Facultad de Ciencias de la Computación



**PARÁMETROS DE ORDEN PARA  
CARACTERIZAR COMPORTAMIENTOS  
COMPLEJOS EN COLONIAS DE HORMIGAS**

Presenta:

Adriana Luna Jiménez

Tesis para obtener el grado de Maestría en:

Ciencias de la computación

Asesores

Dr. Alejandro Rangel Huerta

C. Dr. Ana Luisa Ballinas Hernández

Septiembre 2019



*A los causantes de mis sueños y anhelos,  
Rubén, Silvio y Sophie*

*A ti,  
que con tu ausencia  
me motivaste a llegar más lejos*



*Lo más terrible se aprende enseguida,*

*lo hermoso nos cuesta la vida*

*Silvio Rodríguez*



Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que, a través del sistema de becas en apoyo a la investigación en programas de posgrado, subsidió el presente trabajo durante el periodo de agosto de 2017 a julio de 2019.

## ***Agradecimientos***

De manera especial, agradezco a mi asesor de tesis, el Dr. Alejandro Rangel por darme a conocer los sistemas complejos, por motivarme a entrar al mundo de las hormigas y entrever que no son tan simples como se piensa; gracias por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, por compartir su conocimiento y guiarme con paciencia a la obtención de resultados. A mi asesora, la maestra Ana Luisa Ballinas por el tiempo de guía para la parte de implementación, por ayudarme a organizar las ideas en la redacción de este documento y por su agradable disposición a colaborar en este proyecto.

Además, este trabajo fue posible gracias al total apoyo de Silvio y Sophie, gracias por entender que a veces debían hacer sus tareas sin mí, por tolerar mis enojos y frustraciones y por buscar senderos de hormigas en todos lados.

Asimismo, nada de esto sería posible sin mi compañero de vida, este logro es gracias a que siempre ha creído en mí, me motivó a dejar el miedo atrás y continuar mi formación académica, gracias por ser un constructor de sueños, un soporte en los malos ratos, un ahuyentador de tristeza cuando mi padre se fue y por ser siempre el coraje que necesito, gracias, Rubén Ilhan.

A Lucia, mi madre, por mantenerse siempre de pie y no abandonar su labor de guía, esa fortaleza formó mis bases y ahora es testigo de este logro, gracias por no rendirse.

A Candy y Quecha por ser ese hogar donde podía acudir cuando ya no había ideas en mi cabeza y darme siempre aliento y apoyo. A mis hermanas, por ser siempre mis compañeras incondicionales, mis confidentes y ese complemento que sólo el amor de hermanas puede dar. A Silvia, por ser el medio entre Dios y yo, por proveer para mis herramientas de apoyo, por su cariño y por su plena confianza en mí. También, a la maestra Miriam Mancilla por la oportuna revisión en la redacción de este trabajo.

A mi padre, gracias por todo lo que hizo, sé que estaría orgulloso de mí.

## Contenido

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CONTENIDO                                                                             | 1  |
| ÍNDICE DE FIGURAS                                                                     | 2  |
| INTRODUCCIÓN                                                                          | 3  |
| 1.1 PROBLEMÁTICA                                                                      | 3  |
| 1.2 OBJETIVOS                                                                         | 3  |
| 1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES                                                           | 4  |
| 1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO                                                        | 5  |
| MARCO TEÓRICO                                                                         | 6  |
| 2.1 HORMIGUERO BIOLÓGICO                                                              | 6  |
| 2.2 FORRAJEО                                                                          | 22 |
| 2.3 HORMIGUERO Y SISTEMAS COMPLEJOS                                                   | 22 |
| 2.4 AUTOORGANIZACIÓN EN EL FORRAJEО DE HORMIGAS                                       | 25 |
| 2.5 PARÁMETROS DE AUTOORGANIZACIÓN EN EL FORRAJEО DE HORMIGAS                         | 26 |
| 2.6 SÍNTESIS                                                                          | 28 |
| ESTADO DEL ARTE                                                                       | 29 |
| 3.1 MODELOS DE ORDEN-DESORDEN EN COMPORTAMIENTOS DE FORRAJEО DE HORMIGAS              | 29 |
| 3.2 VARIANTES DEL MODELO DE FORRAJEО                                                  | 34 |
| 3.3 SÍNTESIS                                                                          | 36 |
| PROPUESTA DE PARÁMETRO DE ORDEN                                                       | 37 |
| 4.1 EL ORDEN EN BIOLOGÍA Y LA ENTROPÍA                                                | 37 |
| 4.2 MODELO DE ENTROPÍA PROPUESTO                                                      | 38 |
| 4.3 SÍNTESIS                                                                          | 40 |
| APLICACIÓN DEL PARÁMETRO DE ORDEN EN UN SISTEMA MULTIAGENTE DE FORRAJEО DE HORMIGAS   | 41 |
| 5.1 CONSIDERACIONES DEL MODELO MULTIAGENTE                                            | 41 |
| 5.2 SISTEMA MULTIAGENTE DEL FORRAJEО DE HORMIGAS                                      | 43 |
| 5.2.1 Entorno                                                                         | 43 |
| 5.2.2 Agente hormiga                                                                  | 45 |
| 5.2.3 Descripción grafica del ciclo Percepción-Decisión-Actuación del agente hormiga  | 50 |
| 5.3 COMPORTAMIENTOS COLECTIVOS                                                        | 51 |
| 5.4 MODELO DE ENTROPÍA PROPUESTO PARA EL SISTEMA MULTIAGENTE DEL FORRAJEО DE HORMIGAS | 52 |
| 5.5 SÍNTESIS                                                                          | 53 |
| VARIACIONES EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA MULTIAGENTE                                  | 56 |
| 6.1 VARIANTE DIFUSIÓN 0 EVAPORACIÓN 10                                                | 56 |
| 6.2 VARIANTE DIFUSIÓN 50 EVAPORACIÓN 5                                                | 57 |
| 6.3 NIDO Y FUENTE DE ALIMENTO CON ÁREA MENOR                                          | 59 |
| 6.4 SÍNTESIS                                                                          | 61 |
| CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO                                                       | 62 |
| 7.1 CONCLUSIONES                                                                      | 62 |
| 7.2 APORTACIONES                                                                      | 63 |
| 7.3 TRABAJO A FUTURO                                                                  | 63 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS                                                            | 65 |
| ANEXOS                                                                                | 66 |
| A.1 CÓDIGO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MULTIAGENTE                                  | 66 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1 HORMIGA REINA RODEADA DE HORMIGAS OBRERAS.                                                              | 7  |
| FIGURA 2.2 PRINCIPALES CASTAS DE HORMIGAS                                                                          | 8  |
| FIGURA 2.3 ESPACIO ACTIVO DE LA ALARMA FEROMONA 4-METIL-3-HEPTANONA                                                | 12 |
| FIGURA 2.4 FORMACIÓN DE SENDEROS CON FEROMONA DE RECLUTAMIENTO.                                                    | 15 |
| FIGURA 2.5 COMPUESTO QUÍMICO USADO PARA LA FORMACIÓN DE SENDEROS                                                   | 16 |
| FIGURA 2.6 COMUNICACIÓN ENTRE LA FUENTE DE ALIMENTO Y UNA HORMIGA                                                  | 17 |
| FIGURA 2.7 COMUNICACIÓN QUÍMICA ENTRE HORMIGA-HORMIGA-NIDO                                                         | 17 |
| FIGURA 2.8 COMUNICACIÓN ACÚSTICA                                                                                   | 18 |
| FIGURA 2.9 COMUNICACIÓN QUÍMICA ENTRE HORMIGAS-HORMIGAS-NIDO                                                       | 19 |
| FIGURA 2.10 COMUNICACIÓN ENTRE NIDO-HORMIGA                                                                        | 19 |
| FIGURA 2.11 DIAGRAMA DEL AGENTE HORMIGA                                                                            | 21 |
| FIGURA 2.12 OSCILACIONES COLECTIVAS DE LA ACTIVIDAD DE HORMIGAS DEL GÉNERO LEPTOTHORAZ [1].                        | 23 |
| FIGURA 2.13 MARCACIÓN DE CAMINOS DURANTE EL FORRAJE DE HORMIGAS DEL GÉNERO ATTA TEXANA [12]                        | 28 |
| FIGURA 3.1 FORRAJE DE HORMIGAS DE LA ESPECIE ATTA TEXANA, IMAGEN TOMADA DE [14]                                    | 30 |
| FIGURA 3.2 MODELO DE FORRAJE DE HORMIGAS BASADO EN ECUACIONES DIFERENCIALES DE PRIMER ORDEN                        | 32 |
| FIGURA 3.3 GRAFICA CORRESPONDIENTE A LA SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO DE TRES BLOQUES DEL FORRAJE DE HORMIGAS       | 35 |
| FIGURA 4.1 GRAFICA CORRESPONDIENTE AL CÁLCULO DE LA ENTROPÍA DEL MODELO DE 3 BLOQUES DEL FORRAJE DE HORMIGAS.      | 39 |
| FIGURA 4.2 FORMACIÓN DE VEREDAS DE HORMIGAS DE LA ESPECIE ATTA TEXANA, IMAGEN TOMADA DE [12]                       | 40 |
| FIGURA 5.1 DIAGRAMA DE INTERACCIÓN ENTRE EL AGENTE HORMIGA Y SU ENTORNO                                            | 43 |
| FIGURA 5.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CELDILLAS QUE COMPOENEN EL ENTORNO DEL MODELO MULTIAGENTE DE FORRAJE DE HORMIGAS | 44 |
| FIGURA 5.2 REJILLA DE FEROMONA                                                                                     | 45 |
| FIGURA 5.3 PERCEPCIÓN DEL AGENTE HORMIGA                                                                           | 45 |
| FIGURA 5.4 SE MUESTRA LA SECUENCIA DE ACCIONES DEL COMPORTAMIENTO ESPERAR                                          | 47 |
| FIGURA 5.5 ACCIONES QUE REALIZA EL AGENTE CUANDO HA ENCONTRADO UNA FUENTE DE ALIMENTO                              | 48 |
| FIGURA 5.6 SE MUESTRA LA SECUENCIA DE ACCIONES CUANDO EL AGENTE SE MUEVE SIGUIENDO UN RASTRO DE FEROMONA           | 48 |
| FIGURA 5.7 SE REPRESENTA LA SECUENCIA DE ACCIONES CUANDO EL AGENTE REGRESA AL NIDO.                                | 49 |
| FIGURA 5.8 CONTEO DE HORMIGAS EN CADA ESTADO POR TIEMPO                                                            | 52 |
| FIGURA 5.9 ENTROPÍA DEL MODELO MULTIAGENTE DEL FORRAJE DE HORMIGAS Y LA ENTROPÍA MÁXIMA                            | 53 |
| FIGURA 5.10 SIMULACIÓN FORRAJE DE HORMIGAS EN NETLOGO                                                              | 55 |
| FIGURA 6.1 SIMULACIÓN CON VALORES DE RAZÓN DE EVAPORACIÓN 10 Y RAZÓN DE DIFUSIÓN 0                                 | 56 |
| FIGURA 6.2 ENTROPÍA DE VARIACIÓN DE RAZÓN DE EVAPORACIÓN Y RAZÓN DE DIFUSIÓN DE FEROMONA                           | 57 |
| FIGURA 6.3 SIMULACIÓN CON VALORES DE RAZÓN DE EVAPORACIÓN 5 Y RAZÓN DE DIFUSIÓN 50                                 | 58 |

# CAPÍTULO 1

## Introducción

La motivación de este trabajo de investigación recae en la comprensión de características complejas que surgen cuando un colectivo de hormigas realiza tareas de manera grupal. Una de estas características es la autoorganización que emerge cuando los integrantes del colectivo son capaces de organizarse de manera autónoma para llevar a cabo una tarea a fin de lograr su supervivencia. Esta propiedad compleja nos indica que el colectivo se comporta de manera ordenada y autónoma, lo cual, para las ciencias de la computación motiva la realización de modelos de simulación bioinspirados que después sirven de base para el computo distribuido y sistemas con inteligencia artificial.

### 1.1 Problemática

La emergencia de patrones espaciales que se han observado en colonias de hormigas durante el forrajeo de alimento supone la existencia de organización entre ellas, para llevar a cabo esta tarea de manera ordenada. El presente trabajo de tesis plantea como problema encontrar un parámetro para cuantificar el orden y desorden existente durante la búsqueda y recolección de alimento de un colectivo de hormigas.

Para establecer un parámetro de orden se requiere, de manera obligada, de un modelo que permita simular el comportamiento biológico de un colectivo de hormigas forrajeras. Esto con el objetivo de aplicar el parámetro de orden y con base a los resultados obtenidos poder afirmar que el forrajeo se realiza de manera organizada. Se pretende modelar un sistema que se apegue al comportamiento biológico. Para ello que se requiere un análisis profundo del comportamiento natural de las hormigas para después generar reglas de comportamiento individuales que permitan la implementación de un sistema multiagente.

### 1.2 Objetivos

#### Objetivo general

Determinar un parámetro que cuantifique el orden-desorden durante la tarea colectiva del forrajeo de hormigas mediante la creación de un modelo de un sistema multiagente basado en reglas de comportamiento individual biológicas para aplicar el parámetro propuesto.

#### Objetivos particulares

1. Aplicar un modelo basado en ecuaciones diferenciales que caracteriza el comportamiento colectivo de búsqueda y recolección de alimento en una colonia de hormigas, establecer estados transitorios y realizar un conteo del número de hormigas en cada uno de esos estados por tiempo.
2. Proponer un parámetro de cuantificación de orden-desorden basado en las probabilidades

del número de hormigas transitando en alguno de los tres estados del modelo de ecuaciones diferenciales.

3. Definir el conjunto de reglas individuales que llevan a cabo las hormigas que buscan comida aleatoriamente guiadas por un determinado medio de comunicación para modelar un sistema multiagente basado en dichas reglas.
4. Aplicar el parámetro de orden-desorden en el sistema multiagente realizando un análisis de los resultados obtenidos en comparación con el modelo basado en ecuaciones diferenciales. Realizar experimentos en la simulación multiagente modificando características del entorno y presentando los resultados en gráficas para un mejor análisis.

### 1.3 Alcances y limitaciones

Los alcances de esta tesis se detallan a continuación:

Alcances del parámetro de orden:

- El parámetro de orden cuantificará con base a conteos probabilísticos, los conteos se referirán al número de hormigas que están llevando a cabo un comportamiento colectivo o estado.
- La propuesta del parámetro de orden se aplicará en el modelo de forrajeo de hormigas basado en ecuaciones diferenciales de primer orden. Se deberá explicar el método numérico de solución de este sistema, debido a que se requiere obtener el conteo del número de hormigas en cada estado del modelo en el tiempo.

Alcances del sistema multiagente:

- El modelo multiagente deberá establecer solo una forma de comunicación entre las hormigas y el entorno, debido a que en esta fase inicial es de interés caracterizar las propiedades más básicas que permiten la realización del forrajeo.
- Las reglas de comportamiento del modelo multiagente deberán apegarse de manera estricta al comportamiento biológico.
- Las características del entorno deberán caracterizar las propiedades que son indispensables para permitir que los agentes busquen y recolecten alimento, el entorno también deberá apegarse a la descripción biológica.

Limitaciones

- El parámetro de orden propuesto no podrá cuantificar de manera explícita con la base a la información transmitida entre hormigas, debido a que la caracterización de transmisión de información directa entre hormigas conlleva la formulación de reglas de comportamiento más elaboradas.
- En el modelo multiagente, el forrajeo caracterizado deberá ser el más general para no depender de una especie en particular, la implementación de comportamientos más avanzados requiere de un mayor tiempo de abstracción.

## 1.4 Organización del documento

Este trabajo de tesis se divide en siete capítulos. En el primer capítulo se establece la problemática que este trabajo de tesis resuelve, así como el objetivo, alcance y limitaciones. En el segundo capítulo se da un panorama de los comportamientos colectivos de las colonias de hormigas en su ambiente natural; esto, con el fin de generar reglas de comportamiento individuales que pueden ser útiles para los modelos de simulación computacionales. Además, se presenta un análisis de las características que emergen cuando los colectivos realizan la tarea de búsqueda y recolección de alimento, lo que permite guiar el estudio mediante las propiedades de los sistemas complejos y así, establecer un parámetro de orden que permita afirmar que el colectivo de hormigas realiza sus tareas de manera organizada.

En el capítulo tres se realiza el análisis de un modelo de forrajeo de hormigas basado en ecuaciones de primer orden, se analizan las características que intervienen en el diseño. Se propone un método numérico para solucionar el sistema de ecuaciones y obtener una simulación de este. En el capítulo cuatro se establece como parámetro de orden a la entropía, medida que permite establecer la cantidad de orden-desorden presente en el forrajeo de hormigas. En el capítulo cinco se establece un modelo multiagente basado en las características biológicas que permiten el desarrollo del forrajeo, se establecen reglas de comportamiento que permiten a los agentes ejecutar acciones autónomas, los resultados se presentan como curvas de comportamiento colectivo y una curva adicional donde se cuantifica la relación orden-desorden en términos de la función entropía del sistema.

En el capítulo seis se presentan simulaciones usando el sistema multiagente, el cual permite modificar características del entorno para obtener curvas de conteo y el comportamiento de la entropía en los tres casos propuestos. Finalmente, el capítulo siete presenta las conclusiones de este trabajo de tesis.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se establecen las características biológicas de una colonia de hormigas, se requiere determinar las propiedades que intervienen en el forrajeo de alimento. Se analiza la división de trabajo, el tipo de comunicación que se entabla entre hormigas que pertenecen a una misma casta, el comportamiento individual y autónomo, conforman la inspiración para la determinación de un parámetro de orden que permita afirmar la existencia de orden durante la realización de la tarea colectiva de búsqueda y recolección de alimento. Además, este estudio, permite el diseño de reglas simples para el sistema multiagente.

#### 2.1 Hormiguero biológico

Los colectivos biológicos han inspirado la formulación de modelos de simulación. En algunas ocasiones el propósito de estos modelos es predecir lo que sucederá en el mundo físico o sugerir y dirigir más experimentación y observación. Otro de los objetivos de formular simulaciones es fomentar una mayor comprensión del sistema en estudio [1], este último objetivo permite llevar las características del colectivo como punto de partida para impactar en otras áreas de conocimiento, para las ciencias de la computación, uno de los colectivos biológicos que más llama la atención son las hormigas. El estudio de estos insectos permite, por ejemplo, la elaboración de algoritmos de optimización utilizados para sistemas multiagente

La elección de estas colonias, entre muchas otras características, radica en que las sociedades de hormigas se consideran entre las más complejas conocidas en el reino animal. Son comparables solamente con las sociedades de termitas, de algunas especies de abejas y avispas. Las colonias que se pueden observar pueden llegar a agrupar hasta 300 millones de individuos en un solo nido. Una característica fundamental es que cada uno de estos individuos desempeña una tarea específica en pro del bienestar de la colonia [2]. Otro aspecto que hace factible el estudio de las hormigas es que son de fácil observación ya que están presentes en casi todos los ecosistemas del planeta con alrededor de 350 géneros y de 9000 a 20000 especies [2]. Algunos de los trabajos colaborativos que realizan lo hacen en superficies de libre acceso permitiendo observar formaciones de patrones, sistema de comunicación y comportamientos a nivel microscópico, mismos que fundamentan la elaboración de modelos de simulación.

Los expertos han observado que el éxito de las hormigas se debe a que su organización está basada en la división del trabajo, la tarea que desempeña cada uno de los individuos depende de la casta a la que pertenezca. Esta división por castas se define, principalmente, si los individuos son fértiles o no, básicamente se dividen en la casta de reinas y obreras, todas las hormigas viven en enormes familias constituidas por una o varias madres (las llamadas reinas) y su progenie de hembras



Figura 2.1 Hormiga reina rodeada de hormigas obreras.

estériles (llamadas obreras). La reina es la hormiga de mayor tamaño que vive enclaustrada en la parte menos accesible y más segura del nido, y solo se dedica a poner huevos que puede fecundar o no, esta actividad puede observarse en la figura 2.1. Es claro ver que las funciones de las hormigas reinas están encaminadas a la reproducción de la colonia y no a representar una autoridad central, de ser así, cada una de las hormigas reinas debería poseer una sofisticada habilidad cognitiva, tener pleno conocimiento acerca del estado de la colonia completa y poder comunicarse con todos los miembros del grupo, sin embargo, la primer limitante para que esto sea posible es que las hormigas reinas solo abandonan el nido cuando están listas para formar una nueva colonia por lo que sólo hasta ese momento tiene conocimiento de las condiciones de su medio[1]. Entonces, se puede afirmar que la colonia es un sistema descentralizado.

Se debe señalar que existe una interacción entre obreras y reinas, las hormigas reinas son las únicas que pueden generar sustancias químicas identificadoras, estas sustancias son adquiridas por las obreras mediante el contacto directo con la reina y transmitidas entre ellas mediante el acicalamiento y regurgitación [5] esta actividad produce la generación del olor de la colonia lo que a la vez permite la organización de las tareas (generación de procesos de retroalimentación positiva) y también imposibilita la sobrepoblación de un hormiguero (proceso de retroalimentación negativa). Ahora se puede notar que el estudio de un colectivo de hormigas puede ser guiado bajo la metodología de sistemas complejos ya que cumple con las características propias al ser descentralizado, conformado por un gran número de individuos con características similares y que se autoorganizan para llevar a cabo diferentes tareas propias de la supervivencia.

Con base en los estudios biológicos, las características de descentralización y conformación de una colonia con individuos similares ha quedado en clara evidencia, pero lo que requiere de un mayor estudio es analizar la forma de organización de tareas, detallar cuales de estas requieren de trabajo colaborativo y especificar el establecimiento de un sistema de comunicación entre los individuos, lo

cual es la base de cualquier colectivo social y parte fundamental de los sistemas complejos, esto nos lleva a concluir que en un hormiguero existe un flujo de información que se da a nivel microscópico y que da paso a la realización de una tarea que los biólogos pueden observar a nivel macroscópico.

Lo primero que se debe comprender es que la división del trabajo está caracterizada porque grupos de individuos especializados realizan diferentes actividades. Es la única forma de cooperar y funcionar como unidad, en lugar de la acción descoordinada de miembros no especializados que sólo se estorbarían durante la realización de una actividad común [3]. La división del trabajo optimiza el consumo de energía en relación con la producción debido, primero, a la repartición de tareas; segundo, a que los especialistas enfocan su actividad en las partes del nido donde es más probable que encuentren estímulos relacionados con su tarea; tercero, a que la ejecución de tareas relacionadas requiere de habilidades sensoriales y motoras similares; y, cuarto, porque la realización de una tarea mejora con la experiencia.

