

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ciencias de la Computación e Informática

**Construcción de un Modelo Organizacional basado en la
Simulación Organizacional y el Análisis de Redes
Sociales**

por

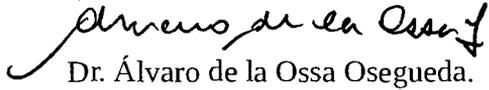
Andrés Segura Castillo

Informe de Proyecto para optar al grado académico
de Licenciatura en Computación e Informática

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro, San José, Costa Rica
Julio de 2013

Este proyecto de graduación ha sido aceptado por el Tribunal Examinador como requisito parcial para optar al grado académico de Licenciatura en Computación e Informática.

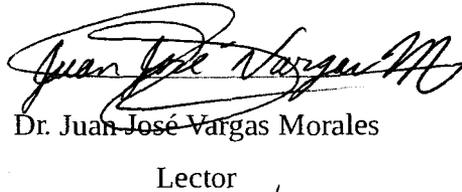
Miembros del Tribunal Examinador:

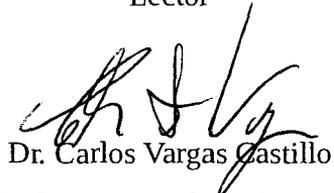

Dr. Álvaro de la Ossa Osegueda.

Director del proyecto


M.Sc. Ileana Alpízar Arias
Asesora


M.Sc. Alan Calderón Castro
Asesor


Dr. Juan José Vargas Morales
Lector


Dr. Carlos Vargas Castillo

Director de la Escuela de Ciencias de la Computación e Informática

*A Vivi, mi amada compañera de vida,
mi familia y amigos.
Gracias por la inspiración.*

Índice general

Hoja de aprobación.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Resumen.....	ix
1 Introducción.....	1
1.1 Objetivo general.....	8
1.2 Objetivos específicos.....	8
1.3 Criterios de cumplimiento de los objetivos específicos.....	9
2 Marco Teórico.....	11
2.1 Agentes inteligentes.....	13
2.1.1 Agentes tropistas:.....	13
2.1.2 Agentes con histéresis.....	13
2.1.3 Agentes con conocimiento.....	14
2.1.4 Agentes deliberativos	14
2.1.5 Agentes racionales.....	15
2.1.6 Agentes sociales.....	16
2.2 Arquitecturas concretas de agentes inteligentes.....	17
2.2.1 Arquitecturas concretas basadas en lógicas formales.....	17
2.2.2 Arquitecturas concretas reactivas.....	18
2.2.2.1 Arquitectura de subsumisión.....	19
2.2.3 Arquitectura Creencia-Deseo-Intención.....	21
2.2.4 Arquitecturas en capas.....	22
2.3 Sistemas multiagente.....	24
2.4 Simulación social.....	27
2.5 Simulación Organizacional.....	29
2.5.1 Diseño organizacional.....	30
2.5.2 Tareas y flujos de trabajo.....	31
2.5.3 Comportamiento emergente.....	33
2.5.4 Sistemas multiagente y simulación organizacional.....	34
2.6 Análisis de Redes Sociales.....	35
3 Metodología.....	41
3.1.1 Construcción del modelo conceptual.....	42
3.1.2 Construcción del modelo calibrado.....	42
3.1.3 Control de consistencia.....	43
3.1.4 Análisis de sensibilidad.....	43
3.1.5 Evaluación de escenarios.....	44

4 Resultados.....	47
4.1 Objetivo específico 1.....	47
4.1.1 Aplicación de generadores de nombres.....	47
4.1.1.1 Resultados Categoría 1: Perfil del investigador.....	48
4.1.1.2 Resultados Categoría 2: Colaboración y financiamiento con otras instituciones.....	49
4.1.1.3 Resultados Categoría 3: Factores que propician los proyectos colaborativos de investigación con entes externos.....	51
4.1.1.4 Resultados Categoría 4: Factores de éxito de los proyectos colaborativos de investigación.....	53
4.1.1.5 Resultados Categoría 5: Preguntas de opinión.....	55
4.1.2 Revisión documental	57
4.1.3 Representación de la red de colaboración del CeNAT.....	59
4.1.4 Representación del modelo organizacional.....	61
4.1.5 Aprobación por parte del experto de la organización.....	63
4.2 Objetivo específico 2.....	63
4.2.1 Control de consistencia.....	64
4.2.2 Selección de herramienta para el desarrollo del sistema multiagente prototipo	64
4.2.3 Construcción de prototipo de sistema multiagente.....	66
4.2.3.1 Objetos creados para el prototipo de sistema multiagente.....	66
4.2.3.2 Pseudocódigo de la simulación.....	69
4.2.4 Análisis de sensibilidad.....	72
4.2.4.1 Variación de probabilidades RSub0 y RSub1.....	73
4.2.4.2 Variación de cantidad de investigadores y fuentes.....	75
4.3 Objetivo específico 3.....	76
4.3.1 Diseño de escenarios de simulación.....	76
4.3.2 Resultados de escenarios de simulación.....	78
4.3.2.1 Resultados Escenario 1.....	78
4.3.2.2 Resultados Escenario 2.....	79
5 Conclusiones y recomendaciones.....	81
6 Bibliografía.....	85
7 Anexos.....	89
7.1 Acrónimos.....	89
7.2 Fórmulas de Análisis de Redes Sociales.....	90
7.3 Generador de nombres aplicado en el CeNAT.....	94
7.4 Métricas obtenidas del análisis de la red de colaboración del CeNAT.....	100
7.5 Diagramas UML.....	101
7.5.1 Diagrama de actividades.....	101

7.5.2 Diagrama de secuencia.....	102
7.5.3 Diagrama de estados.....	103
7.6 Valoración de herramientas para desarrollo de sistemas multiagente.....	104

Índice de tablas

Tabla 6.2: Resultados de variación de investigadores y fuentes.....	75
---	----

Índice de figuras y gráficos

Figura 3.1 Arquitectura en capas horizontales.....	23
Figura 3.2 Arquitectura en capas verticales de uno y dos pasos.....	23
Gráfico 6.1: Red de colaboración del CeNAT.....	60
Gráfico 6.2: Rango aceptable de R_{sub0}	74
Gráfico 6.3: Rango aceptable de R_{sub1}	74
Gráfico 6.4: Comportamiento coeficiente de agrupamiento y porcentaje de éxito.....	79
Gráfico 6.5: Comportamiento experiencia vs. porcentaje de éxito.....	80

Resumen

El funcionamiento estable de una organización depende de una multiplicidad de factores y es en sí un problema complejo para la gestión organizacional. Una estrategia común para afrontar dicha complejidad estriba en expresar la dinámica de la organización mediante un modelo, el cual, normalmente, consiste en una representación simplificada de la entidad, que aclara las variables y dinámicas propias de la organización.

Recientemente se ha reconocido en los sistemas multiagente, es decir, sistemas computacionales basados en componentes de software y/o hardware autónomos capaces de interactuar entre sí, una alternativa para apoyar la gestión organizacional. Mediante dicha herramienta es posible modelar sociedades de agentes que proceden de acuerdo a reglas de interacción similares a las encontradas en las organizaciones, y por ende simular su comportamiento. Esta aproximación se conoce como simulación social y es normalmente adoptada para visualizar aspectos organizacionales cualitativos durante las simulaciones y al mismo tiempo emplear herramientas cuantitativas para evaluar la posible existencia de patrones emergentes de comportamiento que ayuden a comprender de mejor forma la dinámica de la organización sujeto de estudio.

Otro posible instrumento capaz de contribuir a la gestión organizacional es el análisis de redes sociales, rama que permite considerar a la organización como una red, es decir, un conjunto de actores o nodos cuya interacción es representada mediante enlaces, y utilizar una serie de métricas para describir su comportamiento, configuración y flujo de información, entre otros.

El proyecto *Construcción de un modelo organizacional basado en la Simulación Social y el Análisis de Redes Sociales* integró las aproximaciones de apoyo a la gestión organizacional mencionadas con el fin de tratar a las organizaciones como redes sociales susceptibles de ser simuladas mediante un sistema multiagente, cuyos datos de salida sean evaluados con

métodos de análisis de redes sociales. Dicha aproximación puede entonces concebirse como un modelo organizacional computacional, capaz de contribuir a la gestión organizacional como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones.

El presente documento detalla los objetivos del proyecto, su marco teórico, la metodología empleada para su ejecución y los resultados obtenidos durante el proceso de implementación de un modelo organizacional computacional en una institución tomada como ejemplo, a saber, el Centro Nacional de Alta Tecnología. En esta entidad se investigaron, modelaron, simularon y analizaron variables de la organización que tienen influencia directa en la generación de proyectos colaborativos de investigación con otras organizaciones. A partir de un conjunto de simulaciones hechas con un prototipo de sistema multiagente se establecieron dos patrones emergentes de comportamiento que revelan posibles condiciones en las que las iniciativas colaborativas con entes externos resultan fructíferas, es decir, se concretan en proyectos conjuntos de investigación.

1 Introducción

Las organizaciones en general, existen como una estrategia colectiva para superar las limitaciones de las acciones individuales (Carley & Gasser, 2001). Aunque no hay un consenso generalizado en su definición, la mayoría de estudios coinciden con Daft (2007), quien señala que una organización consiste en una entidad social caracterizada, al menos, por una estructura de ordenamiento interno, un conjunto de objetivos a cumplir, una serie de vínculos con su ambiente y una colección de actividades coordinadas sistemáticamente.

El funcionamiento estable de una organización depende de una miríada de factores y es de hecho un problema abierto para la *gestión organizacional* (GO), es decir, para la adecuada administración de la organización (Daft, 2007). Es necesario tomar en cuenta que el comportamiento organizacional es dinámico, por lo tanto, varía constantemente. Para la GO resulta imperativo evaluar con regularidad el estado de la organización en cuestión, e identificar situaciones que puedan afectar o debilitar su solidez. Además es importante verificar de manera periódica si la configuración interna, cumple en efecto con el propósito pretendido en principio (Burton, DeSanctis & Obel, 2006).

En segundo lugar, existe el riesgo de que los objetivos organizacionales no estén claros, o bien, no sean compartidos en la misma medida por los integrantes de la organización, circunstancia que plantea obstáculos para las actividades desempeñadas diariamente y que debe monitorearse con regularidad (Daft, 2007).

Además debe valorarse el hecho de que el ambiente cambia rápidamente y es necesario adaptarse a nuevos escenarios de trabajo. Anticipar los efectos de las modificaciones del entorno en la organización es primordial para que la misma se mantenga firme con el paso del tiempo.

En última instancia, la coordinación sistemática de actividades es una tarea compleja, que

involucra tanto actores humanos como artificiales. El funcionamiento armónico entre personas, recursos y especialmente otras organizaciones, requiere de un considerable esfuerzo logístico. Asimismo, en la actualidad, la dificultad aumenta conforme los ambientes de trabajo se distribuyen y amplían globalmente (Carley & Gasser, 2001).

Cabe resaltar que las situaciones mencionadas hasta este punto no ocurren en forma aislada; por el contrario, suceden simultáneamente y se relacionan unas con otras. Con el fin de reducir la complejidad presente, aquellos encargados de la GO han optado, en la mayoría de los casos, por abstraer los elementos más relevantes de su organización y expresarlos en un *modelo organizacional* (MO). Dicha conceptualización consiste en una representación simplificada de la entidad, que incluye entre otras cosas, la lista de variables que afectan la organización (presupuesto, recurso humano, infraestructura, etc.), los posibles flujos de trabajo, la descripción del comportamiento de los componentes (tanto humanos como artificiales, internos y externos, etc.) y el detalle de los procesos de la organización que la GO considere pertinente estudiar. Con este tipo de metodología es posible desarrollar una mejor comprensión de las características y operaciones del caso en cuestión (Zacarias, Pinto & Tribolet, 2007).

Dentro de los distintos métodos utilizados tradicionalmente para modelar y gestionar organizaciones podemos mencionar los siguientes:

- *Modelos estadísticos*: En este caso se recopila una serie de datos históricos del comportamiento de la organización. Los mismos sirven de insumo a un modelo estadístico construido sobre la base de un conjunto de métodos de análisis basados en cálculos como el promedio, la varianza, la regresión, el análisis de tendencias, entre otros. El resultado obtenido consiste en un grupo de valores que sirven de guía, según un criterio experto, para la toma de decisiones en el contexto particular de la organización (North & Macal, 2007).

- Análisis de riesgos: Consiste en detectar, a partir de la percepción de los miembros o con ayuda de una auditoría externa, las situaciones que representan una posible amenaza para la organización. Desde esta perspectiva no es indispensable un método estadístico o formal, ya que los factores que se consideran no necesariamente son representables en estos términos. Generalmente el instrumento utilizado consiste en un documento donde se establecen fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de la organización, a partir de las cuales se establecen políticas de prevención y mitigación de riesgos (North & Macal, 2007).
- Modelos gerenciales: Consisten en representaciones no formales, normalmente elaboradas con herramientas gráficas y documentos de texto, que describen la estructura, objetivos, procesos y entorno de una organización (Zacarias, Pinto & Tribolet, 2007).

Es importante añadir que recientemente las herramientas de apoyo para la toma de decisiones en el contexto la GO han aumentado de manera considerable, en particular debido a la mayor disponibilidad de herramientas de modelación y simulación computacional y al aumento de la capacidad de procesamiento de los sistemas informáticos. Dentro de las aproximaciones de este tipo figuran:

- Dinámica de sistemas (System Dynamics): Según North & Macal (2007) este es un enfoque computacional útil para simular sistemas complejos y su evolución en el tiempo. Esta metodología pretende, mediante funciones matemáticas, establecer relaciones de causa y efecto entre las variables que se consideren importantes para un MO (Gilbert, 2008). Esta orientación contiene dos elementos principales: una

lista de variables que describen el estado del sistema y una serie de flujos que detallan su comportamiento con el paso del tiempo (North & Macal, 2007). Los valores iniciales son dados por el usuario como parámetro a un programa que implementa el MO, del que se obtienen como resultado las posibles consecuencias de los mismos en el modelo.

- *Redes de Petri*: Es un método formal de especificación de eventos discretos y flujos de información en términos computacionales. Consiste en un grafo dirigido en el que los nodos representan ya sea lugares (condiciones) que describen parcialmente el estado del sistema, o bien transiciones que detallan las acciones de un proceso. Cabe aclarar que las transiciones consisten en activar el paso de fichas (tokens) de unos nodos a otros. Nodos y transiciones pueden estar unidos entre sí por medio de arcos y por ende estar habilitados para permitir el paso de fichas a través del grafo. Los caminos contruidos de esta forma describen los flujos de información en el sistema y pueden ser simulados computacionalmente. Con ayuda de las Redes de Petri es posible detectar comportamientos anómalos en una organización, por ejemplo puntos muertos (deadlocks) o fallas en la comunicación en algún momento.
- *Microsimulación*: Esta aproximación busca recolectar una cantidad aleatoria y basta de datos de una población (organización en este caso). Cada variable recolectada es “envejecida” utilizando un conjunto de probabilidades de transición, con el fin de determinar el cambio de dicha unidad en un período de tiempo establecido, por ejemplo un año. Una vez “envejecidas” todas las variables, se repite el proceso, simulando así el paso del tiempo en la población y variables elegidas (Gilbert & Troitzsch, 2005).

Si bien los enfoques computacionales anteriormente citados han brindado resultados relevantes para ciertas tareas de GO, en muchos casos no son aptos para comprender la

dinámica de una organización, especialmente si los factores a considerar en el MO no son formalizables matemáticamente. Por ejemplo, el impacto de los distintos roles que asumen los miembros de la organización, cambios en el entorno organizacional, o la influencia de las relaciones con entes externos no son, en principio, medibles con base en alguna descripción formal, por ende requieren de una metodología distinta para su valoración.

Dada esta coyuntura, en los últimos años se ha reconocido en los *sistemas multiagente* (SMAs) una alternativa para apoyar la GO. Los SMAs son sistemas computacionales basados en componentes de software y/o hardware autónomos, capaces de interactuar entre sí en ambientes y tareas predefinidos (Lees, Logan & Theodoropoulos, 2007). Según Oprea (2004), es posible comprender los SMAs como sociedades de agentes que proceden de acuerdo a las reglas de su contexto, específicamente, como una organización que debe cumplir sus objetivos, utilizando para ello mecanismos de interacción y de flujo de trabajo, es decir, un conjunto de actividades cooperativas y coordinadas (Davulcu et al., 1998) que permiten alcanzar las metas propuestas. Fortino, Garro & Russo (2006) insisten que esta es una vía apropiada para la GO, ya que permite observar en instancias simuladas, la influencia de variables que en los métodos citados previamente no es posible; por ejemplo, la cantidad de miembros participantes en una actividad, los roles posibles durante una tarea y las interacciones entre integrantes, entre otros.

En general, este tipo de aproximación al estudio de grupos humanos, sociedades y organizaciones es denominada *simulación social* (SS), y cuenta ya con un considerable cuerpo de investigación y herramientas de análisis (Heath, Hill & Ciarallo, 2009). Desde esta perspectiva es posible examinar aspectos cualitativos durante las simulaciones organizacionales y al mismo tiempo emplear herramientas cuantitativas para evaluar los resultados producidos (Gilbert, 2008). Así, la comparación de los datos simulados obtenidos y los datos reales de la organización brindan una mejor comprensión del fenómeno en cuestión y un panorama mucho más amplio para la GO y la toma de

decisiones en contextos organizacionales.

Otra rama que recientemente ha hecho aportes importantes para el estudio de las organizaciones es el *Análisis de Redes Sociales* (ARS). Este campo es hoy en día un área consolidada entre las ciencias sociales y cuenta con teorías, modelos, metodología y aplicaciones propias para entender los grupos humanos. Su nombre se debe al hecho de que las agrupaciones u organizaciones son entendidas como un tejido de relaciones y procesos entre entidades, es decir, como *redes sociales* (RS) (Wasserman & Faust, 1994), representable mediante un conjunto de nodos (actores o agentes) unidos mediante enlaces que indican su interacción. Para el ARS las RS poseen una estructura que emerge de los patrones regulares de interacción de sus miembros, ya sean grupos pequeños, instituciones, organizaciones, entre otros (Knoke & Yang 2008). Dicha noción ha sido muy útil para la GO, ya que le permite identificar la configuración de una organización sin presuponer que esta deba adaptarse a ningún esquema rígido predeterminado.

El ARS propone una aproximación cuantitativa al fenómeno y establece una serie de medidas que describen las RS y aclaran el comportamiento, configuración y el flujo de información en estas. Para ello ha utilizado generalmente herramientas computacionales especializadas que facilitan el trabajo de los investigadores y que están a disposición de la comunidad científica.¹

La investigación realizada para el presente proyecto permite plantear una nueva manera de analizar una organización al unificar las propuestas de la SS y del ARS para entender a las organizaciones como RS susceptibles de análisis y simulación mediante SMAs. Este acercamiento brinda la opción de simular una organización a partir de datos recolectados para dicho propósito y obtener como resultado un conjunto de datos que denoten el comportamiento probable de la misma en el escenario simulado. A partir de dichos registros

¹ Un ejemplo de herramientas de ARS se puede encontrar en el siguiente enlace: <http://statnet.csde.washington.edu/index.shtml>

es posible, mediante métodos de ARS, inducir estructuras, patrones o generalizaciones del fenómeno de estudio, o bien deducir las consecuencias de añadir nuevos supuestos al sistema (Sun, 2006). El sistema multiagente resultante, en conjunto con los métodos de ARS utilizados, pueden entonces concebirse como un *modelo organizacional computacional* (MOC), el cual contribuye a la GO con una herramienta de apoyo en la toma de decisiones.

El presente documento presenta los resultados obtenidos durante el proyecto de graduación *Construcción de un modelo organizacional basado en la Simulación Social y el Análisis de Redes Sociales*, cuyo objetivo primordial era crear un MOC para simular, mediante un prototipo de SMA, y analizar mediante ARS, una organización tomada como ejemplo, en este caso, el *Centro Nacional de Alta Tecnología* (CeNAT). Dicha institución es un centro de investigación y desarrollo del *Consejo Nacional de Rectores* (CONARE), institución coordinadora del sistema universitario estatal costarricense. La misión del CeNAT consiste en contribuir a la solución de problemas de alcance nacional mediante la investigación y transferencia científica y tecnológica, con la participación de equipos de investigadores y estudiantes de posgrado de las cuatro universidades estatales de Costa Rica, en cooperación con otros sectores del país, incluyendo tanto al gobierno como a los distintos sectores productivos.

