



UNIVERSIDAD DE MURCIA
FACULTAD DE INFORMÁTICA

Metodología para la Creación de Modelos
Computacionales de Comportamiento Humano
aplicados a la Validación de Entornos Inteligentes

D. Francisco José Campuzano Adán
2015



UNIVERSIDAD DE MURCIA

Facultad de Informática

METODOLOGÍA PARA LA CREACIÓN DE MODELOS
COMPUTACIONALES DE COMPORTAMIENTO HUMANO
APLICADOS A LA VALIDACIÓN DE ENTORNOS INTELIGENTES

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

D. Francisco José Campuzano Adán

Supervisada por:

Dr. D. Juan Antonio Botía Blaya

Dr. D. Emilio Serrano Fernández

Murcia, Enero de 2015

A José Luis e Irene, los mejores maestros que he podido tener.

Agradecimientos

En primer lugar, tengo que dar las gracias a mis directores, principales culpables de que este trabajo saliese adelante. A Juan por haber depositado en mi la confianza necesaria desde aquel lejano 2010 para trabajar con un simulador, hasta que la cosa empezó a tomar cuerpo y parecía que la tesis podía ver la luz en algún momento. Además de ayudarme a ser doctor, me ha espabilado a base de bien. También tiene parte de la culpa Emilio, por su inestimable ayuda con correcciones y sugerencias en diferentes fases de la investigación, que me ha ayudado enormemente a sacar el trabajo adelante.

También es de agradecer la oportunidad que me ha brindado el Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones de colaborar en tantos proyectos de investigación, en los que pude aplicar sobre casos reales los procesos metodológicos de esta tesis doctoral, y a toda esa gente a la que he conocido y con la que he colaborado en los proyectos Cardinea (TSI-020302-2008-78), DIA++ (TRA2009 0141), MSI (TSI-020302-2010-171), Caronte (TSI-020302-2010-129), Caduceo (IPT-2011-1080-900000) y SOCIAAL (TIN2011-28335-C02-02).

Un enorme gracias también a todos los compañeros con los que he coincidido estos años en el laboratorio 2.6 y allegados, en especial a Mayte por su implicación en gran parte de los artículos que he publicado, y también a Pablo, Alberto, Vicky, los dos Andreses, los dos Jesuses, Pedro, Paco I, Marwan, Carmen, Ramón, Tony, Ángel, Dani, Fran, Perico, y si me dejo a alguno que me perdone, porque me habré equivocado y no volverá a ocurrir. Me llevo muchos amigos de este período, lo cual me llena de orgullo y satisfacción. Muchas gracias también a Eduardo, que me dio la primera oportunidad para empezar en el mundo de la investigación.

Saliendo de la órbita universitaria, el agradecimiento más grande es para Paqui, por haber estado a mi lado durante todo el Doctorado, demostrando su amor y apoyo continuo para que siguiese adelante incluso en los peores momentos. Si alguien me ha tenido que soportar en esos peores momentos y en las incertidumbres, ha sido ella. Mil gracias.

Este trabajo tampoco hubiera sido posible sin mi familia, fuente de apoyo constante e incondicional durante la carrera de fondo. Mis padres, que no han parado nunca de enseñarme cosas y ayudarme, y también mis hermanos, que han estado siempre presentes cuando los he necesitado. Mención especial a mi tía Catalina, que ya puede contarle a sus amigas del pueblo que su sobrino el pequeño es doctor.

Para terminar, como ya es tradición, doy las gracias a la Hermandad Robot, que con sus debates mañaneros y compartidos del Reader cualquier trabajo se hace mucho más llevadero.

Tabla de contenidos

Resumen	xiii
Abstract	xv
1 Guía del lector	1
2 Estado del arte	5
2.1 Validación de entornos inteligentes mediante simulación	5
2.2 Validación de entornos inteligentes mediante simulación social basada en agentes	7
2.3 Modelado de comportamientos humanos simulados	9
3 Objetivos, resultados y conclusiones	13
3.1 Motivación y objetivos	13
3.2 Resultados	16
3.2.1 Resultados científicos	17
3.2.2 Resultados de aplicación	23
3.3 Conclusiones y Trabajos futuros	28
3.3.1 Conclusiones	28
3.3.2 Trabajos futuros	30
4 Introducción a las publicaciones	33
4.1 La metodología CHROMUBE	33
4.1.1 Técnicas cronobiológicas	34
4.1.2 Creación y aplicación de los modelos	35
4.1.3 Validación	36
4.2 La metodología CHROMUBE: extensión de Aprendizaje Computacional	37
4.2.1 Técnicas de aprendizaje supervisado	38
4.2.2 Creación y aplicación de los modelos	39
4.2.3 Validación	40
4.3 La metodología CHROMUBE: obteniendo datos de expertos	40
4.3.1 Técnicas de Adquisición de Conocimiento	40
4.3.2 Creación y aplicación de los modelos	41
4.3.3 Validación	42

5	Publicaciones presentadas a compendio en la tesis	43
5.1	Chronobiology Applied to the Development of Human Behavior Computational Models	44
5.2	Generation of human computational models with machine learning . . .	47
5.3	Generation of human computational models with knowledge engineering	50
6	Impacto de publicaciones	53
6.1	Chronobiology Applied to the Development of Human Behavior Computational Models	54
6.2	Generation of human computational models with machine learning . . .	55
6.3	Generation of human computational models with knowledge engineering	56
7	Bibliografía relacionada	57
7.1	Referencias	57
7.2	Publicaciones propias	65

Lista de figuras

1.1	Resumen esquemático del contenido del documento de tesis.	2
3.1	Arquitectura de la plataforma de simulación <i>UbikSim</i>	18
3.2	Método preliminar para la validación de software inteligente presentado en [102]	20
3.3	Diseño de la arquitectura de un modelos HAI de interacciones entre HAB.	22
4.1	Actograma y plexograma que muestran la actividad de un sujeto durante 18 días	35

Resumen

Los entornos inteligentes son espacios físicos, en los cuales las tecnologías de la información y las comunicaciones se encuentran plenamente integradas. El objetivo de dichas tecnologías es el de mejorar la calidad de vida del usuario que habita el entorno, ya sea su domicilio, lugar de trabajo o incluso espacios públicos. Gracias a los últimos avances tecnológicos en hardware, este soporte al usuario se realiza de forma no intrusiva. Existen dispositivos de todo tipo capaces de obtener información de contexto del entorno en el que se encuentran y de los usuarios de dicho entorno. Esta información puede ser utilizada por servicios o aplicaciones software a los que se les denomina inteligentes, por ser capaces de aprender acerca del comportamiento del usuario y de ofrecerle servicios adaptados a cada situación.

El auge de estos entornos inteligentes en la sociedad actual ha provocado la proliferación de métodos para un desarrollo robusto de sus componentes software. La etapa de validación resulta imprescindible en todo proceso de calidad y su objetivo es comprobar que el software en cuestión cumple determinados requisitos para los que fue creado. El método más utilizado para validar software de entornos inteligentes son los laboratorios de pruebas, o *living labs*, que consisten en emular de forma física el entorno y los usuarios que van a interactuar con el sistema durante su despliegue final. De forma previa al *living lab*, o de forma alternativa si no es posible desplegar el laboratorio (por motivos económicos, situaciones de riesgo, elevada cantidad de usuarios, etcétera), se propone el uso de plataformas de simulación.

Mediante estas plataformas se pueden simular tanto los dispositivos hardware del entorno inteligente, como los comportamientos de los usuarios que utilizan el sistema. Esta tesis propone una metodología para crear y validar modelos computacionales de comportamiento humano (*Computational Models of Human Behaviour*, CMHB) orientados a la validación software de entornos inteligentes en plataformas de simulación.

Chronobiological Modelling of Human Behaviours (CHROMUBE) es una metodología iterativa que permite, a través de una serie de pasos, la creación, simulación y validación de CMHB con el nivel de detalle adecuado como para validar las aplicaciones y servicios para los que sean requeridos. Este nivel de detalle se puede obtener a partir de diversas fuentes de datos. Se proponen ramas alternativas para crear los modelos tanto a partir de datos de sensores como a partir de entrevistas con expertos. Con este fin, CHROMUBE aplica técnicas de varias disciplinas científicas, como son la Cronobiología, el Aprendizaje Computacional y la Ingeniería del Conocimiento.

Así, la principal contribución científica de esta tesis consiste en la definición

de una metodología para la creación y validación de modelos de usuario, aplicable a cualquier situación donde se requiera validar aplicaciones o servicios inteligentes mediante simulación. También se ha obtenido como resultado una plataforma de simulación que permite la integración de elementos reales con elementos simulados, y cuyo fin es utilizar los modelos de usuario simulados de CHROMUBE para validar software real en un entorno que emule al entorno inteligente real donde se pretende desplegar el software.

En el ámbito práctico, gracias a la aplicación de la metodología CHROMUBE en la plataforma de simulación, se ha conseguido reducir los tiempos y costes de implantación de diversos entornos inteligentes complejos donde la creación de *living labs* no era viable, como centros geriátricos y hospitales. También, en otros escenarios la simulación de CMHB ha sido útil para la detección de fallos del sistema previa a la etapa de *living lab*. Los CMHB resultantes han sido empleados por diversas empresas para simular nuevas condiciones de trabajo o funcionalidades del sistema imposibles de reproducir en el entorno real. La posibilidad de observación directa y análisis forenses de los resultados de dichas simulaciones también les ha proporcionado un valioso sistema de apoyo a la decisión.

Abstract

Intelligent environments are physical spaces where information and communication technology (ICT) becomes embedded into the spaces in which we live and work, even in public spaces. The main objective of these environments is supporting people in their daily lives. The enormous advances in hardware allow this support to be non-intrusive. There are all kind of smart devices able to obtain context-aware information from users and environment. This information can be processed by intelligent software and applications to learn about users' habits and to enhance their daily experiences by *Ambient Intelligence* (AmI) services.

Nowadays, the emergence of intelligent environments has caused the proliferation of different validation methods of their software components. Validation is a software life cycle stage that provides evidence that the software satisfies specified requirements. A typical approach to validate intelligent software is the use of *living labs*. These labs emulate the final environment where the system is going to be deployed, including users. The use of simulation platforms is proposed here during the earlier stages of the *living lab*, or as an alternative if the *living lab* creation is unfeasible, e.g. due to its high cost.

Simulation platforms allow simulating both the hardware devices of the intelligent environment and the users' behaviours. This PhD thesis proposes a methodology to create and validate *Computational Models of Human Behaviour* (CMHB). These models can be used in simulation platforms in order to validate AmI software systems. The proposed methodology, *Chronobiological Modelling of Human Behaviours* (CHROMUBE), is an iterative methodology that provides methodological processes for the creation, simulation and validation of CMHB. The complexity of these models is given by the complexity of the services or applications they are intended to validate. This information can be obtained from different sources. CHROMUBE proposes two main data sources: 1) sensor devices and 2) interviews with experts. The behaviour data obtained from these sources is conveniently analysed using different scientific disciplines, such as Chronobiology, Machine Learning and Knowledge Engineering.

Thus, the main contribution of this thesis is the definition of a methodology, which is applicable to any situation where software validation by simulation requires the use of realistic computational models of human beings, such as AmI systems and intelligent environments. Another significant contribution is the implementation of a simulation platform that enables the integration of real and simulated elements. In this manner, it is possible to integrate the software under test (SUT) into a simulated environment

that emulates the final scenario where the software is going to be deployed.

The application of CHROMUBE within the simulation platform has helped to reduce deploying times of a number of complex intelligent environments. In some of them, the deployment of a *living lab* was unfeasible, e.g. in an operating theater. In other cases, simulations were useful to detect system failures in the earlier stages of the deployment, which supposed a considerable cost saving. The resulting CMHBs have been also employed by various companies to validate new working situations or system functionalities which are impossible to test exhaustively in the final environment. The possibility of forensic analysis during the simulations has also provided them a valuable decision support system.

Capítulo 1

Guía del lector

Este primer capítulo define la estructura de este documento de tesis, presentado bajo la modalidad de tesis por compendio de publicaciones [1]. La elección de esta modalidad influye en que el documento deba incluir determinados apartados que complementen a las publicaciones presentadas, por ejemplo, un resumen global de los objetivos de la investigación y de las conclusiones finales, en el que se unifiquen los resultados parciales obtenidos en cada una de las publicaciones. También una introducción general, en la que se presenten los trabajos y se justifique la unidad científica de la tesis.

Para una mejor comprensión de la estructura del documento por parte del lector, se ha añadido este capítulo a modo de guía introductoria a los contenidos. Con el fin de complementar esta guía, la figura 1.1 contiene un resumen esquemático de la estructura del documento dividida en capítulos. Este esquema muestra todos los capítulos y secciones principales de la tesis, haciendo especial énfasis en detallar cuáles son los procesos metodológicos propuestos en cada una de las publicaciones del compendio. De esta forma se ofrece también una imagen unificada de la metodología que se presenta en esta tesis con todas sus extensiones.

El segundo capítulo consiste en una recopilación de trabajos relacionados cuyo fin es situar al lector en los ámbitos científicos por los que discurre la tesis. Aunque cada artículo del compendio contiene su propia sección de trabajos relacionados, éstas podrían ser demasiado específicas, por lo que se ha considerado de interés ofrecer una recopilación más general que abarque todo el contenido de la tesis. Para ello, el capítulo hace un repaso al estado del arte en el ámbito del modelado de comportamientos humanos, al de la simulación social multi-agente y a sus posibles aplicaciones en la asistencia en el desarrollo de sistemas, especialmente, de entornos inteligentes.