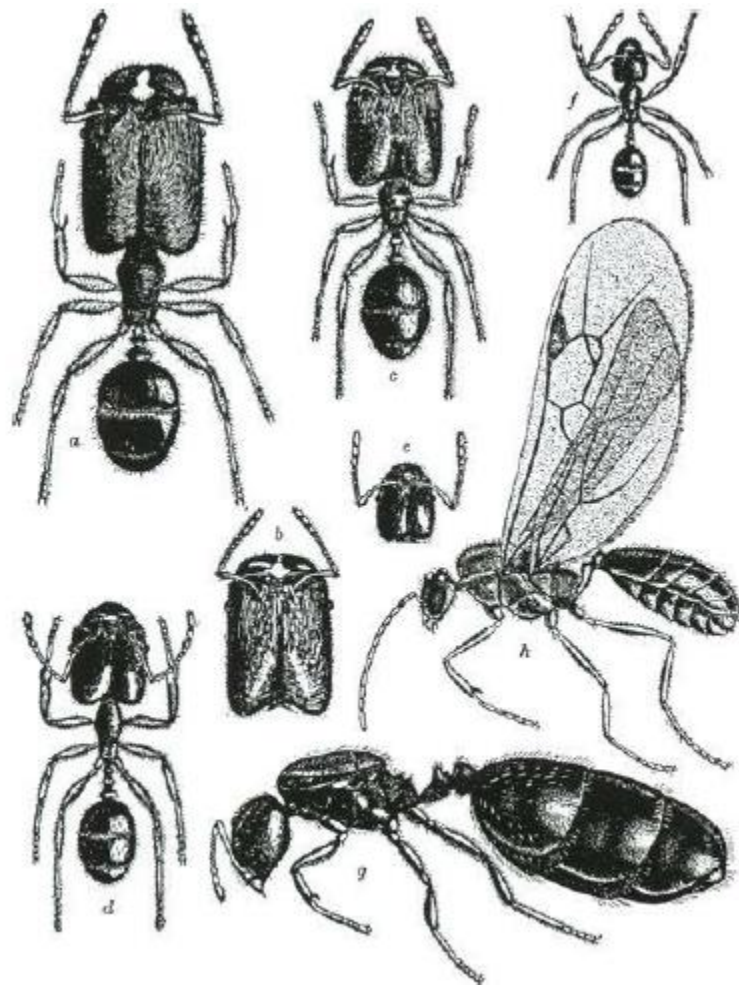


Figura 2.2 Principales castas de hormigas

La determinación de las castas en los insectos sociales es principalmente mediada por el ambiente, de donde provienen señales endocrinas y nutricionales que actúan como factores próximos que "conducen" el desarrollo de los individuos [3]. Para las sociedades de hormigas esta división de trabajo se denomina polietismo, este puede darse con base a la edad o por la casta. El polietismo por edad se refiere a la casta obrera, se ha observado que permanecen en el nido como enfermeras por un tiempo y conforme comienzan a envejecer entonces se dedican a la búsqueda y recolección de alimento o trabajos de construcción del nido [6], el polimorfismo por castas está en función de los cambios morfológicos que ocurren dentro de una misma casta, este tipo de polimorfismo es el responsable de la existencia de hormigas obreras que al paso del tiempo presentaron un crecimiento más acelerado definiendo así el comportamiento a desarrollar como por ejemplo la defensa de la colonia [6]. En la figura 2.2, se observan las castas femeninas y el macho de la hormiga mirmicina *Pheidole tepicana*. En este clásico dibujo de Wheeler, la casta trabajadora se muestra compuesta de subcastas sucesivamente disminuyendo el tamaño de los trabajadores principales (a) a través de los trabajadores de los medios (b-e) para el trabajador menor (f). La reina (g) y el macho (h) también se muestran. Imagen tomada de [4].

Con base en estas ideas es fácil entender porque las obreras forman un colectivo biológico dirigido hacia una tarea común de hormiguero. Además, cabe mencionar que cada individuo de una casta tiene una especialización en el desempeño de sus tareas lo que favorece a una mejor organización del colectivo. La existencia de especialización de una tarea en las hormigas estaría asociada con un buen uso de sus reglas individuales de comunicación, esto implicaría una mejor eficiencia en la realización de las tareas colectivas. De ser este el caso habría una sintonización en la aplicación de las reglas individuales de comunicación acompañadas de procesos de aprendizaje colectivo inducidos por perturbaciones del medio ambiente. Dentro del colectivo, los expertos han observado la ejecución de diferentes tareas, con apego a los estudios realizados por [4] la tabla 2.1 resume en orden de frecuencia de ejecución los comportamientos colectivos de más fácil observación y que interesan por tener características propias de los sistemas complejos pues al ejecutarlos se aprecian transiciones de fase y formación de patrones espaciales.

| # | Comportamiento                                     |
|---|----------------------------------------------------|
| 1 | Forrajeo                                           |
| 2 | Acarreo de alimento hacia adentro del nido         |
| 3 | Acarreo de compañeros muertos hacia el nido        |
| 4 | Manipulación de material para construcción de nido |

Tabla 2.1 Tareas colectivas de mayor frecuencia realizadas por hormigas

Como se puede observar, la tarea de forrajeo es la que se realiza con mayor frecuencia en el colectivo y biológicamente junto con la reproducción, la búsqueda y recolección de alimento son las más importantes para llevar a cabo los procesos de supervivencia. Debido a que la reproducción no es una tarea colectiva este trabajo se enfoca en el análisis de la tarea de forrajeo, que como ya antes se ha mencionado, este comportamiento se realiza de manera descentralizada, colectiva y permite la observación de fenómenos de orden y desorden. Una vez identificado el comportamiento a estudiar, el siguiente paso es identificar la forma de interacción de las hormigas, ya que el ser una tarea social se

habla de la existencia de transmisión y recepción de información implícita entre los individuos que conforman el colectivo. Mas adelante se detalla el ciclo de ejecución de esta tarea, pero antes es necesario conocer el establecimiento de comunicación entre hormigas.

Se ha descubierto que los modos de comunicación son extremadamente diversos, existen las estridulaciones<sup>1</sup>, caricias, agarres, toque de antenas, degustaciones, resoplidos y estrías de productos químicos que evocan varias respuestas desde el simple reconocimiento hasta el reclutamiento y la alarma.

La tabla 2.2 [4] presenta un esquema de las formas de comunicación entre individuos de la misma casta y entre castas diferentes, se describe el estímulo del emisor, la forma de entablar comunicación y la respuesta del receptor:

| Estimulo                                                                                                                                                                                                        | Transmisión                                           | Respuesta                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>De obrera a obrera</b>                                                                                                                                                                                       |                                                       |                                                                                                          |
| <b>1. Olor de la colonia</b>                                                                                                                                                                                    | Química                                               | Ninguno, si el olor es similar al del trabajador local                                                   |
| <b>2. Olor de la casta</b>                                                                                                                                                                                      | Química                                               | Reconocimiento de casta                                                                                  |
| <b>3. Contacto casual antenal o corporal</b>                                                                                                                                                                    | Táctil                                                | Girando hacia el emisor o realizando movimientos no dirigidos                                            |
| <b>4. Atrayentes de la superficie corporal</b>                                                                                                                                                                  | Química                                               | Aseo                                                                                                     |
| <b>5. Dióxido de carbono</b>                                                                                                                                                                                    | Química                                               | Agrupación y excavación                                                                                  |
| <b>6. Solicitud de alimento ingluvial</b>                                                                                                                                                                       | Probablemente táctil (tocando o acariciando un labio) | Regurgitación                                                                                            |
| <b>7. Regurgitación</b>                                                                                                                                                                                         | Químico, al menos en parte                            | Alimentación                                                                                             |
| <b>8. Emisión de sustancias de la glándula de Dufour como senderos</b>                                                                                                                                          | Química                                               | Atracción seguida de movimiento a lo largo del camino (utilizada en el forrajeo y la emigración en masa) |
| <b>9. Emisión de sustancias glándulas de Dufour durante el ataque</b>                                                                                                                                           | Química                                               | Atracción al trabajador perturbado                                                                       |
| <b>10. Emisión de sustancia cefálica</b>                                                                                                                                                                        | Química                                               | Comportamiento de alarma                                                                                 |
| <b>Ácido oleico y oleatos entre los productos de descomposición corporal</b>                                                                                                                                    | Química                                               | Comportamiento necrofórico: reconocimiento y eliminación del cadáver                                     |
| <b>Obrera con Reina</b>                                                                                                                                                                                         |                                                       |                                                                                                          |
| <b>Olor de colonia, contacto casual, atrayentes de la superficie del cuerpo, dióxido de carbono, regurgitación, sustancias del camino, lo mismo que en la comunicación de trabajador a trabajador anterior.</b> |                                                       |                                                                                                          |
| <b>Reina con Obrera</b>                                                                                                                                                                                         |                                                       |                                                                                                          |

<sup>1</sup> Sonido estridente que emiten ciertos insectos, como los saltamontes, los grillos o las hormigas.

|                                                                                                                                                                                                                                     |         |                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Olor de colonia, olor de casta, contacto casual, atrayentes corporales, dióxido de carbono, solicitud de alimentos ingluviales y sustancias necróforas, lo mismo que en la comunicación de trabajador a trabajador anterior.</b> |         |                                                                                                                              |
| <b>11. Feromona de reconocimiento de reina</b>                                                                                                                                                                                      | Química | Reconocimiento y atracción a la reina                                                                                        |
| <b>Reina con Reina</b>                                                                                                                                                                                                              |         |                                                                                                                              |
| <b>12. Feromona de inhibición de desalación</b>                                                                                                                                                                                     | Química | Inhibición del desprendimiento de alas por las reinas vírgenes aladas                                                        |
| <b>13. Olores de la etapa de vida</b>                                                                                                                                                                                               | Química | Reconocimiento de huevos, larvas de dos o más etapas, pupas y eclosionar a los trabajadores como etapas distintas de la vida |

Tabla 2.2 Comunicación entre diferentes castas de hormigas.

Se puede observar que la comunicación química es la preferida por la colonia de hormigas en general, sin embargo es importante mencionar las otras formas de comunicación, ya que algunas de ellas se utilizan para reforzar o agilizar la comunicación química cuando esta es muy básica, lo que depende en gran medida del tipo de sociedad que se esté observando, algunas hormigas basan su comunicación únicamente en señales químicas ya que sus sociedades están mejor organizadas pero muchas otras necesitan de una combinación de señales.

La comunicación química se asemeja al uso de palabras y frases (entre 10 y 20), dado que cada sustancia generada por una hormiga transmite un significado distinto pero muy general, lo importante de esta comunicación es que sirve para la organización de la realización de tareas que requieren la participación de un grupo de hormigas como el forrajeo de alimentos y materiales para construcción, este tipo de comunicación constituye la retroalimentación negativa y positiva a la vez, pues dependiendo de la cantidad de sustancia química que se emplee se estabiliza el funcionamiento de la colonia a fin de llevar a cabo su tarea.

La comunicación se puede enriquecer por la variación en la respuesta de acuerdo con la concentración de la feromona. En los trabajadores de la cosechadora Florida Pogonomyrmex badius, la principal feromona de alarma es la 4-metil-3-heptanona, que se almacena en cantidades de 0.2-34.0 microgramos (promedio: aproximadamente 16  $\mu\text{g}$ ) en el reservorio de la glándula mandibular, comunicación personal). Los trabajadores cerca del nido responden a concentraciones de umbral que promedian  $10^{10}$  moléculas por centímetro cúbico al moverse hacia la fuente del olor; cuando se alcanza una zona de concentración de uno o más órdenes de magnitud mayor que esta cantidad, las hormigas cambian a un frenesí de alarma agresiva. El espacio activo de la alarma puede, por lo tanto, visualizarse como un par concéntrico de hemisferios. A medida que la hormiga ingresa a la zona exterior, es atraída hacia la fuente puntual; cuando la próxima cruza al hemisferio central, se excita en un frenesí. Un patrón muy similar de respuesta a la misma feromona se produce en el cortador de hojas hormiga Atta texana y se ilustra en la figura 2.3.

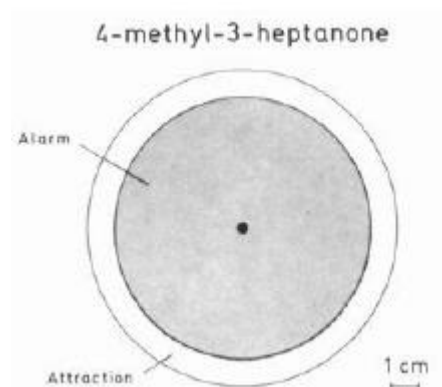


Figura 2.3 Espacio activo de la alarma feromona 4-metil-3-heptanona

El estudio de colocación de senderos, reclutamiento de trabajadores y seguimiento de senderos por hormigas obreras comprende un estudio cooperativo de entomólogos y químicos que ha resultado en la identificación de la naturaleza química de tales feromonas en muchas especies de cinco subfamilias de hormigas. Estas feromonas pueden comprender un solo compuesto o, en un caso excepcional, una mezcla de hasta 14 compuestos, pueden provenir de una sola glándula, o en algunos casos, una combinación de dos glándulas. Pueden ser peculiares de una sola especie o pueden ser compartidos por varias especies. Existen en la secreción glandular en cantidades de nanogramos a picogramos<sup>2</sup> y son detectados por los trabajadores en pequeñas cantidades en un camino [7].

La tabla 2.3 [4,5] presenta una síntesis de los tipos de comunicación que se entablan entre hormigas cuando realizan tareas colectivas, con este análisis se puede observar que existen diferentes formas de transmitir información y no solo se hace mediante quimiorreceptores, entre las más sofisticadas se encuentran las estridulaciones, este tipo de comunicación es más efectiva y atrae a un número mayor de hormigas en comparación con el uso de feromonas de atracción.

<sup>2</sup> El picogramo (pg) es una unidad de masa del Sistema Internacional de Unidades (SI), equivalente a la billonésima parte de un gramo. Se representa con el símbolo pg.

| Comunicación química                                                                                                                                                                                                                                                          |                                               |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Descripción: Este tipo de comunicación se basa en la producción de sustancias químicas por parte de un emisor que liberan o evocan ciertas conductas en los receptores, estas sustancias son producidas como secreciones glandulares y se almacenan en depósitos glandulares. |                                               |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |                                                                         |
| Emisor                                                                                                                                                                                                                                                                        | Componente fisiológico utilizado              | Medio de comunicación                                 | Receptor                                                                                                                                                                                                                                              | Componente fisiológico utilizado                                                                                      | Alcance                                                                                                                                                                            | Tarea                                                                   |
| El insecto emisor libera una porción de la sustancia quimiorreceptora como una señal para indicar, por ejemplo, el descubrimiento de una fuente de comida o una posible amenaza.                                                                                              | Glándulas emisoras                            | Las sustancias químicas se difunden a través del aire | La hormiga receptora percibe el mensaje a través de la concentración de la sustancia química, dependiendo del tipo y concentración se procesa el mensaje recibido y entonces se transforma en una indicación específica para llevar a cabo una tarea. | La percepción se realiza mediante membranas receptoras ubicadas en las antenas de cada individuo denominadas sensilos | La comunicación basada en quimiorreceptores es de alcance grupal debido a que cada individuo refuerza la concentración del químico con base a la percepción que tiene de su medio. | Las tareas asociadas para este tipo de comunicación son las siguientes: |
|                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1. Glándula Dufour                            |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    | Atracción                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2. Glándula venenosa                          |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    | Reclutamiento                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3. Glándula pigidial                          |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    | Alarma                                                                  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                               | 4. Glándula esternal                          |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    | Identificación de otras castas                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                               | 5. Glándulas mandibulares                     |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    | Reconocimiento de las larvas y otros estadios biológicos                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                               | 6. Glándulas metapleurales                    |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    | Discriminación entre compañeras de hormiguero y extrañas                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                               |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |                                                                         |
| Comunicación Acústica                                                                                                                                                                                                                                                         |                                               |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |                                                                         |
| Descripción: El uso de señales vibratorias se desarrolla débilmente en hormigas en comparación con la comunicación por feromonas. A menudo este tipo de comunicación ocurre junto con señales químicas.                                                                       |                                               |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |                                                                         |
| Emisor                                                                                                                                                                                                                                                                        | Componente fisiológico utilizado              | Medio de comunicación                                 | Receptor                                                                                                                                                                                                                                              | Componente fisiológico utilizado                                                                                      | Alcance                                                                                                                                                                            | Tarea                                                                   |
| La hormiga emisora produce sonidos mediante alguna de                                                                                                                                                                                                                         | Por golpeteos:                                | La mayoría, pero no todas las señales acústicas se    | La hormiga receptora capta las vibraciones que se propagan a                                                                                                                                                                                          | Para la recepción de las ondas vibratorias, las                                                                       | Golpeteos: contenido máximo de energía de 4-5 kilohertzios, se                                                                                                                     | Según las especies, la comunicación                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                               | El sonido se produce a través del golpeteo de |                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |                                                                         |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                        |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                    |                                                                                  |                                                                                              |                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| las dos formas conocidas: por golpeteos o por estridulaciones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | la mandíbulas o gáster contra el sustrato.                                                                                             | transmiten principalmente a través del suelo, paredes del nido o algún otro sustrato solido en lugar de a través del aire. | través del suelo, en algunas especies la intensidad de las vibraciones determina la calidad nutritiva del alimento                                                                 | hormigas hacen uso de detectores extremadamente sensibles ubicados en sus patas. | atenúa a una velocidad de 2 decibelios por cm                                                | por sonido es usada en:                         |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Por estridulaciones:                                                                                                                   |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                    |                                                                                  | Alarma                                                                                       |                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | El sonido se produce elevando y bajando el gáster frotándose contra un raspador situado cerca del borde del tercer segmento abdominal. |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                    |                                                                                  | Reclutamiento                                                                                |                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                        |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                    |                                                                                  |                                                                                              |                                                 |
| Comunicación táctil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                        |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                    |                                                                                  |                                                                                              |                                                 |
| Descripción: las señales táctiles cumplen varias funciones comunicativas, transmiten solo una cantidad limitada de información. Este tipo de comunicación en gran parte está encaminado a recibir información más que enviarla, lo que quiere decir que las hormigas hacen frente a los cuerpos de los compañeros de nido para olerlos, no para informarles. La técnica más estudiada es la trofalaxis. |                                                                                                                                        |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                    |                                                                                  |                                                                                              |                                                 |
| Emisor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Componente fisiológico utilizado                                                                                                       | Medio de comunicación                                                                                                      | Receptor                                                                                                                                                                           | Componente fisiológico utilizado                                                 | Alcance                                                                                      | Tarea                                           |
| En este tipo de comunicación, no existe como tal una hormiga emisora, más bien se puede interpretar como una solicitud de información, el cual se hace mediante el golpeteo o toque constante hacia el insecto que contiene la información.                                                                                                                                                             | Antenas y patas                                                                                                                        | Antenal y corporal                                                                                                         | La hormiga receptora obtiene un golpeteo y dependiendo del lugar donde se haya dado entonces responderá a este estímulo compartiendo alimento o iniciando la tarea de seguimiento. | Antenas y patas                                                                  | Este tipo de comunicación se lleva a cabo entre pares por lo que afecta a un solo individuo. | Trofalaxis y rutinas de reclutamiento en tándem |
| Comunicación visual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                        |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                    |                                                                                  |                                                                                              |                                                 |
| Este tipo de comunicación se lleva a cabo de manera muy limitada debido a una restricción fisiológica, en algunas especies que poseen ojos grandes entonces tienen una excelente forma de visión y pueden detectar objetos en movimiento, lo que les sirve para llevar a cabo comportamientos por imitación, sin embargo, no existe un ejemplo sólidamente documentado.                                 |                                                                                                                                        |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                    |                                                                                  |                                                                                              |                                                 |

Tabla 2.3 Síntesis de los tipos de comunicación generales entre hormiga

La colocación de senderos se ha definido como una actividad de campo en la que un insecto marca una ruta con rastros de olores de manera que otros insectos de la misma comunidad puedan seguirla. El proceso de crear un sendero comienza con una hormiga exploradora que encuentra comida. Después de que se ha alimentado, deposita un rastro de productos químicos cuando regresa al nido. Dentro o justo fuera del nido, atrae a otros trabajadores en una variedad de formas que no siempre se entienden. Puede incluir contacto antenal, regurgitación, movimientos bruscos o la emisión de otro olor que recluta trabajadores para abandonar el nido (tabla 2.2). Es evidente que este acto de reclutamiento puede ser una parte integral del proceso químico general del seguimiento de rastros.

El reclutamiento se define como la comunicación que lleva a los compañeros de nido a algún punto del espacio donde se requiere trabajo. Los trabajadores reclutados siguen el camino hacia la fuente de alimentos. Los trabajadores que regresan cargados de comida refuerzan el camino. Cuando la comida se agota y los trabajadores vuelven vacíos, ya no vuelven a aplicar la sustancia del camino, y el olor se evapora. El camino por lo tanto existe solo mientras sea útil.

El proceso de búsqueda masiva de senderos, tal como ahora los entendemos, se ilustra en la figura 2.4 [7], el cual describe el esquema de la vida de un sendero de búsqueda de comida. (a) Un trabajador que busca al azar encuentra comida. (b) A medida que regresa al nido, establece un camino químico. (c) Dentro del nido, otros trabajadores son estimulados de diversas maneras para emerger y seguir el rastro. (d) Los trabajadores de replete continúan reforzando el rastro con su secreción. (e) Cuando los alimentos se explotan por completo, los trabajadores no exitosos ya no refuerzan el camino. (f) La comida se consume, los trabajadores hambrientos no ponen la secreción. El grosor de la línea indica la fuerza del olor. Las líneas discontinuas representan el debilitamiento del olor a medida que el camino se evapora. El camino es eficiente porque la cantidad de trabajadores que lo utilizan es proporcional a la cantidad de alimentos disponibles.

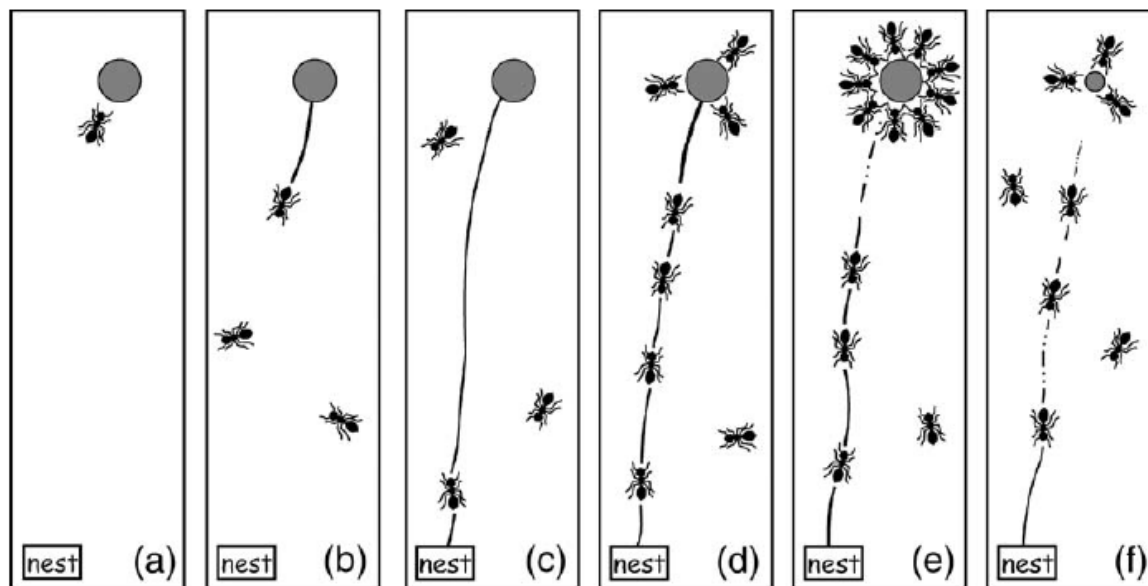


Figura 2.4 Formación de senderos con feromona de reclutamiento.

La primera feromona de seguimiento identificada químicamente fue la de *Atta texana*, el compuesto se identificó como 4-metilpirrol-2-carboxilato de metilo ( $C_7H_9NO_2$ ) (figura 2.5), este compuesto se encuentra en la glándula de veneno, los expertos aseguran que probablemente este compuesto este acompañado de otros más sin embargo no interfieren con la tarea de reclutamiento. La tarea de reclutamiento es un comportamiento complejo que permite la observación de formación de patrones espaciales, estos patrones muestran que las hormigas han pasado de un estado desorganizado a uno organizado. Para que el colectivo de hormigas inicie la tarea de recolección de alimentos primero deben buscar una fuente de alimento y cuando esta es encontrada entonces da paso a la comunicación de reclutamiento, esta comunicación se realiza haciendo uso de la sustancia química  $C_7H_9NO_2$  además de otro tipo de comunicación que se detalla más adelante.

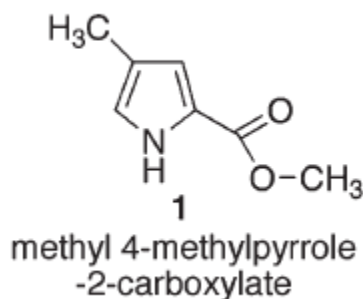


Figura 2.5 Compuesto químico usado para la formación de senderos

| Tipo de comunicación | Componente          | Intensidad/concentración                | Tarea por desarrollar                            |
|----------------------|---------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Química              | $C_7H_9NO_2$        | 0.8, 8.0 y 80.0 pg/cm                   | Atracción por reclutamiento                      |
| Acústica             | Estridulaciones     | Vibraciones con alcance de hasta 15 cm  | Atracción por reclutamiento                      |
| Química              | 4-Metil-3 heptanone | $5.7 \times 10^{-13}$ g/cm <sup>3</sup> | Reconocimiento de compañeras de nido y atracción |
| Química              | 4-Metil-3 heptanone | $5.7 \times 10^{-12}$ g/cm <sup>3</sup> | Alertamiento                                     |
| Química              | 2-Heptanone         | Baja concentración                      | Alertamiento                                     |
| Química              | 2-Heptanone         | Alta concentración                      | Alertamiento y ataque                            |

Tabla 2.4 Comunicación entre hormigas del género *Atta texana*

Se puede observar en la figura 2.4 un conjunto de imágenes que ejemplifican la forma en que las hormigas realizan un trabajo colaborativo, lo que es indispensable observar, es la formación del camino de seguimiento, esto debido al uso de la feromona  $C_7H_9NO_2$  la cual es la principal forma de entablar comunicación entre obreras del género *Atta texana*, una manera más específica para analizar este proceso de comunicación se detalla en los siguientes diagramas.