Para efectos de este estudio, se investigaron, modelaron, simularon y analizaron únicamente variables de la organización que tienen influencia directa en las labores de investigación, específicamente en la formación de alianzas o redes, entre los investigadores del CeNAT y otras organizaciones. La intención primordial es innovar en el análisis de organizaciones dedicadas a la investigación, mediante la construcción del MOC para establecer, a partir de un conjunto de simulaciones hechas con el prototipo de SMA, algunas de las condiciones en las que las alianzas resultan fructíferas, es decir, se concretan en proyectos conjuntos de investigación.

1.1 Objetivo general

Construir un Modelo Organizacional Computacional de un centro de investigaciones mediante un prototipo de Sistema Multiagente, que permita simular y analizar el comportamiento de los miembros de la organización, específicamente el establecimiento de alianzas de investigación con otras organizaciones.

1.2 Objetivos específicos

1. Especificar con base en información extraída del Centro Nacional de Alta Tecnología un Modelo Organizacional, que refleje las interacciones de sus agentes y las condiciones en las que se forman alianzas con otras organizaciones de investigación.
2. Construir a partir del Modelo Organizacional del Centro Nacional de Alta Tecnología un Modelo Organizacional Computacional mediante un prototipo de Sistema Multagente, capaz de llevar a cabo una serie de simulaciones computacionales válidas de dicho centro.
3. Establecer, mediante el uso de métodos de Análisis de Redes Sociales sobre los datos obtenidos en las simulaciones, algunas de las condiciones en las cuales el Centro Nacional de Alta Tecnología podría establecer exitosamente alianzas de investigación con otras organizaciones.

1.3 Criterios de cumplimiento de los objetivos específicos

A continuación se presenta los productos establecidos para determinar, desde la metodología planteada, la culminación de los objetivos específicos en el contexto del CeNAT:

1. El primer objetivo específico fue evaluado a partir del modelo organizacional del CeNAT obtenido de los datos brindados por la organización. El mismo debía ser plasmado en un documento, mediante algún lenguaje de modelado o especificación y aprobado según el criterio experto del administrador de la institución. Las secciones 4.1.1 y 4.1.2 de la metodología indican los pasos que debían ser alcanzados para entonces.
2. Para efectos de la evaluación del segundo objetivo específico, se necesita el prototipo de sistema multiagente y un análisis de sensibilidad de las variables elegidas como determinantes en el modelo. Dicho estudio debería mostrar que se cuenta con un modelo robusto y por ende capaz de llevar a cabo simulaciones válidas. Los pasos de la metodología que deben cumplirse en este punto se detallan en las secciones 4.1.3 y 4.1.4.
3. La evaluación del tercer objetivo específico se satisface mediante el descubrimiento de posibles condiciones donde el CeNAT pueda establecer alianzas exitosas de investigación con otras organizaciones. Las siguientes medidas de Análisis de Redes Sociales debían ser calculadas sobre los datos obtenidos en las simulaciones: la densidad de la red social representada, la cantidad de componentes conexos de la red, el coeficiente de agrupamiento y las variables que se consideraran necesarias para el modelo (disponibilidad de recursos, experticia de los agentes, por ejemplo). La sección 4.1.5 de la metodología corresponde con esta evaluación.

2 Marco Teórico

El proyecto integra nociones desde distintas disciplinas para lograr los objetivos planteados. Los conceptos que fundamentan dicha iniciativa abarcan campos como la inteligencia artificial, las ciencias de la computación y las ciencias sociales. Cada una de dichas áreas del conocimiento provee una serie de nociones que resultan útiles para construir el Modelo Organizacional Computacional deseado.

El presente marco teórico detalla los conceptos que cada una de las disciplinas aporta a la investigación propuesta, a saber:

- *Agentes inteligentes*: Esta idea es originalmente propuesta en el campo de la IA con el objetivo de plantear un ente artificial capaz de exhibir comportamiento inteligente. La sección correspondiente detalla las distintas aproximaciones conceptuales que históricamente han jugado un papel importante.
- *Arquitecturas concretas de agentes inteligentes*: El inciso dedicado a las arquitecturas concretas de agentes inteligentes muestra los métodos computacionales más relevantes para concretar las diversas nociones de agentes inteligentes.
- *Sistemas multiagente*: Un avance reciente en IA es la inteligencia artificial distribuida. Dicha aproximación propone el uso de agentes inteligentes en contextos distribuidos. La interacción posible en este tipo de entorno facilita la modelación y simulación de conjuntos de agentes que se comporten de manera similar a grupos humanos. En este sentido, la herramienta por excelencia es el Sistema Multiagente, por lo que se dedica un apartado a aclarar su composición y funcionamiento.

- *Simulación social:* Recientemente los Sistemas Multiagentes han sido adoptados por científicos sociales como una herramienta para afinar teorías que expliquen el comportamiento de grupos humanos en ambientes específicos. Esta aproximación a los fenómenos colectivos es denominada Simulación Social y es aclarada con detalle en un apartado dedicado.
- *Simulación organizacional:* Las organizaciones son un tema de vital interés para las ciencias sociales. La Simulación Social ha generado a su vez una rama específica dedicada a la simulación organizacional. Dado que la presente propuesta estudiará una organización dedicada a la investigación científica, es necesario aclarar las nociones de simulación organizacional que se utilizarán durante la puesta en marcha del proyecto.
- *Análisis de redes sociales:* Finalmente, se dedica un segmento del marco teórico al Análisis de Redes Sociales, el cual es una rama de las ciencias sociales que posee una serie de medidas útiles para evaluar la interacción dentro de los grupos humanos. Dado que el proyecto sugiere que las organizaciones pueden ser tratadas como Redes Sociales, las técnicas que proporciona el Análisis de Redes Sociales para su estudio complementan el uso de Sistemas Multiagente para la modelación, simulación y análisis de las mismas.

Dados los conceptos que cimantan la propuesta, a continuación se desarrolla de manera detallada cada uno de ellos.

2.1 Agentes inteligentes

En la actualidad, en el campo de la inteligencia artificial no hay un consenso generalizado en la definición de un agente inteligente, por el contrario, existen distintas arquitecturas conceptuales que pueden ser tomadas como punto de partida para tratar el tema, por lo que es importante aclarar dichas perspectivas previo a la implementación de cualquier agente computacional. A continuación se describe aquellas que más influencia han tenido en el desarrollo del concepto.

2.1.1 Agentes tropistas:

Un *agente tropista* se postula como una entidad capaz de reaccionar de manera determinada a las entradas sensoriales que percibe en su entorno (Genesereth & Nilsson, 1987). Dicho agente se formaliza mediante una tupla $\langle E, P, A, obs, hace, acción \rangle$, donde E es el conjunto de todos los estados posibles en su ambiente, P es un conjunto de particiones de E que el agente puede percibir y A el conjunto de acciones que puede llevar a cabo. La función *obs* representa la percepción del agente y determina la partición de P observada en E . *hace* constituye la denominada función efectora, la cual se encarga de establecer el efecto en E de las acciones de A llevadas a cabo por el agente. La función *acción* evalúa cuál es la acción del conjunto A a ejecutar ante la partición P percibida.

2.1.2 Agentes con histéresis

Genesereth y Nilsson (1987) señalan que el agente tropista no es un concepto suficiente para fundamentar un agente inteligente, ya que este debería incluir capacidades de memoria en su funcionamiento. La arquitectura conceptual propuesta como alternativa ha sido denominada *agente con histéresis* y asume que las decisiones del agente no solo están basadas únicamente en sus observaciones, sino que además toman en consideración la

información retenida en su memoria.

El agente con histéresis se plantea formalmente como la tupla $\langle I, E, P, A, obs, hace, interna, acción \rangle$, donde además de los componentes del agente tropista mencionados anteriormente, se añade el conjunto I de estados internos que representan la memoria del agente y la función *interna* que los actualiza una vez ejecutada alguna acción.

2.1.3 Agentes con conocimiento

Dadas las arquitecturas conceptuales anteriores, surge entonces la pregunta de cómo proporcionar algún mecanismo a partir del cual sea posible representar conocimiento sin necesidad de almacenar en memoria cada acción que ejecute el agente. La solución propuesta por Genesereth y Nilsson (1987) consiste en representar la memoria del agente mediante una base de sentencias en cálculo de predicados, a partir de las cuales sea posible inferir las acciones que correspondan a un estímulo. La tupla $\langle B, E, P, A, obs, hace, actualiza, acción \rangle$ describe un *agente con conocimiento*, el cual integra, además de los componentes comunes a las arquitecturas conceptuales citadas, una base de conocimiento B a partir de la cual la función *acción* infiere las acciones a ejecutar por el agente en un estado dado. Asimismo posee la función *actualiza*, que se encarga de actualizar la base de conocimiento, una vez que el agente con conocimiento ejecuta una acción.

2.1.4 Agentes deliberativos

Una alternativa introducida por Genesereth y Nilsson (1987) contempla la posibilidad de dotar al agente con la habilidad de deliberar si efectivamente debe llevar a cabo la acción que ha inferido en un momento dado. El concepto planteado es el *agente deliberativo* e incluye, además de los componentes y las características de un agente con conocimiento, un mecanismo de *acción* distinto, que aparte de inferir la operación que corresponde a un evento, verifica si la misma deba llevarse a cabo bajo las circunstancias observadas, de no

ser así, a pesar de la observación, la acción como tal es descartada.

2.1.5 Agentes racionales

Otros autores brindan arquitecturas conceptuales que parten de supuestos muy distintos en lo que a la noción de agente inteligente se refiere. Russell y Norvig (1995) proponen la noción de agente racional, como aquel que ante cualquier evento hace “lo correcto”, es decir, ejecuta la acción que le permite obtener el resultado más exitoso posible ante sus observaciones.

Es importante mencionar que esta aproximación supone, al igual que un agente con conocimiento, la presencia de estados internos, específicamente, memoria para observaciones hechas y acciones ejecutadas, además de un mecanismo de inferencia para determinar la acción correspondiente ante un evento en su entorno. La novedad que añade esta arquitectura conceptual se presenta en la capacidad del agente de definir su comportamiento, sin intervención externa, a partir de su propia experiencia (Russell & Norvig, 1995). Esta cualidad se conoce como el principio de autonomía y ha llegado a ser parte fundamental de la noción de agente inteligente en general.

Finalmente otro punto que Russell y Norvig (1995) proporcionan dentro de su marco teórico, es la posibilidad de incluir múltiples agentes para resolver una tarea. Este es probablemente el punto más significativo del agente racional, ya que proporciona un primer paso hacia la resolución distribuida de problemas mediante agentes, sin embargo los autores no especifican cómo incluir políticas de coordinación de las acciones, tema que será abordado posteriormente en el presente documento.

2.1.6 Agentes sociales

Hoy en día es ampliamente aceptado que el conocimiento y su construcción suceden en un contexto social y no únicamente en los estados internos de un individuo como tácitamente supuso la inteligencia artificial en sus inicios (Sun, 2006). Por este motivo, en la actualidad, la conceptualización de agente inteligente incluye aspectos sociales en su definición, principalmente la capacidad de interactuar con otros agentes.

Un ejemplo de este tipo de noción es brindada por Gilbert (2008), quien establece cuatro propiedades mínimas para lo que denomina un *agente social*, a saber:

- *Autonomía*: En este caso se entiende como la ausencia de un controlador global que dicte las acciones de los agentes.
- *Habilidad social*: Este punto insiste en la existencia de mecanismos de interacción entre los agentes, los cuáles pueden ser cooperativos, competitivos o una mezcla de ambos según amerite el caso.
- *Capacidad Reactiva*: Consiste en reaccionar apropiadamente a los estímulos que perciba en el ambiente.
- *Capacidad proactiva*: El agente debe procurar alcanzar las metas que tenga establecidas.

Las propiedades dadas por Gilbert (2008) sintetizan las nociones de agente desarrolladas anteriormente en inteligencia artificial, tanto por Genesereth & Nilsson (1987) como por Russell y Norvig (1995), con la ventaja de añadir el carácter social del agente. El proyecto toma la noción de agente social como fundamento teórico para el desarrollo de los agentes del Modelo Organizacional Computacional propuesto.

En la siguiente sección serán descritas algunas de las implementaciones concretas más

importantes surgidas a partir de las nociones conceptuales de agente inteligente presentadas hasta este punto.

2.2 Arquitecturas concretas de agentes inteligentes

Para efectos prácticos, un agente inteligente puede considerarse como un ente computacional capaz de ejecutar acciones autónomas en algún ambiente con el fin de cumplir con sus objetivos de diseño (Wooldridge, 2001), sin embargo, tal y como se mostró anteriormente, existen múltiples puntos de partida teóricos para la implementación de un agente inteligente propiamente dicho. La presente sección describe las arquitecturas concretas comúnmente utilizadas para la implementación de un agente inteligente en un medio computacional.

2.2.1 Arquitecturas concretas basadas en lógicas formales

Las *arquitecturas concretas basadas en lógicas formales* provienen de un enfoque tradicional en inteligencia artificial, el cual asume que el comportamiento inteligente en un sistema computacional puede ser generado mediante representaciones simbólicas (Wooldridge, 2001). El agente puede construirse a partir de un conjunto de fórmulas lógicas, las cuales proveen el conocimiento necesario de su ambiente y las acciones que debe ejecutar. Dicha colección de enunciados constituye la base de datos necesaria para alguna función de deducción lógica o prueba de teoremas que actúe como mecanismo de razonamiento del agente.

Formalmente una arquitectura concreta de este tipo necesita como mínimo los siguientes componentes:

- Un conjunto $B = \wp(F)$ que representa la base de datos del agente, la cual está constituida por fórmulas lógicas que pertenecen al conjunto de fórmulas posibles F .
- Un conjunto de estados internos del agente Δ, Δ_1, \dots , tal que $\Delta, \Delta_1, \dots \in B$.
- Un conjunto de reglas de deducción o inferencia lógica d , tal que $\Delta \perp_d \phi$ si la fórmula ϕ puede ser probada dado Δ y utilizando las reglas de d .
- Una función de percepción $observa : C \rightarrow P$, es decir, capaz de obtener un percepto P del contexto C .
- Una función $siguiente : B \times P \rightarrow B$ que determina una nueva base de datos B dada una observación.
- Una función $acción : B \rightarrow A$ definida a partir de las reglas de deducción presentes en su base de datos.

Es importante mencionar que esta propuesta concreta permite llevar a cabo todas las arquitecturas conceptuales mencionadas en la sección anterior, es decir, los conceptos de agente tropista, agente con histéresis, agente con conocimiento, agente racional y agente social son traducibles a un programa computacional cuyo fundamento sea lógico-formal. Asimismo, el presente proyecto realizó la implementación de sus agentes sociales mediante una arquitectura lógica y formal. Los detalles de los elementos que conforman al agente serán expuestos en la sección de resultados.

2.2.2 Arquitecturas concretas reactivas

Existe la posibilidad de construir un agente inteligente sin necesidad de declarar su comportamiento mediante una teoría lógica. Las *arquitecturas concretas reactivas* plantean

un enfoque que prescinde de representaciones simbólicas y de su manipulación sintáctica. Desde esta perspectiva el comportamiento inteligente y racional de un agente es producto de su interacción con el entorno y se encuentra estrechamente vinculado al ambiente en el que se desempeña (Wooldridge, 2001). Además, las arquitecturas concretas reactivas sostienen que el proceder de un agente debe fundamentarse en componentes con funciones simples, cuya integración en un sistema puede generar conductas de mayor complejidad. A continuación se brinda un ejemplo de una arquitectura que muestra los detalles de esta implementación de agente inteligente, a saber, la arquitectura de subsumisión².

2.2.2.1 Arquitectura de subsumisión

La *arquitectura de subsumisión* puede definirse en términos de dos características primordiales; la primera consiste en que la toma de decisiones se lleva a cabo mediante módulos asignados a tareas específicas (Wooldridge, 2001). La segunda cualidad definitoria de esta arquitectura concreta es el hecho de que es capaz de “disparar” o activar múltiples comportamientos (módulos candidatos a responder ante la acción) de manera simultánea. Así, la elección de la respuesta adecuada se rige por una jerarquía de niveles, donde los estratos de menor nivel subsumen a los de franjas más altas, de ahí el nombre dado a la arquitectura. El supuesto básico es que los comportamientos de las franjas más altas son de naturaleza abstracta y son inhibidos por los de bajo grado en la jerarquía, que representan conductas de carácter más urgente. Por ejemplo, en el contexto de un agente inteligente robótico cuyo objetivo sea recorrer un camino determinado, evadir obstáculos posee alta prioridad, por lo tanto sería codificado como una conducta de bajo nivel. Formalmente podemos presentar la arquitectura de subsumisión de la siguiente manera (Wooldridge, 2001):

² Dada la dificultad de traducir el término original en inglés, a saber, subsumption architecture, se adoptó el término arquitectura de subsumisión para referirse al mismo.

- Un comportamiento es un par (c,a) , donde $c \subseteq P$ es un conjunto de perceptos llamado *condición* y $a \in A$ es una acción. Un comportamiento (c,a) se dispara cuando el ambiente se encuentra en un estado $s \in S$ sii $observa(s) \in c$.
- Sea $Comp = \{(c,a) \mid c \subseteq P \wedge a \in A\}$ el conjunto de todas las reglas de comportamiento.
- Asociado al conjunto de reglas de comportamiento de un agente $R \subseteq Comp$ se encuentra una relación binaria *inhibición* sobre el conjunto $inh \subseteq R \times R$. Si $b_1 inh b_2$ y $(b_1, b_2) \in inh$, b_1 es de menor jerarquía y por ende recibe prioridad. Se asume que *inh* es de orden total (transitiva, antisimétrica y reflexiva) en R .
- La acción del agente consiste en primeramente determinar el conjunto de pares (c,a) tal que se disparan ante un percepto. A continuación para cada par encontrado, el agente inteligente debe inspeccionar si existe algún comportamiento que lo inhiba. De no ser así, se ejecuta la acción a asociada. Si no se dispara ningún comportamiento se retorna *null* indicando que no hubo actividad.

Ahora bien, dado que la arquitectura de subsumción no maneja representaciones simbólicas de su ambiente, su funcionamiento depende de suficiente información disponible en su localidad, lo cual restringe sus decisiones a un lapso corto de tiempo. En la mayoría de los casos es realmente difícil que la arquitectura de subsumción aprenda de sus experiencias, lo cual reduce los contextos en los que es posible su uso y las arquitecturas conceptuales que puede concretar, a saber: el agente tropista y en alguna medida el agente racional y el agente social.

2.2.3 Arquitectura Creencia-Deseo-Intención

Históricamente la inteligencia artificial ha sido influenciada por distintas disciplinas, una de ellas es la filosofía. Una postura filosófica que ha mediado y contribuido al diseño e implementación de agentes inteligentes artificiales, específicamente a la *arquitectura creencia-deseo-intención*, es la comprensión del *razonamiento práctico* como un proceso de reflexión, el cual momento a momento, impulsa decisiones para la consecución de metas (Wallace, 2008). El razonamiento práctico se constituye de dos procedimientos primordiales (Wooldridge, 2001):

- *Deliberación*: Resolución de las metas que se desean alcanzar.
- *Medios-Fines*: Definición de los métodos para conseguir los fines deseados.

Dentro de este marco el agente inteligente posee creencias, deseos e intenciones que guían el razonamiento práctico y le permiten actuar de una manera similar a la humana, al menos intuitivamente hablando. El supuesto de fondo es que dichas creencias, deseos e intenciones, interactúan durante el razonamiento práctico para determinar cuál es la siguiente acción a ejecutar. El agente, según este enfoque, actuará conforme a la intención que posea en un momento dado. Dicha determinación es el resultado de la revisión previa de sus creencias y deseos. Wooldridge (2001) presenta los componentes formales de esta arquitectura de la siguiente manera:

- Sea Cr el conjunto de todas las posibles creencias.
- Sea Des el conjunto de todos los posibles deseos.
- Sea $Inten$ el conjunto de todos las posibles intenciones.
- Una arquitectura creencia-deseo-intención se define mediante la tripleta $\langle C,D,I \rangle$,

con $C \subseteq Cr$, $D \subseteq Des$ e $I \subseteq Inten$.