El tercer capítulo contiene el resumen global de la tesis establecido por normativa. Está dividido en tres secciones: motivación y objetivos, resultados y conclusiones. En el apartado de motivación y objetivos se ofrece una contextualización de la investigación realizada en esta tesis doctoral, y además se detallan los objetivos que se pretenden alcanzar durante la realización de la misma. En el apartado de resultados se explica cuáles de estos objetivos han sido alcanzados en cada una de las publicaciones y de qué modo. Además de los artículos presentados a compendio, también se incluye en el resumen los resultados obtenidos de todas las demás publicaciones realizadas durante el

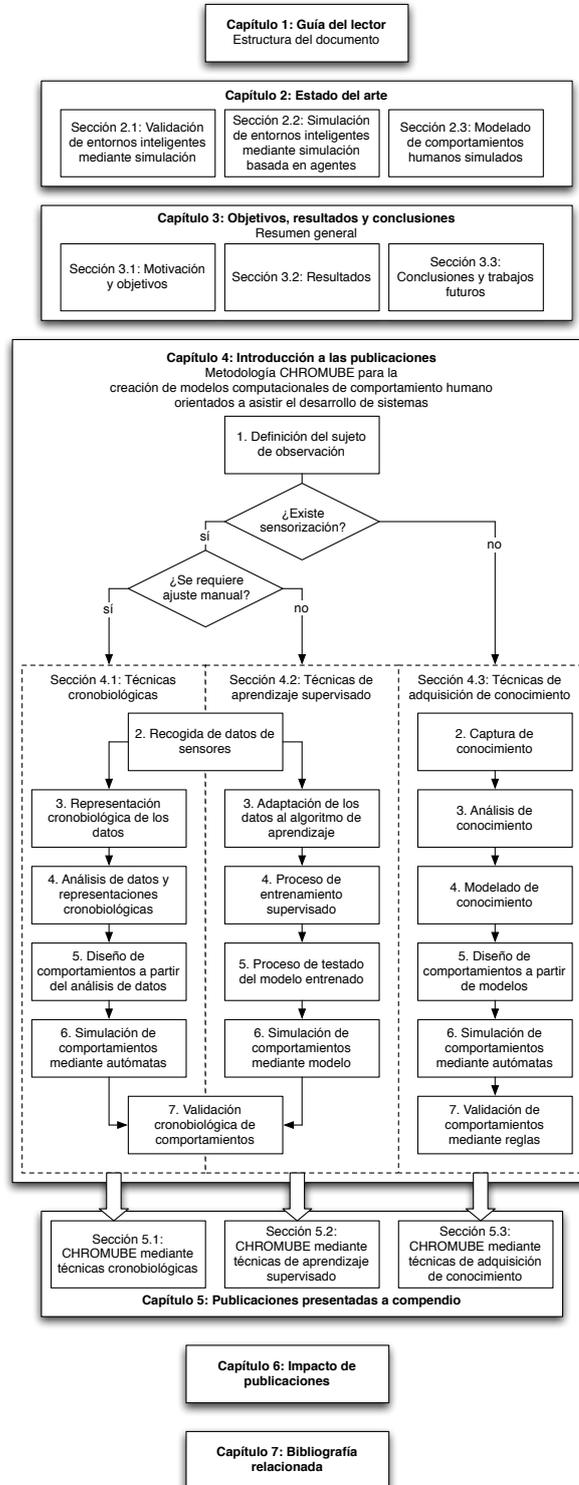


Figura 1.1: Resumen esquemático del contenido del documento de tesis.

desarrollo de la tesis y se explica con detalle el contexto de los proyectos de investigación donde se aplicaron y qué objetivos de la investigación trata de cubrir cada una de las publicaciones. Por cuestiones de normativa, no todas las publicaciones realizadas en el ámbito de esta tesis doctoral han podido ser presentadas a compendio, o bien por no ser el doctorando el autor principal o bien por haber sido publicadas en congresos que no cumplieran con los requisitos de la normativa. No obstante, las publicaciones que han sido presentadas constituyen el núcleo central de la investigación y atacan los objetivos más prioritarios de la tesis. Por último, el apartado de conclusiones unifica los resultados obtenidos y da una visión de conjunto de los mismos. También se establecen en este apartado los trabajos futuros que pueden derivar de la realización de esta tesis, así como primeras impresiones acerca de los pasos a seguir para avanzar aún más en la investigación.

El cuarto capítulo del documento es una introducción al contenido de las publicaciones científicas presentadas a compendio en la tesis doctoral. De acuerdo a la normativa [1], este capítulo debe presentar los trabajos publicados como una sola unidad científica. En él se exponen los principios y definiciones fundamentales del modelado de comportamientos humanos en el ámbito de la validación en entornos simulados, incluyendo la metodología *Chronobiological Modelling of Human Behaviors* (CHROMUBE) [96,98,100] desarrollada en la tesis doctoral y todas sus extensiones. En cada extensión se ofrecen algunos detalles sobre las disciplinas científicas que utilizan, los procesos de creación y validación que proponen y los posibles entornos donde se podrían aplicar. Cabe destacar que la información ofrecida en este capítulo tiene carácter introductorio, ya que se encuentra convenientemente ampliada en el interior de los artículos de investigación del capítulo quinto. En la figura 1.1, dentro del capítulo 4, se ofrece una vista esquemática de la metodología presentada a través de las publicaciones del compendio, aportando al lector una imagen unificada de la misma. También mediante flechas, relaciona qué aspectos de la metodología cubre cada una de las publicaciones del capítulo 5.

El quinto capítulo recopila las publicaciones científicas presentadas al compendio. Además del contenido de dichas publicaciones, y siguiendo la normativa vigente, también se incluye en este capítulo: la referencia completa de los trabajos, datos personales de todos los autores, la revista donde se han publicado y la aportación del doctorando a cada uno de los trabajos.

En el capítulo sexto se ofrece más información adicional sobre las publicaciones, como la relevancia en su campo y el factor de impacto de las revistas donde se publicaron los trabajos. Para ello se ha utilizado Web of Science [10], un servicio académico de indexación, donde se pueden realizar búsquedas por revista y por año, para conocer la relevancia y factor de impacto de la revista en el año de publicación.

Por último, el capítulo séptimo recopila la bibliografía referenciada en esta tesis, con la excepción del capítulo 5 donde cada artículo contiene su propia sección bibliográfica específica. También se listan todas las publicaciones del autor publicadas durante la tesis doctoral, incluyendo aquellas que no han podido ser presentadas a compendio pero que también forman parte de la unidad científica de esta investigación.

Capítulo 2

Estado del arte

Este capítulo pretende proporcionar al lector una visión general del estado actual de las tecnologías utilizadas con el fin de: 1) validar entornos inteligentes mediante plataformas de simulación y 2) crear modelos de usuario que permitan dicha validación. Además, se trata de ubicar esta tesis como una propuesta científica que aporta determinadas soluciones tecnológicas nuevas y/o mejora algunas de las ya existentes.

El capítulo está estructurado en tres secciones, y en cada una de ellas se hace un recorrido por una serie de trabajos relacionados destacando la aportación o mejora concreta que esta tesis doctoral presenta respecto a ellos. En primer lugar, la sección 2.1 introduce algunos trabajos relacionados con la validación general de entornos inteligentes mediante simulación. A continuación, la sección 2.2 profundiza en determinados trabajos que también validan este tipo de sistemas mediante simulación, pero más concretamente, haciendo uso del paradigma de simulación multi-agente, como en la tesis que nos ocupa. Por último, la sección 2.3 se encarga de analizar las diferentes tecnologías empleadas en la literatura con el fin de conseguir que los agentes de la simulación manifiesten comportamientos humanos de forma autónoma, lo que se conoce como modelos de usuario.

2.1 Validación de entornos inteligentes mediante simulación

Según el estándar 24765-2010 del *Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica* (IEEE) [49], que ofrece un vocabulario común aplicable a todos los trabajos de Ingeniería de Sistemas y del Software: “*La validación es un proceso del ciclo de vida de los sistemas software que provee evidencias objetivas de que se satisfacen los requisitos del sistema para un determinado uso o aplicación*”. En esta tesis, se pretenden validar determinados sistemas software que, por su naturaleza, o por las condiciones del entorno donde se van a desplegar, no ofrecen la posibilidad de realizar el proceso de validación con garantías en un entorno real. Estos sistemas se conocen como entornos inteligentes [88]. El concepto de entorno inteligente está en pleno proceso de maduración debido a que se trata de una tecnología reciente, por ejemplo, en el manifiesto de Augusto et al. [15]

se define como la composición de: 1) un entorno con dispositivos hardware desplegados, capaces de obtener información del entorno y procesarla, 2) un software inteligente cuyo fin es asistir a las personas en sus vidas diarias. La integración de estos dos elementos da lugar a un entorno inteligente que recoge información contextual de los usuarios y las condiciones físicas del entorno, con el fin de servir como entrada al software que procesará la información y actuará en consecuencia, proporcionando al usuario un servicio o aplicación determinados. Para la validación de este tipo de software cuyo funcionamiento es tan dependiente de las variaciones que se produzcan en su entorno, se suelen utilizar diferentes tipos de validación. Por un lado están los *living labs* [72], o entornos de laboratorio donde se reproducen físicamente las características del entorno real de despliegue. Cuando la recreación de dichos entornos tampoco es aplicable, o se pretenden reducir costes y/o tiempo, se aplica otro tipo de validación: la validación mediante simulación. Según el estándar IEEE 24765-2010: “*La simulación consiste en el uso de un sistema de procesamiento de datos para representar determinadas características y comportamientos de un sistema físico o abstracto*”. Aplicando esta definición al problema de la validación, lo que se pretende es crear un entorno virtual que represente determinadas características y comportamientos del entorno real de despliegue del sistema software, y probar en dicho entorno virtual el sistema con el fin de validar su funcionamiento. Dicho entorno virtual debe simular además de los espacios físicos donde se va a desplegar el sistema, al menos los componentes hardware que pudiesen existir, y los usuarios que van a interactuar con el sistema.

En la literatura relacionada pueden encontrarse diversos enfoques que trabajan con simulación para la validación de entornos inteligentes. Algunas de estas propuestas, como las de Gabel et al. [38] y Reynolds et al. [79], se centran en el modelado de los dispositivos hardware y sus comunicaciones que forman parte del entorno, dejando de lado otros detalles como pueden ser los usuarios. Una de las herramientas de simulación más conocidas a nivel internacional es *Ubiquitous Wireless Infrastructure Simulation Environment* (UBIWISE) [17]. UBIWISE es una plataforma de simulación, que está principalmente enfocada al modelado de dispositivos de sensorización y sus comunicaciones. La interfaz de usuario utiliza el motor gráfico del videojuego *Quake II* [47], que proporciona una vista 3D de todo el entorno físico. Esta interfaz permite observar cómo los usuarios simulados del entorno, controlados de forma manual, experimentan con los dispositivos hardware y cómo se comportan los servicios software que se pretenden validar. Múltiples usuarios pueden conectarse a la vez a un mismo servidor para recrear escenarios interactivos y validar los servicios que se instalen en dichos escenarios.

En la misma línea de vista en 3D del entorno por parte del usuario (en esta ocasión basada en el motor del videojuego *Half-Life* [91]) está *TATUS* [75], un simulador que experimenta con software adaptativo. Se reproduce el entorno simulado de despliegue, y se conecta con el *System Under Test* (SUT) que pretende validar. Dicho SUT puede ser adaptativo ya que recibe como entradas los datos recogidos por los sensores del entorno y, en función de cómo se comporten los usuarios simulados, puede cambiar su modo de funcionamiento. Otros factores ambientales como condiciones de la red o ruido ambiente pueden ser también modelados. En este caso, en cuanto al factor social

del simulador, los usuarios pueden comportarse de forma autónoma mediante scripts de secuencias de comportamientos, aunque la herramienta está sobre todo enfocada a que los usuarios controlen manualmente a las personas virtuales e interactúen con el SUT, como en el caso de *UBIWISE*. Se puede trabajar hasta con un máximo de 32 usuarios simultáneamente (por ejemplo, para validar un software de gestión de salas de reuniones inteligentes).

Otra herramienta en este ámbito es *UbiReal* [73]. Esta plataforma de simulación permite comprobar de forma intuitiva cómo se controlan dispositivos, dependiendo de las variaciones de contexto que se puedan producir. La principal contribución de *UbiReal* consiste en simular condiciones físicas, como humedad y temperatura e incluye un simulador de red, que permite la comunicación entre dispositivos virtuales y reales. Éste es un aspecto muy importante, ya que la integración de elementos reales dentro del simulador implica la obtención de simulaciones más realistas. El comportamiento de los usuarios simulados en este caso, debe ser preconfigurado mediante la definición previa de una serie de rutas y acciones predefinidas a realizar durante la simulación. Este modelo de comportamiento obliga al desarrollador a definir nuevas rutas y acciones cada vez que quiera lanzar una nueva simulación.

En los simuladores contemplados hasta el momento, los usuarios simulados o bien son controlados de forma manual, o bien son controlados mediante scripts que les proporcionan comportamientos muy simples. Lo que se pretende conseguir en esta tesis doctoral es una plataforma de simulación que proporcione al desarrollador unos modelos de usuario capaces de interactuar con su entorno y de manifestar comportamientos realistas de forma autónoma, sin necesidad de ser controlados manualmente. De esta forma, el proceso de validación del software se puede realizar de forma más exhaustiva, ejecutando grandes baterías de simulaciones que permitan comprobar de forma semiautomática si el SUT cumple los requisitos para los que fue creado en gran variedad de situaciones diferentes. Se parte por tanto de la hipótesis de que para la validación de determinados sistemas reales como puede el software de un entorno inteligente, puede no ser suficiente un enfoque de simulación como los que se han mencionado hasta ahora, donde no existe un modelo de usuario autónomo o éste es demasiado simple.

2.2 Validación de entornos inteligentes mediante simulación social basada en agentes

Como se ha descrito en la sección 2.1, en esta tesis se propone el modelo de usuario como un modelo fundamental a la hora de crear un entorno simulado para la validación de entornos inteligentes. Pero, ¿cómo se van a modelar los usuarios simulados y cómo se les va a dotar de mecanismos para que sean capaces de manifestar comportamientos autónomos y de interactuar entre ellos y con el propio sistema?