A continuación se presentan diagramas que establecen la dirección del flujo de información cuando las hormigas realizan la tarea de forrajeo, se incluyen los diferentes tipos de comunicación en términos de emisor-receptor. El establecimiento de estos diagramas es un ejercicio que permite el primer establecimiento de reglas de comportamiento en términos de transmisión de información.

## Comunicación Fuente de alimento-Hormiga

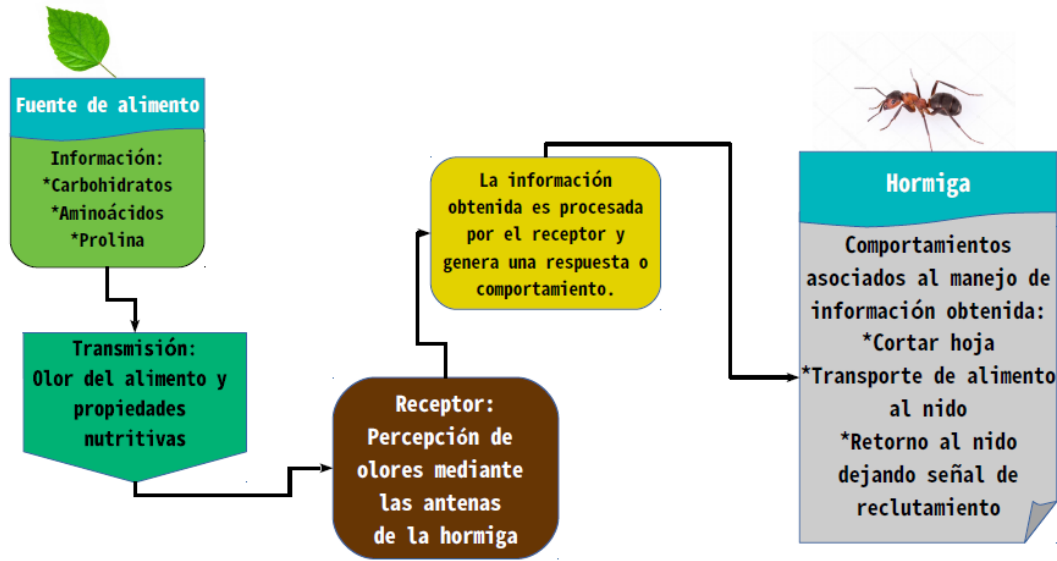


Figura 2.6 Comunicación entre la fuente de alimento y una hormiga

## Comunicación química Hormiga-Hormiga-Nido

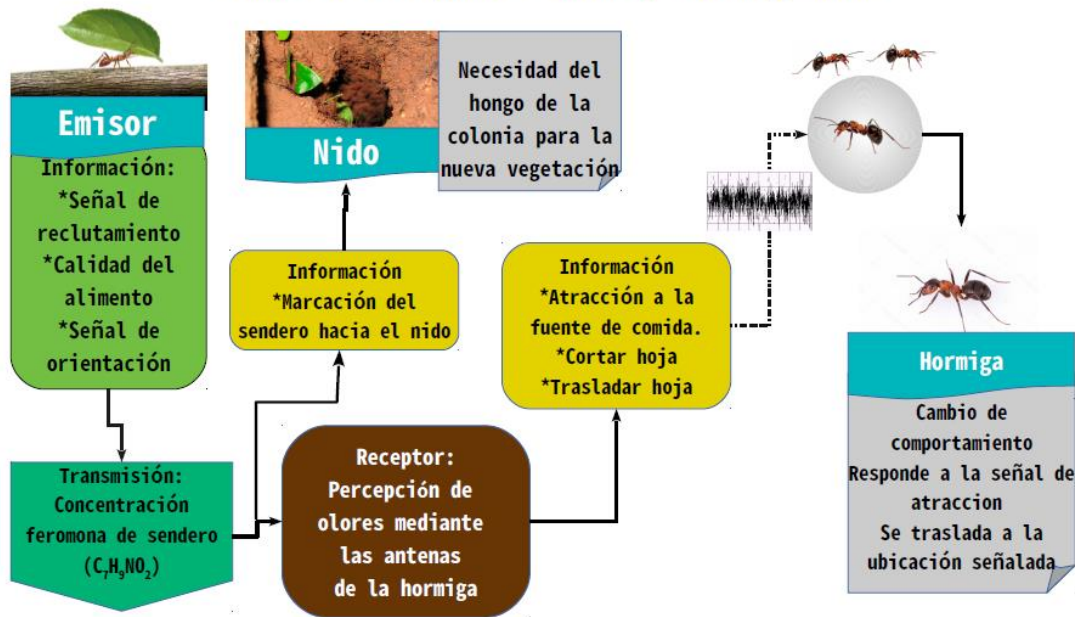


Figura 2.7 Comunicación química entre hormiga-hormiga-nido

La tarea de forrajeo de alimento inicia cuando una obrera forrajera encuentra una fuente de alimento, debe obtener información específica para iniciar el traslado del alimento al nido y a la vez comunicar a sus compañeras el hallazgo, la figura 2.6 ejemplifica lo que sucede en los incisos (a) y (b) de la figura 2.4. Cuando una hormiga retorna al nido con una porción de alimento, en su camino va informando a sus compañeras características propias del alimento lo que provocara una atracción a la fuente de comida, una vez llegando al nido la hormiga forrajera ha establecido un canal de

comunicación entre la fuente de comida y el nido, después mediante un proceso de retroalimentación obtendrá información del nido para decidir el tipo de comportamiento que debe realizar, la figura 2.7 ejemplifica lo que ocurre en los incisos (c) y (d) de la figura 2.4

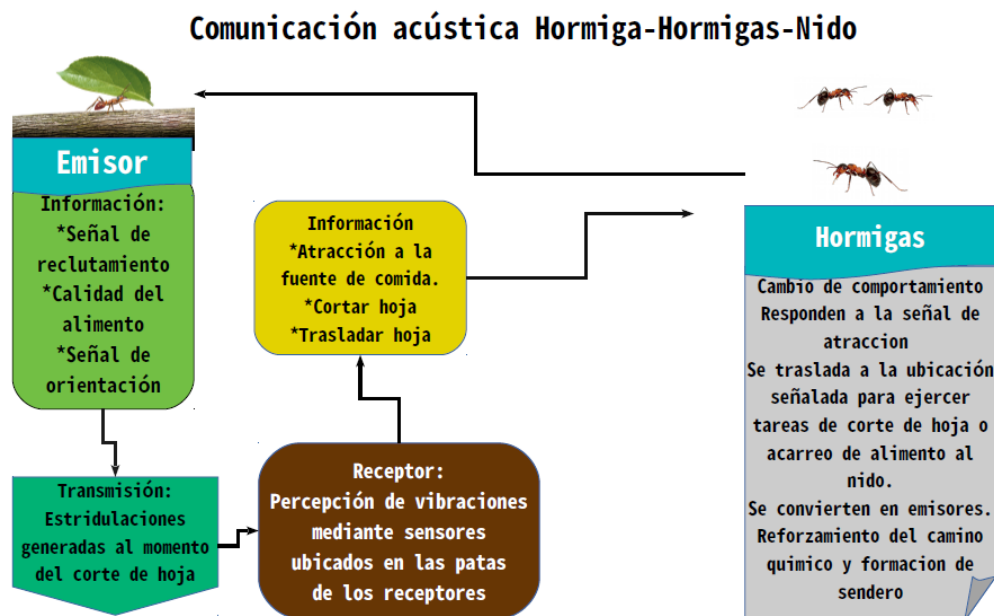


Figura 2.8 Comunicación acústica

El género *Atta texana* realiza la tarea de forrajeo no solo mediante comunicación química, también utiliza estridulaciones, la hormiga que ha encontrado una fuente de alimento emite vibraciones a través del sustrato para reclutar a las forrajeras que reciban el mensaje, este tipo de comunicación es masiva lo que provocará el inicio de la formación del sendero y de patrones espaciales de fácil observación, este comportamiento se representa en la figura 2.8. La figura 2.9 representa la comunicación química entre un grupo de hormigas hacia otro grupo de hormigas basada en quimiorreceptores, cuando esto ocurre emergen propiedades visibles propias de los sistemas complejos; en esta fase, son varias hormigas obreras que han acudido al llamado de reclutamiento uniéndose a la realización de esta tarea por lo que se convierte en un ejercicio colectivo en el cual se da la formación de patrones espaciales. La repartición de tareas como traslado, corte y cuidado del alimento, la comunicación entre el nido y la fuente de comida fluye de manera directa a través de las forrajeras, cuando el alimento se ha agotado también culmina la tarea colectiva y el proceso vuelve a iniciar tal como se muestra en los incisos (e) y (f) de la figura 2.4.

## Comunicación química Hormigas-Hormigas-Nido

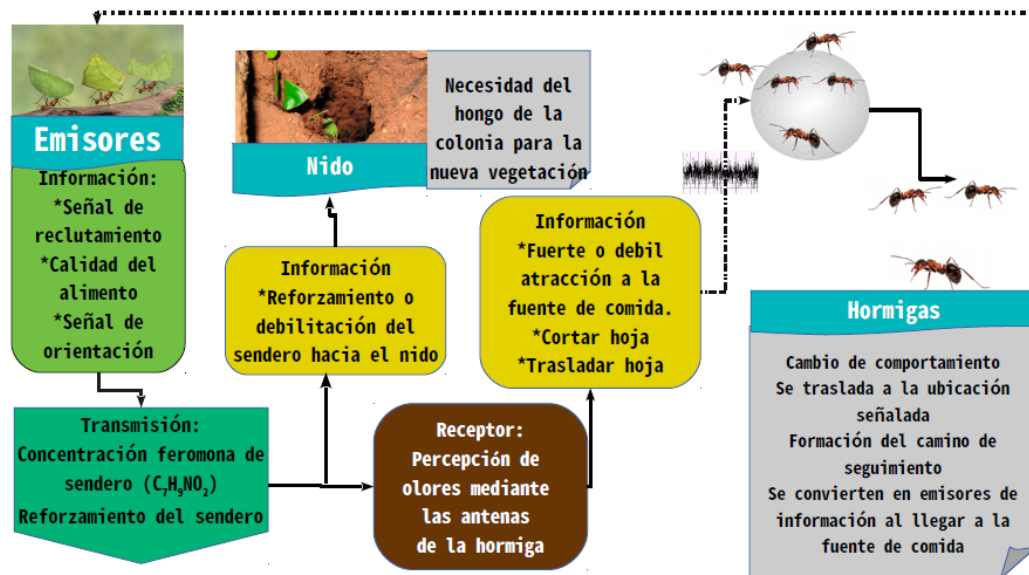


Figura 2.9 Comunicación química entre hormigas-hormigas-nido

## Comunicación Nido - Hormiga

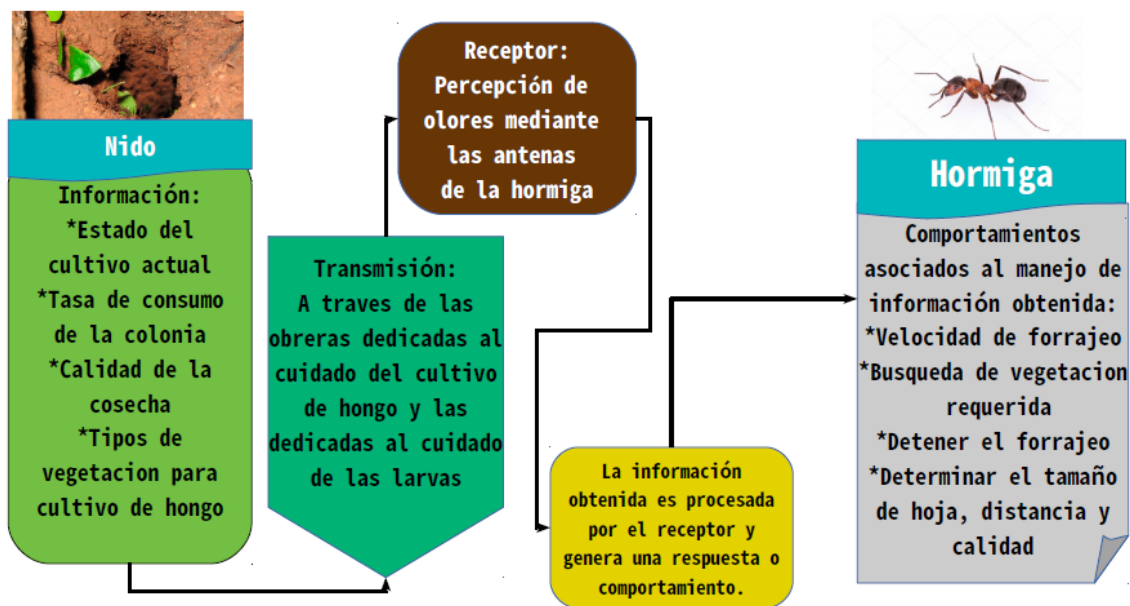


Figura 2.10 Comunicación entre nido-hormiga

La comunicación que se entabla a nivel global al realizar la tarea de forrajeo es finalmente entre el nido de hormigas y el medio, figura 2.10, esto ocurre a través de las hormigas forrajeras, cuando una hormiga llega al nido luego de acarrear alimento, debe obtener cierta información del estado del nido, de los cultivos de hongo y el consumo requerido de alimento de la colonia para determinar el ritmo de forrajeo, con esto se concluye que la tarea de búsqueda y recolección de alimento esta moderada

por las condiciones del nido lo que se sabe a través de un flujo de información que fluye mediante cada una de las castas de hormigas.

Las ciencias biológicas dedicadas al estudio del comportamiento de hormigas, destaca como características principales, que poseen una organización para la ejecución de diferentes tareas, cada una de estas tareas es realizada por miembros que pertenecen a una misma casta y que todos estos comportamientos se llevan a cabo de manera colaborativa, excepto el de la reproducción. La reina que habita en una colonia es responsable únicamente de la fundación y reproducción de esta, por lo que no influye en el orden o control sobre las tareas que lleva a cabo la colonia. Por tales características, este colectivo biológico es la inspiración para la formulación de modelos (matemáticos, lógicos, basados en reglas, etc.) y simulaciones computacionales, que tienen como finalidad, profundizar en el aprendizaje de los sistemas de autoorganización para la realización de tareas. Lo que implica el manejo de un sistema para la transmisión de información, pues un hormiguero visto como un conjunto de sistemas distribuidos, están conectados de tal forma que la información que comparten entre castas modula los comportamientos colectivos con el único objetivo de lograr su supervivencia.

Es así, que, para la computación, poder comprender los mecanismos de organización y el flujo de información hará posible la formulación de algoritmos que permitan resolver problemas propios de esta ciencia de manera colaborativa, requiriendo cada vez menos de sistemas de control diseñando en cambio procesos algorítmicos de aprendizaje y conocimiento del entorno para tomar decisiones en beneficio de la tarea que se está ejecutando.

La teoría de sistemas complejos nos describe ciertas características que podemos llegar a observar en una colonia de hormigas, lo que nos permite utilizar estos conceptos para dirigir el estudio y análisis de un hormiguero en términos no biológicos y que facilitan el traslado de comportamientos naturales a términos del área de la ciencias computacionales.

De manera muy general, podemos observar un gran número de subsistemas comunicándose para llevar a cabo tareas colaborativas, sin ningún tipo de líder que planee la forma de organización, tiempos o proyectos, es más bien un colectivo que conoce su entorno, se comunica para conocer el estado global actual del nido y así iniciar una tarea a nivel microscópico sin dejar de informar cualquier situación de peligro o beneficio, lo que deriva en conductas globales autoorganizadas, una de las tareas que se llevan a cabo de este modo y que es muy perceptible es la del forrajeo. Cuando un conjunto de hormigas o subsistemas ha llegado a organizarse para la recolección de alimento hacia el nido se puede ver la formación de senderos y se puede afirmar que cada una de estas hormigas sabe lo que debe realizar, cuando y como.

Como todo sistema complejo, existen procesos de retroalimentación positivos y negativos, los patrones espaciales emergentes son el resultado de la atracción hacia una fuente de alimento, lo que se puede entender como retroalimentación positiva, pero no todas las integrantes de la colonia acuden a estos llamados, esto es porque la retroalimentación negativa modula el comportamiento de reclutar ya que las mantiene en otros tipos de tareas que son indispensables para la supervivencia tales como el cuidado de las crías, defensa del nido y en caso de las *Atta texana*, el cultivo del hongo que les sirve de alimento, entonces se puede concluir que las condiciones ambientales modulan los comportamientos microscópicos.

Los comportamientos microscópicos que se llevan a cabo en el colectivo biológico de hormigas se pueden modelar como reglas para un sistema multiagente en el ámbito de la computación, esto es debido a que las tareas que realizan las hormigas lo hacen de manera colaborativa y distribuida, es importante señalar que estas reglas son muy simples y no lineales, lo que significa que una hormiga no responde del mismo modo a una información recibida, tienen un comportamiento simple pero variado.

Una característica que cabe destacar es que estos comportamientos los lleva a cabo de manera autónoma y dependiendo únicamente de los estímulos que recibe de su medio ambiente por lo que procesan la información obtenida y reaccionan a su medio integrándose a la colaboración de una tarea, en este trabajo nos referimos al forrajeo, ya que esta actividad se realiza de modo colectivo, con distribución de tareas y teniendo un objetivo en común, la biología indica que en este proceso existe un sistema de comunicación entre hormigas, por lo que modeladas como agentes tienen la capacidad de percibir y reaccionar.

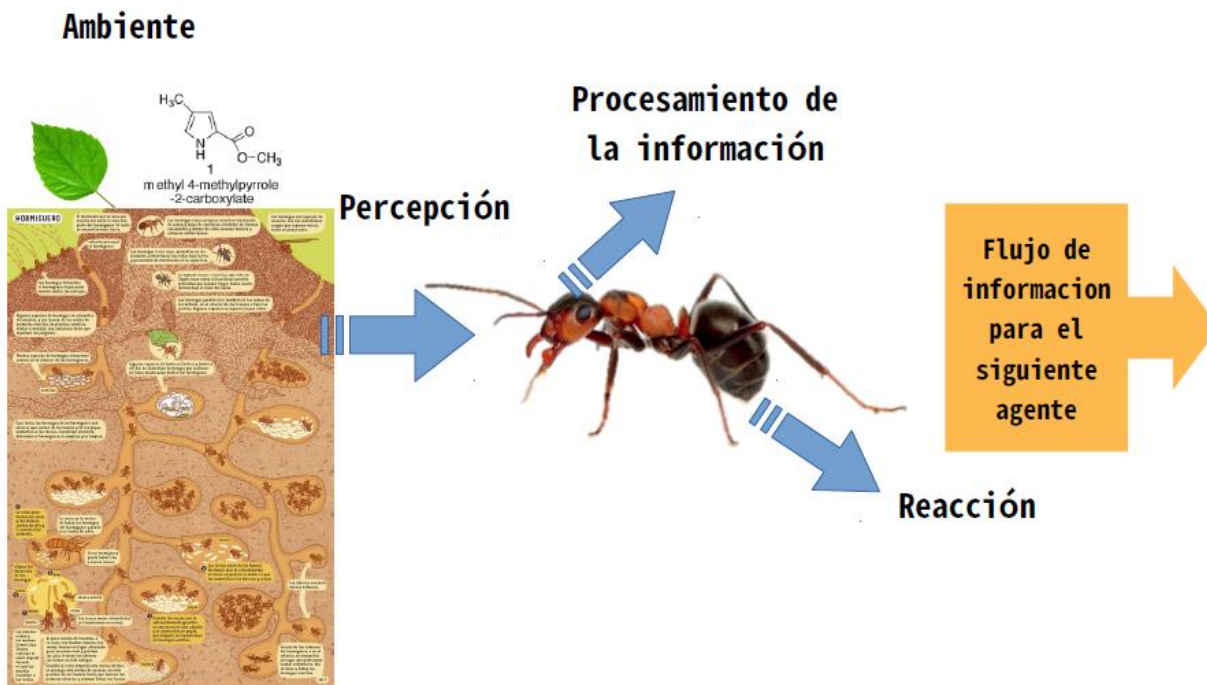


Figura 2.11 Diagrama del Agente hormiga

La figura 2.11 establece que una hormiga puede ser vista como un agente con capacidad de percibir el entorno donde habita y el sustrato donde se desplaza para realizar la búsqueda y recolección de alimento, únicamente basándose en tales percepciones, lleva a cabo la toma de decisiones para finalmente reaccionar a las condiciones percibidas. Las acciones de reacción modifican el entorno y se crea una comunicación indirecta entre agentes a través del entorno.

## 2.2 Forrajeo

El forrajeo ha sido una actividad que ha inspirado, por ejemplo, el diseño de modelos de optimización basados en metáforas matemáticas cuyo objetivo es la maximización del rendimiento energético, es una tarea de fácil observación y que cumple con las características propias de un sistema complejo ya que se realiza de manera colectiva, con división de roles, entablando un sistema de comunicación a nivel microscópico el cual desencadena comportamientos individuales en el receptor que no se llevan a cabo de manera estricta, más bien se tiene un listado de posibles respuestas a los estímulos recibidos por parte del emisor, cuando estos comportamientos son conducidos hacia la misma tarea entonces emergen propiedades de fácil observación por lo que esta actividad facilita su análisis a nivel global.

De manera general, la tarea de forrajeo se puede describir con reglas de comportamiento a nivel individual, a continuación, se hace una propuesta:

- 1) Una hormiga forrajera sale del nido con información del estado del nido, por ejemplo: el tipo de alimento que debe buscar; está en un estado de búsqueda (permanece en este estado hasta que un estímulo del medio la haga cambiar).
- 2) Si encuentra alimento, debe determinar el tamaño de la porción y con base en esto realizar (cambio de estado):
  - a. Reclutamiento masivo de obreras cortadoras por emisión de estridulaciones.
  - b. Reclutamiento de compañeras de transporte por estridulaciones.
  - c. Cortar la hoja y transportarla al nido
- 3) Si está buscando y encuentra un rastro de feromona
  - a. Si el rastro es lo suficientemente fuerte entonces síguelo.
  - b. Si el rastro es débil entonces continúa buscando.
- 4) Retornar al nido siguiendo el camino marcado si existe si no marca en apego a
  - a. Reforzar camino si hay suficiente alimento para más compañeras
  - b. No reforzar si el alimento se agotó.
- 5) Obtener información del estado del nido, determinar continuar forrajeando o no.

El análisis anterior puede servir de base para el desarrollo de modelos de simulación del forrajeo de hormigas, ya que proporciona una descripción completa del sistema real. En efecto en este proyecto haremos modelos del forrajeo basados en sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias y en la última parte propondremos un modelo de simulación de un sistema multiagente describiendo la tarea de forrajeo y tomando en cuenta las actividades principales que modulan esta actividad.

## 2.3 Hormiguero y Sistemas Complejos

La teoría general de sistemas no da una definición exacta de lo que es un sistema, sin embargo, se puede hablar de ciertos componentes básicos que nos acercan a una referencia de lo que es, debemos saber que básicamente los sistemas se dividen en abiertos y cerrados, de estos, los abiertos son los que representan un mayor reto para estudio y análisis. Los sistemas abiertos son aquellos que intercambian energía con su medio y además son dinámicos, algunas de sus características son que

poseen corrientes de entrada y un proceso de conversión el cual genera una corriente de salida [9]. A este tipo de sistemas pertenecen los llamados complejos.

Cabe señalar que no todos los sistemas dinámicos son complejos, la complejidad es el problema central de este tipo de sistemas, una característica importante es que estos sistemas deben estar compuestos por un gran número de subunidades o elementos con características similares, casi idénticos, y estos elementos deben interactuar de manera local lo cual conduce a la emergencia de propiedades a nivel global. Estas propiedades emergentes son de carácter complejo mientras que las interacciones a escala microscópica no lo son, la complejidad también está relacionada con la generación espontánea de orden que se manifiesta en varias escalas temporales y espaciales diferentes a aquella en la que ocurren las interacciones, se trata de un orden generado sin la intervención de un control central o de un plan predefinido en los mecanismos de interacción, este nuevo orden se conoce como autoorganización [10].