- La función de revisión de creencias sería: $frc : \wp(Cr) \times P \rightarrow \wp(Cr)$, es decir a partir de las creencias actuales y un percepto P se determina el nuevo conjunto de creencias Cr .

- La función generadora de opciones (deseos) se define como:

$$opciones : \wp(Cr) \times \wp(Inten) \rightarrow \wp(Des)$$

- Es necesaria una función de filtrado tal que:

$$filtro : \wp(Cr) \times \wp(Des) \times \wp(Inten) \rightarrow \wp(Inten)$$

- Además debe cumplirse que:

$$\forall C \in Cr, \forall D \in Des, \forall I \in Inten, filtro(C, D, I) \subseteq I \cup D$$

En pocas palabras, las intenciones actuales son intenciones mantenidas anteriormente o nuevas opciones adoptadas.

- Finalmente la siguiente formalización corresponde a la función de selección de acciones: $ejecuta : \wp(Inten) \rightarrow A$.

En conclusión, a partir de la descripción dada de una arquitectura creencia-deseo-intención es posible concretar cualquiera de las conceptualizaciones de agente planteadas en el primer inciso del presente marco teórico.

2.2.4 Arquitecturas en capas

Las arquitecturas en capas nacen con el objetivo de reducir la complejidad computacional de la implementación de un agente inteligente. La solución propuesta en este caso, aprovecha una estrategia común en computación, a saber, la descomposición de problemas en subproblemas más pequeños de menor dificultad. En este caso existen capas (subsistemas) encargadas de comportamientos específicos y su organización puede darse en dos sentidos:

- *Horizontal:* Cada capa está conectada directamente con la entrada sensorial y la salida. Para efectos prácticos cada capa actúa como un agente que produce sugerencias para las acciones a tomar (Fig.3.1).
- *Vertical:* Puede ser de un paso o de dos pasos. En el primer caso el control fluye secuencialmente a través de cada capa en una sola dirección, es decir, la información es la entrada de la primera capa y la acción es ejecutada por la última capa. En el caso de la de dos pasos la información sube por las capas y el control es cedido en dirección opuesta hasta ejecutar la acción (Fig 3.2).

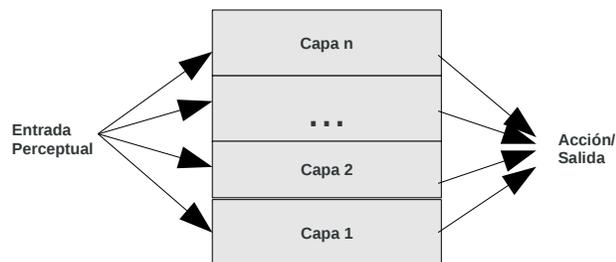


Figura 3.1 Arquitectura en capas horizontales

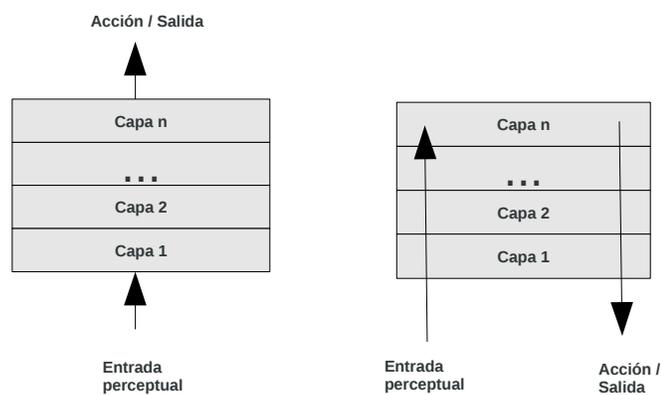


Figura 3.2 Arquitectura en capas verticales de uno y dos pasos

Es importante recalcar que en las arquitecturas en capas horizontales, el propósito es representar un comportamiento (o agente) distinto en cada capa, cada una capaz de producir sugerencias ante los perceptos observados. Ahora bien debe tomarse en cuenta que esta posibilidad requiere de una función (o agente) que medie, sin producir un cuello de botella, en la elección de la opción adecuada; de lo contrario existe la posibilidad de un comportamiento caótico. La ventaja de las arquitecturas en capas es que es posible adaptarla a cualquier conceptualización de agente inteligente y es una alternativa que brinda la posibilidad de arquitecturas híbridas para futura investigación.

Finalmente, es de vital importancia enfatizar nuevamente el hecho de que en la actualidad el interés primordial radica en la interacción entre múltiples agentes, más que en el diseño de una arquitectura única que resuelva problemas de forma aislada. El siguiente inciso presenta detalladamente los sistemas multiagente, los cuales se han establecido como una alternativa para enfrentar contextos de esta índole.

2.3 Sistemas multiagente

Un sistema multiagente es un sistema computacional cuyos componentes (software y/o hardware) interactúan entre sí en tareas y ambientes predefinidos (Lees, Logan & Theodoropoulos, 2007). Oprea (2004) asevera que es posible comprender el sistema multiagente como una sociedad de agentes que proceden de acuerdo a un conjunto de reglas o normas dispuestas previamente. Así, un sistema multiagente permite afrontar los problemas mediante estrategias distribuidas y colectivas que se asemejan a aquellas empleadas por grupos humanos, organizaciones o sociedades, cuyo objetivo sea resolver una tarea común (Huhns & Stephens, 2001).

Este enfoque multiagente ha sido utilizado en una amplia gama de áreas de investigación (Heath, Hill & Ciarallo, 2009), dentro de las cuales podemos citar las siguientes:

- *Ciencias sociales*: El análisis del comportamiento social humano ha recurrido a los sistemas multiagente como una herramienta importante de trabajo. Dentro de los principales temas de estudio se encuentran: la dinámica redes sociales (reales y virtuales), la dinámica de formación de grupos humanos particulares, entre otros (Gilbert & Troitzsch, 2005).
- *Economía*: En este caso se ha utilizado principalmente para estudiar la conducta de consumidores en contextos particulares, el comportamiento de bolsas de valores y las variaciones de precios en mercados (North & Macal, 2007).
- *Biología*: Esta ciencia ha aprovechado los sistemas multiagente para investigar el comportamiento de agentes infecciosos en el organismo humano, así como para el estudio de epidemias y enfermedades contagiosas en general (Roche, Guégan, Bousquet, 2008).
- *Política*: En la actualidad muchos gobiernos utilizan sistemas multiagente para observar el posible efecto de sus políticas en el comportamiento de la población. Dentro de los asuntos tratados desde esta perspectiva podemos mencionar la planificación urbana, la infraestructura vial y el turismo entre otros (Cecchini & Trunfio, 2007).
- *Milicia*: El ámbito militar actual cuenta, en la mayoría de los casos, con sistemas multiagente tanto para establecer posibles estrategias de defensa y ataque, como para entrenar a sus miembros en escenarios virtuales de combate (Owens et al., 2006).

Según Zhang, et al. (2008) un sistema multiagente es, en general, apto para modelar y simular situaciones donde el comportamiento de los agentes se encuentra delimitado por un

conjunto de reglas (estructuras sociales), las cuales no necesariamente son de naturaleza estática, por el contrario, pueden variar con el paso del tiempo. Dicha coyuntura brinda la ventaja de estudiar en el sistema multiagente distintos escenarios, es decir, entornos cuyas variables determinantes pueden modificarse para observar el efecto resultante en la conducta de los agentes y por ende en el sistema mismo. Troitzsch (2009) apunta que esta capacidad de plantear “mundos posibles” mediante sistemas artificiales permite comprender de mejor forma sistemas reales complejos.

Dada la diversidad de ámbitos en los que los sistemas multiagente son utilizados, Huhns & Stephens (2001) insisten en que es necesario clarificar las características mínimas que un sistema debe poseer para ser considerado como tal, independientemente del contexto donde se emplee, a saber:

- *Descentralización*: Los sistemas multiagente son sistemas abiertos, es decir, no poseen un ente controlador del curso de la interacción de los agentes.
- *Componentes autónomos*: El sistema multiagente provee un espacio donde los agentes inteligentes mantienen su autonomía; las estrategias (colaborativas, competitivas, etc.) para la consecución de objetivos son responsabilidad de los agentes, no del sistema propiamente dicho.
- *Protocolos de comunicación e interacción*: Un sistema multiagente provee una especificación de las posibles vías de comunicación y requerimientos para la interacción entre los agentes y su entorno.

Ahora bien, el uso de sistemas multiagente para la modelación y simulación de organizaciones es un tema que cuenta ya con una pila de conocimiento considerable, por lo que a continuación se describe los conceptos más importantes relacionados con la materia.

2.4 Simulación social

La *simulación social*, es decir, el estudio y simulación de fenómenos de naturaleza social mediante herramientas computacionales, es una corriente relativamente novedosa en el quehacer de las ciencias sociales. Durante los últimos veinte años la simulación social ha demostrado un gran potencial para la modelación y comprensión de los procesos sociales, particularmente como un método para la construcción y verificación de teorías (Gilbert & Troitzsch, 2005). Los sistemas multiagente han sido muy utilizados en esta disciplina, ya que se adaptan plenamente al supuesto fundamental de esta rama de las ciencias sociales, a saber que la complejidad del comportamiento social es el resultado emergente de la interacción de múltiples agentes relativamente simples. Cabe aclarar que la noción de conducta emergente nace en un inicio en filosofía con el objetivo de explicar sistemas complejos cuyo comportamiento no puede ser reducido a las cualidades de sus partes o componentes (O'Connor & Wong, 2006) y será analizada con mayor detalle en un inciso posterior (ver sección 3.5.3).

En este punto, es importante aludir al hecho de que las simulaciones que se utilizan en esta área de las ciencias sociales cuentan con parámetros de entrada, dados por un investigador por ejemplo, y generan una serie de salidas (datos) conforme avanzan. Los parámetros de entrada y el funcionamiento de la simulación están basados en datos observados del fenómeno en estudio, garantizando así que los resultados producidos sean plausibles y comparables con el fenómeno real. Es así como las teorías acerca del comportamiento social pueden refinarse; a medida que se simula se corrobora que efectivamente los datos generados sean coherentes con el caso de estudio. La sección de metodología expondrá con más detalle los pasos que normalmente se emplean en simulación social para la creación de modelos y experimentos.

Como aspecto relevante de este campo es importante mencionar que la simulación

computacional en este contexto permite un mayor grado de formalización para el estudio de procesos sociales. Los científicos de esta área pueden construir modelos simples que reflejen aspectos específicos del comportamiento social y descubrir las consecuencias de sus supuestos en un escenario artificial que simula dichas representaciones. La formalización consistirá entonces en una especificación de dicho modelo traducible a un programa ejecutable en una computadora (Gilbert & Troitzsch, 2005). Es necesario aclarar que esta noción no implica el abandono del uso de ecuaciones y fórmulas matemáticas durante la construcción de modelos o teorías, sin embargo, su instanciación será, en última instancia, un segmento de código de programación ejecutado en un ambiente computacional.

Otra cualidad en la que insiste la simulación social, es la posibilidad de interacción presente durante una simulación. El hecho de que un sistema esté compuesto por agentes heterogéneos, capaces de: representar personas con perspectivas distintas, poseer conocimiento distribuido, manifestar capacidades diversas e interactuar entre sí, es una ventaja sin precedentes en ciencia social. Por esta razón, la simulación social utiliza como herramienta primordial los sistemas multiagente.

Gilbert y Troitzsch (2005) señalan que aún cuando los agentes sean programados con protocolos muy simples de interacción, el comportamiento del sistema como un todo puede tornarse extremadamente complejo. Según dichos autores, los métodos estadísticos convencionales asumen una relación lineal entre las variables del modelo, es decir, el efecto en la variable dependiente es la suma de un conjunto de variables independientes. Ahora bien, desde la simulación ese no es el caso, por el contrario, se asume que el sistema que se pretende examinar no es lineal y su estudio no puede hacerse de manera exclusivamente analítica. En términos prácticos, la simulación social afirma que no siempre existe un conjunto de ecuaciones que pueda ser resuelto y determine todas las acciones del sistema. Así, una posibilidad efectiva de estudiar el comportamiento no lineal de los fenómenos

sociales es mediante la construcción de un modelo y su respectiva simulación.

Cabe resaltar que el uso de simulación computacional brinda la posibilidad de representar aspectos cambiantes en los modelos y facilita la comprensión de la relación entre atributos que se encuentren en el nivel micro, es decir, el del agente, y aquellos que respondan a propiedades macro (globales) de los grupos sociales.

Finalmente es necesario aclarar que actualmente la simulación social incluye vertientes con temas específicos de estudio, entre ellas la simulación organizacional, donde el objeto de estudio son específicamente las organizaciones humanas. El siguiente inciso aclara las nociones de simulación organizacional que se adoptaran en el presente proyecto.

2.5 Simulación Organizacional

Las organizaciones en general, surgen como una estrategia colectiva para enfrentar los obstáculos inherentes a las acciones individuales (Carley & Gasser, 2001). Aunque no hay un acuerdo generalizado en su definición, la mayoría de estudios coinciden con Daft (2005), quien comprende las organizaciones fundamentalmente como entidades sociales caracterizadas, al menos, por una estructura de ordenamiento interno, un conjunto de objetivos a cumplir, una serie de vínculos con su ambiente y una colección de actividades coordinadas sistemáticamente.

Según Carley y Gasser (2001) resulta de particular interés estudiar las condiciones en las que las organizaciones operan, con el fin de averiguar cuáles son los principios básicos que cimentan su quehacer. Dichos investigadores sugieren que una aproximación computacional al problema puede brindar una perspectiva muy provechosa para el análisis de este fenómeno y ser de utilidad para la toma de decisiones en este contexto.

La *teoría computacional de la organización* postula una concepción sistémica de las organizaciones, en la cual, dichas entidades son planteadas como sistemas compuestos de agentes que integran un conjunto de unidades vinculadas mediante una serie de procesos

(Giaglis, Paul & Hlupic, 1999). Tal aproximación es complementada además por una noción informática del contexto donde operan, es decir, los agentes, las unidades y los procesos son vistos como entes computacionales que requieren y transforman información durante el ejercicio de sus actividades (Carley & Gasser, 2001).

En este punto es importante mencionar que dicha noción plantea un conjunto heterogéneo de agentes, es decir, la organización consta de agentes inteligentes de distinta naturaleza, con habilidades y responsabilidades diferentes. También cabe resaltar que el conocimiento del agente inteligente no abarca únicamente sus capacidades técnicas, sino que implica sus competencias para la interacción social y su destreza para lidiar con el entorno organizacional (Carley & Newell, 1994).

Dicha postura ante las organizaciones representa un paradigma pionero en el estudio del fenómeno mediante herramientas computacionales y ha sido asumido como parte fundamental de la simulación organizacional. Actualmente el objetivo primordial de la simulación organizacional consiste en construir nuevos conceptos con el fin de desarrollar herramientas computacionales para el análisis y validación de modelos organizacionales. Dentro de los instrumentos utilizados con mayor frecuencia para dicho propósito se encuentran algunos métodos matemáticos y principalmente la modelación y simulación en sistemas multiagente (Carley & Gasser, 2001). A continuación se presenta una sucesión de conceptos que fundamentan gran parte de la actividad actual en torno a la simulación organizacional.

2.5.1 Diseño organizacional

El diseño o estructura organizacional puede conceptualizarse como una configuración específica de parámetros o colección de variables que gobiernan el comportamiento de la organización. Dicha conformación normalmente incluye elementos como tareas, roles,

disponibilidad de información, presupuesto y otros componentes específicos al caso de estudio. Asimismo, contempla los procedimientos y reglas que regulan el conocimiento de los agentes en la organización, por ejemplo los lineamientos de contratación y promoción, entre otros (Carley & Gasser, 2001).

También es importante mencionar que el rango de valores que se asigna a cada parámetro es una cuestión aún abierta a discusión, ya que muchos de ellos no pueden ser tratados analíticamente y requieren de criterio experto para su valoración. Para efectos de la simulación organizacional, una vez establecido el rango, es posible manejar los parámetros, ya sea como un conjunto de atributos o como un conjunto de matrices que contiene los valores asignados.

Otra posibilidad es concebir el diseño organizacional como una cualidad incorporada en los agentes que conforman la organización, es decir, como el resultado de sus mecanismos de comunicación, razonamiento y manipulación de conocimiento, así como de sus estrategias para la consecución de sus tareas.

2.5.2 Tareas y flujos de trabajo

El quehacer de los agentes en una organización puede reducirse a la ejecución de tareas. Así, los agentes inteligentes pueden verse involucrados en una o más tareas en un momento dado. Además dichas labores pueden, a su vez, estar compuestas de una o más subtareas y así sucesivamente. Cabe mencionar que la resolución organizada de las tareas no es un trabajo trivial, por el contrario, en la mayoría de las ocasiones requiere de normas de interacción o un *flujo de trabajo* que asegure el cumplimiento de los objetivos buscados por la faena. Los flujos de trabajo pueden entenderse como procesos automatizados donde las tareas son trasegadas de un agente a otro, según un conjunto de reglas o procedimientos preestablecidos (Meena et.al, 2005). En pocas palabras, los flujos de trabajo dictan los protocolos de comunicación en un contexto organizacional.

Es importante mencionar que, para efectos computacionales, el conjunto de flujos de trabajo y de las tareas que los integran representan el ambiente de la organización, el cual puede tornarse más o menos complejo según:

- El grado de repetición de las tareas.
- La volatilidad o tasa de cambio de las tareas.
- El sesgo que tengan las tareas hacia un resultado determinado.
- La complejidad de las tareas que integran el flujo de trabajo.

También cabe aclarar que a partir del cumplimiento de las tareas es posible plantear medidas de rendimiento de una organización (Carley & Gasser, 2001), por ejemplo en términos de:

- *Efectividad*: Esta medida se estima de acuerdo a las tareas llevadas a cabo por la organización. Las mismas pueden ser evaluadas en relación con otras organizaciones, en términos de exactitud del resultado esperado o bien en función de la duración del flujo de trabajo.
- *Eficiencia*: En este caso se evalúa si el resultado obtenido maximiza la salida esperada de un flujo de trabajo.
- *Efectividad percibida*: Esta medición se basa en la percepción que tienen agentes externos a la organización de los flujos de trabajo llevados a cabo por la misma. Por ejemplo los inversionistas, medios de comunicación y público en general son capaces de calificar el desempeño de una organización a partir de la valoración de las tareas ejecutadas por dicha entidad.

2.5.3 Comportamiento emergente

Un sistema con propiedades emergentes es aquel cuyo comportamiento o características surgen como resultado de la interacción de sus partes fundamentales y es a su vez irreducible a sus componentes (O'Connor & Wong, 2006). En resumen, el comportamiento de un sistema emergente es más que la suma de las características de sus elementos constituyentes.

La simulación organizacional incorpora esta noción filosófica y asume que una organización exhibe, durante su funcionamiento, fenómenos causados por eventos a un nivel bajo de abstracción (el comportamiento de los agentes por ejemplo) que no pueden ser predichos o comprendidos únicamente sobre la base de dicha capa de especificación (Shaw & Pritchett, 2005). Así, el comportamiento del sistema como un todo *emerge* como resultado de la interacción de sus agentes, permitiendo comprender o evidenciar cualidades de la organización no observables en la descripción de sus componentes.

Es importante mencionar que las propiedades emergentes pueden ser observadas en escenarios simulados mediante sistemas multiagente, de ahí que se considere esta herramienta como primordial para efectos de la simulación de organizaciones. A continuación se aclara el uso de sistemas multiagente en este contexto.

2.5.4 Sistemas multiagente y simulación organizacional

Según Shaw y Pritchett (2005) un sistema multiagente es una herramienta adecuada para modelar y simular organizaciones, ya que es posible representar en él las siguientes características definitorias de una organización:

- Un conjunto de agentes con distintos roles, objetivos y capacidades.
- Una serie de metas a cumplir.
- Conocimiento, procesos y flujos de trabajo.
- Un conjunto de vínculos con su ambiente que afectan y son afectados por el sistema multiagente.