Existen otro tipo de simuladores en la literatura que se basan en la tecnología de agentes. Según el estándar IEEE 24765-2010 [49]: “Un agente es un ente en el que se delega para que realice determinadas acciones en representación de otra

entidad". En este caso, se pretende usar agentes en las simulaciones para que actúen en representación de los usuarios simulados, manifestando determinados comportamientos en determinadas situaciones de la misma forma que el usuario lo haría. Para llevar a cabo este tipo de modelado se utiliza el paradigma de simulación social basada en agentes (*Agent Based Social Simulation*, ABSS). Mediante este paradigma de simulación, es posible modelar por separado cada una de las entidades integrantes de la simulación, para a posteriori estudiar las sinergias que se producen entre ellas. El paradigma ABSS se viene utilizando comúnmente para el modelado complejo y dinámico de los comportamientos de los usuarios. Actualmente, hay una gran disponibilidad de plataformas para desarrollo de modelos para ABSS. En la Web del *Open Agent Based Modelling Consortium* [2] se listan un total de 35 plataformas que, entre otras, incluyen *MASON* [57], *Repast* [28] y *NetLogo* [93]. Actualmente estas tres plataformas son las más usadas. Tienen capacidad de simulación de un alto número de individuos, además de permitir el modelado de sensores, actuadores y otras entidades que presenten comportamientos autónomos. Todas estas plataformas constan de interfaces que permiten al usuario visualizar las simulaciones y modificar sus parámetros, por ejemplo, modificar la velocidad de la simulación, la forma de repartir turnos entre los agentes, la introducción de nuevos elementos, etcétera.

Un ejemplo de simulador social que utiliza agentes autónomos es el de Lozano et al. [56]. Estos autores tienen varios trabajos que simulan agentes inteligentes con el fin de estudiar, por ejemplo, el comportamiento de muchedumbres en casos de evacuación. Su simulador consta de una vista 2D y una vista 3D, donde han llegado a realizar grandes simulaciones de muchedumbres, por ejemplo, una ciudad con 8000 agentes. Liu et al. [54] propone una plataforma para la validación de aplicaciones móviles. Para ello utilizan un sistema multi-agente distribuido para modelar comportamientos de usuarios complejos y dinámicos. Por ejemplo, el movimiento de usuario puede estar simulado basado en políticas especificadas en el SUT como velocidades o trayectorias. En el trabajo de Narendra [70], se discuten los retos involucrados con el testado a gran escala de sistemas de computación ubicua, y proponen la simulación multi-agente como solución. En el trabajo de Drogoul et al. [32] se presenta un framework metodológico basado en modelos para diseñar simulaciones multi-agente. En Martin et al. [60] la simulación separa agentes, entorno y contexto. El modelo de contexto se define mediante variables de contexto y mapas. Otros simuladores tienen aplicaciones más específicas, por ejemplo, en Schreinemachers and Berger [81] se simulan agentes con el objetivo de estudiar las sinergias entre el hombre y su entorno en sistemas rurales, por ejemplo la comprobación del impacto que tienen las nuevas tecnologías aplicadas a la agricultura en entornos rurales. También existe un gran número de trabajos enfocados al modelado de comportamiento humano durante emergencias, [24, 55, 76, 78].

En esta tesis, se aporta una plataforma de simulación que sigue un enfoque basado en ABSS similar a las anteriores, pero que ha sido mejorada con el fin de: 1) ofrecer flexibilidad para la creación y visualización de entornos simulados variados, tanto de interiores como de exteriores; 2) integración de elementos reales dentro de la simulación; 3) soporte para los procesos metodológicos de creación y validación de usuarios que propone la tesis. Con este fin se ha trabajado utilizando el simulador *UbikSim*

desarrollado por la Universidad de Murcia [83]. Dicho simulador está basado en la plataforma *MASON*, y su cometido inicial era el de simular situaciones de emergencia y comprobar cómo las personas reaccionan ante ellas, la cantidad de pérdidas humanas que puede haber o cuánto tiempo se tardaría en evacuar un edificio. La primera versión de *UbikSim* permitía la simulación de incendios en un entorno cerrado de oficinas [84], y también era útil de cara a realizar una mejor distribución de los sensores de detección del edificio si tras los resultados de las simulaciones se comprueba que una determinada distribución no ofrece buenos resultados.

El trabajo que se ha realizado en el transcurso de esta tesis sobre el simulador *UbikSim* con el fin de conseguir los propósitos anteriormente descritos ha sido bastante amplio. En una primera fase, se adaptó el simulador a un entorno gráfico *Java3D*. Mediante la incorporación de un editor de mundos 3D, se hizo posible la creación de cualquier tipo de escenarios y no sólo edificios de oficinas. También es posible la inclusión de cualquier tipo de personas o dispositivos hardware que se estime conveniente simular en el catálogo de objetos que ofrece. De esta forma, el simulador de incendios original pasa a ser un simulador genérico donde se puede recrear todo tipo de entornos y situaciones. Además del editor, se añadió un visualizador que ofrece la posibilidad de visualizar las simulaciones generadas por *MASON* ya sea en 2D, en 3D o también en modo texto. Por último, se realizó la integración del simulador dentro de una arquitectura OSGi con varios componentes que permite la integración de elementos reales en el simulador, por ejemplo, los sistemas que se pretenden validar.

De esta forma, se ha conseguido una plataforma de simulación para la validación de sistemas que ha sido ampliamente utilizada a lo largo de esta tesis doctoral. La arquitectura de la plataforma de simulación se describe detalladamente en el artículo [99]. Desde entonces, han sido varias las tesis doctorales que han hecho uso de la herramienta *UbikSim* para recrear entornos simulados con propósitos de validación. En la Universidad de Murcia están las tesis de Muñoz [68], Serrano [82] y García-Valverde [39]. También en la Universidad Complutense de Madrid, con la tesis de Fernández-de-Alba [37]. Algunas publicaciones científicas realizadas en el ámbito de dichas tesis y que utilizan el simulador son las siguientes: Muñoz et al. [69], Serrano et al. [83, 84], García-Valverde et al. [40, 41, 102], Fernández-de-Alba et al. [35, 36].

2.3 Modelado de comportamientos humanos simulados

Para la validación en los entornos inteligentes simulados creados mediante *UbikSim* resulta imprescindible la definición de unos modelos de usuarios adecuados. La simulación de unos usuarios que permita validar sistemas con la misma eficacia que unos supuestos usuarios reales como los que se pueden tener en un *living lab*, es un caso ideal. Sin embargo, este supuesto caso ideal es todavía un reto que parece inalcanzable en el ámbito de la simulación. Evidentemente la simulación no ofrece predicciones perfectas del futuro, y menos sobre un modelo tan complejo como es el comportamiento humano. Aún así, esta técnica es de gran valor para validar todo tipo de sistemas complejos y

adaptativos, de modo que se considera suficiente que los modelos se comporten con un nivel de detalle acorde a las necesidades del sistema que se pretende validar.

Por lo general, podemos encontrar en la literatura muchos estudios que intentan simular el comportamiento humano y que se basan en detalles complejos como las emociones, los sentimientos y las personalidades. Los casos más populares son los motores de videojuegos, por ejemplo *Los Sims* [33]. También existen numerosos trabajos de investigación que tratan de interactuar con un usuario en base a sus expresiones faciales y sentimientos. La inclusión de emociones en un modelo de usuario permite crear personajes que actúen en función de sus sentimientos. En Bosse y Gerritsen [22] se propone una simulación basada en agentes con el fin de comparar diferentes estrategias de prevención de crímenes teniendo en cuenta las personalidades de los criminales implementadas. Otro ejemplo de modelos de usuario emocionales es el Proyecto *Oz* [3]. *Oz* es un sistema que permite crear un mundo animado en tiempo real con personajes implementados mediante agentes que muestran personalidades y emociones interactivas. Un caso similar es *Artificial Life Interactive Video Environment (ALIVE)* [59], un sistema que permite al usuario interactuar con un entorno virtual habitado por agentes autónomos que tienen: 1) un conjunto de necesidades y motivaciones internas; 2) un conjunto de sensores para percibir su entorno; 3) un repertorio de actividades a realizar y 4) un motor físico para moverse e interactuar con el entorno. Todo este tipo de simulaciones resultan bastante útiles y vistosas para la implementación de videojuegos, pero no es común su aplicación en la validación de entornos inteligentes mediante simulación social.

Otro tipo de arquitectura para el modelado de usuarios es la de agentes cognitivos. En Caballero et al. [25] se propone el uso de agentes cognitivos en simulaciones sociales. Este tipo de arquitectura provee a los agentes de determinadas capacidades cognitivas como razonamiento, toma de decisiones o planificación. Suelen ser modelos bastante complejos conceptualmente y pueden utilizar un lenguaje propio para especificar el conocimiento del agente o tecnologías muy específicas. Algunos ejemplos de estas arquitecturas son *Soar* [52] o *Act-R* [13]. Este tipo de modelos tan complejos no tienen el beneplácito de toda la comunidad científica, por ejemplo, Kennedy et al. [50] sugieren que estas arquitecturas cognitivas no son adecuadas para representar sociedades humanas debido a la enorme complejidad que pueden introducir en simulación de muchedumbres donde, realmente, sólo unos pocos agentes necesitan realizar acciones cognitivas. Muchos autores consideran que los comportamientos cognitivos y sociales deben estar en niveles diferentes de abstracción ya que los comportamientos sociales emergen de los cognitivos. Por esta vía se han creado nuevas tecnologías que presentan diferentes capas de abstracción para los comportamientos sociales y los cognitivos, como son los agentes *Belief, Desire, Intention (BDI)*. Según Sun [90], los modelos BDI son diferentes de los modelos cognitivos ya que se basan más en teorías psicológicas y evidencias experimentales, muy útiles para representar un modelo mixto socio-cognitivo. Un ejemplo de BDI se muestra en Huiliang y Ying [46]. Esta arquitectura equipa a los agentes BDI con la habilidad de priorizar sus deliberaciones e intenciones. En el ámbito de la validación de servicios, la complejidad que incorpora este tipo de modelos puede llegar a resultar innecesaria si los sistemas a validar no implican componentes

cognitivos complejos.

La implementación del comportamiento de agentes sin componentes emocionales ni necesidad de razonamiento complejo se ha abordado ampliamente en la literatura científica, si bien por lo general no van más allá de describir la implementación de los mismos. Existen arquitecturas muy variadas que normalmente, el desarrollador crea en función de las necesidades de sus modelos. En esta línea, Arthur et al. [14] desarrollan agentes mediante algoritmos de decisión parametrizados. Estos algoritmos se escogen y se calibran con la intención de que los agentes se comporten como un sujeto real observado en el mismo contexto. Anastassakis et al. [12] proponen que cada carácter se provea de un *Sistema Basado en Conocimiento* (SBC) [30] simple. Este método es una implementación flexible que permite al sujeto simulado ir aprendiendo de forma continua, aunque tiene el inconveniente de que definir una base de conocimiento puede llegar a ser un problema complejo. Noser et al. [74] también usan un sistema de razonamiento. Según Chittaro y Serra [27] las secuencias de comportamiento de los usuarios se modelan mediante Máquinas Probabilistas de Estado Finito [92], estos autómatas permiten representar qué acciones o comportamientos está realizando el usuario en cada momento. La inclusión de comportamientos probabilistas implica que nunca se puedan predecir con total confianza cómo reaccionará el usuario a determinados estímulos.

La diferencia principal entre todos estos trabajos y esta tesis, es que, más allá de definir una implementación de comportamientos humanos, esta tesis también proporciona los procesos metodológicos necesarios para asistir a todo el proceso de definición, creación y validación de los comportamientos. Teniendo en cuenta las limitaciones existentes en el campo del modelado de seres humanos, y siendo conscientes de que no es posible modelar un usuario perfecto, lo que la metodología *Chronobiology for Modeling Human Behavior* (CHROMUBE) intenta conseguir son modelos de comportamiento humano enfocados a un ámbito concreto: la validación software de entornos inteligentes con sociedades artificiales. Dependiendo del entorno en cuestión, se van a requerir modelos de simulación lo más realista posible pero sólo acerca de determinados aspectos.

Ejemplo 1. Se pretende validar un sistema software que detecta caídas en una casa a partir de unos datos de comportamiento del usuario que habita la casa. El entorno inteligente donde se va a utilizar el software dispone de unos sensores de presencia instalados en cada una de las estancias de la casa, y el software se basa en un algoritmo que detecta, a partir de los datos de los sensores, si el usuario pasa demasiado tiempo en una habitación. ¿Necesita el modelo de simulación en este caso comportamientos específicos como expresiones faciales o manifestar sus sentimientos? Parece evidente que no. Como la meta es probar el software de detección de caídas y validar que funciona correctamente, lo que se necesita es un modelo de simulación que se desplace por la casa tal como lo haría una persona real. Es decir, sólo se necesita modelar al mismo nivel de abstracción que los dispositivos sensores del entorno son capaces de detectar. No importa si la persona está triste o alegre en determinado momento, sino su localización. Y cuánto tiempo ha pasado en esa localización. Esta información de contexto se le va

a pasar como entrada al algoritmo a validar y, en función de sus respuestas, se da por válido su funcionamiento o no.

El modelo de usuario presentado en esta tesis es un modelo teórico que pretende describir a los usuarios del sistema, sus comportamientos y sus interacciones con el entorno físico u otros usuarios, siempre en función de las necesidades del sistema a validar. A lo largo del desarrollo de esta tesis se han ido generando modelos de comportamiento de usuario con los procesos metodológicos de CHROMUBE, y aplicándolos de forma práctica a la validación de servicios en el ámbito de diversos proyectos de investigación. Como se verá en el siguiente capítulo, estos proyectos de investigación han sido de vital importancia, al proveer al doctorando de unos casos de uso reales donde aplicar de forma práctica los resultados de la investigación. Todos los resultados de investigación alcanzados han permitido cubrir las necesidades reales que tenían determinadas empresas para probar y validar sus aplicaciones mediante el uso de la simulación.