Una característica más de los sistemas complejos es la adaptación la cual emerge como resultado de las interacciones locales entre individuos y la autoorganización. Las propiedades emergentes de los sistemas complejos tales como dinámicas y estructuras no pueden ser reducidas a explicaciones ni gestiones de tipo cíclico, regular o previsible [1], tal como se observa en la figura 2.12.

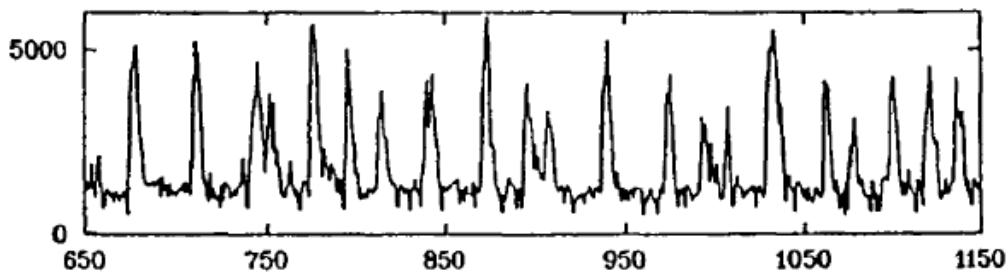


Figura 2.12 Oscilaciones colectivas de la actividad de hormigas del género *Leptothorax* [1].

Ahora es momento de hablar del hormiguero como sistema complejo, las propiedades de los sistemas complejos están presentes en las colonias de hormigas, y de manera más reducida, en la tarea de búsqueda y recolección de alimentos, en la siguiente tabla se presentan de manera precisa cada una de estas características.

| Comportamientos individuales durante el forrajeo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Colonia de Hormigas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Sistema Complejo                              |
| <p>La forma de interactuar entre individuos se puede visualizar de manera explícita en las figuras 2.7, 2.8 y 2.10 del apartado anterior. Algunas de estas interacciones son las siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cortar hoja.</li> <li>▪ Transportar alimento al nido dejando señal de reclutamiento.</li> <li>▪ Retornar al nido dejando señal de reclutamiento sin alimento ya que es muy grande.</li> <li>▪ Si está buscando y detecta una señal responder.</li> </ul> | <p>Interacciones individuales no lineales</p> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Si la colonia requiere más alimento aumentar velocidad si no mantener velocidad.</li> <li>▪ Si ya no se requiere alimento detener forrajeo.</li> <li>▪ Si es el alimento buscado trasladar si no seguir buscando.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                  |
| <p>En la Tabla 2.2 se explica que existe un sistema de comunicación entre hormigas que pertenecen a diferentes castas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Si existe un buen número de larvas que tendrá éxito entonces se requiere más alimento.</li> <li>▪ El estado del cultivo de hongo determina la cantidad y tipo de alimento para llevar al nido.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Los subsistemas están conectados |
| La tarea de forrajeo no requiere de una hormiga que controle el inicio o fin de esta actividad, está más bien regulada por los procesos de retroalimentación negativa y positiva. La reina no influye ni coordina esta tarea.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Descentralizado                  |
| Comportamientos colectivos durante el forrajeo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                  |
| Colonia de hormigas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Sistema Complejo                 |
| <p>El forrajeo es una tarea que está regulada por diferentes factores, mismos que actúan como corrientes de retroalimentación positiva y negativa.</p> <p>Positiva:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El reclutamiento constituye la principal corriente positiva para realizar esta tarea (figura 2.4 incisos (a) al (e)).</li> <li>▪ Si el ambiente proporciona un alimento de gran tamaño entonces más hormigas se suman a esta tarea.</li> <li>▪ Si el nido requiere más alimento el forrajeo se sigue realizando.</li> </ul> <p>Negativa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Si el medio proporciona una porción pequeña de alimento entonces no se recluta de manera masiva.</li> <li>▪ Si el alimento se ha agotado entonces desaparece el patrón espacial formado o se elimina el camino (figura 2.4 (f)).</li> <li>▪ Las condiciones climáticas modulan el ritmo de forrajeo.</li> <li>▪ La colonia tiene más necesidades lo que provoca que se module el número de hormigas dedicadas a esta tarea.</li> <li>▪ Pérdida de forrajeras debido a depredadores.</li> </ul> | Retroalimentación                |
| La tarea de forrajeo es una de las importantes y que se realiza de manera más frecuente (tabla 2.1) lo que constituye una actividad que regula la adaptación de la colonia al medio, ya que aprenden de las condiciones climáticas que les proporciona el medio ambiente para regular la tarea de búsqueda y recolección de alimento y así llevarla a cabo en las mejores épocas del año.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Adaptación                       |
| En el caso del forrajeo el patrón espacial que se observa son las veredas (figura 2.4), cuando este patrón se ha formado entonces la tarea de forrajeo alcanza un estado estacionario y una transición del desorden al orden, este proceso se detalla en la figura 2.9.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Formación de patrones espaciales |
| Al ser un colectivo biológico, esta es la forma más obvia para describir la organización para llevar a cabo el forrajeo. Ya se ha                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Autoorganización                 |

|                                                                                                                                                                                |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| mencionado como se llevan a cabo los procesos de retroalimentación positiva y negativa y que estos no requieren de un líder, más adelante se explica esta propiedad emergente. |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

Tabla 2.5 Propiedades emergentes de una colonia de hormigas y un sistema complejo

## 2.4 Autoorganización en el forrajeo de hormigas

Podemos definir a la autoorganización como el trabajo conjunto y coherente realizado por un sistema en ausencia de órdenes externas, simplemente como resultado del entendimiento mutuo entre las partes que lo forman. El termino autoorganización se refiere básicamente a la formación de patrones en sistemas físicos y biológicos. Se puede afirmar que cuando un sistema atraviesa por una fase de autoorganización surgen patrones globales de orden, uno de estos patrones puede ser un comportamiento que está encaminado a la realización de alguna tarea, en otras ocasiones un patrón representa un arreglo organizado en el espacio o tiempo, ejemplo de esto se puede observar en las veredas formadas por hormigas cuando están llevando alimento hacia el nido.

Es importante mencionar que la autoorganización surge por las interacciones locales de los individuos que conforman un colectivo, estos individuos generan interacciones con base en la información local que tiene de su medio (figuras 2.7 y 2.9 )y además algunos expertos señalan que no es necesario que exista una interacción directa, en el caso de las hormigas del género *Atta texana*, como ya se explicó en el capítulo anterior, una forma de interacción no directa es mediante la generación de estridulaciones con el fin de reclutar a compañeras forrajeras hacia una fuente de alimento de buena calidad (figura 2.8). Esta característica importante de los sistemas complejos ocurre de manera descentralizada, es decir, no existe un líder que controle u organice las actividades que deben desempeñar los integrantes del colectivo, más bien, cada uno de estos individuos se comporta de manera simple, basándose en las percepciones de sustancias químicas (tabla 2.4) o vibraciones producidas por sonidos para entablar un sistema de comunicación [1].

Es importante señalar cómo trabaja la autoorganización, regresando a la teoría general de sistemas, podemos notar que la forma en que los sistemas logran mantenerse funcionando es mediante la retroalimentación, la cual puede ser positiva o negativa.

La retroalimentación positiva es la encargada de promover cambios en el sistema, por ejemplo, el crecimiento de una población origina fenómenos tales como la auto mejora, amplificación y facilitación, cambia la dirección del sistema para reforzar el cambio que ha recibido [1]. Esta retroalimentación también genera el aumento de la complejidad del sistema esto es debido a que estos procesos son los encargados de recibir la información del medio y transmitirla a través de las subunidades a fin de llevar a cabo con éxito la tarea que se está desarrollando. Es gracias a estos procesos que se generan amplificaciones de fluctuaciones, estas fluctuaciones están relacionadas con la densidad de la población, al incrementarse el número de unidades en un colectivo también crece el número de interacciones dentro la población y se da paso a la formación de patrones espaciales(figura 2.4), cuando la fuente de alimento es grande entonces se inicia un proceso de retroalimentación positiva, una hormiga es la que hace el descubrimiento y mediante el sistema de comunicación de feromonas “avisa” a sus compañeras del hallazgo, de esa forma se suman más elementos al acarreo de alimento hacia el nido.

La retroalimentación negativa es la encargada de los procesos homeostáticos, aquellos que advierten o comunican al sistema de alguna desviación y ejecutan acciones correctivas [9], estos procesos de retroalimentación negativa proveen inhibición para compensar la retroalimentación positiva: siguiendo el ejemplo de las hormigas (figura 2.4 inciso (f)) cuando la comida se agota entonces finaliza ese estado de orden pues las hormigas dejan de comunicar el hallazgo de una fuente de alimento y la vereda formada se desvanece [1].

La autoorganización es entonces la causante de que en un sistema conformado por una cantidad de elementos similares bajo interacción exhiban una gama muy rica de conductas dinámicas complejas cuando se encuentran en las cercanías de una zona de transición entre estados ordenados y estados desordenados (las llamadas transiciones de fase orden-desorden) [10]. Lo que podemos notar aquí es que en medio de los procesos de retroalimentación existe claramente un flujo de datos el cual debe ser procesado por las subunidades que conforman al sistema y permite la existencia de la autoorganización la cual es responsable de que el sistema no llegue a un estado de máxima entropía.

Con base en lo anterior podemos concluir que el fenómeno colectivo de forrajeo del hormiguero es una actividad colectiva de los sistemas complejos biológicos, la cual es motivada por las condiciones del nido (retroalimentación positiva) iniciando con una fase de desorden, limitada por las características del medio ambiente tales como la cantidad de alimento (retroalimentación positiva) y llegando a una fase de orden debido al sistema de comunicación entre hormigas para llevar a cabo esta tarea.

## **2.5 Parámetros de autoorganización en el forrajeo de hormigas**

Los sistemas evolucionan hacia una situación de equilibrio caracterizada por la máxima entropía, una vez llegado a este punto, nada más ocurre. Sin embargo, los sistemas complejos parecen contradecir esto, pareciera que se encuentran alejados de un estado de equilibrio, pero al hacerse presente el fenómeno denominado autoorganización, a través del tiempo el sistema presenta características espontaneas propias de lo complejo.

Aquí podemos hacer evidente un cambio de concepto, antes mencionamos que los sistemas intercambian energía con su medio, sin embargo, de un modo más adecuado, los sistemas complejos intercambian información. Esta nueva medida nos permite obtener una cuantificación para medir el orden y desorden en un sistema complejo. Este cambio de concepto es debido a que el forrajeo de hormigas llega a ser una tarea colectiva y ordenada gracias a la constante transmisión de información entre ellas (Figuras 2.6 a 2.10), es así que se puede afirmar que la información transmitida entre pares determina el comportamiento individual que llevan a cabo y a una escala global se observan las propiedades emergentes tales como la formación de veredas, sin embargo, hemos visto que estos comportamientos no son lineales por lo que no todas las hormigas se suman a esta actividad, esto conlleva que el colectivo no alcance un orden total, dicho de otro modo, unas cuantas responden al llamado mientras que otras continúan realizando otras tareas.

De esta idea es que se origina la necesidad de medir el orden y desorden para este sistema complejo biológico, en particular, durante la realización de la tarea de forrajeo, la figura 2.4 incisos (a) al (b) describe el forrajeo de manera no colectivo pues la información apenas está en proceso de ser

transmitida y percibida por los posibles receptores por lo que no existe organización, sin embargo en los siguientes incisos, se puede observar que la tarea ya no solo la realiza una hormiga si no que la información de la fuente de comida ha sido recibida por otras hormigas las cuales se han sumado a la recolección de alimento, se puede concluir que cuando la tarea se vuelve colectiva entonces se lleva a cabo de manera óptima, pues se asegura que el alimento llega al nido, por lo tanto mientras más orden exista la tarea se acerca al éxito de ejecución por lo que es importante cuantificar el orden y desorden en tareas colectivas propias de los sistemas complejos.

Para analizar la emergencia de la complejidad (asociada al manejo de información dentro del sistema), se hace uso de herramientas matemáticas típicas del análisis de los sistemas desordenados, se trata de establecer medidas con base al comportamiento de los componentes del sistema, la medida establecida para el desorden es la entropía y sirve como punto de partida ya que lo complejo se encuentra entre lo ordenado y lo desordenado. Esta medida es bien aceptada para sistemas dinámicos, ya que los valores de desorden evolucionan a través del tiempo [11]. Una forma establecida para medir la entropía es la propuesta por Ludwig Boltzmann, la forma de estudiar a la entropía es estableciendo probabilidades a los estados en los que pueden estar los elementos de ese sistema. La entropía se define por:

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \dots\dots\dots 2.1$$

donde  $p_i$  es la probabilidad de ocurrencia asociada a los diferentes estados microscópicos y la sumatoria se realiza sobre todo el espacio muestral del sistema, es decir la suma desde  $p_i = 1$  hasta  $p_n$  es igual a 1. cabe mencionar que estas probabilidades se obtienen a partir de modelos de simulación del comportamiento colectivo del hormiguero, esto es, son probabilidades experimentales.

La entropía de un sistema físico proporciona una primera aproximación en la búsqueda de una medida de complejidad [11]. Un dato importante es saber que en los sistemas cerrados la entropía siempre llegara a su máxima estado, la razón es que no existe interacción entre sus componentes, pero para los sistemas complejos como el de las hormigas, una característica importante es que exista ese intercambio (figura 2.7 a 2.9) además de poder cuantificarlo, cuando hablamos del término información, entonces podemos equiparar a la entropía como una medida de incertidumbre en un sistema.

En los sistemas complejos se aprecia claramente el manejo de información que el sistema obtiene del exterior, esta información debe ser transmitida y procesada a través de las subunidades lo que nos indica que de alguna forma la información se conserva de manera permanente o temporal, un ejemplo de esta dinámica se puede observar en el forrajeo de alimento ya que la información que obtienen del exterior y del interior del nido debe ser transmitida de modo efectivo a través de la colonia, alcanzando a un número mayor o menor de individuos. Por otra parte, la señal debe ser mantenida (esto es, almacenada) durante cierto tiempo. Esta memoria a corto plazo permite responder a la señal. La complejidad emerge por lo tanto a medio camino entre el orden y el desorden [11].

Hemos aprendido que las hormigas están equipadas de diferentes tipos de glándulas que les permiten la deposición de sustancias químicas, otras poseen características corporales útiles para la emisión de estridulaciones, ambas características les sirven para convertirse en emisores de información, misma que obtienen del medio que las rodea pues para llevar a cabo la tarea de forrajeo

requieren conocer el estado del nido como por ejemplo el número de larvas que tendrán éxito en el nacimiento o la cantidad de alimento que requiere la colonia para su supervivencia, cuando ya están realizando esta tarea es importante que sepan el tamaño de la fuente de comida entre otras características, es por ello que también se convierten en receptoras y lo logran mediante los sensores de las cuales han sido dotadas a través de procesos de evolución, llevando este análisis a los sistemas complejos, las hormigas cumplen con la característica de transmitir, recibir, procesar y manejar información a fin de llevar a cabo una tarea, y como ya se explicó, esta información ciertamente viene del exterior.



Figura 2.13 Marcación de caminos durante el forrajeo de hormigas del género *Atta texana* [12]

## 2.6 Síntesis

El análisis de las características biológicas de las colonias de hormigas nos permiten establecer como guía de estudio a los sistemas complejos, al existir manejo de información para llevar a cabo la autoorganización de tareas colectivas entre las hormigas, se puede decir que la entropía es una medida que nos permitirá parametrizar el orden y desorden durante la ejecución de esta actividad, lo cual es importante observar cuando se realiza una simulación pues en el colectivo natural la emergencia del orden trae consigo la formación de veredas y además se puede afirmar que el forrajeo está llevándose a cabo de manera exitosa por lo que un correcto modelado debe mostrar en la simulación esta transición de fase llegando a un estado estacionario que debe estar asociado con alcanzar cierto orden u organización para el forrajeo.

## CAPÍTULO 3

### ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo, se presenta el análisis de un modelo de forrajeo de hormigas basado en un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden, el objetivo de este estudio es identificar como se caracterizan las propiedades que intervienen en la búsqueda y recolección de alimento por un colectivo de hormigas. El sistema de ecuaciones que el modelo presenta se resuelve mediante el método matricial de Euler, el comportamiento individual de las hormigas está asociado a unas constantes que describen los tiempos promedios que tarda cada hormiga en los estados que establece el autor.

#### 3.1 Modelos de orden-desorden en comportamientos de forrajeo de hormigas

Estudiar los colectivos de hormigas representa un reto para diferentes áreas de las ciencias, estos insectos sociales proporcionan las bases para generar modelos bioinspirados para sistemas de inteligencia artificial en computación debido a su sofisticado modelo de organización para llevar a cabo tareas de sobrevivencia y adaptación el cual involucra un sistema de comunicación basado en señales y sustancias químicas. Observar y comprender su comportamiento no es una tarea fácil, requiere de la integración de expertos de diferentes áreas para llevar a cabo el análisis biológico y conductual que deriva en la formulación de modelos y simulaciones para predecir comportamientos colectivos.

Los estudios biológicos, como ya se mencionó en el capítulo 1, dan a conocer que las hormigas tienen una división de trabajo, las tareas de cuidado de las crías, construcción del nido y búsqueda y recolección de alimento entre otras, son comportamientos colectivos que realizan con base en una división por castas, la elección de uno de estos comportamientos constituye la fase inicial para el diseño de un modelo matemático que describa la conducta observada a nivel macroscópica (comportamiento global). Es evidente que el comportamiento individual de cada hormiga observado de manera grupal es sinérgico, ya que contribuye al logro de obtener alimento, la cooperación entre hormigas se observa en la figura 3.1.

Una de estas tareas que más llama la atención es el forrajeo ya que es un comportamiento colectivo fácilmente observable y con una tarea bien definida. Esto permite validar cualquier modelo de simulación tanto microscópico como macroscópico ya que proporciona criterios para decidir si la simulación está funcionando correctamente, además la tarea de forrajeo de hormigas presenta todas las propiedades de un sistema complejo: es un sistema colectivo, descentralizado, con interacciones no lineales que manifiesta autoorganización de comportamientos cooperativos y adaptación al medio ambiente.



Figura 3.1 Forrajeo de hormigas de la especie *Atta Texana*, Imagen tomada de [14]

Podemos analizar el sistema de búsqueda y recolección del alimento como un proceso en dos fases: la exploración para descubrir las fuentes de alimento y la recolección de este ya sea en forma individual o cooperativa [2]. Se ha observado que el forrajeo de alimentos se realiza con base en la distribución de los recursos disponibles, es decir, las hormigas entablan un sistema de recolección dependiendo de la concentración de alimento, lo que significa que el alimento puede estar muy disperso o se encuentran fuentes de alimento concentradas en pocos sitios. Por lo tanto, si se enfrentan a fuentes de comida muy concentradas entonces deberán realizar una recolección cooperativa, mientras que en otro caso la recolección individual es la que se lleva a cabo.

En [1] el autor presenta un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales de primer orden para describir el forrajeo de hormigas. La metodología para el establecimiento de este modelo consiste en primero elegir la especie de hormiga a observar, la elección del comportamiento colectivo a analizar, lo cual requiere de un tiempo de observación y experimentación. Una vez identificadas las subunidades que forman parte del colectivo lo siguiente es identificar y caracterizar las interacciones entre estas subunidades que en este caso es el comportamiento individual de cada hormiga. Para este modelo, el experto divide el ambiente en tres estados: Nido(N), Fuente de comida (F) y Buscando (S), esta división está dada en base a la descripción del comportamiento de una hormiga, para caracterizar el comportamiento individual, el experto se basa en el tiempo que pasa cada hormiga en los estados antes descritos, a esta caracterización se le da el nombre de razones ( $r$ ).

$$\frac{dN}{dt} = r_F F + r_S S - r_N N \quad \dots\dots\dots 3.1$$

$$\frac{dS}{dt} = r_N N - r_S S - r_D S \quad \dots\dots\dots 3.2$$

$$\frac{dF}{dt} = r_D S - r_F F \quad \dots\dots\dots 3.3$$

Donde

$N$  = numero de hormigas en el nido.

$F$  = numero de hormigas en la fuente de comida.

$S$  = numero de hormigas buscando comida.

$r_N$  = razón a la que las hormigas abandonan el nido.

$r_F$  = razón a la que las hormigas abandonan la fuente de comida.

$r_S$  = razón a la que las hormigas regresan al nido después de una búsqueda sin éxito.

$r_D$  = razón a la que las hormigas descubren comida durante la búsqueda.

Las constantes  $r$  sirven para caracterizar el comportamiento a nivel macroscópico del colectivo de hormigas forrajeando, lo que significa, es que una hormiga puede realizar la tarea de búsqueda, recolección o permanecer en el nido. Estas constantes describen los promedios en términos de numero de hormigas sobre tiempo, los valores otorgados para este modelo son obtenidos mediante la observación, métodos de conteo, identificación de individuos en cada comportamiento y conocimiento empírico y experimental por parte del experto, los resultados de este análisis se muestran a continuación.

$r_N = \frac{1}{5}$  en promedio sale una hormiga cada 5 minutos del nido

$r_D = 1$  en promedio una hormiga tarda un minuto en encontrar comida después de buscar

$r_S = \frac{1}{30}$  en promedio una hormiga regresa al nido sin éxito cada 30 minutos

$r_F = \frac{1}{2}$  en promedio una hormiga tarda 2 minutos en regresar al nido después de encontrar alimento

En la figura 3.2 se muestra un diagrama de estados donde se representan de manera gráfica los comportamientos por los que puede transitar una hormiga así como la integración de las constantes  $r$  y se establece la dirección en que se dan las transiciones de comportamientos. Es importante mencionar que las direcciones entablan prohibiciones a la forma conductual de los individuos, ya que una hormiga que ha encontrado alimento no puede despreciarlo y regresar a realizar una búsqueda, más bien como lo indica la flecha, debe regresar al nido.

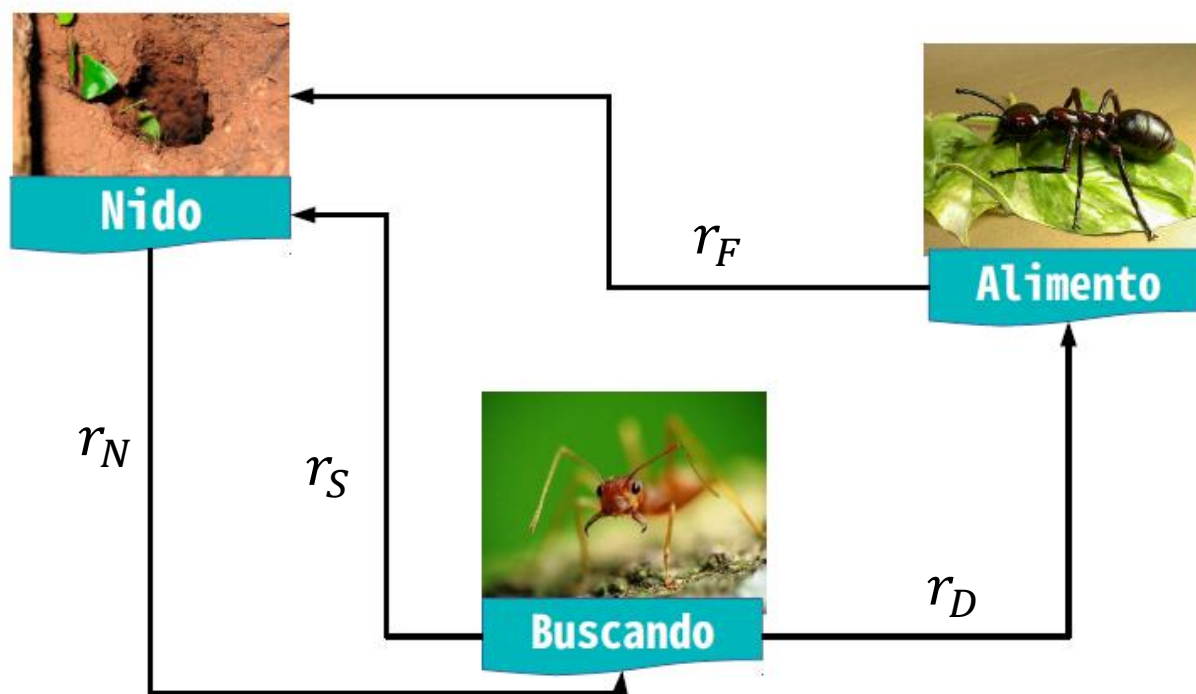


Figura 3.2 Modelo de forrajeo de hormigas basado en ecuaciones diferenciales de primer orden

Se puede observar que el modelo presentado describe el comportamiento biológico de las hormigas a través de las constantes  $r$ , realizando un análisis de esto tenemos lo siguiente:

$r_N \rightarrow$  la salida de una hormiga del nido hacia la búsqueda y recolección de alimento está determinada por la información que se obtiene del estado del nido. Este modelo establece que, en promedio, recibir y procesar esta información le toma 5 minutos. Se presenta entonces un flujo de información a través de las diferentes castas de la colonia (tabla 2.2) lo cual modula la tarea de forrajeo y el tiempo promedio de este proceso se representa por esta constante.