Asimismo, dichos autores aseveran que para construir un sistema multiagente con el propósito de modelar y simular una organización es necesario desarrollar tres componentes, a saber:

- Modelos de los agentes capaces de simular sus características (roles) relevantes dentro del sistema.
- Un modelo del ambiente organizacional en el que se desempeñan los agentes inteligentes, que contemple la información necesaria para identificar todos los aspectos importantes del contexto, ya sean físicos, sociales o procedimentales.
- Mecanismos para la actuación e interacción de los agentes, incluyendo aquellos necesarios para el control del tiempo y el envío de datos dentro de la simulación.

Los componentes mencionados anteriormente requieren de la construcción tanto de modelos conceptuales como de una instanciación de los mismos en software. Es relevante mencionar que su desarrollo no necesariamente se adecua a los estándares existentes en materia de *ingeniería de software*, sin embargo, muchas de las técnicas y buenas prácticas de esta rama de la informática se incorporan durante el proceso.

El presente proyecto recurrirá no solo a las nociones de simulación social y simulación organizacional mencionadas, sino además a postulados y medidas elaboradas desde el *Análisis de Redes Sociales* para estudiar el comportamiento y configuración de la organización escogida. Los pormenores de esta aproximación serán descritos en detalle en el inciso siguiente.

2.6 Análisis de Redes Sociales

Históricamente, el estudio de los grupos sociales mediante técnicas cuantitativas tiene su origen en la década de los treinta del siglo XX (Wasserman, Scott & Carrington, 2005), cuando surgieron herramientas como los sociogramas, las matrices sociales y otras, que permitieron, medir de forma analítica la interacción social. Progresivamente, este tipo de técnicas de investigación se hizo más frecuente hasta derivar, a mediados de los años setenta del período mencionado, en el Análisis de Redes Sociales (ARS).

El ARS es hoy en día una rama consolidada entre las ciencias sociales y cuenta con teorías, modelos, metodología y aplicaciones propias. Su nombre se debe al hecho de que esta materia entiende los grupos sociales como un tejido de relaciones y procesos entre entidades, es decir, como *redes sociales* (Wasserman & Faust, 1994).

La inquietud fundamental del ARS es establecer una serie de medidas que describan y expliquen el comportamiento de las redes sociales. Cabe resaltar, que dicho análisis asume que las redes sociales poseen una estructura, que se hace evidente en los patrones regulares de interacción entre las entidades concretas (personas, grupos pequeños, organizaciones,

entre otros) que participan en ellas (Knoke & Yang, 2008). En este sentido hay una coincidencia con la simulación organizacional, ya que tales patrones pueden surgir de manera emergente de la interacción mencionada.

También es importante mencionar que la configuración de una red social normalmente se representa mediante un conjunto de nodos (actores en la red) unidos mediante enlaces que describen su interacción. Dicha noción se adoptó para representar visualmente la organización en estudio, en este caso el CeNAT.

Con respecto a la dinámica de las redes sociales, Wasserman & Faust (1994) señalan las siguientes características básicas:

- Una interdependencia entre los entes que forman parte de la red.
- Un flujo de recursos (materiales y no materiales) a través de los enlaces que unen a las entidades en la red.
- La red misma influye en las oportunidades y/o restricciones para la acción individual de las entidades.

Cabe resaltar que la metodología del ARS utiliza instrumentos de recolección de datos como encuestas, entrevistas y cuestionarios de distintos tipos, a partir de los cuales se analizan las redes sociales. En general las herramientas utilizadas pueden categorizarse de la siguiente manera (Knoke & Yang, 2008):

- *Generadores de nombres*: Consisten en cuestionarios que recolectan información concerniente a las relaciones que existen entre un grupo de individuos (nombres). Normalmente los sujetos de estudio son expuestos a preguntas vinculadas a su grupo de pares, de manera que pueda obtenerse información de cada uno de los miembros del grupo y las relaciones entre ellos.

- *Generadores de posición y recursos*: En este caso, se asume que la posición de un individuo en una red social puede definirse a partir de su nivel de riqueza, poder y estatus. Con el objetivo de identificar dichos marcadores en los miembros de un grupo, los generadores de posición y recursos someten a los encuestados a preguntas relacionadas con dichas variables.
- *Generadores de redes personales*: El interés de esta categoría de instrumentos es establecer redes amplias donde se evidencien todos los contactos posibles de un individuo, es decir, su red social total. Esta aproximación permite, por ejemplo, establecer, a partir de las respuestas dadas en los cuestionarios, el alcance de una red particular, la cantidad de individuos que la integran y los segmentos de la misma en donde se concentra la interacción.

Es importante mencionar que constantemente existen esfuerzos en el ARS para desarrollar nuevos tipos de instrumentos que faciliten una recolección más precisa de las variables que interesan al investigador responsable del análisis. (Marsden, 2005; Knoke & Yang, 2008). En este punto es necesario aclarar algunas de las medidas desarrolladas por el ARS para el estudio de las redes sociales. Las mismas pueden clasificarse de la siguiente forma (Knoke & Yang, 2008):

- *Medidas relacionales*: Este tipo de medidas generalmente se utilizan para evaluar la intensidad de los vínculos presentes en una red social. Normalmente toman en cuenta la direccionalidad de la relación y el peso otorgado al vínculo. Cabe resaltar que dado que la red social siempre se denota mediante un grafo (dirigido en algunos casos), la dirección y el peso de los enlaces son fácilmente representables. Dentro de las medidas relacionales establecidas por el ARS se pueden citar la densidad de la red, el grado nodal de los actores y la distancia geodésica. Las fórmulas

respectivas se detallan en el anexo incluido al final de este documento.

- *Medidas de centralidad y prestigio:* Esta categoría incluye medidas cuyo objetivo es identificar actores importantes o prestigiosos en una red social. La importancia de un actor se determina a partir de su involucramiento en un grupo, es decir, de la cantidad de vínculos establecidos con otros miembros de la red. Por otra parte el prestigio se estima a partir del número de miembros que refieren a un actor dado, es decir, en términos de un grafo, de la suma de aristas que un nodo particular recibe. Las medidas más utilizadas en este sentido son los grados de centralidad, cercanía y mediación. Las fórmulas de cálculo se detallan en el anexo adjunto a la presente propuesta.
- *Medidas de cohesión:* Las medidas de cohesión establecen el grado de intimidad de un subgrupo de miembros particular dentro de una red particular. Normalmente los investigadores utilizan mediciones de este tipo para comprender de los beneficios que la cohesión brinda a un grupo determinado en términos de apoyo, conocimiento y recursos en general. La medida más utilizada en este contexto es el coeficiente de agrupamiento (Watts & Strogatz, 1998), el cual busca establecer la tendencia de un conjunto de actores a formar un grupo. Los detalles de la fórmula de dicho coeficiente y otras medidas relacionadas se encuentran en el anexo adjunto al presente escrito.

Dada la complejidad de los ambientes organizacionales actuales, el ARS ha sido una herramienta muy útil para estudiar la estructura y los fenómenos de naturaleza social que ocurren en una organización. Por ejemplo, Zagenczyk et al.(2010) analizan mediante métodos de ARS la influencia de las redes sociales en la percepción de apoyo organizacional por parte de un grupo de trabajadores en dos escenarios distintos de estudio. Sus resultados muestran que dicha apreciación es influida fuertemente por la pertenencia de

los empleados a redes sociales específicas dentro de la organización.

Igualmente es relevante mencionar que, dado que existen problemas metodológicos y éticos a la hora de estudiar grupos humanos durante espacios amplios de tiempo, en la actualidad el ARS emplea herramientas computacionales para construir experimentos de situaciones simuladas (Burger & Buskens, 2009). Un fenómeno social es susceptible a este tipo de enfoque si cuenta con datos suficientes, que a lo largo de un período del tiempo describan su comportamiento.

En el caso del presente proyecto, el ARS se considera un enfoque, que al complementarse con las posibilidades dadas por los sistemas multiagente y las nociones provenientes de la simulación social y la simulación organizacional, permitiría cumplir con los objetivos planteados para esta investigación. La sección siguiente muestra en detalle la metodología adoptada para llevar a cabo el proyecto.

3 Metodología

Con el propósito de construir el modelo organizacional computacional, el presente proyecto basa su metodología en la propuesta SimSahel (Saqalli et al., 2010), la cual fue creada con el objetivo de lidiar con contextos donde la información documentada es escasa o no abarca todo el quehacer del caso de estudio. Si bien las organizaciones tienden a documentar sus actividades, hay gran parte de su dinámica que no se encuentra detallada en documentos de texto o en bases de datos. La fuente primaria para la extracción de la información no sistematizada o documentada son los mismos integrantes de la organización, por lo que esta metodología propone una serie de etapas que permiten:

- Reducir la incompletitud de los datos documentados.
- Establecer hipótesis fundamentadas en datos.
- Corroborar la consistencia y robustez del modelo.
- Plantear escenarios para simulación.

A continuación se describe las cinco fases que componen la metodología SimSahel, a saber:

- Construcción del modelo conceptual.
- Construcción del modelo calibrado.
- Control de consistencia.
- Análisis de sensibilidad.
- Evaluación de escenarios.

3.1.1 Construcción del modelo conceptual

Esta etapa consiste en un período inicial de recolección de información. El instrumento diseñado para dicho propósito busca establecer las variables que desde la perspectiva de los miembros, inciden mayormente en el quehacer de la organización. El producto obtenido en esta etapa es un modelo organizacional inicial, el cual reflejaría las micro-reglas del modelo organizacional computacional, es decir, las reglas que, según los integrantes, definen su quehacer y que, normalmente, posibilitan establecer los algoritmos de comportamiento de los agentes computacionales del modelo.

Esta etapa es necesaria para la consecución del primer objetivo específico del proyecto. En el caso del CeNAT es indispensable elucidar las condiciones en las que los agentes de la institución han formado alianzas con entidades externas para la consecución de las metas de sus proyectos colaborativos de investigación.

3.1.2 Construcción del modelo calibrado

La labor primordial en esta fase consiste en una revisión de la información documentada disponible en la organización, con el objetivo de afirmar, descartar o depurar las micro-reglas obtenidas en el paso anterior. En este punto, la información obtenida complementa los datos extraídos en el paso anterior. El resultado de este proceso es un modelo calibrado que, en principio, se aproxima en un grado mayor al fenómeno de análisis y el cual ya puede ser plasmado en algún lenguaje de especificación, por ejemplo, mediante Lenguaje Unificado de Modelado (UML por sus siglas en inglés), y por ende, ser implementado en un sistema multiagente inicial. Además, en este punto se especifican las variables de análisis para efectos del modelo organizacional computacional. Asimismo, este resultado debe ser validado por criterio experto de algún representante de la organización. Al finalizar esta etapa se dará por logrado el primer objetivo específico del proyecto.

3.1.3 Control de consistencia

Desde la perspectiva de la metodología SimSahel, el siguiente paso consiste en un período de observación de la organización (Saqalli et al., 2010). Esta fase no necesariamente es pasiva, sino que admite la posible intervención del investigador en el entorno organizacional mediante actividades que confrontan los supuestos establecidos en el modelo calibrado con el comportamiento a observar de los integrantes de la organización. De esta manera es factible constatar la consistencia del modelo y agregar nuevos supuestos del nivel macro de la organización que no fueron reportados anteriormente. Este proceso permite refinar la especificación del modelo organizacional computacional, así como el sistema multiagente desarrollado hasta obtener un modelo consistente. Este paso de la metodología es necesario para cumplir con el segundo objetivo específico del proyecto; ahora bien no es suficiente para asegurar la consecución del mismo, para ello es necesario un análisis de sensibilidad.

3.1.4 Análisis de sensibilidad

Seguidamente se lleva a cabo un análisis de sensibilidad, el cual consiste en un estudio estadístico de una serie de simulaciones hechas en el sistema multiagente construido hasta el momento. El mismo busca establecer hasta qué punto el comportamiento del sistema es sensible a los supuestos del modelo (Gilbert & Troitzsch, 2005). El objetivo de este paso de la metodología es garantizar la robustez del modelo, es decir, determinar que el modelo no presenta incoherencias y que produce resultados plausibles.

El análisis de sensibilidad parte de un conjunto de simulaciones que se toman como parámetro para evaluar la robustez del modelo. Cada una de ellas varía sistemáticamente los valores de las variables del modelo, con el objetivo de generar un volumen considerable de datos, a partir de los cuáles sea posible establecer estadísticamente si el modelo se comporta de manera adecuada. Ahora bien, en términos computacionales la cantidad de

posibles combinaciones de variables e iteraciones necesarias para establecer la robustez del modelo puede ser excesiva o no viable computacionalmente, por lo que en la práctica no se llevan a cabo todas las simulaciones posibles, sino que heurísticamente se determina un subconjunto suficientemente representativo de las mismas. Por ejemplo, una posibilidad es asumir una distribución uniforme de los valores de las variables para generar aleatoriamente el subconjunto de datos para el análisis.

En este punto es importante resaltar que las etapas mencionadas anteriormente no necesariamente se ejecutan de manera iterativa, por el contrario, es posible reiterar alguna de ellas en caso de que los resultados obtenidos no satisfagan las expectativas.

Cabe insistir que si los resultados del análisis de sensibilidad son satisfactorios, el modelo se considera robusto y por ende se cuenta con un sistema multiagente capaz de llevar a cabo simulaciones válidas del fenómeno, es decir, en este punto se considera que el segundo objetivo específico del proyecto ha sido alcanzado.

3.1.5 Evaluación de escenarios

Una vez comprobada la robustez del modelo, es posible simular escenarios para probar las hipótesis del modelo e inferir patrones emergentes de conducta. En este caso, un escenario es una configuración inicial particular de las variables que se brindan como parámetros de entrada en el sistema multiagente que implementa el modelo organizacional computacional. Dicho estado inicial variará conforme avanza la interacción de los agentes durante la simulación y producirá valores de salida para ser analizados. Es importante aclarar que la metodología elegida propone llevar a cabo un conjunto numeroso de simulaciones, que genere datos suficientes para analizar el modelo organizacional computacional y establecer la existencia de comportamiento emergente durante las simulaciones. En el caso específico de la presente propuesta se considerarán, específicamente, nociones de Análisis de Redes Sociales, tales como: densidad de la red social, cantidad de componentes de la red, y el

coeficiente de agrupamiento, para identificar las posibles conductas emergentes.³ Dichas métricas se eligieron como posibles indicadores del aumento o consolidación de alianzas y por ende de colaboración de los agentes en búsqueda de proyectos. El objetivo específico tres se da entonces por satisfecho si las simulaciones brindan resultados que permitan evidenciar algún patrón de comportamiento emergente que aclare las condiciones en las que el CeNAT puede potenciar sus alianzas de investigación con instituciones externas.

³ Ver anexo 8.2 para efectos de las fórmulas de cálculo necesarias para estas métricas.

4 Resultados

A continuación se presenta los resultados obtenidos en cada una de las actividades realizadas para la satisfacción de cada uno de los objetivos específicos. Los productos se presentan según cada objetivo específico del proyecto, con el fin de constatar claramente el cumplimiento de cada uno de ellos.

4.1 Objetivo específico 1

Para cumplir con el primer objetivo específico era necesario contar con un modelo calibrado plasmado en UML, así como con la aprobación por parte del experto de la institución. Seguidamente se presenta las acciones realizadas con este propósito.

4.1.1 Aplicación de generadores de nombres

Tal y como se mencionó anteriormente, al utilizar la metodología SimSahel, se asume que la documentación generada por una organización no detalla completamente su quehacer y que son sus miembros quienes poseen el mayor conocimiento al respecto (Saqalli et al., 2010). En el caso particular del CeNAT, la recolección de los datos necesarios inicialmente para el desarrollo del modelo conceptual se llevó a cabo mediante un cuestionario en línea, el cual se puso a disposición de todos los investigadores del centro mediante un enlace enviado por correo electrónico. El cuestionario se encuentra en el anexo 7.3.

Cabe resaltar que dicho instrumento buscaba establecer las micro-reglas que desde la perspectiva de los miembros del CeNAT definen las dinámicas involucradas en el establecimiento de alianzas con entes externos. Dicho generador de nombres, como se le conoce en análisis de redes sociales, fue elaborado siguiendo la estructura y tipos de preguntas recomendadas por Knoke & Yang (2008).

La consulta se dividió en cuatro categorías de análisis, a saber: el perfil de los

investigadores, las condiciones para la consecución de fondos en proyectos colaborativos, los factores que propician la colaboración en investigación y los factores de éxito para los proyectos colaborativos de investigación. La escogencia de dichas categorías obedeció a las sugerencias hechas por el director administrativo de FunCeNAT así como de algunos investigadores del centro. Además se incluyó una sección de opinión para dilucidar algún otro elemento que no estuviera contemplado en la categorización realizada. En total respondieron un 80% de las personas a las que se les envió la solicitud. Los resultados por categoría se presentan a continuación.

4.1.1.1 Resultados Categoría 1: Perfil del investigador

El cuestionario permitió establecer que la edad promedio de los investigadores del CeNAT es de 30 años con una desviación estándar de 4.6 años. El menor valor obtenido en relación a la edad fue de 23 y el mayor de 52.

Un 61% de los investigadores reporta sexo masculino y 39% femenino. La distribución de los grados académicos es de un 66% bachilleres, 26% licenciados, 4% masters y 4% doctores. En términos de tiempo laborado para el CeNAT, un 22% ha laborado más de 5 años en la institución, el 78% restante oscila entre 1 a 5 años laborados. Asimismo actualmente un 70% de los investigadores dedica tiempo completo a su trabajo, mientras que un 17% lo hace medio tiempo, 4% trabaja un cuarto de tiempo y otro 4% labora más de tiempo completo. El porcentaje restante consiste de personas contradas por proyecto cuya dedicación se mide por objetivos cumplidos en plazos determinados y no por una jornada de trabajo fija.

Los datos obtenidos permiten conocer mejor la población que labora en investigación en el CeNAT y es un insumo importante para el proyecto, aunque no se refleje directamente en la construcción de los agentes computacionales que formaran parte del modelo organizacional computacional, es decir, el modelo no replicará exactamente la población pero sí tomará en

cuenta sus características como guía para posibles escenarios de simulación. Las siguientes categorías de preguntas del cuestionario permiten dilucidar con quienes colabora el CeNAT y cuál es la percepción de sus investigadores en relación a la participación en proyectos colaborativos de investigación con entes externos, insumo indispensable para la elaboración de las micro-reglas del modelo.

4.1.1.2 Resultados Categoría 2: Colaboración y financiamiento con otras instituciones

Las unidades del CeNAT que demostraron estar vinculadas en proyectos colaborativos de investigación son el Colaboratorio de Computación Avanzada (CNCA), el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) y el Programa de Investigaciones Aerotransportadas (PRIAS). Los programas de Observatorio Climático y de Seguridad Alimentaria no reportaron ningún proyecto de esta naturaleza.

Por otra parte se evidenció participación en proyectos colaborativos de investigación con las siguientes entidades externas:

- Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD)
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Consejo Nacional de Rectores (CONARE).
- Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT).
- Die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Estado de la Nación.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC).
- Ministerio de Economía Industria y Comercio (MEIC).
- Museo Nacional de Costa Rica.

- National Aeronautics Space Administration (NASA).
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Red de Innovación en Biotecnología para las Américas (Red Bionna).
- The Advanced Research and Technology Collaboratory for the Americas (ARTCA).
- Universidad de Costa Rica (UCR).
- Universidad de Vermont.
- Universidad Estatal a Distancia (UNED).
- Universidad Nacional (UNA).
- University of Maryland Baltimore County (UMBC).

Es importante mencionar que actualmente existen más entes externos que colaboran con las unidades de investigación del CeNAT, sin embargo, el período considerado para la elaboración del modelo fue del 2009 al 2011, por lo cual no se listan dichas instituciones a pesar de que algunas personas consultadas mencionaron dichas entidades externas en el cuestionario.

En lo que a financiamiento concierne, el CeNAT ha obtenido fondos de las siguientes fuentes externas:

- Alianza en Energía y Ambiente para Centroamérica.
- CONARE.
- CONICIT.
- Fundación Blue Moon.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Museo Nacional de Costa Rica.
- Red Bionna.
- Universidad de Vermont.