Capítulo 3

Objetivos, resultados y conclusiones

En este capítulo se ofrece un resumen global del trabajo realizado en la tesis doctoral, dividido en tres secciones: la sección 3.1 plantea cuál es la motivación del doctorando para la realización de la tesis y los objetivos a conseguir durante la investigación. La sección 3.2 resume los resultados parciales obtenidos en cada uno de los trabajos y su aplicación en diversos casos prácticos reales. Por último, la sección 3.3 unifica dichos resultados, obtiene conclusiones y propone algunos retos futuros derivados de esta tesis.

3.1 Motivación y objetivos

La continua evolución de las tecnologías de la información y el conocimiento que está experimentando el mundo actual, tiene como consecuencia la presencia cada vez mayor de sistemas computacionales complejos en nuestro entorno. Estos sistemas, como consecuencia de un determinado control de calidad, deben pasar por diferentes etapas a lo largo de su ciclo de vida. Las etapas que se encargan de comprobar la calidad final del software son las de verificación y validación. La verificación es el proceso de evaluación de un sistema o componente software con el fin de determinar si funciona correctamente [48, 49], mientras que la validación es el proceso de evaluación de un sistema o componente software durante o al final de su desarrollo cuyo fin es determinar si se satisfacen determinados requisitos [48, 49]. En otras palabras, la validación de un sistema permite comprobar que se comporta tal y como se esperaba en la fase de diseño. El proceso a realizar durante esta etapa es tan complejo o más que el de verificación y existen determinados sistemas que, por su naturaleza, son difíciles de validar. Un claro ejemplo de este tipo de sistemas son los entornos inteligentes, que como todo sistema deben ser testados, verificados y validados antes de su despliegue en un entorno real. Cada vez son más las casas, edificios, exteriores e incluso ciudades enteras en las que se implantan este tipo de sistemas. Por lo general, consisten en entornos tecnológicos compuestos por componentes hardware y software. Estos entornos son capaces de interactuar de forma autónoma con los usuarios que los habitan, y su objetivo puede ser desde la mejora de la calidad de vida de los usuarios hasta la mera obtención de datos estadísticos. Sus componentes hardware desplegados en el

entorno, por lo general de manera no invasiva para el usuario, se encargan de recopilar información acerca del entorno y de los usuarios. Dicha información, denominada en la literatura como información de contexto [31], se utiliza como entrada para uno o varios componentes software encargados de tratar y analizar dicha información, con el fin de producir como salida un determinado servicio o aplicación acorde al contexto actual. Por lo general, a este software se le denomina inteligente porque puede ser capaz de aprender por sí mismo acerca de los usuarios a través de la información de contexto recopilada, y ofrecer determinados servicios en función de las necesidades que tenga el usuario en cada momento. El proceso de validación de este tipo de software no es una tarea fácil, debido a la gran variedad de escenarios y comportamientos cambiantes que se les pueden presentar.

Uno de los enfoques que más se han utilizado en la validación de software de entornos inteligentes ha sido el uso de *living labs*. Un *living lab* es una metodología centrada en el usuario para validar y refinar soluciones software complejas, reproduciendo de la forma más fidedigna posible el que será su entorno final [72]. Para ello se utiliza una infraestructura de laboratorio que permite a los desarrolladores emular los espacios físicos donde se pretende desplegar el sistema final, como casas o edificios, y además los dispositivos hardware que dicho espacio debe integrar. Una vez implantado el entorno de pruebas, se procede a validar el software pasándole como entrada la información de contexto que se va generando en el *living lab* y comprobando que el sistema se comporta de acuerdo a los requisitos establecidos en la fase de diseño.

Algunos ejemplos de *living lab* son los proyectos *AwareHome* [51] y *Adaptive House* [67]. La validación mediante *living labs* es siempre deseable, aunque el coste económico de desplegar estos laboratorios los hacen prohibitivos para muchas organizaciones. Además, pueden ser inviables debido al número de usuarios involucrados o por tratar con escenarios que presentan riesgos para los seres humanos. Finalmente, los errores del sistema descubiertos tras desplegar un *living lab* tienen una reparación mucho más costosa que si se hubiesen descubierto en fases anteriores. Todo esto motiva la investigación de técnicas alternativas para validar sistemas en espacios inteligentes, siendo la simulación la más destacada.

La simulación permite imitar problemas reales a través de modelos de comportamiento sobre un período de tiempo [16], y está considerada como una importante herramienta de ayuda a la toma de decisiones en la industria desde los años sesenta [87]. La simulación no tiene por qué ser vista únicamente como un proceso alternativo al de los *living labs*, sino también como una fase previa que permite realizar una mejor configuración del *living lab*, así como descubrir y solucionar fallos en el sistema mucho antes, y por tanto, con menor costo [62]. La contribución científica que se pretende realizar con esta tesis es la definición de una serie de modelos, métodos y herramientas para validar sistemas inteligentes mediante el uso de la simulación social basada en agentes. La simulación social basada en agentes (*Agent Based Social Simulation*, ABSS) es un paradigma de simulación enfocado a la simulación de entidades autónomas, cuyo fin es estudiar las interacciones y sinergias que se producen entre ellas [42].

En estas simulaciones, el elemento más importante y complejo son los agentes que representan a los usuarios. Estos agentes deben estar provistos de comportamientos

realistas, que permitan mejorar la fiabilidad de las simulaciones. Esta tesis doctoral define unos procesos metodológicos para la creación y validación de modelos realistas de comportamiento humano (*Computational Models of Human Behaviour*, CMHB), que pueden ser incorporados a los agentes durante la simulación. Dada la complejidad del problema de modelar el comportamiento humano, no se pretende en esta tesis conseguir unos CMHB perfectos, sino unos CMHB con el nivel de detalle adecuado como para validar las aplicaciones y servicios para los que sean requeridos. Por tanto, el nivel de complejidad en cada caso vendrá dado por el nivel de realismo que requieran dichos modelos. Y este nivel de realismo vendrá determinado por las características de los sistemas que se pretenden validar.

Ejemplo 2. Se pretende validar un sistema de localización en interiores para ancianos que viven solos. La infraestructura hardware de dicho sistema consiste en unos sensores de movimiento por infrarrojos desplegados en la casa del anciano, uno por habitación. Sea H el conjunto de n habitaciones de la casa tal que $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ y sea $S(t)$ el conjunto de valores que ofrecen los sensores desplegados en el instante de tiempo t tal que $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$, $s_i(t) = \begin{cases} 1 & \text{si detecta movimiento en } h_i \\ 0 & \text{si no detecta movimiento en } h_i \end{cases}$

Se dispone por tanto de un conjunto de sensores capaces de detectar si existe o no movimiento en cada una de las habitaciones de la casa a lo largo del tiempo. La única información que se puede obtener del usuario monitorizado es su nivel de actividad a lo largo del día y cómo se desplaza a través de las habitaciones. En este caso, el modelo simulado o CMHB del anciano que se utilice para validar el servicio mediante simulaciones debe implementarse pretendiendo que, en un caso ideal: 1) demuestre los mismos niveles de actividad basados en movimiento que el usuario real, 2) se desplace por las habitaciones de la casa de la misma forma que el usuario real.

Otros detalles más complejos del comportamiento humano, como el estado de ánimo del anciano, se consideran innecesarios de modelar aquí, ya que lo que se requiere validar es un servicio cuya percepción no va más allá del nivel de actividad y movimiento del sujeto por la casa. El enfoque adoptado en esta tesis opta por prescindir de determinados comportamientos que se consideran irrelevantes para el problema en cuestión, y se centra en el modelado de aquellos aspectos del comportamiento humano que repercuten directamente sobre el sistema a validar. El motivo es que la inclusión de comportamientos adicionales en el CMHB complicaría innecesariamente la verificación y validación de los CMHB.

Este ejemplo ilustra cómo la existencia de un despliegue sensorial puede determinar el nivel de detalle de los modelos, sin embargo, ¿qué sucedería en el caso de que se pretenda validar una aplicación o sistema carente de dispositivos de sensorización? ¿Y en el caso de que no fuese posible hacer un despliegue previo de sensores para la recogida de información? El nivel de detalle de los modelos debe venir dado en este caso por otras fuentes. La metodología CHROMUBE debe ofrecer también soluciones a este tipo de casos, que pueden darse con frecuencia, y por tanto debe tenerse en cuenta a la hora de establecer los objetivos de la investigación.

Toda esta problemática deriva en la principal motivación de esta tesis doctoral: la obtención de una metodología que permita la creación y validación de comportamientos humanos realistas a partir de fuentes variadas de información. Los modelos de comportamiento obtenidos deben servir como base para la validación de diferentes tipos de sistemas reales dentro de entornos simulados. Para que la validación sea realista, estos entornos simulados deberán permitir: 1) la simulación de un elevado número de usuarios, 2) la interacción de los usuarios simulados entre ellos y con su entorno simulado y 3) la interacción entre los usuarios simulados y el sistema o aplicación real a validar dentro de este mundo simulado. Para la consecución de este último punto, resulta imprescindible la integración de elementos reales dentro del mundo simulado. Principalmente, el software del entorno inteligente que se pretende validar.

A continuación, se establecen una serie de objetivos específicos. Mediante su consecución se pretende satisfacer la motivación de la tesis. Dichos objetivos son los siguientes:

- O_1 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano a partir de datos obtenidos de sensores.
- O_2 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_1 .
- O_3 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano cuando no existe una infraestructura de sensores previa.
- O_4 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_3 .
- O_5 : Definición de una arquitectura de simulación escalable válida para simular desde un pequeño grupo de personas hasta grandes muchedumbres.
- O_6 : Exploración de la integración de realidad en el simulador con el fin de obtener simulaciones que combinen elementos reales con elementos simulados.
- O_7 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano que permitan una reproducción realista de sus interacciones.
- O_8 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_7 .

3.2 Resultados

Se exponen a continuación los resultados conseguidos durante la elaboración de esta tesis. Para clarificar la descripción de los resultados obtenidos en el ámbito de la tesis se ha decidido dividir esta sección en subsecciones: la sección 3.2.1 presenta los resultados

obtenidos en el ámbito científico, mientras que la sección 3.2.2 recopila los resultados obtenidos tras aplicar los modelos teóricos de la tesis en diversos escenarios prácticos reales.

3.2.1 Resultados científicos

El primer resultado científico destacado de la tesis consiste en la creación de una arquitectura software basada en el estándar *IEEE 1516 High Level Architecture* (HLA) [29]. Mediante esta arquitectura se integra el simulador social *UbikSim* [23, 83] previamente desarrollado en el Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones de la Universidad de Murcia, junto a otras herramientas que proveen servicios de coordinación de operaciones e intercambio de datos a tiempo real.

La interacción de componentes en la arquitectura mencionada está basada en el estándar *Open Services Gateway Initiative* (OSGi) [11]. Dicho estándar es modular y dinámico, y es muy utilizado en el ámbito de los entornos inteligentes y las aplicaciones sensibles al contexto [26, 43]. La figura 3.1 muestra el esquema de la arquitectura dividida en módulos de OSGi. En el lado del cliente hay dos módulos. El primero consiste en un editor de entornos de simulación y de sus restricciones, que permite crear instancias de personas y dispositivos hardware a simular. El otro módulo consiste en un visor 3D cuyo objetivo es hacer una validación visual de las simulaciones y del adecuado funcionamiento de los servicios y de los comportamientos humanos. En el lado del servidor, usando como entrada el entorno de simulación definido por el cliente, se define un modelo de simulación social basada en agentes (*Agent Based Social Simulation*, ABSS) que será simulado, e irá generando un registro que permite hacer análisis forenses complejos mediante un analizador. Este analizador comprueba que se cumplen las restricciones definidas por el cliente, por ejemplo, que los sistemas a validar estén funcionando como es debido. La arquitectura se completa con un módulo que actúa como middleware [19] y el propio *System Under Test* (SUT). Como middleware se propone la herramienta *Open Context Platform* (OCP) [71], cuya labor es recoger información contextual del simulador, para alimentar al servicio o sistema que se pretende validar (SUT). El SUT interactúa con el entorno simulado tal como lo haría el software real.

Ejemplo 3. Se pretende validar mediante simulación un sistema de detección de caídas para ancianos que viven solos en su casa. El sistema está configurado para emitir alertas en caso de detectar que el usuario pasa demasiado tiempo sin moverse en una habitación. Para ello, dispone de una infraestructura de n sensores desplegados en el entorno simulado de la casa, y que recogen información acerca del comportamiento del humano simulado que vive en esa casa a lo largo del tiempo. En cada instante de tiempo t , dicha información consiste en un conjunto S de valores de salida de los sensores tal que $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$.