$r_D \rightarrow$  esta constante establece el tiempo que tarda una hormiga en encontrar un rastro de alimento, la cual también se apega al comportamiento biológico, ya que cuando una obrera está realizando la tarea de forrajeo el primer estado por el que atraviesa es el de la búsqueda de alimento. El tiempo también está determinado por las necesidades del colectivo total, como ya se vio en el capítulo 2, si el nido requiere alimento de manera urgente entonces la búsqueda se realiza en lugares más cercanos mientras que si no es urgente entonces el tiempo de búsqueda y la distancia pueden prolongarse, para este modelo se ha establecido 1 minuto como tiempo promedio.

$r_S \rightarrow$  durante la tarea de forrajeo, una hormiga debe regresar al nido si no ha sido capaz de encontrar una fuente de alimento, del mismo modo que la constante anterior, el tiempo de retorno está determinado por el estado del nido. En este modelo el tiempo promedio es de 30 minutos, este valor describe de manera oportuna el comportamiento biológico, pues una hormiga encargada de forrajear y que no ha tenido éxito se mantendrá en esta tarea. El retorno

al nido es parte del forrajeo y esta constante describe de manera implícita que una hormiga no puede cambiar de tarea a pesar de no tener éxito. Este proceso es un mecanismo de retroalimentación ya que no puede hacer un cambio de tarea sin antes obtener información del colectivo.

$r_F \rightarrow$  esta constante describe el tiempo que tarda en promedio una hormiga para regresar al nido, de manera implícita, en esta constante se considera la velocidad de forrajeo, misma que está determinada por los requerimientos alimenticios de la colonia, lo que implica que mientras más urgente sea el alimento más rápido se retorna al nido. Aquí también se considera la marcación y seguimiento de un sendero lo que interviene también en el tiempo de regreso. Un aspecto importante es que este modelo se apegue al comportamiento biológico al no considerar otro comportamiento una vez que la hormiga ha encontrado alimento.

Para solucionar el sistema de ecuaciones se siguió el método de Euler aplicado a matrices, por lo que el primer paso fue formular la representación matricial del sistema de ecuaciones de primer orden presentadas anteriormente (ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3) tal como se indica a continuación:

$$\begin{bmatrix} \frac{dN}{dt} \\ \frac{dS}{dt} \\ \frac{dF}{dt} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} N \\ S \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ S \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}N + a_{12}S + a_{13}F \\ a_{21}N + a_{22}S + a_{23}F \\ a_{31}N + a_{32}S + a_{33}F \end{bmatrix}$$

donde

$$\begin{array}{lll} a_{11} = -r_N & a_{12} = r_S & a_{13} = r_F \\ a_{21} = r_N & a_{22} = -(r_S + r_D) & a_{23} = 0 \\ a_{31} = 0 & a_{32} = r_D & a_{33} = -r_F \end{array}$$

Haciendo la siguiente igualdad tenemos:

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} N \\ S \\ F \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{dN}{dt} \\ \frac{dS}{dt} \\ \frac{dF}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_N & r_S & r_F \\ r_N & -(r_S + r_D) & 0 \\ 0 & r_D & -r_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ S \\ F \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\bar{H}}{dt} = R \bar{H}$$

Aplicando la definición del método de Euler para matrices, tenemos:

$$\frac{\Delta \bar{H}}{\Delta t} = R \bar{H} \rightarrow \Delta \bar{H} = R \bar{H} \Delta t$$

$$\Rightarrow \bar{H}(n+1) - \bar{H}(n) = R * \bar{H}(n) \Delta t$$

$$\Rightarrow \bar{H}(n+1) = \bar{H}(n) + R * \bar{H}(n) \Delta t \dots \dots \dots 3.4$$

Donde  $\Delta t$  es el tamaño de paso, para esta simulación se le asigno un valor de 0.1. Para la implementación de la solución numérica se utiliza como base la ecuación 3.4 y se obtiene el siguiente planteamiento para codificar:

$$N(n+1) = N(n) + (-r_N N(n) + r_S S(n) + r_F F(n))\Delta t$$

$$S(n+1) = S(n) + (r_N N(n) - (r_S + r_D)S(n))\Delta t$$

$$F(n+1) = F(n) + (r_D S(n) - r_F F(n))\Delta t$$

La implementación de este modelo se realiza en el lenguaje orientado a objetos (Java) haciendo uso del IDE NetBeans 8.2 y la versión 1.8.0\_144 del compilador de Java, la aplicación consta de una interfaz gráfica de usuario donde los valores para la simulación pueden ser modificados y se obtienen como resultados las gráficas donde se representan las curvas de comportamiento del modelo de tres bloques como la de entropía, el graficador utilizado corresponde a Gnuplot 5.2, ambos entornos de desarrollo fueron utilizados para el sistema operativo Windows 10 para 64 bits.

La solución numérica utilizando el método de Euler del sistema de ecuaciones de primer orden que describen la tarea de forrajeo de hormigas se expresa mediante la gráfica que se muestra en la figura 3.3, donde el eje de las  $x$  expresa el tiempo y el eje  $y$  el numero de hormigas, lo que podemos observar es la cuantificación de hormigas realizando cierto comportamiento a través del tiempo, en el inicio todas las hormigas se encuentran el nido, después de que salen cada una de ellas transita por alguno de los comportamientos establecidos en el modelo, a partir del minuto 4, se observa una estabilidad en las gráficas, lo que parece indicar es que el colectivo biológico ha llegado a una fase de equilibrio respecto a la distribución de hormigas.

Se asume que cuando la distribución de hormigas ha llegado a una fase de equilibrio, el comportamiento a nivel macroscópico llega a un estado estacionario, se aprecian formaciones de patrones, transiciones de fase y entonces podemos decir que el colectivo biológico se ha autoorganizado con el fin de llevar a cabo de manera coordinada una tarea colectiva.

### 3.2 Variantes del modelo de forrajeo

El modelo de tres estados descrito en el apartado anterior no considera ciertas características importantes de la naturaleza del hormiguero, está basado únicamente en el número de hormigas que pasan de un estado a otro y esto se representa mediante el uso de las constates  $r$ . Sin embargo, para tener un modelo que se aproxime más a la forma en que se realiza esta tarea es necesario considerar algunas modificaciones, las cuales se describen a continuación:

Nido

El modelo propone que cada 5 minutos sale una hormiga de este estado para pasar al estado de búsqueda, pero podrían agregarse las siguientes características:

- Una variable que indique la cantidad de alimento que ha llegado al nido la cual determinara o modificara el tiempo en que sale una hormiga de este estado, a mayor alimento en el nido menor número de hormigas saliendo de este. De esta forma se introduce información en el nido la cual debe modelar el comportamiento que se está llevando a cabo (feedback negativo).

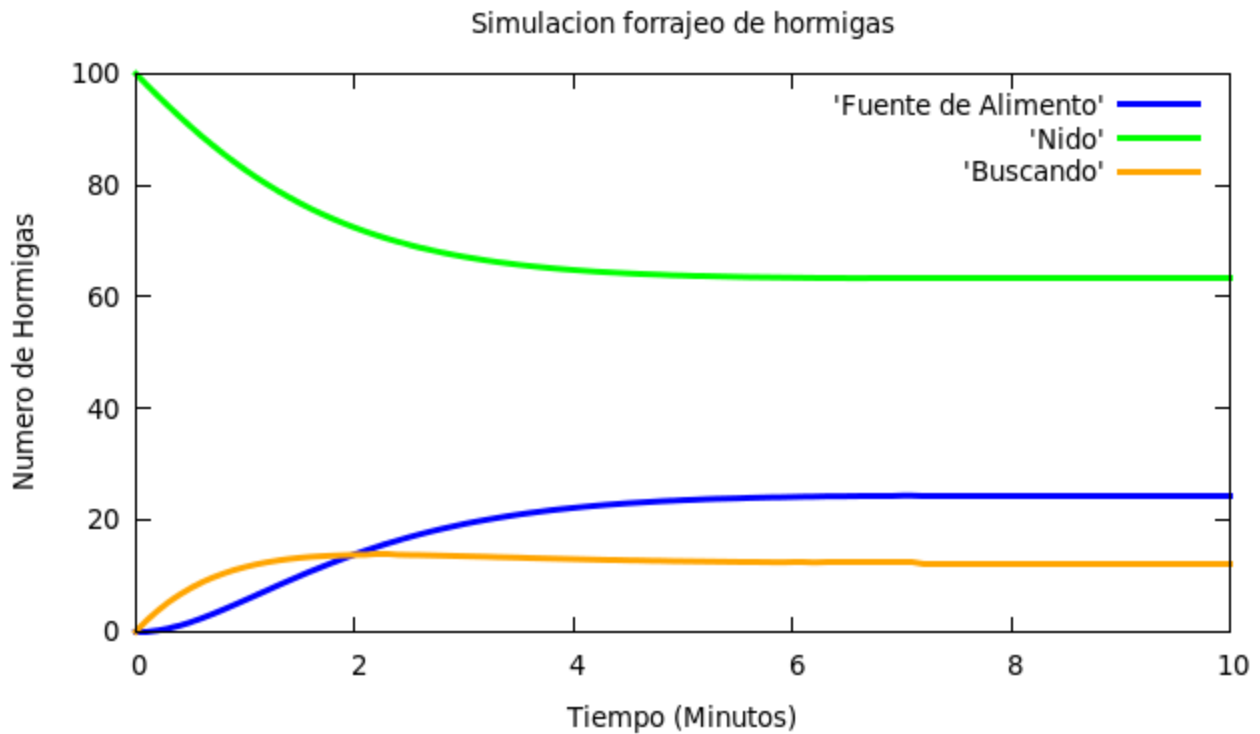


Figura 3.3 Grafica correspondiente a la solución numérica del modelo de tres bloques del forrajeo de hormigas

#### Buscando

El modelo propone que una hormiga regresa al nido después de estar buscando por 30 minutos y no tener éxito y que encuentra alimento después de un minuto de estar buscando, las variables a considerar en este estado son:

- El cambio de estado de búsqueda a alimento o retorno al nido no solo está modulada por el éxito o fracaso. Una variable importante es encontrar un rastro de feromona de atracción la cual conduce a una fuente de alimento por lo que se puede agregar un nuevo estado, no solo buscar y alimento. El modelo puede considerar que la hormiga está en el proceso de reclutamiento, en este caso se tiene que agregar un factor de pérdida de la población  $S$  que se incorporan a la población  $F$  o bien agregar otra variable de estado  $R$  que considere a la población de reclutamiento

#### Alimento

Para este estado, la descripción señala que una vez que la hormiga ha encontrado alimento tarda 2 minutos en regresar al nido, de manera natural este comportamiento está bien descrito pues una hormiga una vez que lleva en sus mandíbulas alimento es poco probable que lo deje para volver a buscar, pero en este estado no se considera las siguientes características:

- Biológicamente, una hormiga está comunicándose constantemente con sus compañeras, esto es porque las tareas las llevan a cabo de manera colectiva, el estado de alimento debe agregar una variable para representar la feromona de atracción.

- Una fuente de alimento es limitada por lo que también se debe considerar una variable que se modifique dependiendo del número de hormigas que llegan a esta fuente y que además modele la cantidad de feromona de atracción. En este caso, fenómeno de atracción, la constante  $r$  de búsqueda se multiplica por un factor  $1+(-\alpha)$  por la población  $S$ .
- La cantidad de alimento y de feromona entonces modificaran la razón de paso del estado buscando al estado alimento. En los tres bloques del modelo se presentan comportamientos colectivos.

### 3.3 Síntesis

El análisis del modelo de tres bloques del forrajeo de hormigas, caracteriza el comportamiento individual mediante la observación del tiempo que tarda una hormiga en salir del nido, en estar explorando de manera aleatoria sin éxito, en encontrar alimento y en permanecer en una fuente de alimento. El autor del modelo asigna el promedio de estos tiempo a una constante y construye un sistema de ecuaciones que refleja el comportamiento colectivo. Mediante la aplicación implementada en Java, se pueden obtener el conteo del número de hormigas en cada uno de los estados en el tiempo, los resultados se muestran en la figura 3.3, el análisis de estas curvas permite afirmar que el colectivo atraviesa por una fase estacionaria, dicho de otro modo, se asume que a partir del minuto 4 la tarea colectiva se comienza a realizar de manera ordenada, por lo que el objetivo del forrajeo comienza a cumplirse. Sin embargo, el propósito de este trabajo requiere de un parámetro que nos permita sustentar esta afirmación, establecer que realmente el colectivo atraviesa por una fase de orden autónomo. El modelo de ecuaciones ha sentado las bases para modelar un sistema multiagente, ya que como se describe en el apartado 3.2, se requiere un modelo que permita implementar características del forrajeo de hormigas.

## CAPÍTULO 4

### PROPUESTA DE PARÁMETRO DE ORDEN

Con base a la información obtenida del comportamiento biológico de la colonia de hormigas y la afirmación de la existencia de un flujo de información entre individuos, el siguiente capítulo establece a la entropía como el parámetro de orden que permite cuantificar el orden-desorden que existe durante el desarrollo del forrajeo de hormigas.

#### 4.1 El orden en biología y la entropía

El orden en biología se refiere a la “armonía con el entorno”, que de manera intuitiva percibimos en la naturaleza [13]. En este sentido el concepto de orden en el hormiguero lo entendemos como una adaptación al medio ambiente por parte del hormiguero que le permite realizar una tarea colectiva, en este caso el forrajeo de alimento hacia el nido. El hormiguero funcionando de esta manera alcanza un estado estacionario en el cual los comportamientos colectivos no cambian en el tiempo. Una especie de armonía no consensada en los comportamientos colectivos que se alcanza en el estado estacionario.

Para poder hablar de orden y desorden existen diferentes perspectivas para estudiar a los colectivos biológicos, en este caso, a una colonia de hormigas. Para hacer un análisis del comportamiento anterior en términos de orden-desorden es necesario considerar algunas ideas y métodos de la termodinámica estadística, teoría de la información y conceptos de sistemas complejos. Una de estas perspectivas que dan una descripción formal del orden biológico involucró el uso de la entropía, término acuñado por Rudolf J. E. Clausius en 1865 para referirse a la cantidad de energía disipada por un sistema. Posteriormente, Ludwig Boltzmann proporcionó una interpretación física de los cambios de entropía de un sistema en relación con el número de posibles microestados propios del macroestado donde se encuentra el sistema [13]. Para comprender la interpretación de Boltzmann se deben tener en cuenta tres hechos y supuestos fundamentales, primero que el número de partículas y microestados es enorme, segundo, todos los microestados son igualmente probables y finalmente en el equilibrio el número de microestados consistentes con (o pertenecientes a) el macroestado observado es casi igual al número total de microestados posibles [14].

Llevando esta perspectiva al estudio del forrajeo de hormigas, se le puede asignar una probabilidad a cada uno de los tres comportamientos en los que una hormiga puede estar, así, la definición clásica de probabilidad nos dice que cada uno de los sucesos elementales tienen la misma probabilidad de ocurrir, lo que nos lleva a asignarle  $1/3$  de probabilidad a cada uno de estos comportamientos. Este tipo de asignación nos dará como resultado el valor de la entropía teórica o máxima entropía para este modelo.

$$\text{entropía teórica} = -\log_2(1/3) = 1.5849625 \dots \dots \dots 4.1$$

Esta medida de entropía teórica es el valor máximo esperado de desorden para este sistema, sin embargo, al observar el colectivo biológico natural, cuando realizan la tarea de búsqueda y recolección de comida es bien sabido que surgen patrones como caminos de hormigas, lo que nos lleva a pensar que en un inicio las hormigas carecen de un orden para llevar a cabo esta tarea, pero a

través del tiempo llegan a autoorganizarse con el fin de optimizar la búsqueda de alimento y transportarla al nido.

Además, al no ser un sistema termodinámico cerrado, la entropía máxima no es alcanzable. Por lo tanto, para aplicar este enfoque, se requiere de un cambio de terminología, ya que no se aborda el estudio del hormiguero en términos de la termodinámica sino más bien, como ya se mostró en el capítulo 1, hablamos de transmisión de información ya que hemos establecido que las hormigas tienen un sistema de comunicación el cual usan para realizar tareas colectivas, por lo tanto y de manera justificada como lo hace el autor de [14] trataremos a la energía como información.

## 4.2 Modelo de entropía propuesto

En cada valor de tiempo se debe calcular la probabilidad ( $P_N, P_S, P_F$ ) de los comportamientos colectivos por los que transitan las hormigas, este valor se asigna contando el número de hormigas que están en ese estado ( $n_N, n_S, n_F$ ) dividido por el número total de hormigas con el que se inició la simulación del modelo.

El número de hormigas se obtiene de la solución numérica del sistema de ecuaciones de primer orden, se debe obtener un valor en cada instante de tiempo.

$$P_N(t) = \frac{n_N}{N_o} \quad P_S(t) = \frac{n_S}{N_o} \quad P_F(t) = \frac{n_F}{N_o} \dots\dots\dots 4.2$$

Finalmente, el valor de la entropía en función del tiempo se obtiene aplicando la definición de entropía ecuación 2.1

$$S(t) = - \sum_{i=N,S,F} P_i(t) \log_2 P_i(t) \dots\dots\dots 2.1$$

En la figura 4.1 se observa el resultado de graficar los valores obtenidos después de aplicar la fórmula para cálculo de entropía aplicada al modelo de forrajeo de hormigas, lo que se aprecia son dos curvas, la línea recta representa la entropía teórica o máxima, la curva representa el valor de entropía. La interpretación más obvia es que la tarea de forrajeo no se realiza de manera desordenada todo el tiempo, ya que nunca llega al valor máximo de entropía.

Se observa que de 0 a 2 minutos las hormigas salen del nido de una forma desordenada hasta alcanzar un valor de máxima entropía asociada al forrajeo, esta etapa de transición es bien conocida en los sistemas complejos [1], es importante notar que en el intervalo de tiempo de 2 a 4 se presenta una disminución en el trazo de la entropía.

Este efecto requiere de una explicación más detallada. En efecto, la interpretación probabilística del aumento de la entropía ha sido popularizada como un aumento en el “desorden” del sistema. Así, el incremento del orden presente en los seres vivos ha tratado de verse como un proceso en el cual la entropía no alcanza el valor máximo [13], entonces en el tramo mencionado de 2 a 4 minutos la disminución de la entropía se puede interpretar como una disminución en el desorden y un aumento en la autoorganización colectiva del forrajeo de hormigas. Cabe resaltar que esta autoorganización se logra de forma espontánea por parte del sistema que además funciona de forma descentralizada, esto significa que el hormiguero ordena su tarea colectiva de forrajeo por sí misma.

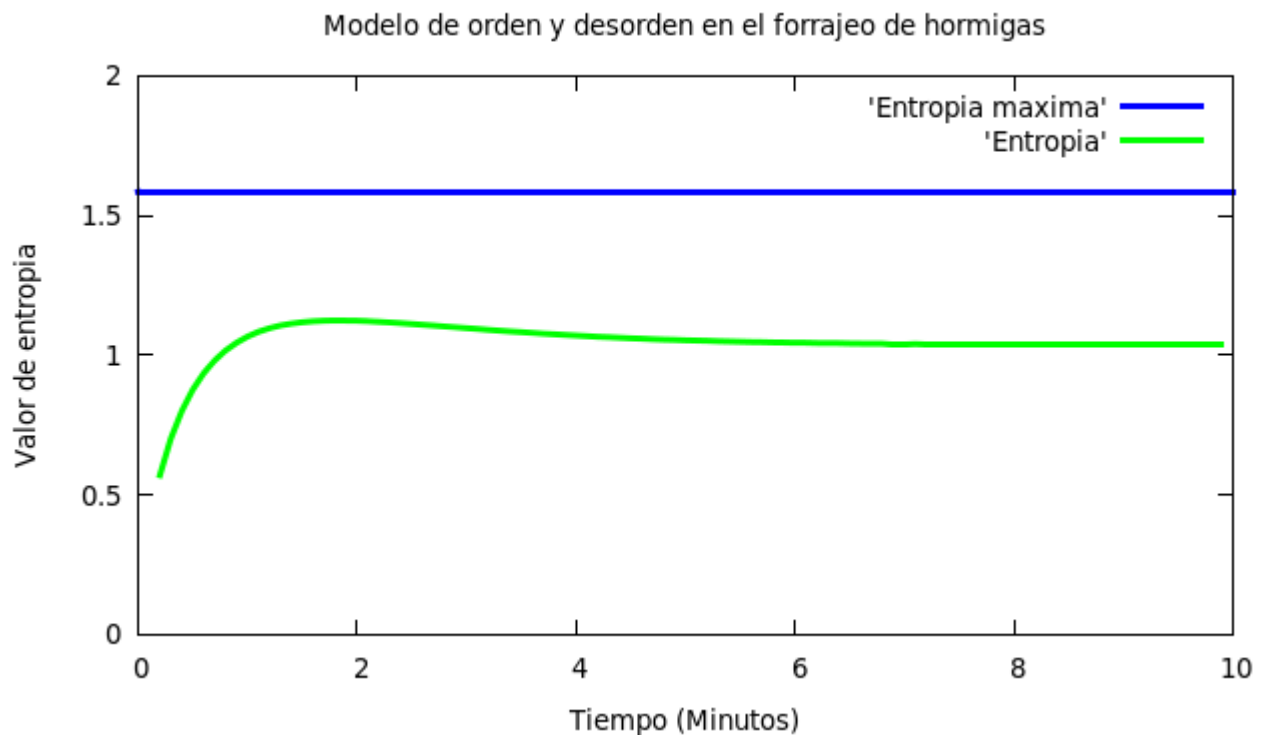


Figura 4.1 Grafica correspondiente al cálculo de la entropía del modelo de 3 bloques del forrajeo de hormigas.



Figura 4.2 Formación de veredas de hormigas de la especie *Atta texana*, imagen tomada de [12]

### 4.3 Síntesis

Como es bien sabido la tarea de forrajeo es una actividad que realizan las hormigas de modo social, donde con base en la figura del comportamiento temporal de la entropía se observa que con el tiempo se alcanza un estado estacionario entre 0 y el valor de entropía máxima. En este caso se presenta un balance de orden desorden combinado con un flujo de retroalimentación de poblaciones de hormigas que visitan los comportamientos del diagrama de bloques del modelo (figura 3.2). Con base en lo anterior pensamos que esto significa que existe un flujo de información implícita entre las poblaciones de hormigas  $n_N, n_S, n_F$  necesarias para cumplir con la tarea de forrajeo.

Como ya se ha planteado, para este trabajo la entropía está asociada al grado de información o incertidumbre el cual también se puede analizar como el grado de orden o desorden de un sistema, lo cual es importante analizar ya que el grado de incertidumbre puede asociarse a afirmar o negar si se completa la tarea que se está llevando a cabo, dicho de otro modo, si la incertidumbre es igual a la entropía teórica entonces el colectivo no está organizado y por lo tanto no se puede completar la ejecución de una tarea colectiva. Es necesario que exista un balance entre el orden-desorden para que una tarea pueda llevarse a cabo tal como se puede observar en la gráfica de entropía de la figura 4.1, lo que evoca el surgimiento de patrones espaciales tal como lo muestra la figura 4.2

## CAPÍTULO 5

### APLICACIÓN DEL PARÁMETRO DE ORDEN EN UN SISTEMA MULTIAGENTE DE FORRAJEО DE HORMIGAS

La emergencia de características complejas como la autoorganización están presentes en el forrajeo de hormigas, sin embargo, para el área de computación, analizar esta dinámica con un nuevo modelo como lo son los sistemas multiagente representa un mayor impacto, esto es debido a que son un subcampo de la inteligencia artificial distribuida, el cual ha experimentado un rápido crecimiento debido a las diferentes aplicaciones que permiten resolver problemas de manera colectiva [15] y que encuentran sus bases en las dinámicas de colectivos biológicos que ejecutan tareas grupales.