Las instituciones cooperantes y de financiamiento identificadas hasta este punto corresponden a aquellas señaladas por los investigadores que respondieron al cuestionario. Posteriormente fue necesario validar dicha lista con la revisión documental del archivo de FunCeNAT, punto que será detallado en la sección 6.1.2.

4.1.1.3 Resultados Categoría 3: Factores que propician los proyectos colaborativos de investigación con entes externos

Con el objetivo de establecer la relevancia de posibles factores que propician los proyectos colaborativos de investigación con entes externos, así como los criterios preponderantes para la escogencia de pares para dichos proyectos, el generador de nombres solicitaba en primera instancia la valoración, en una escala de 1 a 10, de las características importantes a tomar en cuenta de un investigador, con el cual se desea llevar a cabo un proyecto colaborativo de investigación, a saber: disponibilidad, experiencia, grado académico, prestigio y grado vinculación personal (amistad, conocido, entre otros).

Además, se consultó, también en una escala de 1 a 10, la relevancia de los posibles lugares de encuentro para iniciar un proyecto colaborativo de investigación. La lista de posibilidades incluía: conferencias o congresos, talleres o seminarios, reuniones informales y espacios virtuales. Es importante mencionar que la escogencia de los factores mencionados en esta categoría se establecieron a partir de la adaptación de los resultados obtenidos por Hara et. al. (2003), quienes estudiaron el surgimiento de la colaboración entre un conjunto heterogéneo de investigadores distribuidos geográficamente y establecieron una noción de compatibilidad basada en variables similares a las propuestas en este proyecto.

Las respuestas obtenidas afirman que las siguientes características de los investigadores son factores significativos para la escogencia de socios en proyectos colaborativos de investigación:

- Disponibilidad.
- Experiencia.
- Grado académico.
- Prestigio.

Dichos factores obtuvieron valoraciones iguales o superiores a 7 en al menos 70% de las respuestas dadas por los investigadores, no así el grado de vinculación personal. Además, es importante señalar que en materia de los posibles lugares para propiciar colaboración entre investigadores, ninguno resultó particularmente favorecido, por lo cual dicha variable fue excluida del modelo.

Los resultados obtenidos son relevantes para modelar el perfil de los agentes que forman parte del modelo, el cual contendrá variables que representan el nivel de experiencia, prestigio, grado académico y disponibilidad de un agente en particular. A cada agente se le asignará un valor para cada una de las características, en un rango real entre 1 y 10 acorde con la escala dada en el cuestionario. Además, los resultados son un indicador de los criterios de mayor relevancia para la búsqueda de pares en proyectos colaborativos de investigación.

En este punto es posible entonces plantear, tomando en cuenta los resultados, un conjunto inicial de micro-reglas para el modelo, a saber:

- Dado un conjunto de investigadores y un conjunto de socios posibles:
 - Si un investigador desea iniciar un proyecto colaborativo de investigación,

buscará socios para llevar a cabo su proyecto según un perfil deseado.

- Se establecerá una alianza si el perfil del investigador (experiencia, prestigio, grado académico y disponibilidad) satisface las expectativas del posible socio y viceversa, es decir, si la valoración del perfil del investigador supera un umbral definido como mínimo para establecer la colaboración.

Formalmente se expresan las reglas de la siguiente forma:

- Sea $I = \{I_i \dots I_n\}$ el conjunto de investigadores y $S = \{S_j \dots S_m\}$ el conjunto de socios posibles, entonces:

$$\text{iniciaProyecto}(I_i) \rightarrow \text{buscaSocios}(I_i, S)$$

$$\text{alianza}(I_i, S_j) \rightarrow \text{satisface}(I_i, S_j) \wedge \text{satisface}(S_j, I_i)$$

Establecida dichas micro-reglas, se muestra los resultados obtenidos en relación a los factores de éxito de los proyectos colaborativos de investigación.

4.1.1.4 Resultados Categoría 4: Factores de éxito de los proyectos colaborativos de investigación

La siguiente sección del cuestionario se concentró en consultar acerca del éxito de los proyectos colaborativos de investigación, específicamente en términos de qué productos miden el éxito del proyecto y qué factores facilitan la consecución de fondos para la ejecución del proyecto.

Las respuestas obtenidas indican que 57% de los investigadores del CeNAT consideran adecuado que el éxito de un proyecto colaborativo de investigación se verifique a partir de

algún tipo de publicación de resultados (artículo científico o presentación pública). El 43% restante no está de acuerdo con tal proposición. Además un 65% considera que las evaluaciones institucionales tampoco son la mejor herramienta. Dado el poco margen de mayoría obtenido en materia de productos que reflejan el éxito del proyecto y el porcentaje que indica que la evaluación institucional no necesariamente es capaz de evaluarlo, es prudente, por el momento, no tomar en cuenta dichas variables para efectos del modelo computacional. Dicha decisión evita la pérdida de claridad del modelo y la introducción de ruido durante las simulaciones.

Ahora bien, un aspecto rescatable de esta categoría de preguntas es que desde la perspectiva de los investigadores del CeNAT, los dos factores más relevantes para la consecución de fondos son los socios elegidos y la formulación del proyecto (entre ambas opciones se alcanza un 68% de las respuestas a la pregunta hecha en este sentido), es decir, el perfil de los investigadores colaboradores del proyecto y la calidad de la propuesta hecha a la fuente de financiamiento.

A partir de dichos resultados es posible concluir que el modelo organizacional computacional debe reflejar una dinámica de interacción entre grupos de investigadores y fuentes de financiamiento, donde las fuentes de financiamiento evalúen las propuestas hechas por los grupos de investigadores a partir de una representación de la calidad de las mismas y de una valoración del perfil de los investigadores.

La siguiente formalización expone dicha situación:

- Sea $F = \{F_1 \dots F_n\}$ un conjunto de fuentes con financiamiento disponible y $G = \{G_j \dots G_m\}$ un grupo de investigadores que presentan una propuesta p de proyecto colaborativo de investigación, entonces:

$$\text{enviaPropuesta}(G_j, p, F_i) \rightarrow \text{evalúaPropuesta}(p, F_i)$$
$$\text{aceptaPropuesta}(F_i, G_j, p) \rightarrow \text{satisface}(G_j, F_i) \wedge \text{satisface}(p, F_i)$$

Hasta este momento ha sido posible, a partir de los resultados del instrumento, establecer un conjunto de micro-reglas que describen, de manera simplificada, la forma y criterios que, según el instrumento de evaluación, describen la formación de alianzas para proyectos colaborativos de investigación en el CeNAT. Con el fin de evitar la omisión de alguna variable que no fuera explícitamente tomada en cuenta en las secciones del cuestionario expuestas anteriormente, se incluyó una última categoría de opinión. Sus resultados se presentan en el siguiente inciso.

4.1.1.5 Resultados Categoría 5: Preguntas de opinión

Las respuestas obtenidas en esta categoría, en general, no aportan ninguna novedad en términos de variables que puedan afectar el modelo, sin embargo, si revelan un énfasis, por parte de las personas consultadas, en la importancia de los procesos vinculados a la generación de iniciativas para proyectos colaborativos de investigación. La mayoría de las respuestas indican que la búsqueda de socios es una actividad fundamental, que requiere habilidades de negociación que se aprenden en la marcha, conforme se adquiere experiencia en investigación. Asimismo, se reportaron afirmaciones en relación a las dificultades generadas por una mala negociación con los colaboradores del proyecto, por ejemplo, mala distribución de responsabilidades y cuestiones de propiedad intelectual fueron mencionadas. Dichas complicaciones son difíciles de modelar. Sin embargo, es posible introducir en el modelo un proceso que aleatoriamente induzca la separación de un grupo de investigadores en un momento dado de las simulaciones, por ejemplo. Se establece así otra micro-regla, a saber:

- Si en un momento dado la probabilidad de separación de grupos supera un umbral dado, entonces se elegirá al azar un grupo, tal que alguno de sus miembros abandonará el grupo.

Formalmente se representa de la siguiente manera:

- Sea U el umbral de separación de un grupo de investigadores $G = \{I_1, \dots, I_n\}$ y $P(I_m)$ la probabilidad de separación del investigador I_m del grupo G en un momento dado, entonces:

$$\text{supera}(P(I_m), U) \rightarrow \text{separa}(I_m, G)$$

Además varios de los comentarios hacen referencia a estrategias para adecuar las propuestas de proyectos a los mecanismos de evaluación de las fuentes y evitar obstáculos, es decir, los criterios de evaluación de las fuentes de financiamiento pueden ser previstos de forma tal que la propuesta se adecúe a las expectativas de la fuente, obteniendo así una mayor probabilidad de aceptación. Esta habilidad es dependiente de la experiencia, por lo que los investigadores recomiendan que preferiblemente el líder del proyecto sea una persona experimentada y reconocida. Esta afirmación confirma la regla hecha en la sección 6.1.1.4 en relación a la aceptación de propuestas por parte de las fuentes de financiamiento. Los resultados obtenidos hasta este punto posibilitan, para efectos del modelo, reducir las interacciones de los agentes del CeNAT en relación a proyectos colaborativos de investigación en tres procesos: búsqueda de pares para el proyecto, negociación de las condiciones de la colaboración y búsqueda de financiamiento. Los mismos serán contemplados en el modelo organizacional computacional, de forma tal que las

simulaciones representen estas tres dinámicas básicas y permitan su análisis.

El siguiente inciso muestra el detalle de la revisión documental hecha para el proyecto, la cual tiene como objetivo buscar información que haya sido omitida por las respuestas de los investigadores.

4.1.2 Revisión documental

Según la metodología escogida, el siguiente paso a seguir para la construcción del un modelo calibrado estriba en una consulta de los documentos de la organización asociados a los proyectos colaborativos con entes externos, con el fin de completar o complementar las micro-reglas elaboradas a partir de los resultados de la actividad anterior. Así, se procedió a una revisión de la base de datos de proyectos del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), la cual es gestionada por la Fundación Centro de Alta Tecnología (FunCeNAT), tanto en formato digital como en archivos documentales físicos. Mediante la ejecución de esta labor se identificaron los proyectos cuyo componente principal era la investigación, es decir, cuyos objetivos implican la generación de nuevo conocimiento, y que su ejecución se diera en colaboración con entes externos durante los años 2009 al 2011. El primer resultado obtenido de esta actividad es la lista de nombres de proyectos mostrada a continuación.

- Artca Intel.
- UICN.
- UNOPS.
- Lanotec ITCR.
- Ozonosonda.
- PNUMA.
- Estado de la Nación.
- Campaña verde.

- CONICIT-SLAP.
- CAS-CONARE
- CIHATA.
- Estructura Supramolecular.
- Laboratorio de Muestras.
- Nanoarcillas.
- Termoterapia contra el cáncer.
- Vesículas.
- Cluster CNCA.
- Cluster UCR.
- AECID.
- LANOTEC-FORINVES.
- ADAI

Una vez identificados los proyectos se procedió a revisar el expediente físico de cada uno de ellos con el objetivo de identificar lo siguiente:

- Unidades externas cooperantes del proyecto.
- Cantidad promedio de participantes por proyecto.
- Condiciones contractuales que permitan identificar factores importantes para la colaboración entre las partes.

El primer resultado relevante de esta actividad fue el descubrimiento de entidades externas involucradas en proyectos colaborativos de investigación con el CeNAT que no fueron reportadas por los investigadores del centro, a saber:

- Universidad de McGill.
- Organización Internacional del Trabajo (OIT).
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

Una revisión más detallada de los expedientes reveló que estas instancias fueron negociadas por investigadores que habían dejado de laborar para el CeNAT y por ende los proyectos habían tenido problemas para su continuación. Este aspecto confirma la posibilidad, establecida en el inciso anterior, de abandono imprevisto por parte de los investigadores de los proyectos.

La cantidad promedio de participantes por proyecto es de 4 investigadores, lo cual colabora a establecer el tamaño de los grupos a formar durante las simulaciones a realizar con el sistema multiagente prototipo.

Además, se estudiaron todos los manuales de procedimientos del CeNAT, los cuales brindan información importante para determinar los pasos que institucionalmente se establecen para la formalización y ejecución de proyectos colaborativos de investigación. Cabe resaltar que los manuales confirman a su vez la existencia de los tres procesos identificados mediante los cuestionarios enviados a los investigadores.

4.1.3 Representación de la red de colaboración del CeNAT

Aunque para efectos del cumplimiento de los objetivos del proyecto esta actividad no es necesaria, la representación gráfica de la red de colaboración del CeNAT permite presentar las relaciones establecidas por la organización de una forma sumamente simple y facilita la comprensión a sus funcionarios, con el fin de recibir sus apreciaciones del modelo.

Para la creación de la red se asume que cada unidad, tanto interna como externa, constituye

un nodo y que existe un enlace si entre dos nodos cualesquiera hay al menos un proyecto. Asimismo el peso del enlace se define por la cantidad de proyectos que exista entre cualesquiera dos nodos que colaboren. La red resultante se muestra en el gráfico 6.1. Cabe aclarar que su construcción y visualización se llevó a cabo mediante la herramienta Gephi (<http://gephi.org/>).

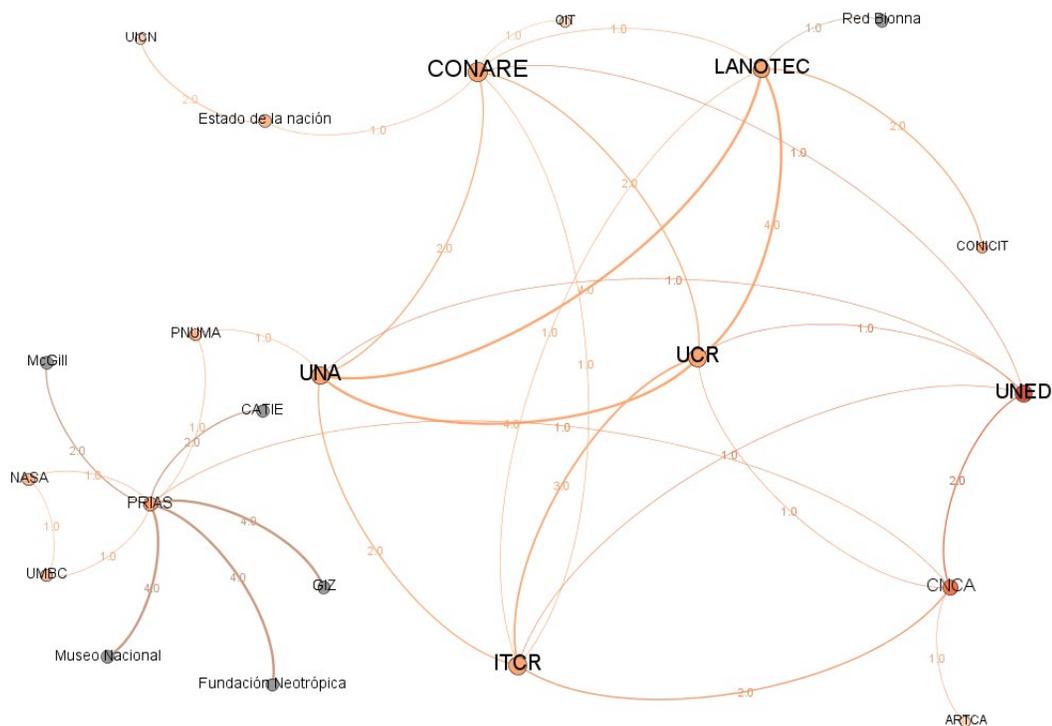


Gráfico 6.1: Red de colaboración del CeNAT

También es importante mencionar que al representar la red de colaboración del CeNAT es posible calcular algunas métricas que sirven de referencia para las simulaciones, por ejemplo su densidad y coeficiente de agrupamiento, así como el grado nodal de los entes sobresalientes. Los resultados obtenidos se incluyen en el anexo 7.4.

4.1.4 Representación del modelo organizacional

Según Bersini (2012), se recomienda la representación formal del modelo mediante el uso de UML, específicamente mediante diagramas de actividades, de secuencia y de estados. En el caso específico del CeNAT, los diagramas muestran los procesos identificados, a saber: de búsqueda de pares, negociación para el proyecto y evaluación por parte de las fuentes de financiamiento. A su vez, la representación en UML aclara los protocolos de comunicación que seguirán los agentes del prototipo.

El diagrama de actividades anexo en la sección 9.5.1 muestra los pasos dados por los agentes, específicamente por los investigadores, tanto internos como externos, y las fuentes de financiamiento durante la simulación. En primera instancia, el investigador interno inicia su búsqueda de socios y busca alianzas con uno o más posibles socios externos, los cuales evalúan su propuesta (incluido su perfil) y responden la solicitud. La cantidad de socios a buscar depende de la cantidad de pares deseada por el investigador para el proyecto en cuestión. En caso de una respuesta afirmativa por parte de los solicitados, se establece un enlace entre ellos, y se procede a negociar las condiciones del proyecto para, finalmente, ser presentado a la fuente de financiamiento, quien puede aprobar o rechazar el proyecto.

En tanto el investigador interno no reciba una respuesta afirmativa de su cantidad deseada de socios, buscará otros que puedan tener interés en colaborar. Si en algún momento el investigador es rechazado, sus parámetros serán actualizados mediante un castigo a su prestigio y un aumento leve en su experiencia y reiniciará la búsqueda.

La fuente de financiamiento por su lado evalúa las propuestas recibidas así como los perfiles de los investigadores solicitantes, y, si superan el umbral de aceptación, aprueba la solicitud para que ejecuten su proyecto. Ahora bien, dado un rechazo de la propuesta por parte de la fuente, los investigadores tienen la posibilidad de actualizar nuevamente sus parámetros y buscar otra fuente de financiamiento.

Además la secuencia desde la perspectiva de un agente investigador interno es aclarada en el diagrama de secuencia anexo en la sección 7.5.2. De igual forma quedan claros los macro-procesos identificados para el prototipo, en un inicio la búsqueda de socios, seguido de una fase de negociación para concluir con una solicitud de apoyo a una fuente de financiamiento, la cual determina la ejecución o rechazo de la propuesta.

Asimismo mediante el diagrama de estados adjunto en la sección 7.5.3. del anexo se detalla los posibles estados de cada tipo de agente. El investigador interno tiene cuatro posibles estados:

- Búsqueda de socios: El investigador busca investigadores para iniciar un proyecto colaborativo de investigación. La cantidad de socios necesarios será de a lo sumo cuatro para respetar los resultados obtenidos en la revisión documental.
- Negociación de propuesta: Los investigadores establecen el valor de su propuesta de investigación, la cual una vez concluido el proceso es enviada a una fuente para su evaluación.
- Espera de evaluación: Tiempo de espera resultante del proceso de evaluación por parte de la fuente.
- Ejecución de propuesta: Dada una evaluación positiva por parte de la fuente, el grupo de investigadores ejecuta su proyecto.

Esta representación formal en UML permite construir un sistema multiagente, a partir del modelo calibrado, es decir, el modelo organizacional computacional. El pseudocódigo definido para su construcción será expuesto en la sección 5.2.3

Finalmente, teniendo claro ya la constitución de los agentes y de los procesos de interacción entre ellos, es posible definir las variables que serán estudiadas con el fin de encontrar patrones emergentes de comportamiento resultante de las simulaciones. Para el modelo organizacional computacional del CeNAT se analizará, a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones, las siguientes variables:

- La densidad de la red resultante.
- El coeficiente de agrupamiento de la red resultante.
- La cantidad de componentes de la red resultante.

4.1.5 Aprobación por parte del experto de la organización

La aprobación del modelo por parte del experto de la organización, en este caso el director administrativo de FunCeNAT, se dio después de hecha una presentación del avance del proyecto.

Todas las actividades descritas hasta este punto permiten establecer la conclusión del primer objetivo específico según los criterios de evaluación establecidos. Seguidamente se muestra las actividades y resultados obtenidos para el segundo objetivo específico.

4.2 Objetivo específico 2

Para cumplir con el segundo objetivo específico era necesario contar con un modelo robusto, para lo cual se efectuó un control de consistencia del modelo calibrado, se implementó el prototipo de sistema multiagente y se llevó a cabo un análisis de

sensibilidad. A continuación se muestra en detalle cada una de dichas actividades.