El middleware OCP es capaz de consumir en tiempo real esta información contextual de los sensores simulados, que actúan como productores de información. El SUT es un consumidor de información y recibe de OCP la información contextual del

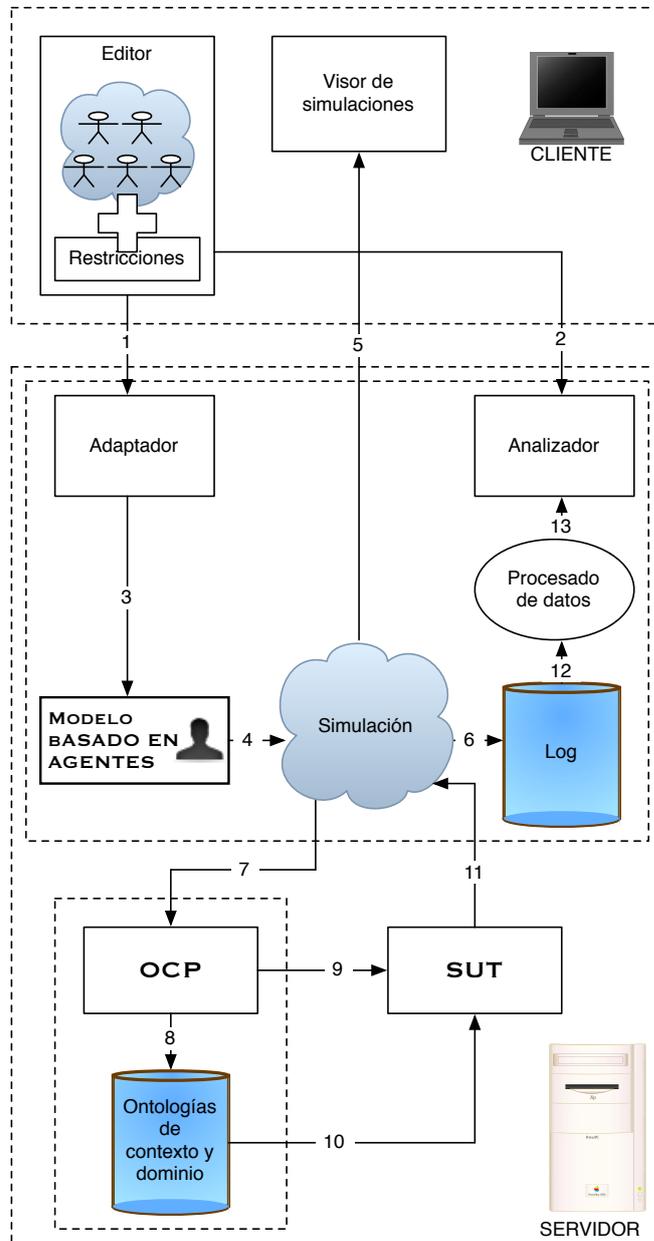


Figura 3.1: Arquitectura de la plataforma de simulación *UbikSim*

comportamiento del humano simulado que a su vez OCP ha recibido de los sensores. Si se diera el caso de que el SUT interpretase de esa información contextual que el usuario ha pasado demasiado tiempo en una habitación, emitiría una alarma en el entorno simulado que le llegaría a quien se supone la debe recibir (cuidadores, familiares, etcétera).

La idea esencial tras esta plataforma de simulación es que el SUT sea el software

real a validar, en el caso del ejemplo anterior el SUT es el servicio que lanza alertas si detecta una anomalía en la información del usuario recogida por los sensores. Este software es el mismo que finalmente se implantaría en el entorno inteligente real o *living lab* una vez validado, ya que la interacción con el entorno y usuarios no depende directamente del software sino de la capa de contexto. De esta forma se puede decir que se integra un sistema software real dentro de un mundo simulado. Esta integración es la que permite validar el software mediante usuarios simulados.

Con la consecución de esta arquitectura de simulación que integra software real con entornos inteligentes simulados se han alcanzado hasta dos objetivos de la tesis:

- O_5 : Definición de una arquitectura de simulación escalable válida para simular desde un pequeño grupo de personas hasta grandes muchedumbres.
- O_6 : Exploración de la integración de realidad en el simulador con el fin de obtener simulaciones que combinen elementos reales con elementos simulados.

Una vez se dispone de las herramientas necesarias para la validación de software en entornos simulados, la primera aproximación del doctorando a la creación de CMHB realistas se produce en el artículo científico de Garcia-Valverde et al. [102]. En este artículo se presentan métodos generales para la validación de servicios inteligentes mediante simulaciones, descritos en la figura 3.2. Los autores ponen de manifiesto la importancia y complejidad de uno de los modelos imprescindibles que forman parte de la propuesta, el modelo de usuario. De esta forma, surge la necesidad de una nueva metodología para la creación de modelos de usuario y su validación rigurosa, que pueda ser aplicada en cualquier entorno con garantías de calidad y no solamente en un entorno reducido con sensores como se presentaba en este trabajo.

Con este fin, se empieza a trabajar en el desarrollo de una metodología que permita la creación de CMHB y además, su posterior validación. El artículo de la tesis contenido en la sección 5.1 obtiene como resultado científico la definición de una nueva metodología para la creación y validación de comportamientos humanos, aplicando técnicas de Cronobiología sobre los datos reales de comportamiento humano obtenidos de sensores. La Cronobiología es una disciplina científica que estudia cómo el paso del tiempo afecta a los organismos vivos [58]. La metodología que la utiliza para modelar comportamientos humanos simulados se denomina *Chronobiological Modelling of Human BEhaviors* (CHROMUBE). Esta primera propuesta de CHROMUBE cubre los siguientes objetivos de la tesis:

- O_1 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano a partir de datos obtenidos de sensores.
- O_2 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_1 .

El propósito del artículo incluido en la sección 5.2 es el de mejorar la metodología propuesta en 5.1, ya que, si bien dicha metodología consigue obtener unos CMHB suficientemente realistas para los propósitos de validación de software, el proceso de

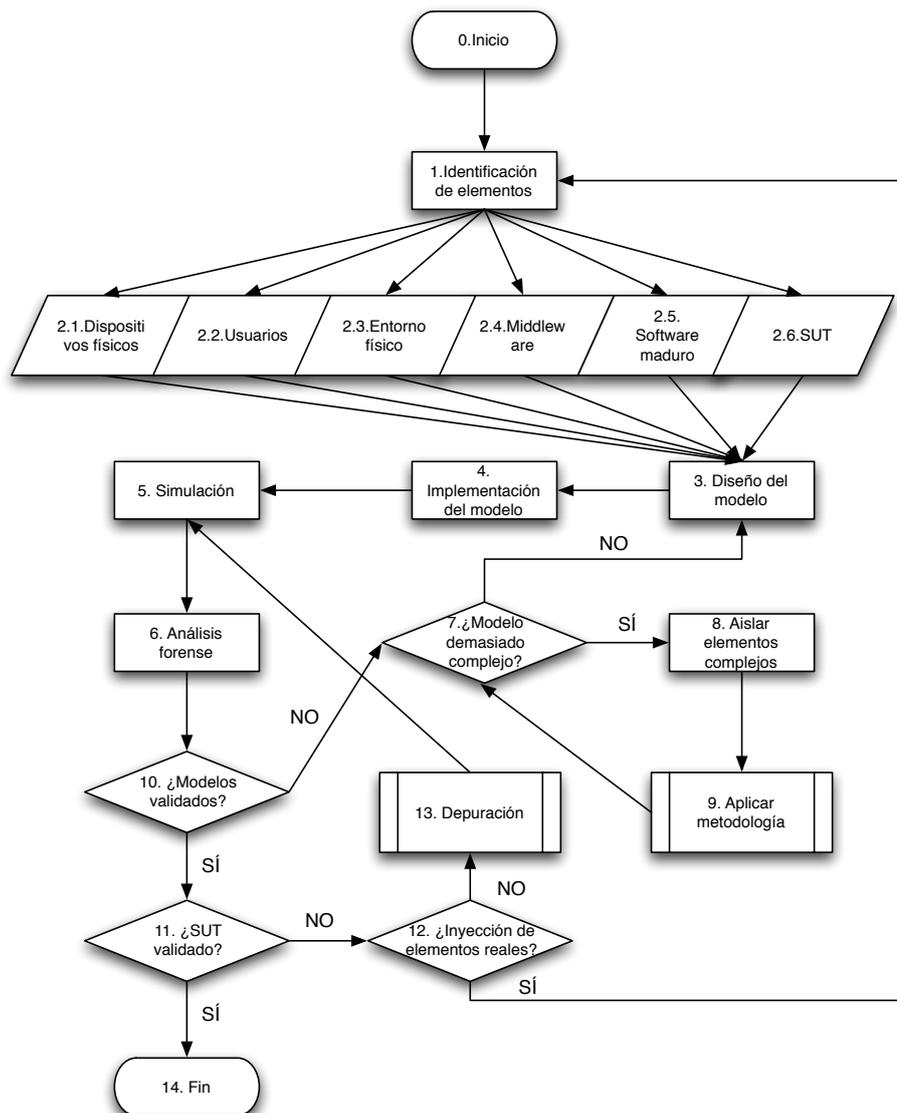


Figura 3.2: Método preliminar para la validación de software inteligente presentado en [102]

creación de los modelos requiere todavía de una fuerte interacción del desarrollador en las fases previas. Cada comportamiento se define como un conjunto de parámetros que deben ser ajustados de forma manual en función de los resultados obtenidos tras aplicar diversos tests estadísticos y cronobiológicos. Esta solución permite que el desarrollador tenga un mayor control sobre la creación de los comportamientos, sin embargo, la cantidad de estudios y configuraciones a realizar puede ser demasiada elevada en casos prácticos donde fuese necesario simular los comportamientos de un elevado número de personas. Por ello, en esta tesis se plantea la automatización de distintas fases del modelado de humanos y de su validación mediante técnicas estadísticas.

A fin de refinar la metodología y ofrecer alternativas válidas tanto para los casos donde el desarrollador quiera tener un mayor control sobre las simulaciones como para aquellos otros casos donde sea necesario simular los comportamientos de muchos usuarios, se propone en este artículo de la sección 5.2 una extensión de la metodología que representa un proceso de creación semiautomática de comportamientos humanos mediante Aprendizaje Computacional. Según la definición de Arthur Samuel (1959), el Aprendizaje Computacional es una disciplina científica que otorga a los ordenadores la habilidad de aprender sin ser programados de manera explícita. Gracias al uso de técnicas de esta disciplina, el desarrollador no tiene que programar explícitamente el modelo haciendo previsión de los posibles comportamientos del humano simulado, sino que es el propio algoritmo de aprendizaje debidamente parametrizado, entrenado y validado el que realiza esta tarea automáticamente. Es decir, a partir de los datos de los sensores, el algoritmo de aprendizaje (por ejemplo, una red neuronal que utiliza el algoritmo *Backpropagation* [65]) se encarga del proceso de aprendizaje, utilizando algunos datos para entrenarse y otros para validar su funcionamiento. Una vez el modelo de aprendizaje está correctamente entrenado, es capaz de reproducir de forma realista el comportamiento del sujeto original. Entre las diferentes configuraciones posibles, es el usuario quien decide cuál es el modelo que presenta unos comportamientos más realistas de entre todos los ejecutados, usando técnicas estadísticas y cronobiológicas que comparan los datos resultado del modelo con los datos del sujeto original.

Se obtiene de esta publicación un resultado científico consistente en la automatización del proceso de creación de modelos de usuario en casos donde se puedan obtener datos de comportamiento humano provenientes de sensores.

Otro resultado científico obtenido durante la elaboración de la tesis consiste en el diseño e implementación de una arquitectura de comportamientos en el simulador *UbikSim*, que permite aplicar la metodología CHROMUBE en escenarios donde varios usuarios deben interactuar y comunicarse entre ellos [101]. Esta arquitectura de comportamientos consiste en un autómata jerárquico de interacciones (*Hierarchical Automaton of Interactions*, HAI) con el cual se pretenden implementar colaboraciones entre dos o más CMHB. Este autómata complementa al autómata jerárquico de comportamientos (*Hierarchical Automaton of Behaviours*, HAB), utilizado en los trabajos presentados a compendio de las secciones 5.1 y 5.3. La figura 3.3 muestra el funcionamiento de los modelos HAI y cómo permiten la comunicación entre los modelos HAB de diferentes usuarios. Un usuario inicia la conversación, mediante un paso de mensajes por un canal que determina las condiciones del entorno y los participantes a los que

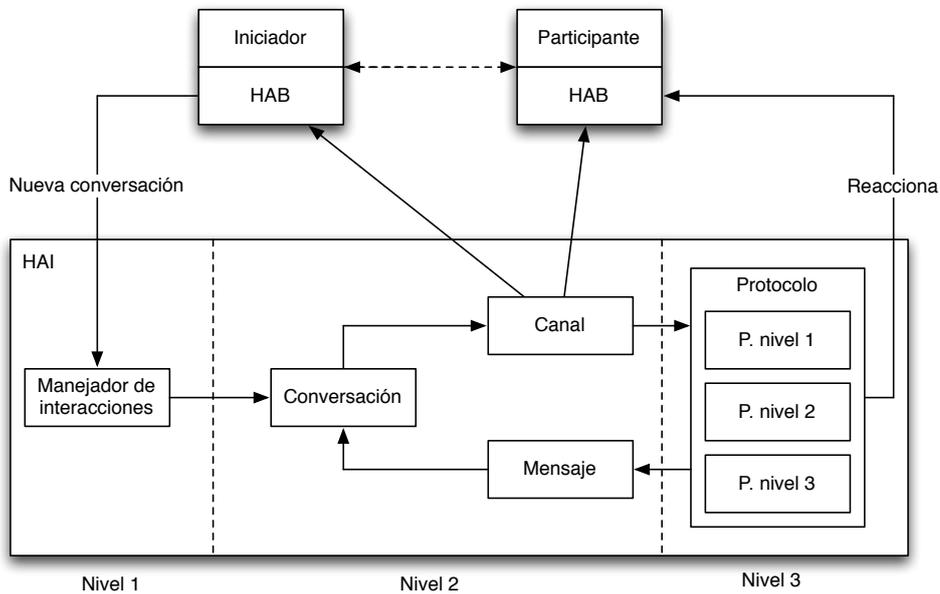


Figura 3.3: Diseño de la arquitectura de un modelos HAI de interacciones entre HAB.

el mensaje puede llegar. Cada conversación va a tener un nivel de protocolo asociado que determina el tipo de mensaje a lanzar y qué comportamientos se desean provocar en el usuario receptor.

También se ha definido una metodología para la creación de interacciones entre usuario, gracias a estos resultados se ha conseguido el siguiente objetivo de la tesis:

- O_7 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano que permitan una reproducción realista de sus interacciones.