Tal es el caso de la búsqueda y recolección de alimento en una colonia de hormigas, aunque la tarea se lleva a cabo en colectivo, cada una de las hormigas forrajeras llevan a cabo comportamientos individuales de manera autónoma motivadas por las condiciones del entorno y el estado del nido. La suma de estos comportamientos individuales da paso a la emergencia de características complejas como la formación de senderos, por lo que, una hormiga puede ser vista como un agente encargado de resolver el problema de forrajeo basándose en la percepción de su entorno y tomando decisiones, estas características nos permiten establecer un modelo multiagente.

#### 5.1 Consideraciones del modelo multiagente

Definir el comportamiento individual de una hormiga no es una tarea fácil para el ámbito computacional, es un proceso que inicia con la investigación realizada por expertos en biología seguido de una abstracción para estructurar la información obtenida a modo de reglas de reacción motivadas por diferentes efectores en el medio ambiente. Una primera aproximación a la definición de estas reglas de comportamiento individual se obtiene como resultado del análisis de los diagramas de comunicación vistos en el capítulo 2, lo que nos lleva a entablar que una hormiga reacciona de formas diferentes dependiendo de lo que encuentre en su camino, ya sea por el tamaño de la fuente de alimento encontrado o la cantidad de feromona de atracción, entonces, podemos afirmar que las hormigas actúan de manera independiente y autónoma únicamente guiadas por las características del entorno a fin de cumplir con la tarea de búsqueda y recolección de alimento.

La primera fase del modelado de la tarea de forrajeo como sistema multiagente consiste en determinar las características propias del medio ambiente, tomando como punto de referencia el modelo de tres bloques (figura 3.2). Podemos comenzar con la descripción de un entorno bien delimitado, lo que significa que solo se consideran las características biológicas más básicas y que permiten el desarrollo de esta actividad colectiva, a continuación se da una descripción del diseño de estas características:

- En un entorno natural, el observador experto debe limitar la superficie física a analizar, de este modo, cuando hablamos de forrajeo los elementos básicos en un espacio limitado de sustrato debe incluir la entrada al nido de la colonia de hormigas, lo que permite observar la salida de las hormigas para dar comienzo a la búsqueda de alimento.

Otro elemento presente es una fuente de alimento, el único modo de simular la autoorganización es asegurarnos de que el medio ambiente de los agentes contenga el elemento que estimula la comunicación colectiva entre hormigas, por lo que se debe considerar en el diseño del entorno al menos una fuente de alimento y esta debe ser infinita tal como en el modelo de tres bloques.

El colectivo natural utiliza una sustancia química que le indica la cercanía al nido, esta sustancia química debe estar presente en el modelo de simulación, corresponde a una variable que será más grande mientras se esté más cerca del nido y más pequeña en caso contrario, el químico de orientación les sirve a las hormigas para poder regresar al nido.

- Para el diseño de los agentes, primero se debe seleccionar la forma de comunicación, para este trabajo, se elige la feromona de atracción, debido a que la implementación de este elemento solo requiere de una variable para la cantidad de feromona, una variable para el tiempo de difusión y una más para el tiempo de evaporación, lo que representa una forma simple de comunicación entre agentes y el entorno.

Al tratarse de un sistema multiagente, lo de mayor relevancia en el diseño de este sistema es la definición de las reglas de comportamiento de las hormigas respecto a la tarea de forrajeo. El género *Atta Texana* presenta diferentes comportamientos cuando realiza la búsqueda y recolección de alimentos, sin embargo, para el modelo que se propone en este trabajo de investigación se han sintetizado ciertas características con el fin de que las hormigas sigan un conjunto de reglas simples y tomando como base las constantes  $r$  del modelo de la figura 3.2, las cuales guían la dinámica de la tarea colectiva. Se proponen las siguientes:

- Las hormigas salen del nido para iniciar la búsqueda de alimento, esta salida debe ser pausada pues las condiciones del nido determinan la salida de las hormigas forrajeras, esto se ve reflejado en la constante  $r_N$ .
- Una hormiga que sale del nido realiza la búsqueda de una fuente de comida de manera aleatoria, este comportamiento tiene asignado un tiempo promedio ( $r_D$ ), el cual indica que una hormiga, se encuentra en este estado durante un minuto antes de encontrar alimento o un rastro de feromona que la guíe hacia una fuente de comida, este comportamiento se lleva a cabo de manera aleatorio y será considerado para el estado de búsqueda.
- Cuando una hormiga encuentra alimento, espera cierto tiempo para llevar a cabo un análisis del tamaño del alimento y el contenido proteínico, después toma una porción y retorna al nido, orientándose por el olor del nido y dejando en su camino un rastro de feromona de reclutamiento para atraer a más hormigas a la fuente de alimento, este estado también tiene asignado un tiempo promedio  $r_F$ , en términos de minutos, una hormiga tarda 2 minutos en evaluar el alimento y retornar al nido.

Se puede observar, que la implementación de este modelo multiagente es guiada por los tiempos promedios o constantes  $r$  del modelo de tres bloques, es importante retomarlas pues los resultados obtenidos en las simulaciones de dicho modelo sirven para comparar con los nuevos resultados y así podemos tener un parámetro para evaluar si la tarea colectiva se desarrolla en apego a los comportamientos biológicos.

Sin embargo, es necesario decir que para un sistema multiagente no se pueden considerar tiempos exactos, ya que eso significa que debemos programar a nuestros agentes a que realicen las tareas de manera condicionada y no de modo autónomo, por lo que en las reglas de comportamiento de los agentes se incluye de manera implícita tales tiempos promedios y son variables que pueden ser menores o mayores dependiendo de la reacción del agente.

## 5.2 Sistema Multiagente del forrajeo de hormigas

Un agente es un módulo de software para resolver un problema simple particular. Un sistema multiagente consiste en un número de tales módulos envueltos de manera conjunta para resolver un problema complejo [16]. Llevando esta definición a la tarea de forrajeo de hormigas, podemos observar que una hormiga se puede modelar como un agente debido a que las tareas individuales que lleva a cabo para resolver problemas se pueden representar con reglas simples de comportamiento. Sin embargo, cuando un colectivo lleva a cabo la tarea de búsqueda y recolección de alimento entonces las interacciones simples dan paso a la emergencia de la complejidad por lo que en este trabajo de investigación, se presenta un modelo multiagente que simula los comportamientos individuales para obtener como resultado la emergencia de la complejidad la cual asociamos al paso del desorden al orden.

El modelado de un sistema multiagente debe involucrar el entorno donde los agentes llevan a cabo la tarea colectiva, así como el diseño del agente que realiza las acciones de percibir, decidir y actuar. El entorno, posee características biológicas que permiten a los agentes percibir una porción limitada del estado del medio ambiente, los agentes evalúan de manera constante el entorno lo que les permite tomar decisiones para llevar a cabo la tarea colectiva del forrajeo, la toma de decisiones se lleva a cabo de manera autónoma sin la existencia de un agente controlador y además las acciones de un agente no dependen de otro, en la figura 5.1 podemos observar la interacción entre el entorno y el agente hormiga así como la secuencia de acciones que realiza el agente de manera autónoma y cíclica.

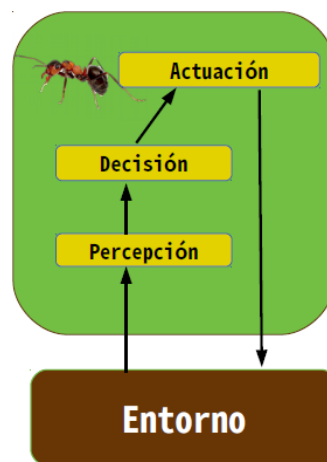


Figura 5.1 Diagrama de interacción entre el agente hormiga y su entorno

### 5.2.1 Entorno

El entorno tiene asociadas variables que representan las características biológicas que permiten a los agentes llevar a cabo la tarea de forrajeo, para un mejor entendimiento del diseño del entorno,

supongamos que dividimos en celdillas la porción de sustrato que estamos observando y a cada una de estas celdillas le asignamos las variables que se muestran en la tabla 5.1.

| Variable                | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>feromona</b>         | Representa la cantidad de feromona en esa celdilla, los agentes pueden aumentar este valor, las propiedades biológicas de evaporación y difusión de la feromona disminuyen y distribuyen la cantidad de este compuesto.                                                             |
| <b>alimento</b>         | Es una variable que representa la cantidad de alimento en esa celdilla, si el valor es mayor a cero entonces el agente puede tomar una porción de alimento, esta cantidad no puede incrementarse ni decrementarse debido a que se define al inicio de la simulación.                |
| <b>nido</b>             | Esta variable es de tipo booleana, solo puede tomar el valor de verdadero si la celdilla pertenece al nido de las hormigas, se utiliza para que el agente sepa si se encuentra dentro del nido.                                                                                     |
| <b>olor-nido</b>        | Representa una cantidad fija que se inicializa con la simulación, representa la distancia al nido, si la celdilla está cerca del nido entonces la cantidad es mas grande, si la celdilla está lejos entonces toma un valor menor.                                                   |
| <b>fuentes-alimento</b> | Es una variable de tipo booleano, si la celdilla pertenece a la fuente de alimento entonces toma el valor de verdadero, el agente requiere saber si ha encontrado una fuente de alimento por lo que el entorno debe proporcionar esta información y lo hace mediante esta variable. |

Tabla 5.1 Variables que caracterizan el entorno de forrajeo



Figura 5.2 Características de las celdillas que componen el entorno del modelo multiagente de forrajeo de hormigas

Es importante mencionar que la variable feromona es modificada por dos coeficientes, la razón de difusión y la razón de evaporación, los cuales están definidos de la siguiente manera para este modelo propuesto:

$$cantidad\ de\ feromona(x) \rightarrow (razon\ de\ difusion/100)(a)..... 5.1$$

donde el valor *razon de difusion* es proporcionado por el usuario del simulador, y la difusión de la feromona afecta a las ocho rejillas que están alrededor de la rejilla principal, lo que ocasiona que la cantidad de feromona se modifique en las rejillas de alrededor sin afectar a la rejilla x la cual solo proporciona el valor a difundir, en la siguiente figura se muestra un ejemplo de este procedimiento.

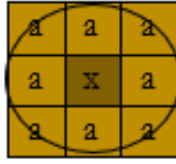


Figura 5.2 Rejilla de feromona

La razón de evaporación para este modelo está establecida de la siguiente manera:

$$feromona\ actual = \frac{feromona\ en\ la\ rejilla * (100 - razon\ de\ evaporacion)}{100} \dots\dots\dots 5.2$$

donde *razon de evaporacion* es un valor proporcionado por el usuario del simulador, la finalidad de esta razón es disminuir la cantidad de feromona que hay en una determinada rejilla, esto se realiza en apego al comportamiento que tienen los quimiorreceptores que utilizan las hormigas en el proceso de comunicación.

### 5.2.2 Agente hormiga

Se ha establecido que un agente autónomo es capaz de percibir su entorno, con base en la información obtenida decide la acción que puede llevar a cabo y finalmente ejecutarla (figura 5.1), para este trabajo de investigación cada uno de estos módulos tiene asignadas ciertas instrucciones las cuales se describen a continuación.

#### I. Percepción

El agente evalúa constantemente los valores del entorno, pero no lo hace de manera global, el alcance de la percepción está limitado a evaluar la rejilla sobre la que está posicionada así como las rejillas que tiene en un radio de 45° a -45°, tomando en cuenta que la cabeza del agente se encuentra en el punto medio o 0°, en la figura 5.3 se observa el proceso de percepción que realiza cada uno de los agentes.

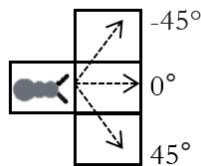


Figura 5.3 Percepción del agente hormiga

## II. Decisión

En este módulo, el agente debe tomar una decisión de cómo actuar con base en la información obtenida de su entorno y eligiendo una de las reglas de comportamiento que se han modelado a partir de los comportamientos individuales biológicos observados en las hormigas forrajeras. Para este trabajo de investigación se presentan tres comportamientos: buscar alimento, regresar al nido y esperar. A continuación se describe las características del entorno que permiten al agente llevar a cabo alguno de los comportamientos.

### i) Agente en el nido

El agente se encuentra en el nido, debe decidir si permanece ahí realizando una valoración del estado del nido o inicia la búsqueda de una fuente de alimento. La descripción de esta decisión es la siguiente:

1. Percibe que se encuentra sobre una celdilla que pertenece al nido
2. Decide salir del nido en busca de una fuente de alimento o decide permanecer para obtener información del nido
3. Ejecuta los movimientos necesarios para abandonar el nido o ejecuta un tiempo de espera

### ii) Agente buscando alimento

El agente hormiga puede decidir realizar esta acción si detecta que no está en el nido y no se encuentra realizando la recolección de alimento, entonces inicia la búsqueda de una fuente de alimento o un rastro de feromona que la pueda guiar hacia la comida. La descripción de esta decisión es la siguiente

1. Percibe las características de la celdilla
2. Decide buscar alimento
3. Ejecuta una búsqueda aleatoria o seguimiento de un rastro de feromona

### iii) Agente realizando valoración

El agente realiza la evaluación del nido, cuando da inicio el forrajeo y cuando ha llegado a una fuente de alimento, en apego al comportamiento biológico, una hormiga obtiene información del estado del nido y de la fuente de alimento para determinar la acción a realizar.

1. Percibe que esta sobre una celdilla de nido o fuente de alimento.
2. Decide realizar una valoración del estado del alimento o nido.
3. Ejecuta movimientos aleatorios para representar la valoración.

iv) Agente en fuente de alimento

El agente ha llegado a una fuente de alimento, debe realizar una valoración del estado del alimento, por lo que permanece un tiempo en el comedero, después toma una porción y retorna al nido.

1. Percibe que se encuentra en una fuente de alimento
2. Decide realizar valoración y tomar una porción de comida
3. Ejecuta movimientos para salir del comedero

v) Agente regresando al nido

Esta acción la puede ejecutar el agente que ha llegado a una fuente de alimento y ha tomado un trozo de comida, por lo que debe retornar al nido, para una mejor identificación de los agentes que han decidido ejecutar esta acción, se hace un cambio de color de negro a anaranjado.

1. Percibe que lleva alimento
2. Decide regresar al nido
3. Percibe el olor del nido
4. Decide dirigirse hacia donde huele más fuerte
5. Ejecuta la marcación de camino dejando un rastro de feromona de atracción

III. Actuación

Después de que el agente percibe el ambiente y decide ejecutar alguna de las reglas que modelan el comportamiento individual, entonces, el siguiente paso es llevar a cabo las acciones asociadas a tal comportamiento elegido. Estas acciones se describen a continuación:

- i) Esperar: el agente avanza dos paso al frente y realiza cuatro giros alternados de  $45^\circ$  hacia ambos lados, finalmente realiza un giro de  $180^\circ$  con el fin de que al siguiente paso salga de la zona de comida o del nido.

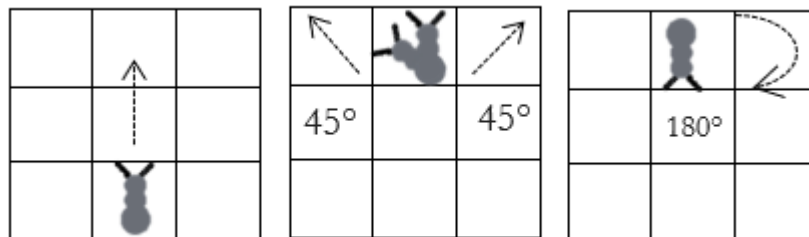


Figura 5.4 Se muestra la secuencia de acciones del comportamiento esperar

- ii) Buscar alimento: el agente ejecuta una consulta para saber si se encuentra en la fuente de alimento, se ejecuta un cambio de color cuando ha tomado una porción de alimento. Espera y sale de la fuente de alimento.

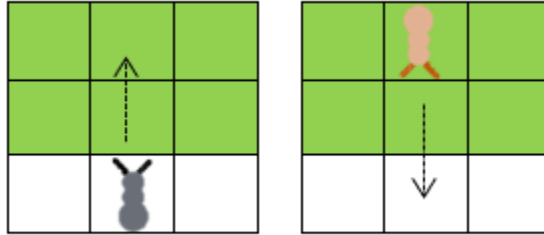


Figura 5.5 Acciones que realiza el agente cuando ha encontrado una fuente de alimento

Si el agente no se encuentra en una fuente de alimento entonces ejecuta la acción de percibir en busca de un rastro de feromona, si lo encuentra puede seguirlo o continuar su búsqueda de manera aleatoria, las acciones que lleva a cabo para realizar una búsqueda aleatoria es realizar un giro a la izquierda con un ángulo aleatorio entre  $0^\circ$  y  $45^\circ$  y repetir esta acción pero hacia el lado derecho, después avanzar un paso, en caso de detectar que no puede avanzar porque la celdilla está ocupada entonces realiza un giro de  $180^\circ$ .

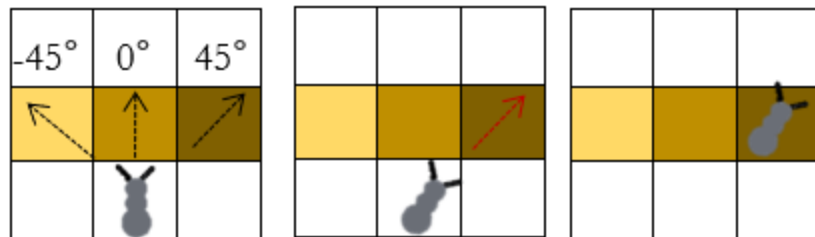


Figura 5.6 Se muestra la secuencia de acciones cuando el agente se mueve siguiendo un rastro de feromona

- iii) Regresar al nido: cuando el agente está en la fuente de comida y toma una porción de alimento entonces decide regresar al nido, para hacerlo debe percibir el olor del nido y dirigirse hacia donde huele más fuerte, por lo que debe obtener información de las celdillas que tiene al frente o  $0^\circ$  y las que se encuentran a  $45^\circ$  y  $-45^\circ$ , evalúa la información y se dirige a la que tiene mayor concentración de olor de nido, además incrementa la cantidad de feromona de atracción en las celdillas por las que va pasando. Cuando el agente llega al nido entonces deposita el alimento, cambia de color anaranjado a negro para indicar que ya no está cargando alimento y realiza un tiempo de espera para volver a percibir, decidir y actuar.

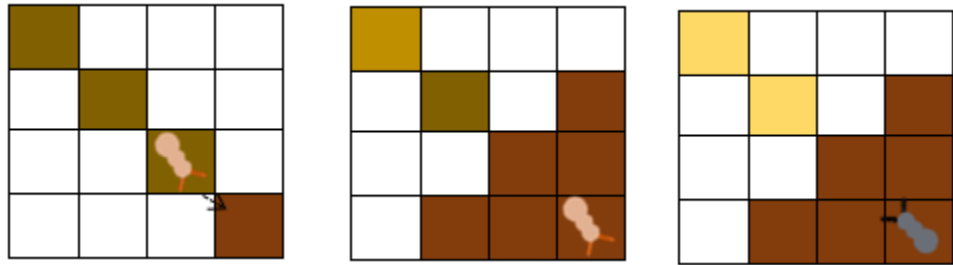


Figura 5.7 Se representa la secuencia de acciones cuando el agente regresa al nido.

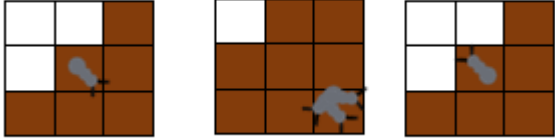
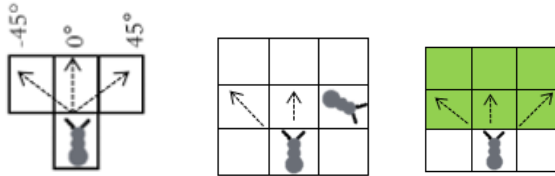
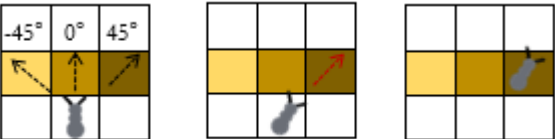
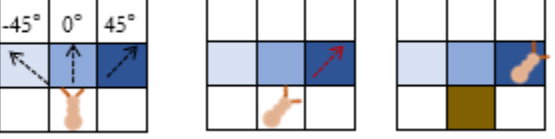
El sistema multiagente funciona, de manera cíclica y como la suma de un gran número de unidades descritos en la figura 5.1, donde cada agente de manera autónoma ejecuta las acciones de percibir, decidir y actuar y en conjunto constituyen la población de hormigas realizando la tarea de forrajeo. El usuario de la interfaz de simulación proporciona el número total de hormigas como parámetros de entrada junto con los parámetros de difusión y evaporación de feromona. Una vez construida la interfaz se puede utilizar para generar comportamientos colectivos y hacer el registro de forma gráfica. En la siguiente sección se presentan resultados de los comportamientos colectivos y de la evolución de la entropía que mide la relación orden-desorden del forrajeo de hormigas vistas como agentes.

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
|  | nido                                  |
|  | Feromona con mayor concentración      |
|  | Feromona con concentración media      |
|  | Feromona con concentración mínima     |
|  | Fuente de alimento                    |
|  | Olor de nido con mayor concentración  |
|  | Olor de nido con concentración media  |
|  | Olor de nido con concentración mínima |

Tabla 5.1 Código de colores que representan propiedades del entorno para describir la percepción del agente hormiga

La tabla 5.1 presenta un código de colores asociados a la característica presente en la rejilla del entorno, para un mejor entendimiento del módulo de actuación del agente.

### 5.2.3 Descripción grafica del ciclo Percepción-Decisión-Actuación del agente hormiga

| Situación                                               | Percibe                                                    | Decide                                                                                                                 | Actúa                                                                                |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Agente en el nido                                       | Se encuentra sobre una rejilla que pertenece al nido       | Permanecer cierto tiempo evaluando las condiciones del nido                                                            |    |
| Agente realiza búsqueda aleatoria                       | Percibe las características de las rejillas                | Decide seguir evaluando las rejillas en busca de una porción de alimento, evitando rejillas ocupadas por otros agentes |    |
| Agente sigue rastro de feromona para encontrar alimento | Percibe la cantidad de feromona en las rejillas            | Se mueve hacia donde la concentración de feromona es mayor                                                             |   |
| Agente en fuente de alimento                            | Percibe una rejilla que pertenece a una fuente de alimento | Avanzar hacia la fuente de alimento, permanecer cierto tiempo y salir de regreso al nido                               |  |
| Agente retornando al nido con alimento                  | Percibe la cantidad de feromona de olor de nido            | Se dirige hacia donde el olor del nido es más fuerte, va dejando un rastro de feromona de atracción                    |  |

### 5.3 Comportamientos colectivos

En el modelo de forrajeo de hormigas simulado como un sistema multiagente, uno de los objetivos es observar y analizar el orden-desorden de los agentes cuando están llevando a cabo esta tarea colectiva, para realizar tal estudio se requiere del cálculo de entropía propuesto en el capítulo 3.

Al analizar el modelo de tres estados, el cálculo de entropía dependía de un conteo del número de hormigas en cada uno de los tres estados, pero para el caso del sistema multiagente hasta el momento se ha hablado de comportamientos para referirse a las acciones que puede realizar de manera autónoma un agente hormiga. Ahora se requiere definir estados; un estado representa un comportamiento colectivo, dicho de otro modo, cuando varios agentes hormiga se encuentran ejecutando el mismo comportamiento entonces se dice que x número de agentes se encuentran en un estado, para este modelo multiagente, la tabla 5.2 presenta la asociación de comportamiento individual a estado.

| Comportamiento                      | Estado       |
|-------------------------------------|--------------|
| <b>Esperar</b>                      | Nido (N)     |
| <b>Buscar alimento</b>              | Buscando (S) |
| <b>Aleatorio</b>                    |              |
| <b>Siguiendo rastro de feromona</b> |              |
| <b>Regresar al Nido</b>             | Alimento (F) |

Tabla 5.2 Asociación de comportamientos a estados, las letras entre paréntesis corresponden a la misma nomenclatura del modelo de forrajeo de hormigas de tres bloques

Se observa que en el transcurso del desarrollo del forrajeo de hormigas, un agente puede transitar de un estado a otro de manera autónoma como respuesta a las condiciones del entorno. Una vez que se ha asociado un comportamiento a un estado entonces lo siguiente es ejecutar la simulación y llevar a cabo un conteo de agentes en cada estado por tiempo.