4.2.1 Control de consistencia

Esta actividad consistió en un período de monitoreo de dos meses de las actividades del CeNAT vinculadas a proyectos colaborativos con otras instituciones. Básicamente se dio seguimiento a las actividades de las unidades del CeNAT vinculadas a la posibilidad de nuevas colaboraciones con entes externos. Aunque el período de control de consistencia puede en apariencia ser poco, dentro del contexto del trabajo final de graduación se justifica su duración debido a las exigencias de tiempo de desarrollo del proyecto.

Lo primordial de esta tarea consistía en detectar posibles variaciones en los procesos macro identificados para la generación de proyectos colaborativos de investigación con entes externos. En este punto se estableció que no era necesario realizar una intervención directa en el quehacer de las unidades del CeNAT, particularmente para que los investigadores no se distrajeran de las actividades vinculadas a sus proyectos y además desde la perspectiva de la organización podría ser malinterpretada como una interferencia no deseada en el centro de investigaciones.

Después del lapso de monitoreo no se detectó ningún evento relevante que pudiera modificar el modelo en este punto, por el contrario se confirmó la secuencia de los macro-procesos descritos anteriormente.

4.2.2 Selección de herramienta para el desarrollo del sistema multiagente prototipo

Para efectos de la traducción del modelo a un sistema multiagente prototipo es necesaria una herramienta que facilite la codificación del mismo sin tener que iniciar desde cero la programación, es decir, que contenga un conjunto de componentes adaptables al contexto del proyecto. Dentro de los ambientes de programación dedicados para el desarrollo de

sistemas multiagentes se encuentran:

- NetLogo (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>).
- Repast 3 (http://repast.sourceforge.net/repast_3/index.html).
- Repast Symphony (http://repast.sourceforge.net/repast_symphony.html).
- AMP (<http://www.eclipse.org/amp/>).
- JADE (<http://jade.tilab.com/>).

Con el fin de determinar el entorno de desarrollo más adecuado, se realizó una evaluación de las herramientas mencionadas según los siguientes criterios:

- Tiempo de existencia de la herramienta.
- Cantidad de componentes adaptables al modelo.
- Documentación y ejemplos disponibles.
- Soporte disponible.
- Licencia de distribución.

La herramienta que resultó con mejor valoración fue Repast 3, ya que tiene el mayor tiempo de existencia, cuenta con muchos módulos adaptables para análisis de redes sociales y su visualización, incluye una extensa documentación así como ejemplos funcionales con su respectivo código fuente. Aunque no hay soporte dedicado 24/7, existe una comunidad numerosa y activa que colabora en la resolución de dudas. La distribución del software es libre bajo términos de la licencia de software de la Universidad de Chicago. La matriz de evaluación se incluye en el anexo 7.6.

4.2.3 Construcción de prototipo de sistema multiagente

La herramienta Repast 3 concibe la construcción de sistemas multiagente a partir de 3 elementos mínimos, a saber: agentes, ambiente del sistema y el cronograma de ejecución. En este marco de trabajo es necesario la creación de un objeto para cada tipo de agente y un objeto coordinador, que maneje las variables del ambiente y el cronograma de ejecución. A partir de dichos componentes mínimos es posible añadir toda la funcionalidad necesaria para representar el modelo a simular.

Además, Repast 3 permite que los objetos hereden o extiendan una serie de métodos y propiedades que facilitan la implementación de las reglas del sistema multiagente y a la vez provee herramientas para analizar el comportamiento de las simulaciones generadas con el mismo.

4.2.3.1 Objetos creados para el prototipo de sistema multiagente

Para el prototipo de sistema multiagente se crearon las siguientes clases de objetos:

- **Modelo:** Consiste en un coordinador de la interacción de los agentes en el ambiente simulado. Dicha coordinación se logra mediante un cronograma que establece el orden de los eventos a realizar en cada paso de la simulación. Esta capacidad es heredada de la clase `SimModelImpl` de Repast 3. Los métodos obligatorios a reescribir son los siguientes:
 - `buildModel`: Básicamente crea los objetos correspondientes a los investigadores y las fuentes.

- `buildDisplay`: Construye la superficie sobre la cual interactúan los investigadores y las fuentes.
- `initialAction`: Eventos que dan inicio a la simulación.
- `mainAction`: Eventos que suceden en cada paso de la simulación.
- `buildSchedule`: Establece la duración y la frecuencia con la que se ejecutan los eventos incluidos en los métodos `initialAction` y `mainAction`.

Esta clase además contiene las variables que representan los parámetros de entrada de la simulación, específicamente: cantidad de investigadores, cantidad de fuentes y el número de iteraciones en cada simulación. Es necesario igualmente resaltar que en esta clase se declaran las variables que representan: la posibilidad de relacionarse aleatoriamente (`RSub0`), la probabilidad que determina la cantidad de socios a buscar para establecer una relación en el vecindario al alcance del agente (`RSub1`), así como la de que suceda una separación repentina en un grupo (`probRemove`). También incluye las variables de salida del modelo (coeficiente de agrupamiento, densidad de la red y cantidad de componentes) y reporta los resultados de la misma en un archivo de texto. De igual modo, es en este objeto donde se representan dentro del método `mainAction` los tres macro procesos del modelo elaborado para el CeNAT, a saber: búsqueda de pares, negociación y evaluación de propuestas.

- **Investigador**: Incluye las variables que representan la disponibilidad, experiencia, grado académico y prestigio. Cada una de ellas puede variar en un rango de 1 a 10. La cantidad de socios tiene un rango entre 3 y 5 y la cantidad deseada de proyectos oscila entre 1 y 3. De igual forma contiene una bandera booleana que indica si el objeto es un investigador interno o externo. Es importante mencionar que dichas variables se asignan aleatoriamente según una distribución uniforme cada vez que

se crea el objeto. Asimismo, el objeto incluye las micro-reglas de comportamiento del investigador, las cuáles se implementan mediante los siguientes métodos:

- `buscaEnlace`: Simula la posible búsqueda de socias para crear alianzas.
 - `negociaColaboracion`: El investigador negocia los términos de colaboración con el par en cuestión, basado en los perfiles de ambos.
 - `getValorPerfil`: Retorna el valor simbólico del investigador, el cual consiste en un promedio de sus variables, a saber, disponibilidad, prestigio, grado académico y experiencia.
 - `getValorPropuesta`: Obtiene el valor de la propuesta una vez que el investigador ha cumplido sus expectativas de formación de un grupo. El valor de la propuesta consiste en un promedio de los perfiles de los investigadores que integran el grupo.
- `Fuente`: Este objeto representa las fuentes de financiamiento del modelo. Cada fuente cuenta con variables que definen su umbral de aceptación y la cantidad de proyectos que es capaz de apoyar. Asimismo cuenta con el método necesario para evaluar las propuestas recibidas. La evaluación básicamente toma el valor de la propuesta emitida por un grupo de investigadores y si esta supera el umbral o si está a no más de un punto de distancia de la misma, se le notifica al grupo que su propuesta es aceptada.

Una vez aclarados los objetos desarrollados por el proyecto, se presenta en la siguiente sección el pseudocódigo de la simulación propiamente dicha, con el fin de tener claro el funcionamiento de la misma.

4.2.3.2 Pseudocódigo de la simulación

Esta sección muestra el pseudocódigo desarrollado para implementar el prototipo de sistema multiagente. El objetivo es mostrar claramente el funcionamiento de los objetos que componen el modelo organizacional computacional. A continuación se muestra el pseudocódigo del objeto Modelo:

```
clase Modelo {
  buildModel(){
    para i ← 0 hasta cantidadInvestigadores
      inicializa Investigadores(i)

    para i ← 0 hasta cantidadFuentes
      inicializa Fuentes(i)

    inicializaProbabilidades()
  }

  buildDisplay(){

    incluye Investigadores
    incluye Fuentes
    despliegaRed

  }

  initialAction(){
    encuentroAleatorioInvestigadores
  }

  mainAction(){
    si numeroIteraciones < limiteIteraciones
      busquedaSocios0
      negociaColaboracion
      evaluacionPropuestas

    sino
      stop()
  }

  buildSchedule(){
    initialAction()
    mainAction()
  }

  begin(){
    buildModel()
  }
}
```

```

        buildDisplay()
        buildSchedule()
    }
}

```

Asimismo el pseudocódigo de la clase Investigador es el siguiente:

```

clase Investigador{
    Investigador(){
        disponibilidad= randomUniforme(1,10)
        experiencia = randomUniforme(1,10)
        gradoAcad = randomUniforme(1,10)
        prestigio = randomUniforme(1,10)
        maxSocios = randomUniforme(3,5)
        proyectosDeseados = randomUniforme(1,3)
        interno = randomUniforme()
    }
    buscaEnlace(){
        seleccionaVecinos()
        negociaColaboracion()
    }
    negociaColaboracion(){
        si socioDisponible&&satisfacePerfil&&proyectosDeseados!=0
            creaEnlace()
            mejoraExperiencia()
    }
    getValorPerfil(){
        return (disponibilidad+experiencia+gradoAcad+prestigio)/4;
    }
    getValorPropuesta(){
        para i ← 0 hasta cantidadSocios

```

```

        sumaPerfil(Socio(i))
    return sumaPerfil/cantidadSocios
    }
}

```

El pseudocódigo de la clase Fuente es el siguiente:

```

clase Fuente{
    evaluaPropuesta(propuesta){
        si superaUmbral(propuesta) && proyectosDisponibles>0
            proyectosDisponibles--=1
            return true
        else
            return false
    }
}

```

A partir del pseudocódigo mostrado se desarrolló el sistema multiagente prototipo, el cual además de las clases mostradas hasta este punto, incluye un conjunto de métodos para visualización y análisis de los datos que permiten llevar a cabo el análisis de sensibilidad por un lado y por otro la búsqueda de patrones de comportamiento emergente.

Seguidamente se detalla el análisis de sensibilidad necesario para la consecución del segundo objetivo específico.

4.2.4 Análisis de sensibilidad

Tal y como se mencionó en el capítulo metodológico, el análisis de sensibilidad consiste en un estudio estadístico de un conjunto de simulaciones realizadas con el prototipo, el cual permite observar el grado de sensibilidad del prototipo de sistema multiagente a las variables y definir el rango en el cual el comportamiento del mismo es robusto, es decir, la salida del sistema es plausible en relación al fenómeno de estudio.

En el contexto de este proyecto cada simulación consta de 500 iteraciones de posible interacción entre los agentes simulados y las fuentes de financiamiento. Para cada simulación se asigna un conjunto de valores de entrada, a saber:

- Cantidad de investigadores.
- Cantidad de fuentes.
- RSub0.
- RSub1.
- Probabilidad de remover aleatoriamente una alianza.

Asimismo, al finalizar cada simulación, se produce una salida escrita a un archivo de texto que refleja el resultado final de la simulación. Los valores de las variables resultantes se escriben separados por comas en una línea del archivo de texto, formando así columnas que contienen el coeficiente de agrupamiento, la densidad de la red y la cantidad de componentes conexos. Al finalizar un conjunto grande de simulaciones se cuenta con un archivo de texto que contiene los resultados finales de cada una de las simulaciones hechas. Seguidamente se muestra los resultados de las pruebas realizadas para establecer la robustez del sistema y por ende la obtención del segundo objetivo específico.

4.2.4.1 Variación de probabilidades RSub0 y RSub1

La primera prueba del análisis de sensibilidad consistió en ejecutar un conjunto de simulaciones con el prototipo, donde para cada simulación se utilizaba un valor distinto de RSub0 y de RSub1. Es importante reiterar que la primera variable afecta la posibilidad de encuentros aleatorios entre investigadores y RSub1 la cantidad de socios que el investigador puede contactar en el vecindario a su alcance.

La intención de esta prueba es verificar que los valores que se asignen a dichas probabilidades, no alteren la plausibilidad de las interacciones representadas, es decir, encontrar un rango donde los resultados de las simulaciones se acerquen a aquellos reportados en el análisis de la red de colaboración del CeNAT (Anexo79.4). Para ello se analizaron 9800 simulaciones resultantes de las permutaciones, en un rango de 0,01 a 1, entre RSub0 y RSub1. Asimismo es importante aclarar que en todas ellas la cantidad de investigadores y fuentes se mantuvo constante, 35 y 10 respectivamente, así como la probabilidad de remover un enlace repentinamente en un 3%. El estudio de sensibilidad utilizó como parámetro de plausibilidad, el coeficiente de agrupamiento resultante, el cual según el análisis hecho en el CeNAT debe rondar 0,28.

Seguidamente se procedió a graficar los resultados en búsqueda de los segmentos donde el coeficiente de agrupamiento se acercaba o era igual a 0,28. Se estableció que dicha condición se obtenía únicamente cuando la variable RSub0 oscilaba entre 0,01 y 0,1 y RSub1 variaba entre 0,3 y 0,8. Los gráficos 6.2 y 6.3 muestran los resultados mencionados.

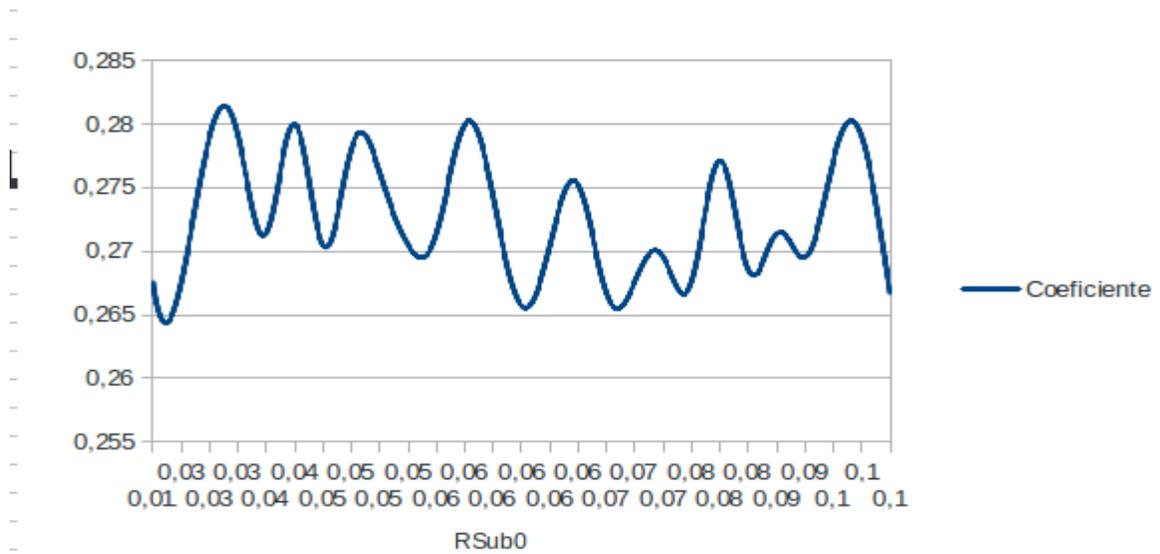


Gráfico 6.2: Rango aceptable de RSub0

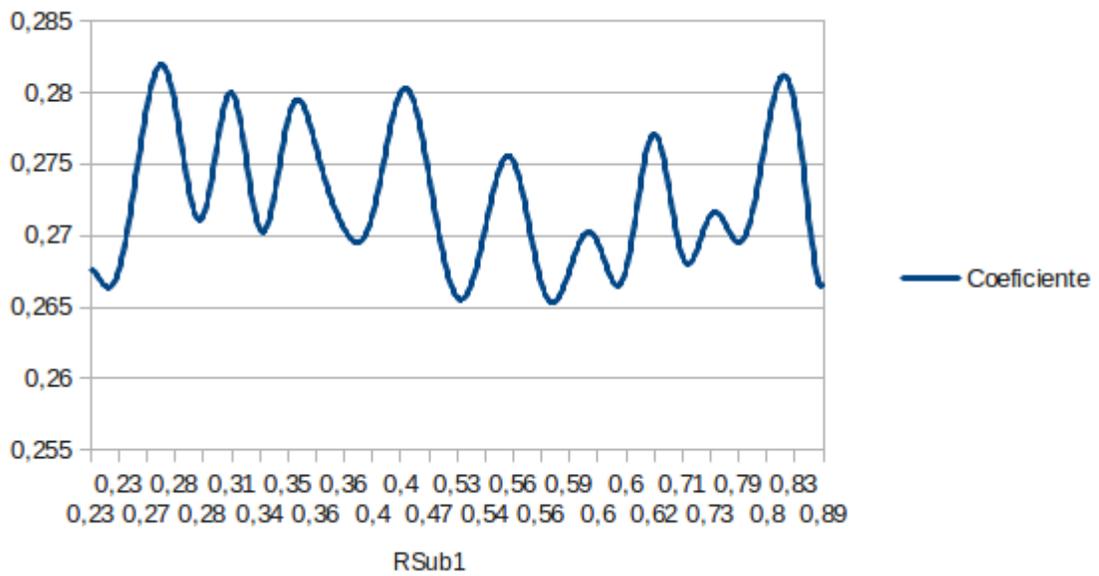


Gráfico 6.3: Rango aceptable de RSub1

4.2.4.2 Variación de cantidad de investigadores y fuentes

La siguiente prueba para analizar la sensibilidad del sistema multiagente consistió en variar la cantidad de investigadores y de fuentes de financiamiento para verificar si, una vez establecidos los valores de RSub0 y RSub1, la variación de los resultados era aceptable y por ende, posible iniciar la búsqueda de patrones emergentes de comportamiento en el prototipo. Se calculó la desviación estándar, tanto del coeficiente de agrupamiento como de la densidad de la red, para evaluar la estabilidad del sistema.

En el caso de la cantidad de investigadores se definieron tres posibles valores, a saber 35, 50 y 100, los cuales representan respectivamente la cantidad actual de investigadores del CeNAT, la cantidad de investigadores posible a mediano plazo así como la suma deseada a largo plazo.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos:

Cantidad simulaciones	Cantidad Investigadores	Cantidad Fuentes	Desviación estándar del coeficiente de agrupamiento	Desviación estándar de la densidad de la red
500	35	10	0,05	0,07
500	50	15	0,04	0,04
500	100	30	0,02	0,01

Tabla 6.2: Resultados de variación de investigadores y fuentes

En vista de los resultados mostrados en la tabla, donde en cada prueba la varianza es relativamente pequeña, así como lo expuesto en el inciso 6.2.4.1, es posible aseverar que el prototipo de sistema multiagente es robusto y que es posible considerarlo como un modelo organizacional computacional del CeNAT, cumpliendo así con la meta propuesta para el

alcance del segundo objetivo específico. Se procede entonces a mostrar los resultados relacionados al tercer objetivo específico.

4.3 Objetivo específico 3

El logro del tercer objetivo específico es dependiente de la obtención de posibles condiciones donde el CeNAT pueda establecer alianzas exitosas de investigación con otras organizaciones. Este inciso muestra los escenarios establecidos para la búsqueda de patrones emergentes y los resultados obtenidos.

4.3.1 Diseño de escenarios de simulación

Tal y como se mencionó en la sección 4.1.5 de la metodología, un escenario es una configuración inicial particular de las variables que se brindan como parámetros de entrada en el sistema multiagente que implementa el modelo organizacional computacional. El fin de los escenarios es realizar un conjunto de simulaciones con los mismos parámetros con el propósito de establecer patrones emergentes de comportamiento a partir de los resultados que brinden las mismas, específicamente en relación al coeficiente de agrupamiento, densidad de la red y la cantidad de componentes conexos. Como producto de varios intentos, dos escenarios resultaron exitosos para la búsqueda de patrones en relación a distintas variables, a saber:

- Escenario 1: Se ejecutaron 100 simulaciones con los siguientes parámetros de entrada:
 - Cantidad de investigadores: 35.
 - Cantidad de fuentes: 15.
 - R_{sub0} : 0,05

- RSub1:0,8
- probRemove: 0,01

Este escenario se utilizó para estudiar si era posible encontrar un patrón que relacionara, ya fuera el coeficiente de agrupamiento, la densidad de la red o la cantidad de componentes conexos de la red (comunidades), con el porcentaje de asignación de proyectos ofrecidos por las fuentes en este escenario. Nótese que se da una probabilidad alta a la posibilidad de contactar investigadores cercanos y una probabilidad baja a la posibilidad de buscar aleatoriamente, es decir, es un escenario que promueve la búsqueda de socios para colaborar en proyectos.