El resultado científico anterior abre una nueva problemática en esta tesis. No es posible validar los modelos de interacciones con la metodología CHROMUBE ya que no se disponen de datos de sensores sobre dichas interacciones. ¿Qué sucede entonces con los sistemas que no se pueden validar porque no se disponen de datos reales de su entorno de aplicación? En numerosos escenarios no existirán datos provenientes de sensores y previos al despliegue del sistema que permitan modelar de manera realista los aspectos necesarios de los usuarios para la validación de este sistema. Consecuentemente, resulta imprescindible abordar en la metodología CHROMUBE estos casos. Por este motivo, el artículo de la sección 5.3 propone una nueva extensión de la metodología que aborda la creación y validación de CMHB sin la existencia de datos de sensores previos. La obtención de datos en este caso se realiza mediante técnicas de adquisición de conocimiento aplicadas a expertos. Se considera un experto a la persona que tiene una gran experiencia en un campo determinado y que puede proveer de una base de conocimiento suficiente para modelar unos comportamientos humanos de la manera más realista posible de cara a la validación de un servicio

determinado.

Se obtiene como resultado de este artículo una nueva rama de la metodología que permite crear y validar comportamientos humanos sin necesidad de datos de sensores. Mediante esta rama, es posible también validar los modelos de comportamientos de interacciones definidos en [101], ya que no existe ya la dependencia sobre datos de sensores existente en propuestas previas. Por lo tanto, este resultado permite dar por satisfechos los siguientes objetivos de la tesis:

- O_3 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano cuando no existe una infraestructura de sensores previa.
- O_4 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_3 .
- O_8 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_7 .

Finalmente y a modo de resumen, la tabla 3.1 muestra un resumen con todos los objetivos que se proponen conseguir en la tesis y los resultados científicos que se han conseguido asociados a cada uno de ellos, con referencia a la publicación donde se exponen.

3.2.2 Resultados de aplicación

A modo de resumen, se listan a continuación algunos ejemplos de servicios y aplicaciones software reales en cuya validación se ha participado activamente durante la realización de esta tesis. La aplicación de la metodología en diversos proyectos de investigación y artículos científicos ilustra la versatilidad y eficacia de las contribuciones teóricas de esta tesis. Los resultados son los siguientes:

- El proyecto DIA++ [7] tenía como objetivo principal la elaboración del sistema comercial *Necessity*, actualmente explotado por la empresa *Ami2*¹. *Necessity* es un sistema que monitoriza personas y es capaz de detectar caídas u otros accidentes domésticos en casos de personas ancianas que viven solas. El objetivo del sistema es evitar situaciones indeseadas en las que el anciano pase mucho tiempo sin ser atendido tras una caída o un desmayo, y eliminar la posibilidad de que estos incidentes pasen desapercibidos realizando un aviso a un equipo de urgencias y/o a sus familiares. El software de detección de caídas de *Necessity* fue integrado en la arquitectura de simulación de *UbikSim* como un SUT, y validado mediante los comportamientos de cuatro ancianos simulados. Esta validación permitió la detección de fallos del algoritmo en una etapa temprana y redujo considerablemente los tiempos de implantación final. Los CMHB empleados se

¹<http://www.ami2.net>

Objetivo	Resultado
O_1 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano a partir de datos obtenidos de sensores.	Metodología CHROMUBE mediante Cronobiología [96], metodología CHROMUBE mediante Aprendizaje Computacional [98].
O_2 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_1 .	Metodología CHROMUBE mediante Cronobiología [96], Metodología CHROMUBE mediante Aprendizaje Computacional [98].
O_3 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano cuando no existe una infraestructura de sensores previa.	Metodología CHROMUBE mediante Adquisición de Conocimiento de Expertos [100].
O_4 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_3 .	Metodología CHROMUBE mediante Adquisición de Conocimiento de Expertos [100].
O_5 : Definición de una arquitectura de simulación escalable válida para simular desde un pequeño grupo de personas hasta grandes muchedumbres.	Plataforma de simulación <i>UbikSim</i> [99].
O_6 : Exploración de la integración de realidad en el simulador con el fin de obtener simulaciones que combinen elementos reales con elementos simulados.	Integración de la plataforma <i>UbikSim</i> con software real a validar (SUT) [99].
O_7 : Definición de procesos metodológicos para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano que permitan una reproducción realista de sus interacciones.	Ampliación del proceso de modelado de la metodología CHROMUBE incluyendo interacciones [101].
O_8 : Definición de procesos metodológicos para la validación del realismo de modelos obtenidos en O_7 .	Metodología CHROMUBE mediante Adquisición de Conocimiento de Expertos [100], Metodología CHROMUBE mediante Adquisición de Conocimiento de Expertos [100].

Tabla 3.1: Objetivos y resultados

- crearon y validaron utilizando los registros de datos provenientes de la monitorización de cuatro personas ancianas reales que tuvieron los sensores del sistema Necessity instalados en sus casas en forma de piloto durante tres semanas para la recogida de información.
- El proyecto Caronte [6] consiste en la gestión de emergencias en residencias de ancianos mediante el uso de técnicas inteligentes. En este caso no se contemplaba la presencia de sensores de ningún tipo. La solución se basa en un panel de control integrado por diversas herramientas para la gestión inteligente de emergencias siguiendo determinados protocolos. Por ejemplo, en el caso de un incendio, los trabajadores del centro deben ir registrando en la herramienta los pasos del protocolo conforme se van realizando. La problemática que se presentaba en este proyecto era la validación de la aplicación Caronte en entornos simulados, ya que no se pueden provocar emergencias reales y no es viable la realización de simulacros de forma continuada en un centro geriátrico. En este proyecto se aplicó por primera vez la metodología de creación y validación de CMHB mediante entrevista con expertos. En este caso por partida doble, primero se realizó una entrevista para la obtención de conocimiento sobre el comportamiento de trabajadores y residentes con la residencia Villa Sofía de Calasparra (Murcia) y más adelante, se volvió a aplicar la metodología en la residencia Ballesol de Villajoyosa (Alicante). En este proyecto, el simulador *UbikSim* con los CMHB creados con CHROMUBE fueron decisivos ya que todas las herramientas y aplicaciones se tuvieron que validar a través de simulaciones. También se utilizaron los modelos de comportamiento mediante interacciones propuestos en el artículo [101]. Dichos modelos fueron validados por los expertos de la residencia Ballesol donde se aplicaron.
 - El proyecto *Mobiliario Sensorial Inteligente* (MSI) [8] se basa en la integración de sensores en muebles, con el fin de conseguir determinados servicios inteligentes. Está enfocado al ámbito de las residencias de ancianos y algunos de los servicios que pretende ofrecer son: detección de anomalías físicas en los residentes (temperatura alta, incremento de peso, etcétera); abandono de dormitorio; y, detección de caídas. Para ello se integran sensores de temperatura, humedad o presión en las camas y sillones de las habitaciones de los residentes. El objetivo una vez más, en este proyecto, era validar los servicios desplegados en la residencia. Se realizaron validaciones del servicio de detección de caídas, integrado como SUT en el simulador *UbikSim*, ya que era el que más interesaba a las residencias. Para recrear los comportamientos de los residentes y trabajadores (por ejemplo, las enfermeras que hacen ronda y entran a las habitaciones o el servicio de limpieza también eran detectados por los sensores y debían ser simulados) se utilizó en primera instancia la metodología de entrevista con expertos desarrollada en el artículo de la sección 5.3. Una vez validado el servicio de detección de caídas, se instaló el sistema en la Residencia Palacios de Ciempozuelos (Madrid) y se empezaron a recopilar datos de sensores que sirvieron para crear nuevos CMHB de los trabajadores y residentes, útiles para validar el resto de servicios.

- El proyecto Caduceo [4] presenta un sistema de creación y validación de servicios inteligentes en centros hospitalarios. Una de las misiones en dicho proyecto era la de validar mediante simulaciones las aplicaciones y servicios que se desarrollaran en el mismo, y comprobar su eficacia en un entorno simulado antes de que se desplegaran en el hospital. El despliegue propuesto consistía de un sistema de localización en interiores basado en Zigbee [95], que proveía de datos a diversas aplicaciones móviles y mashups [94]. El objetivo de estas aplicaciones era mostrar información en tiempo real sobre la localización de personal y material quirúrgico. Por la problemática que suele suponer el despliegue de infraestructuras hardware en un entorno tan sensible como las salas de quirófano de un hospital, se decidió no realizar ninguna instalación de dispositivos hasta que el funcionamiento del servicio de localización fuese validado en un entorno simulado. Para ello, fue necesaria la recreación de los comportamientos del equipo completo de operaciones (cirujanos, enfermeros, anestesistas, servicios de limpieza, etcétera) durante una jornada de trabajo en la planta de quirófanos. Estos modelos se crearon y validaron utilizando la metodología CHROMUBE de entrevista con expertos. En este caso, el grupo de expertos consultado fue el equipo directivo del hospital, capaz de proporcionar todo tipo de detalles en sucesivas entrevistas acerca de los comportamientos y horarios de sus trabajadores. La validación de estos modelos viene dada por los propios expertos y además se aplican determinadas técnicas de validación como reglas de producción para comprobar que los modelos se comportan de acuerdo a lo establecido en la base de conocimiento. En la fase final del proyecto, una vez el equipo directivo dio su visto bueno a las simulaciones y por tanto, al sistema de localización, se realizó el despliegue de dispositivos Zigbee en el hospital. Mediante estos dispositivos se obtuvieron nuevos datos de comportamiento de algunos trabajadores que no habían sido todavía modelados, como la coordinadora de quirófano. Estos nuevos modelos fueron creados a partir de los datos de localización recogidos durante un mes, utilizando la metodología de creación mediante Aprendizaje Computacional, presentada en el artículo de la sección 5.2 de la tesis.
- En el proyecto Cardinea [5] se ha utilizado un modelo de usuario para validar una aplicación para hospitales que consiste en lanzar alertas cada vez que un trabajador del hospital pasa demasiado tiempo en una habitación expuesta a radiación. Esta aplicación lleva integrados servicios de localización de trabajadores mediante RFID y de generación de alertas. Ambos servicios fueron validados mediante simulación. Este caso de uso también se realizó en el contexto del hospital del Consorci Sanitari de Terrassa.
- Los modelos obtenidos en el artículo de la sección 5.1 se han reutilizado para validar un servicio de detección de riesgos para personas mayores que viven solas en su casa. Este servicio se presenta en el artículo de Navarrete et al. [104], y es novedoso en el ámbito científico por estar implementado mediante una red de autómatas temporales. Al no disponer el equipo de investigación de aparatos

- sensores que desplegar para probar el servicio en un entorno real, se decidió optar por el uso de CMHB para simular a personas ancianas viviendo solas en casa. Con el fin de comprobar los requisitos que exige validar el servicio de detección de riesgos, a los modelos previamente desarrollados para el proyecto *Necessity* se les incluyeron algunos nuevos comportamientos que simulaban determinados comportamientos anómalos. De esta forma, se valida el correcto funcionamiento del servicio con respecto a determinados requisitos.
- En el artículo de Terroso et al. [105] se utilizan CMHB para validar una aplicación de Transporte Inteligente a bordo de un coche. Esta aplicación tiene en cuenta las lecturas de los sensores internos del vehículo que indican el número de personas a bordo, y además los itinerarios más frecuentes del vehículo. La simulación se utiliza para mostrar la efectividad del sistema en función de diferentes ocupaciones y movimientos de los usuarios. En este caso, se aplica la metodología de expertos de una forma especial ya que no se han realizado entrevistas. Lo que hicieron los autores en este caso, fue pasar cuestionarios a un elevado número de conductores para que describieran sus movimientos más frecuentes en el interior de su vehículo. A raíz de esas respuestas se generaron unos modelos probabilistas simples que cumplían el propósito de manifestar comportamientos variados para validar el sistema.
 - Serrano et al. exploran el uso de CMHBs para estudiar los requisitos de servicios inteligentes en varios dominios específicos. Entre ellos, la gestión de emergencias en interiores [86] y la personalización de servicios mediante teoría del voto [85]. El doctorando ha colaborado en estos trabajos mejorando los mecanismos ofrecidos por *UbikSim* para la generación de CMHBs.
 - En el capítulo de libro de Martínez et al. [103] se utilizan los modelos computacionales de comportamiento humano para la validación de un sistema de localización en interiores basado en la tecnología Bluetooth [21].
 - En el artículo de Campuzano et al. [97] se presenta una colaboración entre la Universidad de Murcia y la Universidad de Middlesex (Londres, Reino Unido) en el ámbito del proyecto SociAAL [9]. Esta colaboración consiste en la aplicación de CHROMUBE para la creación y validación de modelos de usuario en un entorno de Campus Inteligente. En este artículo se definen los modelos a partir de datos de entrevistas realizadas a varios estudiantes en el seno de la Universidad de Middlesex. Dichos estudiantes proporcionaron información acerca de sus horarios y costumbres diarias. La idea principal de este proyecto consiste en la creación de un Campus Inteligente simulado que: 1) pueda servir como sistema de apoyo a la decisión, ya que permite extraer diferentes conclusiones como la idoneidad de un sistema de horarios concreto, de los desplazamientos que debe realizar el alumnado a través del campus, datos estadísticos del uso que se hace de los diferentes edificios, etcétera; 2) permita la validación de diferentes servicios inteligentes antes de su despliegue con el fin de comprobar su correcto

funcionamiento o de estudiar las ventajas que pueden ofrecer tanto a alumnos como a profesores.

3.3 Conclusiones y Trabajos futuros

Los entornos inteligentes [88] son un nuevo paradigma emergente en la sociedad actual que permiten la interacción del usuario con un entorno tecnológico mediante servicios que facilitan la vida del usuario. La implantación y despliegue de estos sistemas requiere un proceso de validación que no resulta sencillo debido a la gran variedad de escenarios y comportamientos cambiantes que pueden presentar los usuarios. Uno de los enfoques que más se han utilizado para ello ha sido el uso de laboratorios o *living labs* que intentan reproducir de la forma más fidedigna posible el que será el entorno final. En esta tesis se propone la validación de software inteligente mediante simulación con anterioridad a su despliegue en el escenario final o en el *living lab*, ya que la detección de errores en un sistema en las etapas tempranas de desarrollo puede suponer un ahorro considerable de recursos. También se propone la simulación como alternativa al *living lab* en aquellos casos donde la validación por este método sea inviable o demasiado costosa.