Cada vez que se incrementa el tiempo, se solicita a las hormigas que informen el comportamiento que están realizando, se les asigna un estado y se incrementa la variable de estado correspondiente, la representación de estos conteos, al igual que en el modelo de tres bloques, se presenta en graficas que permiten observar tales incrementos de las variables de estado en el tiempo.

En la figura 5.10 se observa la simulación del sistema multiagente del forrajeo de hormigas, la cual esta codificada en NetLogo, un lenguaje de programación multiagente que permite el modelado de ambientes para simular fenómenos complejos [17]. Se observa una fuente de alimento, la entrada al nido y los agentes hormiga, algunas hormigas son de color anaranjado, esto se debe a que el agente está ejecutando la acción de retornar al nido con alimento. Muestra la simulación en la fase de configuración donde se aprecia que las hormigas están en el nido, en la segunda interfaz, la simulación da inicio por lo que los agentes comienzan a salir y realizan una búsqueda aleatoria de la fuente de alimento, finalmente, en la tercera pantalla se observa que ha transcurrido un mayor tiempo de la simulación por lo que algunos agentes ya están trayendo alimento al nido. A un lado de la simulación

se observan las gráficas correspondientes al conteo del número de hormigas en cada estado en el tiempo y la gráfica de entropía asociada al sistema.

En la figura 5.8 se presenta la gráfica resultante del conteo del número de agentes en un estado en el tiempo, un análisis de estas curvas nos permite concluir que la tarea colectiva de forrajeo de hormigas inicia con una fase de desorden. El mayor número de hormigas se encuentran en el nido en espera de obtener la información necesaria para iniciar con la búsqueda de alimento mientras que otro grupo ya se encuentra explorando fuera del nido pero ninguna ha tenido éxito por lo que entre el minuto 0 y el 4 las hormigas están en una fase de desorden. A partir del minuto 4, las curvas de conteo llegan a un estado estacionario, donde el número de hormigas que están transportando alimento al nido es mayor que las que están explorando de manera aleatoria, también el número de hormigas en el nido se estaciona por lo que podemos decir que es una fase de autoorganización. Las gráficas permanecen con esta tendencia hasta el minuto 10, pero aún no podemos establecer que el orden es inminente en esta tarea, requerimos de un parámetro que determine si hay una transición del desorden al orden o si el trabajo colaborativo ha evitado llegar a un punto de desorden máximo, por lo que debemos hacer uso del parámetro propuesto en el capítulo 4 para determinar estas cuestiones.

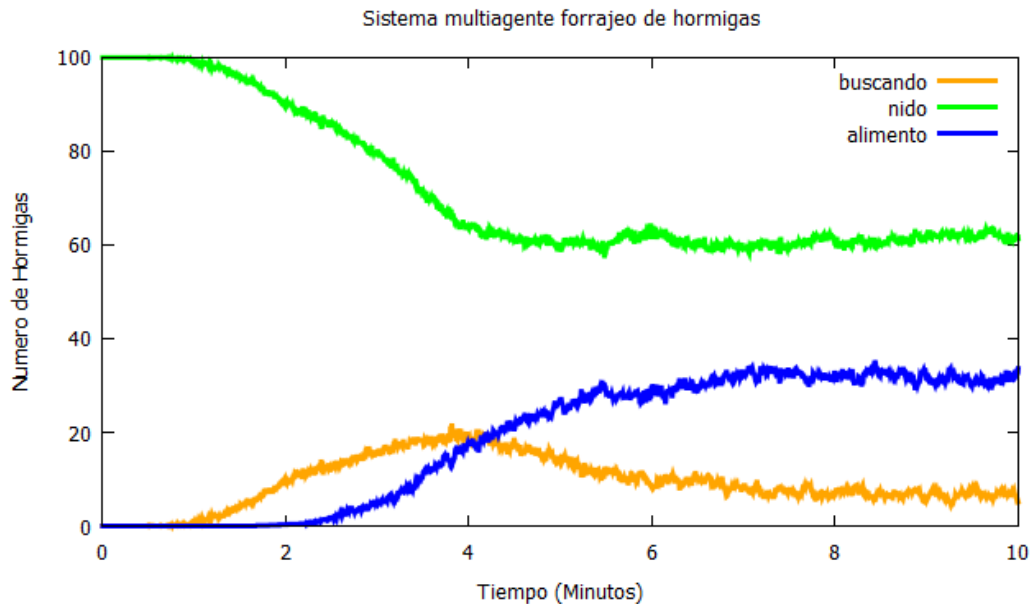


Figura 5.8 Conteo de hormigas en cada estado por tiempo

#### 5.4 Modelo de entropía propuesto para el sistema multiagente del forrajeo de hormigas

Una vez que se han obtenido los conteos de hormigas en cada estado, el siguiente paso es la aplicación de la propuesta de parámetro de orden-desorden que se explicó en el capítulo 4, por lo que se debe realizar el cálculo de las probabilidades por estado por tiempo, aplicando la ecuación 4.2 obtenemos

$$P_N(t) = \frac{n_N}{N_o} \quad P_S(t) = \frac{n_S}{N_o} \quad P_F(t) = \frac{n_F}{N_o} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4.2}$$

Finalmente, el valor de la entropía en función del tiempo se obtiene aplicando la definición de entropía presentada en el capítulo 2.

$$S(t) = - \sum_{i=N,S,F} P_i(t) \log_2 P_i(t) \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.1}$$

la representación de estos cálculos también se hace mediante la gráfica de entropía, en esta se pueden observar dos curvas, una corresponde a la entropía teórica o máxima y la segunda a la entropía del forrajeo de hormigas basada en el cálculo de probabilidades utilizando conteos por estados, los resultados se muestran en la figura 5.9.

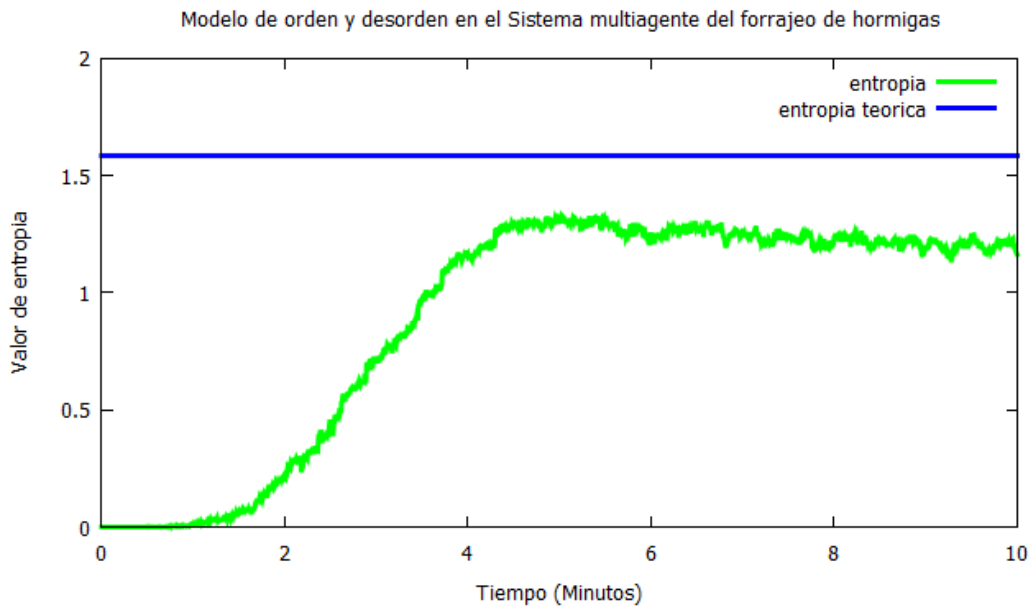


Figura 5.9 Entropía del modelo multiagente del forrajeo de hormigas y la entropía máxima

La grafica de entropía permite ver que cuando los agentes ejecutan un conjunto de reglas simples de manera autónoma estimulado por las condiciones del entorno y en colectivo, existe un flujo de información entre ellos el cual permite que lleven a cabo la tarea que están realizando con autoorganización. Esto se sustenta mediante el cálculo de entropía basada en las probabilidades de los estados por los que transita un agente ya que se aprecia claramente que esta entropía no llega a su punto máximo o entropía teórica, lo que afirma la idea de que existe orden en la ejecución del forrajeo de alimento y que esta transición encuentra una estabilización ya que la curva no presenta fluctuaciones tan distantes.

## 5.5 Síntesis

Realizando una comparativa entre los dos modelos que caracterizan el forrajeo de hormigas podemos concluir que las gráficas asociadas al conteo de hormigas en cada estado colectivo son

semejantes, ambas llegan a una fase estacionaria y el cálculo de entropía también es semejante, por lo tanto se puede afirmar que el modelo multiagente cumple con un correcto modelado de las reglas individuales, esto se debe a que en este sistema también hay un surgimiento de orden cuando los agentes están forrajeando, y de manera más puntual, la entropía nos permite asegurar que el colectivo se ha organizado de manera autónoma y el forrajeo se está realizando de manera óptima. Esta afirmación se fundamenta con la estabilización de la curva de entropía mostrada en la figura 5.9.

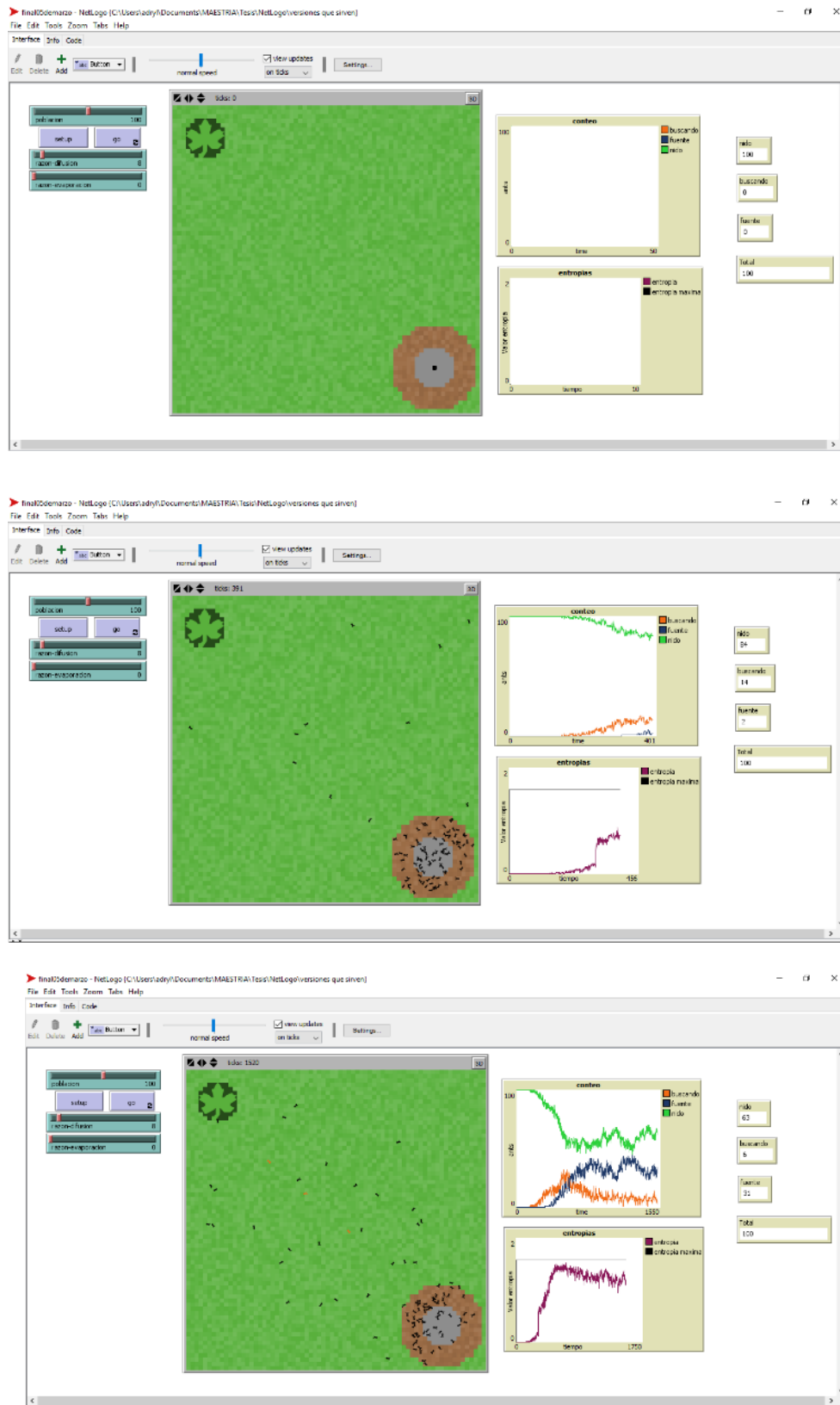


Figura 5.10 Simulación forrajeo de hormigas en NetLogo

## CAPÍTULO 6

### VARIACIONES EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA MULTIAGENTE

Una forma de comprender la emergencia de propiedades complejas en colectivos biológicos es mediante el análisis de las simulaciones de tareas donde se pueden cambiar características del entorno y lo que se espera es una variación en los resultados, o dicho de otro modo, que el colectivo responda de diferentes maneras a las condiciones del medio pero siempre buscando llevar a cabo con éxito la tarea colectiva, que en este caso, es la búsqueda y recolección de alimento. A continuación se presentan las gráficas resultantes de modificar características el entorno y la forma en que respondieron los agentes.

#### 6.1 Variante Difusión 0 evaporación 10

El primer cambio del entorno es respecto a las razones de difusión y evaporación, se les da el valor de cero a ambas razones, el objetivo de estos cambios es eliminar la difusión de la feromona para que los agentes perciban de manera más restringida este químico, también, poner en un valor alto la evaporación con el fin de acelerar el proceso de disminución de feromona en una rejilla, los agentes tendrán menos tiempo para percibir la feromona de atracción.

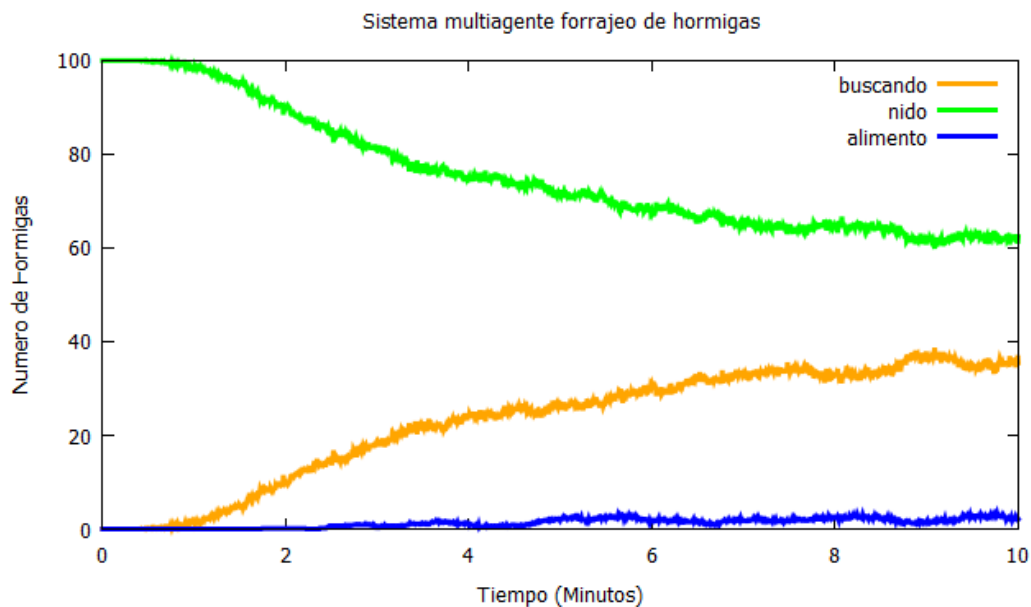


Figura 6.1 Simulación con valores de razón de evaporación 10 y razón de difusión 0

La figura 6.1 muestra el resultado del conteo del número de agentes en cada estado por tiempo, el análisis de estos datos nos muestra que al eliminar la razón de difusión de feromona y poner un valor máximo a la evaporación, en esta caso 10, da como resultado que se dificulte la organización entre los agentes para llevar a cabo la tarea de forrajeo ya que podemos observar que la curva que

representa a las hormigas que están teniendo éxito al encontrar y traer alimento al nido está en los valores mínimos, también se observa que las gráficas se encuentran en un estado estacionario, a pesar de no tener éxito en la realización de la tarea, los agentes no se encuentran descontrolados.

La figura 6.2 muestra la gráfica correspondiente a la entropía calculada para la simulación de forrajeo de hormigas cambiando los valores de las razones de difusión a 0 y evaporación a 10. Los datos obtenidos establecen que el colectivo comienza la tarea de manera desordenada pero nunca llega a un estado de máxima entropía o máximo desorden, a pesar de no tener un número más grande de hormigas que llevan alimento en comparación con las que buscan de manera aleatoria, el colectivo no está en una fase de desorden total, se afirma esto, sustentado con la curva de entropía (verde) la cual tiene como valor máximo 1.047939213 al minuto 5 aproximadamente por lo que nunca toca el valor máximo de entropía. Podemos decir, que el colectivo en el tiempo 0 al 10 con las condiciones descritas anteriormente se encuentra en una fase de autoorganización.

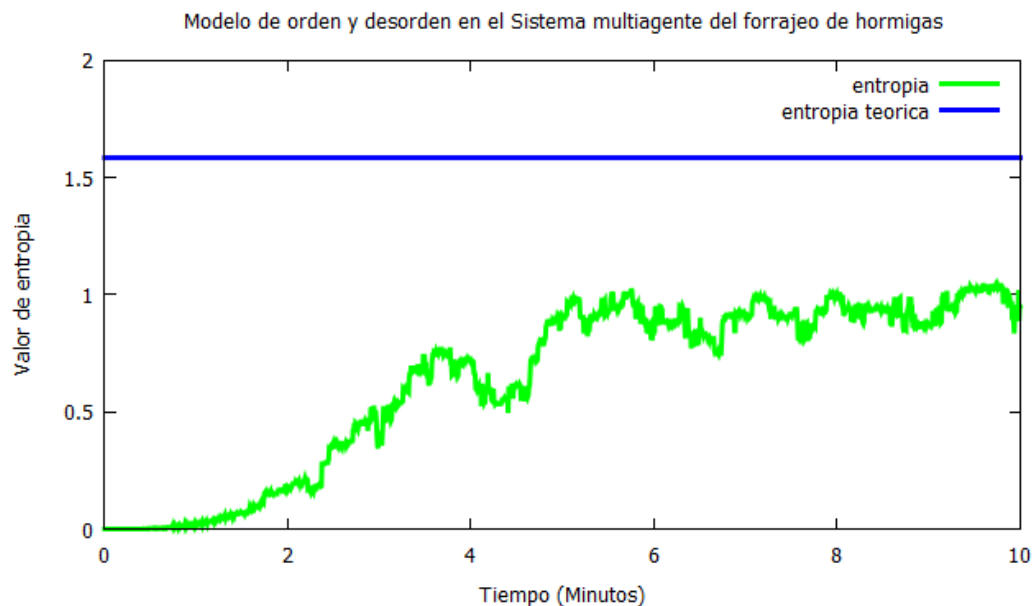


Figura 6.2 Entropía asociada a la simulación de forrajeo de agentes con variación de razón de evaporación y razón de difusión de feromona

## 6.2 Variante Difusión 50 evaporación 5

Las características que me modifican para esta simulación también son respecto a los valores de las razones de difusión y evaporación, se les asignan valores intermedios quedando de la siguiente manera, difusión = 50 y evaporación = 5, se espera que se intensifique el uso de la feromona como guía para la formación de patrones espaciales y que el número de agentes que traen alimento al nido sea mayor con respecto a la simulación anterior.

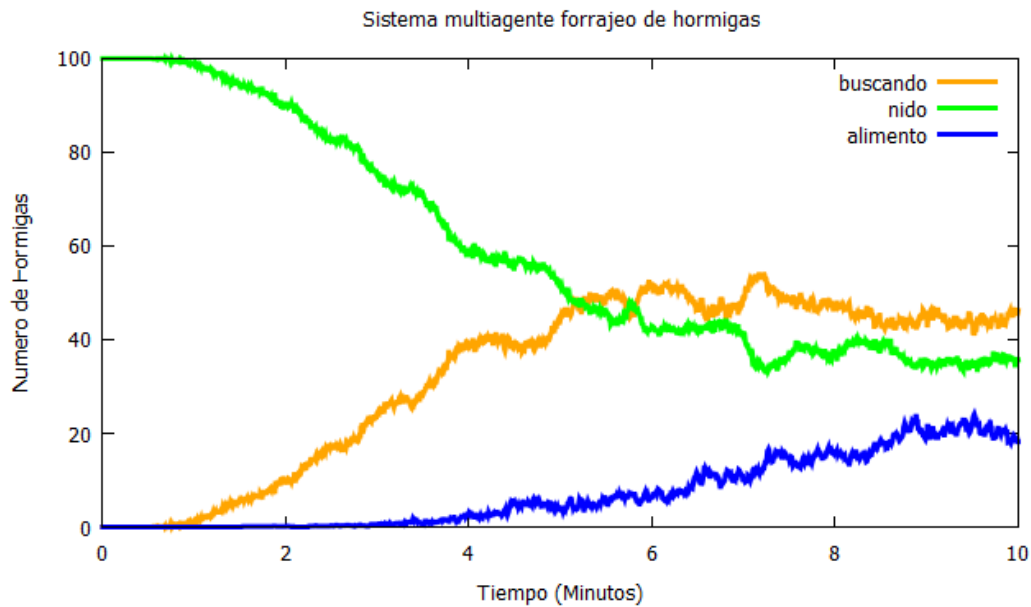


Figura 6.3 Simulación con valores de razón de evaporación 5 y razón de difusión 50

La figura 6.3 muestra el conteo de agentes en cada uno de los estados por tiempo, lo que se observa es que no hay una fase de estado estacionario, las curvas tienen fluctuaciones, el número de agentes que están trayendo alimento al nido es mayor en comparación a la simulación anterior. Sin embargo el número de agentes que están realizando una búsqueda de alimento de forma aleatoria es mayor al número de hormigas que permanecen en el nido, esto se debe a que la difusión de la feromona es mayor en comparación a las simulaciones pasadas, esto incrementa el número de agentes estimulados salir del nido y además, en conjunto con la razón de evaporación el ambiente se encuentra lleno de feromona de atracción por lo que los agentes no son capaces de formar una vereda se encuentran desorientados siguiendo rastros que no los llevan a una fuente de alimento.

La figura 6.4, muestra el cálculo de entropía de la simulación con valores intermedios en las razones de difusión y evaporación, la curva verde representa a la entropía asociada al sistema multiagente la cual alcanza un valor máximo de 1.315592668 en el minuto 9 aproximadamente, en comparación con la simulación anterior, este valor de entropía es mayor. Podemos decir que para esta simulación los agentes tardan más tiempo en llegar a una fase de autoorganización para llevar cabo la tarea de forrajeo, el desorden es mayor en comparación con la simulación anterior, sin embargo, el colectivo tampoco llega a una fase de desorden total, esto lo podemos afirmar porque la gráfica de entropía asociada al modelo nunca alcanza el valor máximo de entropía teórica. Entonces los agentes de este modelo logran mantenerse en orden, el forrajeo no se realiza de la manera óptima pues hay más hormigas buscando que trayendo alimento pero tampoco se encuentran en desorden total.



Figura 6.4 Entropía asociada a la simulación de forrajeo de agentes con variación de razón de evaporación y razón de difusión de feromona

### 6.3 Nido y fuente de alimento con área menor

Las características que me modifican para esta simulación afectan al tamaño de la fuente de alimento y del nido, ambas se reducen por lo que la distancia entre ambos elementos se hace mayor, entonces se puede esperar que los agentes tarden más tiempo en encontrar la fuente y por lo tanto también tarden más en autoorganizarse. Las razones de difusión y evaporación no se modifican.