- Escenario 2: Se ejecutaron 100 simulaciones con los siguientes parámetros de entrada:
 - Cantidad de investigadores: 80.
 - Cantidad de fuentes: 15.
 - Rsub0: 0,05
 - RSub1:0,8
 - probRemove: 0,01

El escenario 2 se analizó en búsqueda de un patrón que relacionara el perfil de los agentes en relación al éxito en la consecución de proyectos colaborativos de investigación, es decir, dado que hay un aumento en la cantidad de investigadores y no así en la cantidad de fuentes, se busca estudiar qué factor del perfil incide mayormente en la consecución del proyecto.

Seguidamente se exhibe los resultados obtenidos en cada escenario.

4.3.2 Resultados de escenarios de simulación

Esta sección presenta los patrones emergentes encontrados en los escenarios de simulación planteados.

4.3.2.1 Resultados Escenario 1

En el primer escenario se procedió a buscar relaciones entre el coeficiente de agrupamiento, la densidad de la red o la cantidad de componentes conexos de la red (comunidades), con el porcentaje de obtención de proyectos por parte de los investigadores simulados.

No fue posible establecer ninguna relación entre la densidad de la red, cuya variación era mínima en los datos obtenidos, y los porcentajes de éxito, es decir de proyectos colaborativos concretados. Asimismo, la cantidad de componentes conexos (comunidades) de la red tampoco reveló ninguna novedad.

Ahora bien, se encontró una relación de sentido positivo entre el coeficiente de agrupamiento y el porcentaje de éxito dado por las simulaciones, es decir, si se da un aumento en el coeficiente de agrupamiento se da a su vez un aumento proporcional en el porcentaje estudiado. El coeficiente de correlación da como resultado 0,91, lo cual confirma el patrón. Para efectos de visualizar y comprender mejor este patrón, el gráfico 6.4 exhibe el comportamiento de ambas salidas a lo largo de las 100 simulaciones realizadas

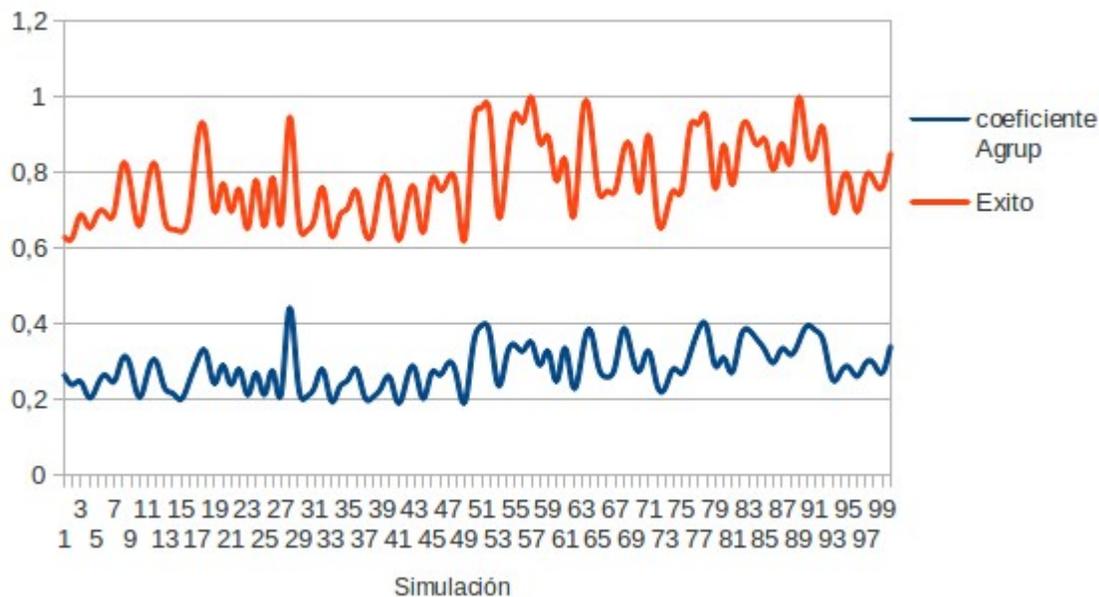


Gráfico 6.4: Comportamiento coeficiente de agrupamiento y porcentaje de éxito

4.3.2.2 Resultados Escenario 2

Para el caso del segundo escenario se buscó relaciones entre las variables que forman parte del perfil de los investigadores con el porcentaje de obtención de proyectos obtenidos en las simulaciones.

En primera instancia no se estableció ninguna relación entre la disponibilidad o el prestigio de los agentes, y los porcentajes de éxito. Sin embargo, fue posible encontrar una relación de sentido positivo entre la experiencia promedio de los investigadores y el porcentaje de éxito. Específicamente, los investigadores con mayor nivel de experiencia son los que en efecto logran mayor porcentaje de éxito. Además el coeficiente de correlación entre ambas salidas da como resultado 0,93, lo cual refuerza el patrón. Para efectos de visualizar y

comprender mejor este patrón el gráfico de dispersión 6.5 expone el comportamiento de ambas salidas.

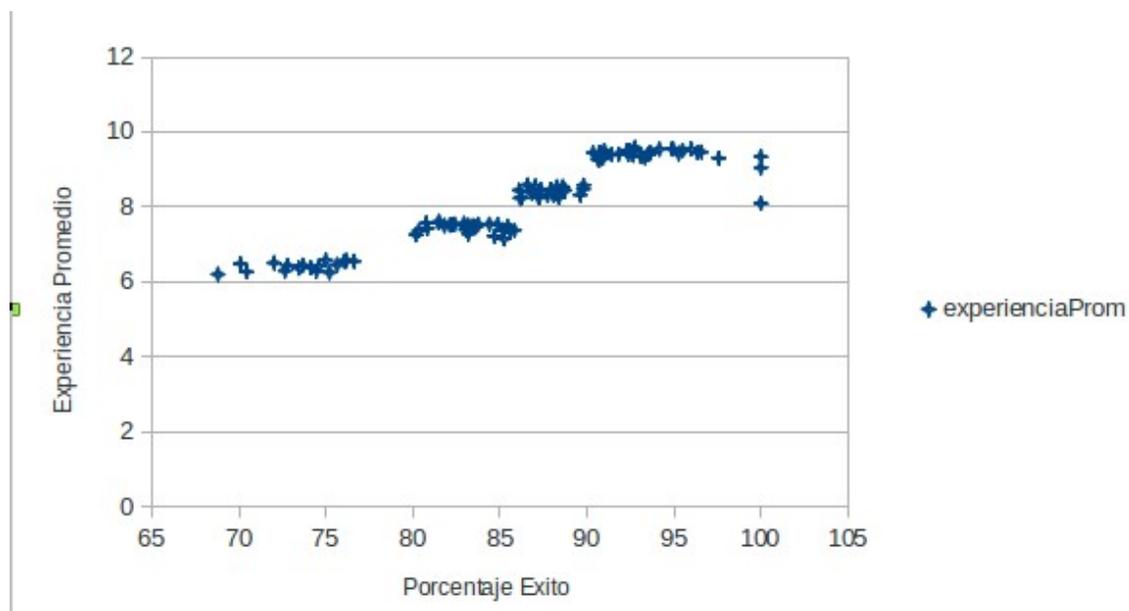


Gráfico 6.5: Distribución de experiencia vs. porcentaje de éxito

Alcanzado este punto es posible afirmar la conclusión del tercer objetivo específico y por ende el logro del objetivo general del proyecto.

5 Conclusiones y recomendaciones

Los resultados obtenidos del proyecto *Construcción de un modelo organizacional basado en la Simulación Social y el Análisis de Redes Sociales* muestran que en efecto la concepción de las organizaciones como redes sociales susceptibles de análisis mediante sistemas multiagente es un enfoque que puede brindar un modelo organizacional computacional útil para el apoyo a la gestión en organizaciones. Asimismo se establece que, en efecto, la metodología SimSahel contribuye a la formulación de un modelo organizacional computacional robusto, capaz de generar simulaciones plausibles del fenómeno de estudio, y que permite obtener patrones de comportamiento emergente de la organización en estudio.

Es necesario reflexionar acerca de los patrones emergentes descubiertos mediante las simulaciones hechas en el prototipo de sistema multiagente y considerar sus implicaciones para la toma de decisiones en el CeNAT. Se aclara que las recomendaciones que se brindan a continuación deben ser consideradas por los tomadores de decisión de la organización como una guía general para implementar políticas más específicas orientadas, las cuales, vistas desde los patrones encontrados en las simulaciones, potencien la generación de proyectos colaborativos de investigación con entes externos.

El primer patrón encontrado indica que existe una estrecha relación entre el coeficiente de agrupamiento de la red, o mejor dicho de la organización en este caso, y la cantidad de proyectos que se logran concretar durante las simulaciones. Cabe resaltar que dicho coeficiente es representativo de la conectividad que existe entre los miembros de la red, y dada su alta correlación (0.91) con el porcentaje de proyectos obtenidos, puede interpretarse que en efecto es importante que el CeNAT fomente que sus investigadores se incorporen a redes de trabajo más amplias, donde sea posible aumentar la cantidad de

vínculos con entes externos y así la posibilidad de concretar proyectos colaborativos de investigación.

Por otro lado, el segundo patrón descubierto enfatiza el peso que una variable del perfil del investigador puede tener en la consecución de proyectos colaborativos de investigación. Los resultados indican que existe una correlación fuerte (0,93) entre la experiencia de los investigadores simulados y la cantidad de proyectos que estos logran concretar. Dicho hallazgo plantea una cuestión muy importante para el CeNAT, dado que la mayoría de sus investigadores son jóvenes con un promedio de edad de treinta años y la adquisición de experiencia es un proceso, que en esencia, tarda relativamente bastante tiempo en gestarse. La organización puede buscar alternativas para mitigar el impacto de esta variable, por ejemplo, fomentando iniciativas de vinculación con investigadores más experimentados mediante pasantías, cursos cortos o algún otro tipo de vinculación.

Es además claro que la aproximación al fenómeno de estudio llevada a cabo por el proyecto es compleja. La creación de un modelo organizacional computacional para el apoyo a la gestión requiere de un esfuerzo investigativo y un plazo de tiempo considerables para su ejecución. Sin embargo, es igualmente importante el valor agregado que brinda al CeNAT la posibilidad de estudiar su funcionamiento mediante el producto obtenido del proyecto. Difícilmente algún otro tipo de análisis, ya fuera estadístico o en general de índole organizacional, es capaz de establecer los patrones emergentes descubiertos por las simulaciones y la perspectiva obtenida de su situación en relación a la posibilidad de concretar proyectos colaborativos de investigación con entes externos es mucho más amplia ahora.

Ahora bien, es igualmente importante considerar aspectos que pueden ser aún susceptibles de mejora. El primero de ellos es que idealmente este tipo de proyectos debiera gestarse en un ambiente interdisciplinario, donde actores de diversas áreas de experticia, puedan contribuir a la generación de modelos cada vez más representativos del fenómeno de

estudio. Dado que el estudio del comportamiento de las organizaciones es un tema de suma complejidad, es necesario que múltiples perspectivas debatan cuáles son las variables que realmente son necesarias de modelar o cuál es el análisis más adecuado para el establecimiento de patrones emergentes. En el caso del proyecto llevado a cabo en el CeNAT por ejemplo, se encontraron los patrones expuestos anteriormente, pero existe la posibilidad de que aún haya más conductas emergentes por descubrir, y que su hallazgo se logre mediante métodos existentes en otras áreas del conocimiento.

La situación mencionada permite además resaltar que el prototipo de sistema multiagente construido, y por ende, el modelo organizacional computacional es una herramienta que debe permanecer en continuo desarrollo. Es importante insistir en que la metodología SimSahel sugiere mantener un ciclo de análisis, donde los patrones emergentes resultantes deben conducir a nuevas interrogantes que permitan refinar el modelo y representar con cada vez mayor fidelidad el fenómeno de estudio.

Así es posible pensar que el CeNAT puede continuar trabajando sobre el modelo organizacional computacional con el fin de incorporar nuevas variables o ampliar el alcance de las simulaciones a otras situaciones de interés de la organización, como puede ser por ejemplo, el funcionamiento de la gestión interna de sus proyectos o su vinculación con entes empresariales para la transferencia de los resultados de sus investigaciones, entre otras. Cabe también aclarar que el producto obtenido es dependiente de la situación analizada en su momento, es posible que las condiciones varíen, y que por ende sea necesario más adelante modificar en alguna forma el modelo organizacional computacional. También es importante considerar la posibilidad de extender o aplicar la herramienta obtenida en otros contextos organizacionales. Dicha opción abre nuevas puertas para indagar situaciones que, dada la especificidad del CeNAT, no hayan sido contempladas, y que en general sean factores decisivos para la generación de proyectos colaborativos de investigación. Claro está, el ámbito que se desee estudiar requiere igualmente de acceso a

una considerable cantidad de información y disponibilidad por parte de los miembros de la organización para participar del esfuerzo. Asimismo, cabe la posibilidad de incluir otro tipo de fuentes de datos que no fueron consideradas en el proyecto, como pueden ser las relaciones generadas en redes sociales virtuales y los datos de interacción que estas generan.

Finalmente, es importante resaltar que el proyecto realizado es, hasta donde se pudo constatar, el primer trabajo final de graduación realizado en esta materia en el país. Esta aproximación innovadora en nuestro contexto plantea a su vez retos importantes para su adopción en ámbitos institucionales más amplios, como pueden ser el gubernamental y la empresa privada, cuya práctica de toma de decisiones se puede ver beneficiada con aproximaciones de esta índole. El principal desafío, desde la experiencia acumulada, es gestar una comunidad de investigadores interdisciplinaria que permita incubar más proyectos en esta área. Incluso, de manera atrevida, es posible considerar los patrones emergentes resultantes del modelo organizacional computacional llevado a cabo en el CeNAT y en efecto insistir en que el aumento en la conectividad entre los posibles actores y la acumulación de experiencia pueden conducir a la generación de nuevos proyectos de esta naturaleza.

6 Bibliografía

- Bersini, H., 2012, UML for ABM, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol 1, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/1/9.html>
- Burger, M. J., & Buskens, V., 2009, Social context and network formation: An experimental study. *Social Networks*, Vol 31(1).
- Burton, M., DeSanctis, G. & Obel, B., 2006, *Organizational Design: A Step-by-Step-Approach*, Cambridge University Press, Nueva York, Estados Unidos.
- Carley, K.M & Newell, A., 1994, The nature of the social agent, *Journal of Mathematical Sociology*, Vol 19 (4).
- Carley, K.M. & Gasser, L., 2001, Computational Organization Theory en Weiss, G. (Ed.), *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*, MIT Press, Cambridge Massachusetts, Estados Unidos.
- Cecchini, A. & Trunfio, G.A., 2007, A Multiagent Model for Supporting Tourism Policy-Making by Market Simulations, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4487.
- Daft, R.L, *Teoría y diseño organizacional*, 2007, 9ª edición, Cengage Learning Editores, D.F, México.
- Davulcu, H., Kifer, M., Ramakrishnan, C.R. & Ramakrishnan, I.V., 1998, Logic Based Modeling and Analysis of Workflows, *Proceedings of the seventeenth ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART symposium on Principles of database systems*.
- Fortino, G., Garro, A. & Russo, W., 2006, From Modeling to Enactment of Distributed Workflows: An Agent-based Approach, *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Applied computing*.

- Genesereth, M. & Nilsson, N.J, 1987, *Logical Foundations of Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., California, Estados Unidos.
- Gilbert, N & Troitzsch, K.G, 2005, *Simulation for the Social Scientist*, 2da Edición, Open University Press, Berkshire, Inglaterra.
- Gilbert, N., 2008, *Agent-Based Models ser. Quantitative Applications in the Social Sciences 153*, Sage Publications, Inc., Londres, Inglaterra.
- Hara, N., Solomon, P., Kim, S. & Sonnenwald, D.H., 2003, An emerging view of scientific collaboration: Scientists' perspectives on collaboration and factors that impact collaboration, *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, Vol 54(10).
- Heath, B., Hill, R. & Ciarallo, F., 2009, A Survey of Agent-Based Modeling Practices, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol 12, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>.
- Huhns, M.N. & Stephens, L.M., 2001, Multiagent Systems and Societies of Agents en Weiss, G. (Ed.), *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*, MIT Press, Cambridge Massachussets, Estados Unidos.
- Knoke, D. & Yang, S, 2008, *Social Network Analysis ser. Quantitative Applications in the Social Sciences 154*, Sage Publications, Londres, Inglaterra.
- Lees, M., Logan, B. & Theodoropoulos G., 2007, Distributed Simulations of Agent Based Systems with HLA, *ACM Transactions on Modeling and Computation*, Vol 17.
- Marsden, P.V., 2005, Recent developments in network measurement en Carrington, P.J, Scott, J. & Wasserman, S. (Eds.) *Models and Methods in Social Network Analysis*, Cambridge University Press, Nueva York, Estados Unidos.
- Meena, H.K, Saha, I., Mondal. K.K & Prabhakar, T.V, 2005, An Approach to Workflow Modeling and Analysis, *Proceedings of the 2005 OOPSLA workshop on Eclipse technology eXchange*.

- North, M.J. & Macal, C.M., 2007, *Managing Business Complexity: Discovering Strategic Solutions with Agent-Based Modeling and Simulation*, Oxford University Press, Nueva York, Estados Unidos.
- O'Connor, T. & Wong, H.Y., 2006, *Emergent Properties*, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/properties-emergent/>
- Oprea, M., 2004, Applications of Multi-Agent Systems, *IFIP International Federation for Information Processing: Information Technology*, Vol. 157, Springer Boston, Estados Unidos.
- Owens, S., Scerri, P., Ginton, R., Yu, B. & Sycara, K., 2006, Synergistic integration of agent technologies for military simulation, *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*.
- Roche, B., Guégan, J.F. & Bousquet, F., 2008, Multi-agent systems in epidemiology: a first step for computational biology in the study of vector-borne disease transmission, *BMC Bioinformatics*, Vol 9, <http://www.biomedcentral.com/content/pdf/1471-2105-9-435.pdf>.
- Russell, S.J & Norvig, P., 1995, *Artificial Intelligence: a modern approach*, Prentice Hall, Inc., Nueva Jersey, Estados Unidos.
- Saqalli, M., Biolders, C., Gerard & Defourny, P., 2010, Simulating Rural Environmentally and Socio-Economically Constrained Multi-Activity and Multi-Decision Societies in a Low-Data Context: A Challenge through Empirical Agent-Based Modeling, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol 13, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/2/1.html>
- Shaw, A.P. & Pritchett, A.R., 2005, Agent-based Modeling and Socio-Technical Systems, en Rouse, W.B. & Boff, K.R. (Eds.), *Organizational Simulation*, John Wiley & Sons, Nueva Jersey, Estados Unidos.

- Sun, R., 2006, Prolegomena to Integrating Cognitive Modeling and Social Simulation, en Sun, R. (Ed.), *Cognition and Multi-Agent Interaction: From Cognitive Modeling to Social Simulation*, Cambridge University Press, Nueva Jersey, Estados Unidos.
- Troitzsch, K.G, 2009, Perspectives and Challenges of Agent-Based Simulation as a Tool for Economics and Other Social Sciences, *Proceedings of the 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009)*.
- Wasserman, S. & Faust, K., 1994, *Social Network Analysis: Methods and Applications*, Cambridge University Press, Nueva York, Estados Unidos.
- Watts, D.J. & Strogatz, S., 1998, Collective dynamics of 'small world' networks, *Nature*, Vol 393.
- Wooldridge, M., 2001, Intelligent Agents en Weiss, G. (Ed.), *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*, MIT Press, Cambridge Massachussetts, Estados Unidos.
- Zacarias, M., Pinto, S. & Tribolet J., 2007, Integrating Engineering, Cognitive and Social Approaches for a Comprehensive Modeling of Organizational Agents and Their Contexts, en B. Kokinov et al. (Eds.), *CONTEXT 2007, Lecture Notes on Artificial Intelligence*, Vol. 4635.
- Zagenczyk, T. J., Scott, K. D., Gibney, R., Murrell, A. J., & Thatcher, J. B., 2010, Social influence and perceived organizational support: A social networks analysis, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Vol 111(2).
- Zhang, Y., Coleman, P., Pellon, M. & Leezer, J., 2008, A Multi-Agent Simulation for Social Agents, *Proceedings of the 2008 Spring simulation multiconference*.