3.3.1 Conclusiones

La principal contribución científica de esta tesis es la metodología *Chronobiological Modelling of Human BEhaviors* (CHROMUBE). CHROMUBE es una metodología iterativa que consta de una serie de pasos para definir, crear y validar modelos computacionales de comportamiento humano (*Computational Models of Human Behaviour*, CMHB). Estos modelos de usuario pueden ser utilizados en entornos de simulación con el fin de validar los componentes software de un entorno inteligente.

La metodología propuesta proporciona soluciones adaptables a situaciones específicas: desde entornos inteligentes donde se han obtenido datos de comportamiento de usuarios mediante sensorización hasta escenarios donde no es viable dicha obtención previa de datos y se debe recurrir a otras fuentes de información. En entornos con despliegue de sensores, y mediante técnicas basadas en las áreas científicas de Cronobiología y Aprendizaje Computacional, se han obtenido modelos humanos similares a los seres humanos observados con un nivel de significación estadística de al menos 0.05. Mientras que, en el caso de escenarios en los que no se dispone de datos previos, se ha seguido una metodología basada en técnicas de Adquisición de Conocimiento que permite extraer datos de otras fuentes con el fin de obtener modelos humanos. Gracias a la colaboración de expertos, se ha validado que estos modelos humanos también presentan unos comportamientos suficientemente similares al de los seres humanos que imitan en determinados contextos.

A modo de conclusión, ya sea través de uno u otro método, mediante la aplicación de CHROMUBE, un desarrollador es capaz de obtener modelos de usuario fiables que aportan beneficios al proceso de desarrollo de entornos inteligentes en diversas

situaciones, tanto desde una perspectiva científica como industrial. Se dispone entonces como elemento distintivo de este trabajo con respecto a otros trabajos relacionados, de una serie de procesos metodológicos que van a guiar al desarrollador desde la concepción inicial de cuál será su sujeto a simular hasta que finalmente su modelo de comportamiento esté totalmente implementado y validado.

Otra contribución científica de relevancia es el desarrollo de una arquitectura de simulación completa, que ofrece la posibilidad a cualquier desarrollador de aplicar los conceptos teóricos de la metodología CHROMUBE que aquí se presenta. Esta plataforma de simulación es software libre, y está basada en el estándar *Open Services Gateway Initiative* (OSGi) ². Su arquitectura se compone de una serie de módulos que permiten la definición completa de un entorno de simulación social basada en agentes (entorno físico, dispositivos hardware, usuarios), su posterior simulación en el simulador *UbikSim* y la recogida de información de contexto mediante el middleware OCP. Gracias a la integración de componentes reales dentro de la arquitectura, resulta posible integrar el software que se pretende validar dentro del mundo simulado, y tras una batería de simulaciones, comprobar si cumple los requisitos para los que fue creado.

Las dos contribuciones previamente mencionadas han permitido aplicar de forma práctica los CMHB generados con CHROMUBE en diversos proyectos de investigación y artículos científicos a lo largo de la tesis doctoral. De la experiencia de esta aplicación práctica se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. En ocasiones, la creación de entornos de laboratorio o *living labs* no es viable, debido al coste económico que suponen. También el número de usuarios involucrados o la necesidad de utilizar determinados escenarios de riesgo pueden obligar a descartar la posibilidad de utilizar *living labs*. En estos casos, se ha comprobado que el uso de una plataforma de simulación con CMHB realistas es una alternativa viable que permite validar servicios en entornos complejos. Así, en los proyectos Cardinea, MSI, Caronte y Caduceo se han simulado escenarios multi-usuario de centros geriátrico y hospitales, es decir, edificios donde por la sensibilidad de sus instalaciones y usuarios no era posible desplegar un *living lab*. La simulación del personal, pacientes y residentes de estos centros, unido a la integración del software a validar en las simulaciones, permitió a los directivos concluir que los sistemas funcionaban correctamente y estaban lo suficientemente maduros como para ser desplegados en el entorno real.
2. Se ha obtenido la conclusión de que la simulación de comportamientos humanos es útil también como etapa de configuración previa a las pruebas de laboratorio, ya que durante dicha etapa se pueden descubrir y solucionar fallos del sistema mucho antes. Ésto supone un ahorro de tiempo y costes en el despliegue final. En el proyecto Necessity se ha conseguido reducir los tiempos y costes de implantación de un servicio de detección de caídas, al paralelizar el desarrollo del algoritmo

²En la actualidad se está trabajando en otras opciones que proporcionan modularidad y distribución de componentes, entre otros, servicios web y tecnologías de la web semántica como ontologías, que además permiten disponer de heterogeneidad entre los componentes y descubrimiento automático.

de adaptación al entorno mediante simulaciones y el despliegue del sistema; en lugar de verse forzados a esperar al final del despliegue para realizar las primeras pruebas de este algoritmo.

3. También se ha concluido que es posible seguir utilizando la simulación para validar nuevos comportamientos o funcionalidades del sistema no posibles de reproducir en el entorno real incluso durante la etapa de ejecución, sirviendo así como herramienta de apoyo en la toma de decisiones. El grado de flexibilidad y automatización con el que se crean los CMHB generados por la metodología han permitido a algunas empresas generar escenarios “y si” para comprobar la robustez de sus servicios, convirtiendo los resultados de esta tesis en un valioso sistema de apoyo a la decisión. Un ejemplo es el Consorci Sanitari de Terrassa que utilizó el simulador para crear escenarios alternativos en la planta de operaciones, tanto con entornos inteligentes integrados como sin ellos, con el fin de decidir qué servicios se debían desplegar con mayor prioridad en el entorno puesto que iban a suponer un mayor beneficio para el hospital. Finalmente, se priorizaron una serie de servicios, en base a lo observado en la simulación, y dichos servicios fueron los que se implementaron durante la fase piloto del proyecto.

3.3.2 Trabajos futuros

En lo que concierne a los trabajos futuros derivados de esta tesis doctoral, existen varios frentes abiertos con potencial para contribuir significativamente en el campo de la Inteligencia Ambiental, así como en otros campos en los que se pueden aplicar modelos de usuario, tales como sistemas de apoyo a la decisión. Como se ha mencionado previamente, ya se han utilizado en alguna ocasión los modelos de simulación como una ayuda para la toma de decisiones por los gestores de un centro hospitalario. Partiendo de la misma base, se puede proponer otras aplicaciones de utilidad en otros campos, como el de juegos formativos. Un juego formativo [63] consiste en un entorno simulado que permite al usuario realizar un aprendizaje o informarse acerca de una determinada temática. En la actualidad, este campo de aplicación consta de un mercado en pleno crecimiento en parte debido a la expansión de las aplicaciones móviles, y se han llegado a financiar presupuestos de hasta 10 millones de dólares [34]. Un ejemplo de aplicación es la utilización de este tipo de juegos en cursos de formación para los usuarios de un determinado entorno, como los trabajadores de un centro geriátrico. Mediante la inmersión del usuario dentro de la simulación, éste puede interactuar con el entorno y con los usuarios simulados con el fin de llevar a cabo de forma virtual una labor que le sirva de formación. Algunos posibles casos de formación son la prevención de riesgos laborales y el seguimiento del protocolo de seguridad de un centro.

La metodología CHROMUBE tal como está planteada ahora mismo, también puede ser extendida para cubrir más aspectos de los seres humanos a modelar. Se ha comprobado que las extensiones de Cronobiología y Aprendizaje Computacional permiten la implementación de comportamientos de una persona individual, suponiendo que, o bien, sólo se están recogiendo datos de comportamiento de una persona, o los datos

están etiquetados de forma que permiten diferenciar a la persona a la que se refieren (por ejemplo, si las personas monitorizadas portan tags Zigbee). Supongamos un caso donde existan datos de comportamiento de varias personas sin etiquetar, por ejemplo, una habitación doble compartida con un sensor de movimiento en la puerta y dos sensores de presión, uno en cada cama. En este escenario una cuestión de investigación novedosa consiste en cómo extraer los comportamientos de las dos personas que conviven en la misma habitación. Y además qué diferencias conllevaría este experimento con el de extraer comportamientos aislados. Existe una línea de investigación abierta en este problema, en la cual se propone el uso de modelos ocultos de Markov (*Hidden Markov Models*, HMM) [20] para detectar patrones en los datos de los sensores que permitan diferenciar a quién pertenece cada registro. Solucionando este problema, la metodología sería más flexible y aplicable en casos más complejos.

Otro de los trabajos futuros derivados de esta tesis también está relacionado con el ámbito de los sensores. Se ha conseguido mediante la rama CHROMUBE de Adquisición de Conocimiento validar el realismo de modelos computacionales de interacciones entre seres humanos. Sin embargo, no ha sido posible hasta la fecha llevar a cabo una investigación que recoja datos reales de interacciones y comunicaciones producidas entre seres humanos para crear y validar nuevos comportamientos simulados de interacción. Se propone para ello el uso de sociómetros [77] u otros aparatos domóticos que permitan registrar movimientos, capturar conversaciones e interacciones. La información obtenida por estos dispositivos se puede utilizar como fuente de entrada en las ramas de Cronobiología y Aprendizaje Computacional.

En cuanto a la rama de Aprendizaje Computacional, se pretende conseguir una automatización completa del proceso de creación de CMHB a partir de los datos de entrada. Esta automatización es realmente útil en casos donde existan grandes muchedumbres de usuarios, cada uno de ellos con su propio comportamiento. En la propuesta actual se ha conseguido eliminar todo el proceso manual de implementación del autómata de comportamientos, aunque todavía es necesaria cierta interacción del desarrollador a la hora de seleccionar la configuración óptima de la técnica de aprendizaje supervisado, por ejemplo el número de neuronas ocultas o etapas de entrenamiento de una red neuronal. En este caso se plantea el uso de algoritmos evolutivos con el fin de obtener de forma automática cuál sería la configuración idónea de entrenamiento. Así, se puede avanzar un paso más en la automatización del proceso de creación de CMHB a partir de datos de sensores.

En el artículo de la sección 5.3 se plantea el uso de ontologías para el modelado de conocimiento relacionado con comportamientos y se utiliza en las fases de diseño de comportamientos y validación. También en *UbikSim* se usa una ontología para representar el entorno simulado. Resulta interesante realizar una extensión de estos modelos ontológicos, de forma que se permita modelar todo el conocimiento presente en la metodología CHROMUBE, desde los primeros pasos de selección del sujeto a modelar hasta la fase de validación. Éste es un trabajo complejo que implica la inclusión de herramientas de web semántica, pero su consecución permitiría facilitar la compartición, reutilización y extensión de los diferentes modelos y simulaciones creados.

En lo que se refiere a la simulación, se ha trabajado en esta tesis principalmente

sobre el modelo de usuario, y también en la integración de software real a validar (SUT) dentro del mundo simulado mediante un módulo middleware. Sin embargo, la tesis no ha tratado la obtención de modelos simulados del hardware del entorno inteligente y su validación rigurosa con métodos estadísticos como se ha hecho con los modelos de los seres humanos. Los modelos hardware empleados cumplen la función de alimentar al SUT, que es la parte que se pretende validar. Por ello, son modelos lo suficientemente realistas como para satisfacer la recogida de datos (en el caso de sensores) o actuación sobre el entorno (en el caso de actuadores). Sin embargo, no se tienen en cuenta determinadas variables físicas complejas como la atenuación de la señal de los dispositivos a través de determinados materiales. Unos modelos de dispositivos que tuvieran en cuenta este tipo de condiciones físicas suponen una mejora en el realismo de las simulaciones, si bien hay que valorar la dificultad que dichos modelos conllevan, ya que por ejemplo, se debe tener en cuenta una gran cantidad de variables: desde los materiales de los que están compuestos los muros del entorno hasta las especificaciones técnicas completamente detalladas de cada dispositivo. La consecución de unos dispositivos hardware simulados con tal nivel de realismo pueden permitir también convertir el simulador *UbikSim* en una herramienta muy potente para optimizar la distribución de los dispositivos en el entorno simulado, y consecuentemente, en un entorno real. Son muchas las empresas que se dedican en la actualidad a desplegar dispositivos en edificios con el fin de ofrecer determinados servicios, por ejemplo, sistemas de localización en interiores. Esta funcionalidad del simulador supondría un fuerte impacto en el sector, debido al considerable ahorro en dispositivos que esta optimización puede suponer a las empresas.

Por último, también existe la posibilidad de utilizar otro tipo de agentes en las simulaciones. Hasta ahora, en el trabajo desarrollado durante esta tesis, debido al nivel de complejidad de los sistemas que se ha requerido validar sólo se han utilizado agentes reactivos con comportamientos implementados o bien mediante un autómata jerárquico probabilista o bien mediante Aprendizaje Computacional. Sin embargo, se pueden necesitar agentes con capacidad de aprender o deliberar en el caso de tener que validar unos entornos inteligentes más complejos. Por ejemplo, un sistema que detectara el estado emocional del usuario, y que crease diferentes planes de actuación en base a estos estados. O un sistema basado en la toma de decisiones del usuario. Estos casos pueden requerir arquitecturas no reactivas, como agentes emocionales, cognitivos o agentes *Beliefs, Desires and Intentions* (BDI). Se plantea como trabajo futuro la inclusión de modelos más complejos tanto en la metodología CHROMUBE como en la plataforma de simulación.

Capítulo 4

Introducción a las publicaciones

En este capítulo de introducción a las publicaciones presentadas a compendio, se ofrece una visión unificada de los diferentes procesos metodológicos propuestos en esta tesis para la creación de modelos computacionales de comportamiento humano (*Computational Models of Human Behaviour*, CMHB). La metodología *Chronobiological Modelling of Human BEhaviors* (CHROMUBE), aúna todos estos procesos y ha sido creada específicamente durante el transcurso de esta tesis con el fin de proporcionar un modelo metodológico de creación y validación de CMHB enfocados a la validación de sistemas y aplicaciones reales en entornos inteligentes simulados. La estructura del capítulo parte desde la definición inicial de CHROMUBE, y continúa dando detalles acerca de cada una de sus extensiones, que permiten crear de forma metodológica CMHB aplicables a diferentes situaciones y casos de uso. La figura 1.1 de este documento muestra cómo cada una de las secciones siguientes se relaciona con los artículos presentados a compendio de la sección 5.