La figura 6.5 muestra los resultados del conteo del número de agentes en cada estado por tiempo, es notorio que el número de agentes en la fuente de alimento es mayor del minuto 4 al minuto 6, esto se debe a que el espacio del nido al ser de menor tamaño entonces los agentes se ven obligados a salir y en un inicio realizan una búsqueda aleatoria pero después pasan a la fase de autoorganización y son reclutadas hacia la fuente de alimento, a partir del minuto 6.5 se observa que las curvas llegan a una fase estacionaria.

La figura 6.6 representa el cálculo de entropía asociada a esta simulación, la curva verde toma su valor máximo en 1.538192082, es un valor muy cercano a la entropía máxima sin embargo no lo alcanza y a partir del minuto 4 se observa un descenso en la curva. La interpretación de este comportamiento está asociado a que en un inicio sale un numero grande de agentes a realizar una búsqueda aleatoria debido a que el tamaño del nido no les permite permanecer en el, esta búsqueda aleatoria se puede considerar como una fase de desorden, a partir del minuto 4 las hormigas se han autoorganizado esto se puede afirmar debido al descenso del desorden en el sistema, entonces afirmamos que la tarea comienza a ejecutarse de modo organizado.

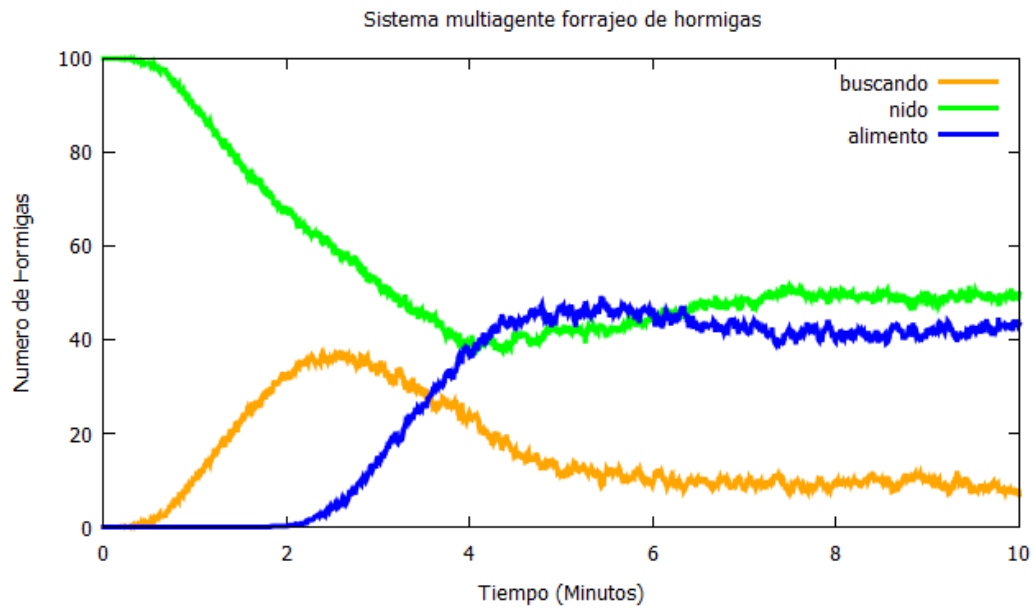


Figura 6.5 Simulación con reducción en el tamaño de la fuente de alimento y del nido

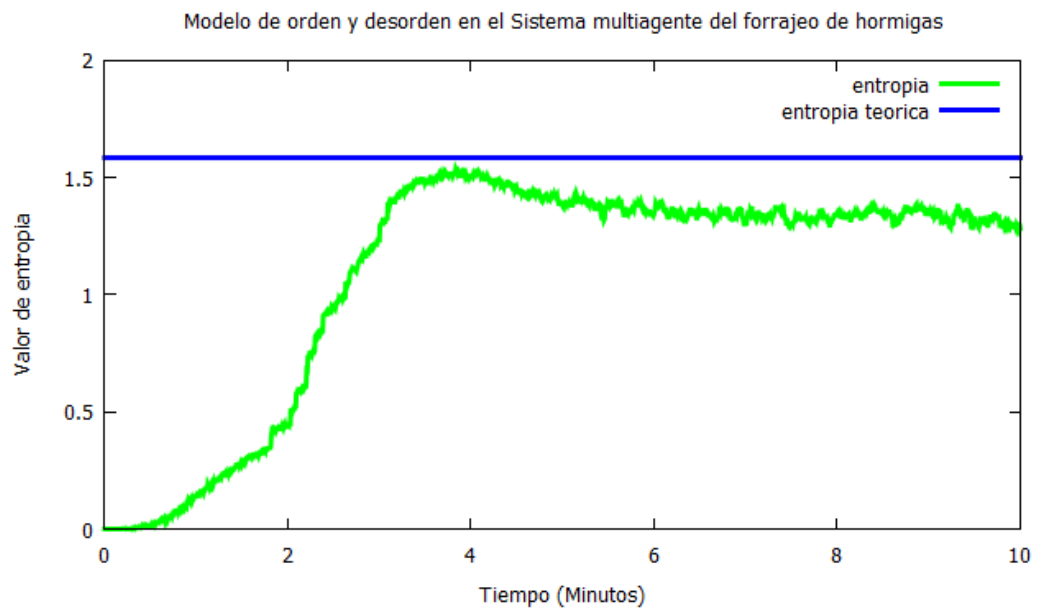


Figura 6.6 Entropía asociada a la simulación con reducción del tamaño de nido y comedero

## 6.4 Síntesis

Las simulaciones presentadas en este capítulo se realizan cambiando valores a las características establecidas en el entorno de los agentes, el análisis de los resultados obtenidos nos permiten concluir que la variación en las razones de difusión y evaporación o el tamaño del nido y el comedero impacta en el tiempo en que los agentes llegan a ordenarse con el fin de llevar a cabo la tarea de forrajeo, esto se debe a que estos cambios estimulan a los agentes a ejecutar sus reglas de comportamiento de diferentes maneras, sin embargo, en todas las simulaciones surge un cambio del desorden al orden, también, en ninguna de las simulaciones la entropía alcanza su valor máximo por lo que concluimos que esta tarea siempre se realiza de manera ordenada.

La varianza en las gráficas de entropía se puede interpretar en términos de optimización, lo que se requiere es que la entropía sea creciente y después se estacione tal como lo muestra la gráfica de la figura 5.9, ese comportamiento de la curva se asocia a que el colectivo realiza la tarea con las condiciones óptimas y se asegura que tengan éxito. Sin embargo, cuando se varían las características del entorno podemos observar que, por ejemplo, en la figura 6.4 la curva presenta fluctuaciones sin lograr llegar a una fase estacionaria por lo que se puede decir que el colectivo está poniendo más esfuerzo para poder llevar a cabo la tarea de búsqueda y recolección de alimento, sin embargo las condiciones del medio no les permite una adecuada autoorganización, se concluye que el colectivo debe tener un desgaste mayor para cumplir con su objetivo.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

#### 7.1 Conclusiones

Estudiar los aspectos biológicos del forrajeo de hormigas es el punto de partida para analizar características emergentes propias de los sistemas complejos, el ciclo de análisis comienza con realizar una abstracción del comportamiento biológico para finalmente llevarlo a un modelo ya sea matemático o multiagente, estas dos perspectivas se han abordado en este trabajo de investigación logrando hacer que ambos modelos conceptualicen y caractericen las propiedades biológicas más básicas e indispensables que un colectivo de hormigas presenta al momento del realizar la búsqueda y recolección de alimento.

Al inicio de este documento, se han analizado las castas de las hormigas con el fin de identificar a las que participan en la tarea de forrajeo y estudiar los tipos de comunicación que llevan a cabo durante esta tarea, el resultado de este análisis se presenta en los diagramas 2.6 al 2.10, estos se consideran el punto de partida para la formulación de las reglas simples de comportamiento.

El modelo matemático de manera implícita considera las características propias del colectivo de hormigas y las representa a través de las razones del número de hormigas por tiempo, tal modelo propone que las hormigas transitan por tres estados y se enfoca en determinar los tiempos que tarda una hormiga en pasar de uno a otro. La gráfica 3.3 fundamenta la hipótesis de este trabajo de investigación ya que permitió observar una fase de estabilización respecto al número de hormigas en los estados transitorios.

La aplicación del parámetro de orden propuesto en el capítulo 4 al modelo de ecuaciones diferenciales ha servido como sustento del objetivo de investigación de este trabajo, se ha podido observar que existe un balance entre el orden y desorden durante el forrajeo de hormigas. La gráfica de la figura 4.1 muestra que la curva de entropía es estable y sin fluctuaciones.

El modelo de sistema multiagente permite la caracterización del entorno natural donde se desarrolla la tarea de forrajeo, estos agentes deciden la forma de actuar ante las propiedades del entorno y lo realizan mediante la elección de alguna de las reglas simples que se entablaron en el modelo, es necesario mencionar que a nivel de implementación no se diseñó ningún módulo que controle a los agentes, estos toman sus decisiones de manera autónoma, entablando un flujo de información entre el agente y las características del entorno.

La simulación de este sistema permite observar que las hormigas tienen un comportamiento natural, al igual que en un entorno biológico, las hormigas pueden o no pertenecer a la vereda que se forma durante el forrajeo pero al igual que en el modelo matemático, se requiere de una representación a forma de gráficas que un mejor análisis por lo que en el modelo multiagente se requirió definir comportamientos colectivos para realizar conteos del número de hormigas en cada estado y posteriormente el cálculo de entropía.

Una comparativa de las gráficas obtenidas en ambos modelos nos han permitido ver que los modelos reflejan resultados parecidos, concluyendo que la caracterización de comportamientos biológicos se ha realizado de manera correcta.

En conclusión, el cálculo de entropía nos permitió un nuevo análisis, estas graficas muestran que la curva asociada a la entropía del sistema de hormigas forrajeras nunca toca a la entropía máxima que este sistema puede tener o entropía teórica, el área debajo de la curva se puede interpretar como la cantidad de desorden durante la ejecución de la tarea, mientras que el área sobre la curva representa la cantidad de orden, entonces podemos asegurar que la autoorganización es una propiedad emergente que está presente en la tarea de forrajeo, además de ser un colectivo que actúa de manera autónoma sin la intervención de ningún tipo de control, simplemente basados en la información que obtienen de su entorno, se trata de un colectivo capaz de ordenarse a fin de llevar a cabo una tarea de manera distribuida y esto es lo que impacta para el área de ciencias de la computación.

El simulador obtenido ha permitido la variación de características del entorno, pudiendo concluir que la gráfica de entropía al estar en una fase estable, permite la ejecución mas óptima de la tarea colectiva, lo que permite al usuario encontrar tales condiciones. Por lo que se concluye que el objetivo planteado en este trabajo se ha alcanzado.

## **7.2 Aportaciones**

La principal aportación de este trabajo de investigación es la propuesta de la entropía como parámetro de cuantificación de orden-desorden durante el desarrollo de una tarea colectiva, en este caso, el forrajeo de hormigas. Esta aportación está basada en el conteo del número de agentes en un comportamiento colectivo.

El simulador obtenido permite la modificación de valores en la constante de difusión, evaporación y tamaño de la población por lo que se pueden hacer experimentos y obtener resultados diferentes. Para el área de ciencias biológicas representa una herramienta para la ejecución de simulaciones así como el planteamiento de nuevas características en comportamiento individual y del entorno.

Finalmente este modelo puede formar la base para predecir comportamientos colectivos en otros tipos de colonias biológicas o sustancias químicas.

## **7.3 Trabajo a futuro**

El modelo multiagente permite establecer que con reglas simples se puede llevar a cabo una tarea de forma colectiva, sin embargo, este trabajo tiene limitaciones en la caracterización de los comportamientos individuales, como trabajo a futuro, se deja la implementación de nuevas reglas para los agentes que impliquen técnicas más sofisticadas de comunicación como las que presenta el género de hormigas *Atta texana*, o la colaboración entre pares que puede acelerar el proceso de acarreo de alimento al nido, participando diferentes.

Otra modificación es la de incrementar el número de comportamientos colectivos, ya que eso nos permitiría conteos más específicos, por ejemplo, crear un estado colectivo para los agentes que están siendo reclutados y ya no contarlos como si estuvieran en la fuente de alimento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Camazine, S., Deneubourg, J. L., Franks, N. R., Sneyd, J., Bonabeau, E., & Theraula, G. (2003). *Self-organization in biological systems* (Vol. 7). Princeton university press.
- [2] Carbonell, K. J. (2004). *El mundo de las hormigas*. Equinoccio.
- [3] López-Riquelme, G. O., & Ramón, F. (2010). *El mundo feliz de las hormigas*. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 13(1), 35-48.
- [4] Hölldobler, B., & Wilson, E. O. (1990). *The ants*. Harvard University Press.
- [5] Hölldobler, B., Wilson, E. O., & Ros, J. (1996). *Viaje a las hormigas: una historia de exploración científica*. Grijalbo Mondatori.
- [6] Wilson, E. O. (1963). *The social biology of ants*. *Annual Review of Entomology*, 8(1), 345-368.
- [7] David Morgan, E. (2009). *Trail pheromones of ants*. *Physiological entomology*, 34(1), 1-17.
- [8] Tumlinson, J. H., Moser, J. C., Silverstein, R. M., Brownlee, R. G., & Ruth, J. M. (1972). *A volatile trail pheromone of the leaf-cutting ant, Atta texana*. *Journal of Insect Physiol* 18: 809–814.
- [9] Bertoglio, O. J., & Johansen, O. (1982). *Introducción a la teoría general de sistemas*. Editorial Limusa.
- [10] Miramontes Vidal, O. (2000). Orden y caos en la organización social de las hormigas. *Ciencias*, (059).
- [11] Solé, R. V., & Manrubia, S. C. (2001). *Orden y caos en sistemas complejos* (Vol. 2). Univ. Politèc. de Catalunya.
- [12] Hölldobler, B., & Wilson, E. O. (2010). *The leafcutter ants: civilization by instinct*. WW Norton & Company.
- [13] Mendoza, L., & Vergara, F. *Orden y caos en biología*.
- [14] Ben-Naim, A. (2011). *La entropía desvelada*. Tusquets Editores. Barcelona.
- [15] Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons.
- [16] Rangel-Huerta, A., & Muñoz-Meléndez, A. (2010). Kinetic theory of situated agents applied to pedestrian flow in a corridor. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(5), 1077-1089.
- [17] Tisue, S., & Wilensky, U. (2004, May). Netlogo: A simple environment for modeling complexity. In *International conference on complex systems* (Vol. 21, pp. 16-21).

# ANEXOS

## A.1 Código de implementación del Sistema Multiagente

```
;; definición de variables globales, son tipo entero, llevaran el conteo de numero de hormigas en dicho estado
breed [comida hoja]    ;; esta raza representa la hoja en el comedero, se crea como agente con fines de diseño del entorno
breed [hormigas ants]  ;; esta raza representa a las hormigas forrajeras
breed [cargadas hojitas]

globals [fuente nido buscando pn ps pf entropia maxentro]

patches-own [
  feromona      ;; cantidad de feromona en ese patch
  alimento      ;; cantidad de alimento en ese patch
  nido?         ;; true si es un patch que pertenece al nido, falso en otro caso
  nido2?        ;; igual que nido original, se define para diseño
  olor-nido     ;; número que es más grande mientras más cerca se está del nido
  fuente-alimento? ;; verdadero si el patch es parte del comedero, falso en otro caso
]

;;aquí viene la definición de la propiedad "estado" para las hormigas, servirá
;;como indicador para saber en cual estado se encuentra tal agente en un determinado tick

hormigas-own[
  estado      ;; los probables valores son: fuente, nido, buscando
]

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;;; Procedimientos de configuración;;;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;

to setup
  clear-all

  set-default-shape cargadas "leaf"
  create-cargadas 1
  [set size 1
   set color green]

  set-default-shape comida "leaf"
  create-comida 1
  [ set size 10    ;; tamaño de los agentes hormigas
    set color green ;; todas la inicio son rojas, lo que quiere decir que no están trayendo alimento
    set xcor -28   ;; coordenada en el eje x de donde saldrán las hormigas por primera vez
    set ycor 28]

  set-default-shape hormigas "bug" ;; asignación de la forma del agente bug= hormiga
  create-hormigas poblacion
  [ set size 1    ;; tamaño de los agentes hormigas
    set color black ;; todas la inicio son rojas, lo que quiere decir que no están trayendo alimento
    set xcor 25    ;; coordenada en el eje x de donde saldrán las hormigas por primera vez
    set ycor -25   ;; coordenada en el eje y de donde saldrán las hormigas por primera vez
  ]

  setup-patches    ;; llamado al proceso de configuración de los patches definido más adelante

  set fuente 0    ;; inicializamos contadores
  set nido 0
  set buscando 0

  ask hormigas[
    set estado "nido" ;; todas las hormigas inician en el nido, por eso su primer estado es "nido"
    set nido nido + 1 ;; necesario para que el monitor de conteo las marque a todas en el nido al inicio
  ]

  reset-ticks    ;; reiniciamos el contador de ticks
```

```

end

to setup-patches ;; procedimiento para configurar los patches
ask patches
[
  setup-nido ;; configurar nido
  setup-alimento ;; configurar fuente de alimento
  recolor-patch ] ;; colorea los patches dependiendo de su función
end

to setup-nido ;; procedimiento para configurar los patches

  set nido? (distancexy 25 -25) < 10 ;; los patches considerados como nido son los que cumplen con la restricción de distancia la coordenada 25
-25
  set olor-nido 200 - distancexy 25 -25 ;; a todos los patches se les otorga una cantidad de olor de nido, mientras más cerca del nido mayor
concentracion
  set nido2? (distancexy 25 -25) < 5 ;; se define el nido interno, esto es solo para darle diseño al mundo de la simulacion
end

to setup-alimento ;; procedimiento para configurar patches que sean parte del comedero

  set fuente-alimento? (distancexy (-0.8 * max-pxcor) (0.8 * max-pycor)) < 5 ;; asignamos patches que pertenecen a la fuente de alimento a los que
cumplan con la restricción de distancia

  if fuente-alimento? ;; si es un patch del comedero entonces le asignamos cantidad de alimento
  [set alimento 5]
end

to recolor-patch ;; procedimiento para dar color a los patch dependiendo de la función que tengan

  ifelse nido2? ;;damos color al nido externo
  [ set pcolor gray ]
  [ ifelse nido? ;; damos color al nido más interno
  [set pcolor brown + (random-float 0.8) - 0.4 ]
  [ifelse fuente-alimento? ;; damos color al pasto
  [ set pcolor 52 ]
  [set pcolor 66 + (random-float 0.8) ]
  ]]
end

to inicializarVariables ;;este procedimiento inicializa las variables que se utilizan para el conteo de estados y cálculo de entropia
set nido 0
set buscando 0
set fuente 0
set pn 0
set ps 0
set pn 0
set entropia 0
end

to cuentaEstados ;; este procedimiento realiza el conteo de estados en el que se encuentra cada agente
set nido count hormigas with[estado = "nido"]
set fuente count hormigas with[estado = "comida"]
set buscando count hormigas with[estado = "buscando"]
end

to calcularEntropia ;; este procedimiento calcula la entropia del modelo, utiliza la definición de Boltzmann por lo que se ejecuta después de obtener
el conteo de estados
;;primero calcular la probabilidad para cada conteo de estado

;;pn es la probabilidad asociada al número de hormigas en el NIDO entre el número total de hormigas
set pn nido / población
ifelse pn = 0 ;;esto se hace porque NetLogo no calcula el log de 0 y marca error
[set pn 0] ;;para la primera ejecución los ponemos en 0 sin solicitar el cálculo del log
[set pn pn * log pn 2]

;;ps es la probabilidad asociada al número de hormigas BUSCANDO entre el número total de hormigas
set ps buscando / población
ifelse ps = 0
[set ps 0]
[set ps ps * log ps 2]

```

```

;;pn es la probabilidad asociada al número de hormigas en la FUENTE DE ALIMENTO o acarreado comida entre el número total de hormigas
set pf fuente / población
ifelse pf = 0
[set ps 0]
[set pf pf * log pf 2]

;;aplicando la definición de entropia calculamos los valores
set entropia ( pn + ps + pf ) * -1
set maxentro (log (1 / 3) 2) * -1
end

to esperar
  fd 2
  lt 45
  rt 45
  lt 45
  rt 45
  rt 180
end

.....
;;;Procedimiento Go ;;
.....

to go

  ask comida
  [stop]

  inicializarVariables      ;; inicializamos las variables para el conteo de estados y cálculo de Entropia

  ask hormigas
  [
    if who >= ticks [ stop ] ;; delay initial departure

    if nido?
    [ esperar ]           ;; si la hormiga está en el nido debe esperar cierto tiempo para salir

    ifelse color = black  ;; para que el agente reaccione primero debe saber cuál es su estado, negro= la hormiga esta libre puede buscar comida
    [ busca-alimento ]    ;; busca alimento
    [ regresa-al-nido ]    ;; si no es negra significa que tiene alimento y debe regresar al nido

  ]

  cuentaEstados           ;; este proceso pregunta a cada agente el estado en el que se encuentra y realiza el conteo asignado valor a las variables de estado

  diffuse feromona (razon-difusion / 100)
  ask patches
  [ set feromona feromona * (100 - razon-evaporacion) / 100] ;; procesos para difusión y evaporación de la feromona de las hormigas

  calcularEntropia        ;;ahora vamos a calcular la entropia

  tick
end

to regresa-al-nido
  ifelse nido?
  [
    set color black
    rt 180

    set feromona feromona + 60 ;; deja un poco de feromona
    uphill-nest-scent

    wiggle
  ]
end

```

```

to busca-alimento ;; turtle procedure
if fuente-alimento?
[
  esperar

  ask hormigas[set breed cargadas]
  set color orange ;; pick up food
  set estado "comida" ;; cambio de estado, la hormiga esta en la fuente de alimento
  esperar
  fd 2
  rt 180
  ;; and turn around
  stop
]
;; dirígete hacia donde el químico huele más fuerte
if (feromona >= 0.05) and (feromona < 2)
[
  uphill-chemical
]

wiggle

end

;; evalua la cantidad de feromona que hay en el patch de la izquierda-derecha-centro
;; dirígete hacia donde el olor sea mas fuerte
to uphill-chemical
  let scent-ahead chemical-scent-at-angle 0
  let scent-right chemical-scent-at-angle 45
  let scent-left chemical-scent-at-angle -45
  if (scent-right > scent-ahead) or (scent-left > scent-ahead)
  [ ifelse scent-right > scent-left
    [ rt 45 ]
    [ lt 45 ] ]
end

;; percibe el olor del nido en el patch izquierdo y derecho y dirígete hacia donde hueles más fuerte
to uphill-nest-scent
  let scent-ahead nest-scent-at-angle 0
  let scent-right nest-scent-at-angle 45
  let scent-left nest-scent-at-angle -45
  if (scent-right > scent-ahead) or (scent-left > scent-ahead)
  [ ifelse scent-right > scent-left
    [ rt 45 ]
    [ lt 45 ] ]
end

;;procedimiento de avance después de ejecutar una acción, también se hace la asignación de estado a la hormiga
to wiggle
  rt random 40
  lt random 40

  ifelse color = black
  [ifelse not nido? and feromona < 5 ;; hormigas que no están en el nido, son negras y están sobre un patch con poca feromona
  [set estado "buscando"] ;; están realizando búsqueda aleatoria, se les asigna el estado buscando
  [ifelse not nido? and feromona > 5 ;; hormigas que no están en el nido, son negras y están sobre un patch con mucha feromona
  [set estado "comida"] ;; están siguiendo un rastro de feromona, por lo tanto se consideran en el estado comida
  [if nido? [set estado "nido"]]] ;; hormigas que están en el nido se les asigna estado nido
  ]
  [set estado "comida"] ;; las anaranjadas

  if not can-move? 1 [ rt 180 ]
  fd 1

end

;; este procedimiento solicita al patch la cantidad de olor de nido que contiene y lo reporta
;; con la finalidad de que el agente hormiga pueda tomar una decisión de hacia dónde dirigirse

to-report nest-scent-at-angle [angle]

```

```
let p patch-right-and-ahead angle 1
if p = nobody [ report 0 ]
report [olor-nido] of p
end
```

:: este procedimiento solicita al patch la cantidad de feromona que contiene y lo reporta  
:: con la finalidad de que el agente hormiga pueda tomar una decisión de hacia dónde dirigirse

```
to-report chemical-scent-at-angle [angle]
let p patch-right-and-ahead angle 1
if p = nobody [ report 0 ]
report [feromona] of p
end
```