7 Anexos

7.1 Acrónimos

ARS: Análisis de Redes Sociales.

CeNAT: Centro Nacional de Alta Tecnología.

CONARE: Consejo Nacional de Rectores.

FunCENAT: Fundación Centro Nacional de Alta Tecnología.

GO: Gestión Organizacional.

MO: Modelo organizacional.

MOC: Modelo organizacional computacional.

RS: Redes sociales.

SMA: Sistemas multiagente.

SS: Simulación social.

7.2 Fórmulas de Análisis de Redes Sociales

Densidad de la red social:

La densidad D de la red social representada por un grafo no dirigido con L enlaces (aristas) entre sus actores (vértices) se define como:

$$D = \frac{L}{C_N^2}$$

donde $C_N^2 = \frac{N!}{2! \times (N-2)!}$ es el máximo número posible de enlaces entre N actores de la red.

En el caso de una red social representada por un grafo dirigido la densidad D se calcula de la siguiente manera:

$$D = \frac{L}{2 \times C_N^2}$$

Si los enlaces de la red constan de pesos, la densidad D deberá tomar en cuenta la sumatoria de pesos w de la siguiente forma:

$$D = \frac{\sum L_w}{C_N^2}$$

Igualmente, para el caso de una red social representada por un grafo dirigido la fórmula de la densidad D es la siguiente:

$$D = \frac{\sum L_w}{2 \times C^2 N}$$

Grado nodal de los actores:

El grado nodal $d(N_i)$ cuantifica el número de relaciones del i -ésimo actor de una red social y equivale al número de aristas que apuntan o surgen de dicho actor.

El grado nodal promedio se establece según la siguiente fórmula: $d_{prom} = \frac{\sum N_i}{N}$

Si la red social es representada mediante un grafo dirigido es posible distinguir un grado nodal interno y otro externo para cada actor, es decir, las aristas que apuntan hacia el actor se contabilizan para efectos del grado nodal interno y las aristas que salen del actor se cuentan a favor del grado nodal externo.

Grado de centralidad:

El grado de centralidad de un actor en la red se establece mediante la siguiente fórmula:

$$C_D(N_i) = \sum x_{ij} (i \neq j) \text{ para } j=1 \text{ hasta } g$$

es decir, la sumatoria de todas las aristas que inician en el nodo i hacia el resto de $g-1$ nodos. Con el objetivo de evitar la influencia del tamaño de la red en el valor del grado de centralidad, es recomendable normalizarlo de la siguiente manera:

$$C'_D = \frac{C_D(N_i)}{g-1}$$

Grado de cercanía

Esta medida se entiende como la inversa de la suma de las distancias geodésicas entre el actor i y el resto de $g-1$ actores, es decir:

$$C_c(N_i) = \frac{1}{\sum d(N_i, N_j)} \quad (i \neq j)$$

El valor normalizado se obtiene de la siguiente forma:

$$C'_c(N_i) = (g-1)(C_c(N_i))$$

Grado de mediación

El valor del grado de mediación de un actor en la red se obtiene de la siguiente manera:

$$C_B(N_i) = \sum_{j < k} \frac{g_{jk}(N_i)}{g_{jk}}$$

donde g_{jk} es el número de distancias geodésicas entre dos nodos j y k , y $g_{jk}(N_i)$ es la cantidad de caminos entre j y k que contienen el actor i .

Coficiente de agrupamiento

El coeficiente de agrupamiento de una red social representada por un grafo dirigido se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

donde n es el número de actores en la red y C_i el coeficiente de agrupamiento del i -ésimo

actor, calculado a su vez por la siguiente fórmula:

$$C_i = \frac{|e_{jk}|}{k_i(k_i - 1)}$$

donde e_{jk} contiene la cantidad de enlaces de un actor con otros actores vecinos y k_i es el grado nodal del actor k .

7.3 Generador de nombres aplicado en el CeNAT

Esfuerzos colaborativos de investigación en el CeNAT

El presente cuestionario pretende recolectar datos con el objetivo de determinar, desde la perspectiva de los investigadores del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), las variables determinantes para el desarrollo de esfuerzos colaborativos de investigación en dicha institución.

Parte 1: Datos personales

[01]Edad:

[02]Sexo:

Femenino ()

Masculino ()

[03]Mayor grado académico obtenido :

Bachillerato ()

Licenciatura ()

Maestría académica ()

Maestría profesional ()

Doctorado ()

Postdoctorado ()

[04]Laboratorio / Institución a la que pertenece:

[05]Tiempo laborado para la institución:

Un año o menos ()

De 1 a 3 años ()

De 3 a 5 años ()

Más de 5 años ()

[06]Años dedicados a la investigación:

[07]Jornada laboral actual:

Cuarto de tiempo ()

Medio tiempo ()

Tiempo completo ()

Más de tiempo completo ()

[08]Área científica de investigación:

Parte 2: Colaboración y financiamiento con otras instituciones

[01] Marque los programas o laboratorios del CeNAT con los que ha colaborado en algún proyecto de investigación durante los últimos dos años:

CNCA ()

LANOTEC ()

Observatorio Climático ()

PRIAS ()

Seguridad Alimentaria ()

Ninguno ()

[02] Indique las instituciones u organismos externos con los que ha participado en algún proyecto de investigación en los últimos dos años.

[03] Indique las tres principales fuentes de financiamiento de los proyectos colaborativos de investigación en los que ha participado durante los últimos dos años.

Parte 3: Factores que propician los proyectos colaborativos de investigación

[1]Valore, según una escala de puntuación de 1 a 10, el grado de importancia que asignaría a cada una de las siguientes características de un investigador, en caso de que su objetivo fuera iniciar un proyecto colaborativo de investigación.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Años de experiencia del investigador

Prestigio académico o profesional del investigador

Grado académico del investigador

Disponibilidad de tiempo del investigador

Que exista algún vínculo personal (amistad, compañerismo, etc.)

con el investigador

[2]Valore, según una escala de puntuación de 1 a 10, a partir de su experiencia, qué tan propicio es cada uno de los lugares presentados para propiciar el desarrollo de proyectos de investigación.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Conferencias / Congresos.

Talleres / Seminarios.

Reuniones informales.

Espacios virtuales: Redes Sociales, correo electrónico, foros, etc.

Parte 4: Factores de éxito de los proyectos colaborativos de investigación

[1]Indique, a partir de su experiencia, cuáles son los criterios que considera más adecuados para evaluar el éxito de un proyecto colaborativo de investigación (seleccione todos los que considere adecuados).

Número de publicaciones ()

Presentación pública de resultados ()

Evaluación académica o institucional ()

Otros:

[2]Marque, a partir de su experiencia, el factor más relevante para la consecución de fondos para un proyecto colaborativo de investigación:

Formulación del proyecto ()

Socios participantes del proyecto ()

Fuente que brinda el financiamiento ()

Otros:

Parte 5: Preguntas de opinión

[1]¿Considera importante la participación de investigadores de distintas disciplinas en los proyectos colaborativos de investigación? Justifique.

[2]¿Cuál es el obstáculo que más frecuentemente ha enfrentado durante un proyecto colaborativo de investigación?

[3]¿Qué medidas ha tomado durante un proyecto colaborativo de investigación para mitigar los obstáculos mencionados anteriormente?

[4]Indique las tres principales medidas que usted considera que su laboratorio / programa debe tomar para fomentar la colaboración con otros entes (académicos, empresariales, sociales, etc) en proyectos de investigación.

7.4 Métricas obtenidas del análisis de la red de colaboración del CeNAT

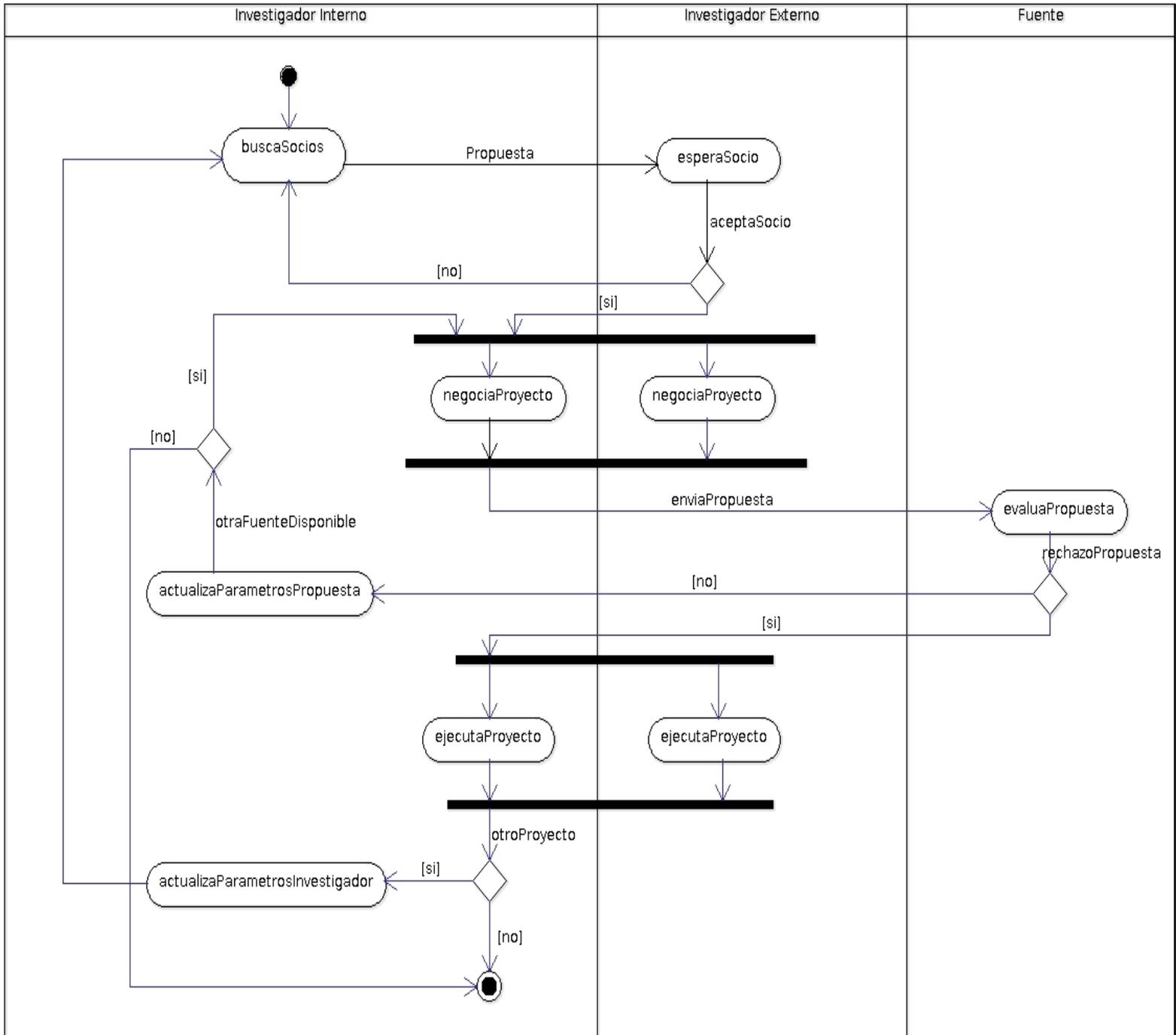
El uso de métodos de análisis de redes sociales sobre la red de colaboración del CeNAT permitió obtener las siguientes métricas:

- Densidad de la red: 0,14.
- Coeficiente de agrupamiento: 0,28.
- Grado nodal promedio: 3,09.
- Nodos con mayor grado nodal:
 - PRIAS
 - CONARE
 - ITCR
 - LANOTEC
 - UCR
 - UNA
 - CNCA
- Cantidad de comunidades (componentes) detectadas: 4.

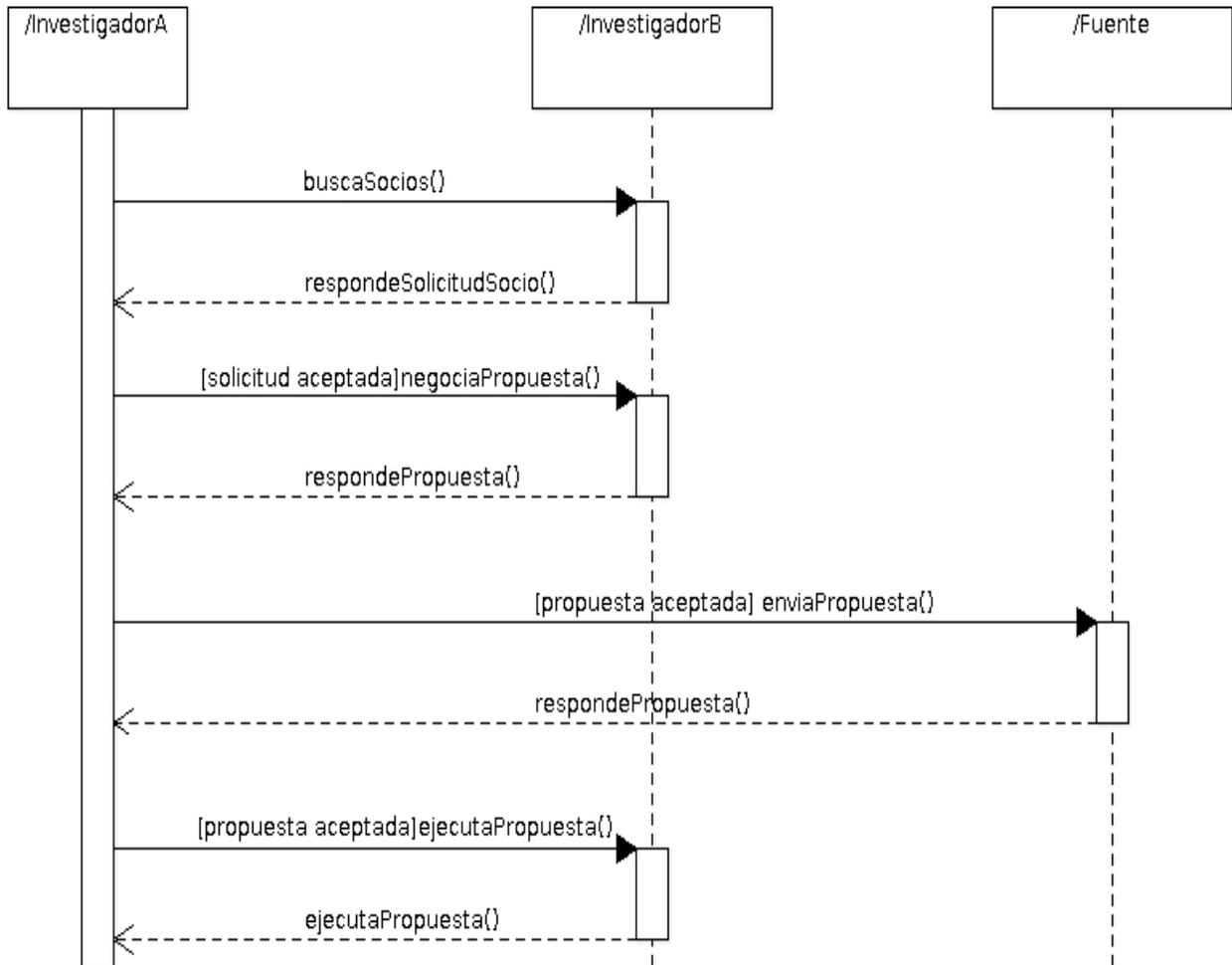
Cabe aclarar que todas las métricas fueron calculadas utilizando nuevamente la herramienta Gephi (<http://gephi.org/>).

7.5 Diagramas UML

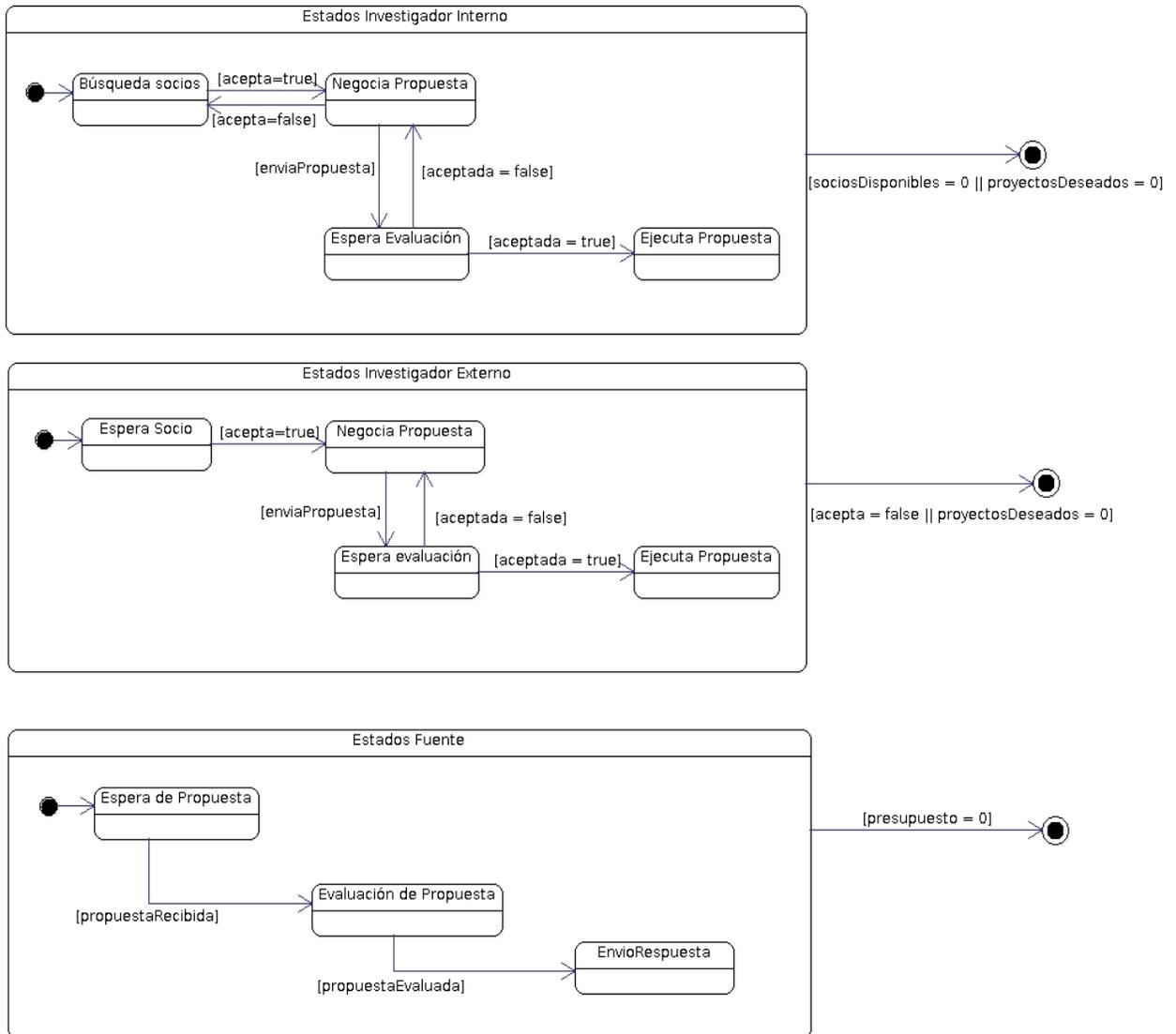
7.5.1 Diagrama de actividades



7.5.2 Diagrama de secuencia



7.5.3 Diagrama de estados



7.6 Valoración de herramientas para desarrollo de sistemas multiagente

La siguiente matriz muestra las herramientas y criterios utilizados para la elección del marco de trabajo para el desarrollo del sistema multiagente prototipo:

	NetLogo	Repast 3	Repast Symphony	AMP	JADE
Tiempo de existencia	Desde 2008	Desde 2006	Desde 2010	Desde 2010	Desde 2008
Cantidad de componentes adaptables	Pocos	Muchos	Suficientes	Pocos	Muy Pocos
Documentación	Poca	Mucha	Mucha	Poca	Mucha
Soporte	Bueno	Bueno	Bueno	Poco	Muy bueno

A partir de la valoración hecha con la matriz se denota que Repast 3 es la herramienta más adecuada para el desarrollo del prototipo del sistema multiagente.