4.1 La metodología CHROMUBE

CHROMUBE es una metodología para la creación y validación de CMHB. El objetivo de estos modelos computacionales es el de simular lo más fielmente posible el comportamiento de un ser humano, para ser de utilidad en la validación de software inteligente en entornos simulados. La primera propuesta de la metodología se basa en la utilización de técnicas de Cronobiología [58]. La Cronobiología es una disciplina científica que estudia los cambios rítmicos que se producen en los seres vivos en sus distintos niveles de organización. Estos cambios rítmicos se denominan ritmos biológicos, y básicamente la Cronobiología estudia cómo el tiempo afecta a dichos ritmos y por tanto, al comportamiento de los organismos vivientes. Al tener que modelar el comportamiento de un ser humano a lo largo del tiempo, se ha decidido hacer uso de técnicas cronobiológicas para: 1) la representación gráfica de los datos de actividad de los usuarios, 2) el análisis de patrones de comportamiento que se puedan manifestar en dichos datos y 3) la comparación entre los niveles de actividad manifestados a lo largo del tiempo por diferentes sujetos, ya sean reales o simulados.

4.1.1 Técnicas cronobiológicas

Entre los parámetros que caracterizan los ritmos biológicos está el período, tiempo que tarda en repetirse una oscilación completa, y la frecuencia, o número de ciclos por unidad de tiempo. En Cronobiología se suele utilizar como unidad de referencia para la variable frecuencia un día, veinticuatro horas. A aquellos ritmos que tienen una frecuencia próxima a un ciclo por día se les denomina ritmos circadianos [58]. Normalmente durante cada intervalo de este período de tiempo se producen condiciones atmosféricas similares (temperatura, luz, etcétera), y es normal que durante varios días seguidos amanezca y anochezca aproximadamente a la misma hora. Estos efectos periódicos tienen repercusión en el comportamiento de los seres vivos y provocan que presenten niveles de actividad similares a determinadas horas del día en días consecutivos. Por ejemplo, un nivel de actividad bajo durante las horas de oscuridad. Con el fin de poder analizar de forma visual o estadística los ritmos de actividad que presentan los sujetos bajo estudio, existen algunas técnicas de representación que ofrecen toda la información del registro de actividad del usuario concentrada en una representación gráfica.

- Actogramas [58]: un actograma es una técnica de representación cronobiológica que permite un análisis visual de los datos de actividad de un sujeto a lo largo del estudio. Para realizar un actograma de un registro de actividad, se colocan los sucesivos tramos de veinticuatro horas del registro cada uno encima del anterior. Por cada lectura de actividad en el registro se añade una marca al actograma en el punto cuyo valor del eje horizontal sea la hora del día a la que se ha producido, y su valor en el eje vertical sea el número de día del estudio en el que se ha producido. Por lo tanto en los tramos donde más actividad se haya monitorizado del usuario, existirán un mayor número de marcas mientras que los tramos con menor actividad quedarán en blanco. La inspección detenida de estas representaciones permite detectar componentes rítmicos presentes en el registro, incluso de muy corta duración. Ofrecen por tanto un mayor nivel de análisis de los datos que otras técnicas, como por ejemplo los plexogramas.
- Plexogramas [58]: en un plexograma se representan los datos de varios días sobre una gráfica cuyo eje horizontal representa un único intervalo de veinticuatro horas. Este intervalo, a su vez se divide en subintervalos. Cuanto mayor sea el número de intervalos, mayor será la granularidad del nivel de actividad representado. En cada subintervalo se representa la media de todos los datos contenidos en dicho subintervalo de tiempo a lo largo de todo el estudio. En esta tesis se han utilizado subintervalos de una hora, por lo que el plexograma queda dividido en veinticuatro subintervalos y la curva media de actividad del sujeto está compuesta por veinticuatro valores. Los plexogramas permiten un estudio visual de los ritmos circadianos más intuitivo que los actogramas, aunque no tan detallado.

La figura 4.1 muestra un actograma (a) y un plexograma (b) correspondientes al mismo sujeto durante el mismo intervalo de tiempo. Se puede observar cómo el

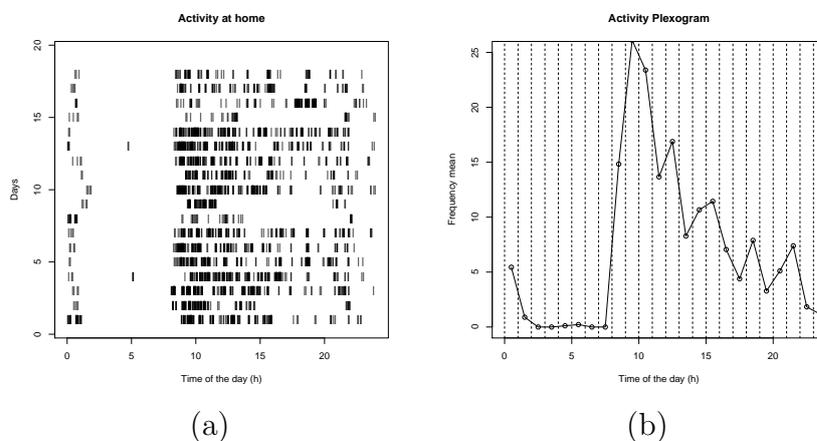


Figura 4.1: Actograma y plexograma que muestran la actividad de un sujeto durante 18 días

plexograma muestra una curva de actividad media que ha presentado el sujeto a lo largo del estudio, estos valores medios son muy útiles para comparar visualmente los niveles de actividad de diferentes sujetos y detectar si poseen un ritmo circadiano. Por su lado, el actograma, ofrece una información más detallada de la actividad del usuario que permite realizar un análisis visual mucho más pormenorizado de lo que ha sucedido a lo largo de los días. Por ejemplo, en el actograma de la figura 4.1(a) se observa cómo el sujeto parece dormir la siesta o ausentarse de la vivienda durante los días 2, 8, 9 y 15 del estudio, ya que presenta prolongados espacios de inactividad entre las 15 y las 20 horas aproximadamente. Este tipo de información tan detallada sobre el usuario no se puede obtener del plexograma donde simplemente se aprecia cómo la media de actividad durante esas horas desciende con respecto a la de la mañana. Mediante los actogramas se puede hacer también un seguimiento del correcto funcionamiento de los sensores. Es posible que en un momento determinado del estudio los sensores no hayan detectado ninguna actividad del usuario durante un día o intervalo concreto porque se hayan quedado sin batería, o que detecten una cantidad de actividad inusual de forma anómala porque no funcionan correctamente. El actograma muestra prolongados espacios en blanco durante ese intervalo de tiempo o día concreto, en el caso de haberse quedado sin batería, y marcas de actividad continuas en el segundo caso. Este tipo de información tan pormenorizada no se puede analizar en el plexograma, si bien el plexograma ofrece un punto de vista más general e intuitivo del nivel de actividad de manera que ambas técnicas se complementan a la perfección.

4.1.2 Creación y aplicación de los modelos

Es posible aplicar la metodología CHROMUBE en escenarios donde se puedan obtener datos de sensores acerca del comportamiento o nivel de actividad de una persona. A partir de esos datos de sensores, se realiza una representación cronobiológica mediante

actogramas y plexogramas que permite obtener determinada información sobre los comportamientos del sujeto. Para la creación del modelo de usuario es imprescindible analizar estas representaciones cronobiológicas en profundidad con el fin de obtener información cuantitativa sobre los comportamientos que permita modelarlos.

La implementación en CHROMUBE de los modelos de usuario se realiza mediante una máquina abstracta basada en el uso de autómatas jerárquicos. Debido a su complejidad, se recomienda la lectura del artículo-sección 5.1 para obtener toda la información relativa a la máquina abstracta. A modo de resumen, la idea básica consiste en que cada sujeto estará compuesto por un intérprete y un conjunto de estados que definen sus comportamientos, teniendo un estado por comportamiento. Las transiciones entre comportamientos son probabilistas. La probabilidad de que un comportamiento se manifieste a lo largo del día viene dada por el análisis estadístico que se debe realizar sobre el conjunto de datos. Tests estadísticos tales como Kolmogorov Smirnov [61], determinan qué distribución de probabilidad se ajusta a un patrón de comportamiento determinado y con qué parámetros. Una vez obtenidas las funciones de distribución de probabilidad de cada comportamiento, un intérprete se encarga de manejar en tiempo real durante la simulación cuándo se manifiesta cada comportamiento de acuerdo a su distribución de probabilidad y los envía a una lista de comportamientos pendientes ordenada por prioridad.

Todo este proceso de diseño permite al desarrollador obtener unos CMHB que se comportan de forma similar al sujeto monitorizado mediante sensores. No obstante, es destacable la complejidad del modelo ya que este análisis y posterior proceso de configuración tiene que ser realizado por el desarrollador para cada uno de los sujetos bajo estudio, siguiendo un proceso iterativo hasta encontrar una configuración lo suficientemente realista para sus propósitos. En este proceso juega también un papel importante la validación, que permite comprobar cuánto se parecen los usuarios simulados al usuario real que modelan.

4.1.3 Validación

El nivel de realismo alcanzado en etapas previas por los modelos debe ser validado para comprobar que los CMHB creados se comportan según lo esperado. Tras realizar una o varias simulaciones con los modelos, el simulador *UbikSim* proporciona un registro histórico en el mismo formato que el obtenido por los sensores reales (no olvidemos que los sensores simulados deben emular el funcionamiento de los reales). Utilizando las representaciones cronobiológicas adecuadas sobre estos conjuntos de datos, por ejemplo plexogramas, según Madrid y Lama [58], la existencia de un ritmo circadiano estadísticamente significativo en el plexograma del sujeto simulado se puede verificar mediante un test estadístico. En caso contrario, si el sujeto no presentara este tipo de ritmos, la simulación carecería de todo interés puesto que no sería un modelo de simulación fiable que se comporta según el ritmo circadiano de los seres vivos.

Una vez comprobada la existencia de ritmo circadiano en el comportamiento del CMHB, es posible comparar mediante otro test estadístico el plexograma simulado con el plexograma del sujeto real. Dependiendo del resultado de dicho test, es posible

hacerse una idea del realismo obtenido por el modelo y afinar más la configuración si fuese necesario para los propósitos del desarrollador. En resumen, los tests estadísticos con los que se ha experimentado para la validación de un CMHB son los siguientes:

- Test de Análisis de la Varianza (ANOVA) [66]: El test ANOVA se aplica a los valores del plexograma obtenido tras la simulación del CMHB, y permite determinar si las medias de cada intervalo horario son estadísticamente similares. La hipótesis nula H_0 es “la media de todos los intervalos es igual” mientras que el cumplimiento de H_1 indica que las medias son diferentes. Obteniendo un p-valor estadístico inferior a 0,05 podemos asegurar con un 95 % de confianza que las medias son diferentes y que por tanto existe un ritmo circadiano en el plexograma del sujeto. En caso de que el CMHB no siguiera un patrón de ritmo circadiano, se descarta automáticamente puesto que se considera un modelo inválido para representar el comportamiento humano, y por tanto, el comportamiento del sujeto original que sí seguía patrones de ritmo circadiano.
- Test-t de Student [66]: Este test estadístico permite comprobar si dos muestras de datos son estadísticamente similares con un determinado nivel de confianza. En este caso, se considera como muestras a comparar los puntos del plexograma del sujeto real y del simulado. De esta forma, si se rechaza la hipótesis nula H_0 “las medias de los plexogramas son iguales” significa que los plexogramas son diferentes y por tanto, el plexograma simulado y su CMHB son descartados.

Una vez se han descartado todos aquellos plexogramas de CMHB que o bien, no siguen un ritmo circadiano, o eran estadísticamente diferentes al plexograma original, con el fin de seleccionar cuál es el CMHB cuyo comportamiento más se asemeja al usuario real se aplica una función de error cuadrático medio (RMSE) [53]. Mediante esta función, se puede decidir sobre una serie de n plexogramas, cuál de ellos es el más parecido al original. Para ello la función compara punto por punto los dos plexogramas, real y simulado, obteniendo una medida de distancia entre las dos curvas. Aquellos CMHB que presenten plexogramas con distancia menor al original serán los seleccionados como válidos, ya que se entiende que son los que presentan unos comportamientos más similares a los del sujeto real.

4.2 La metodología CHROMUBE: extensión de Aprendizaje Computacional

La extensión de Aprendizaje Computacional de CHROMUBE permite crear CMHB sin la necesidad de realizar el proceso de configuración manual de comportamientos necesario en la rama cronobiológica de la metodología. Este proceso de configuración, si bien resulta realmente apropiado en casos donde el desarrollador quiere tener control total sobre los modelos, por ejemplo, modificando a conciencia determinado tipos de comportamientos o incluyendo otros nuevos, puede llegar a resultar demasiado tedioso

o complejo en casos en los que el desarrollador pretende conseguir varios modelos de forma rápida o semi-automática.

Por este motivo, se ha considerado incluir en CHROMUBE un proceso de creación de modelos alternativo basado en Aprendizaje Computacional [65], ver figura 1.1. En este caso, el análisis de los datos por el desarrollador desaparece, siendo la propia máquina quien, a partir de los datos obtenidos de los sensores, realiza un proceso de aprendizaje supervisado que le permite entrenar un modelo capaz de comportarse de forma similar al sujeto monitorizado. En este caso, la función del desarrollador se limita a seleccionar en una fase previa una técnica de Aprendizaje Computacional adecuada al problema, por ejemplo, redes neuronales o árboles de decisión, a seleccionar una configuración de parámetros apropiada para el proceso de aprendizaje y posteriormente, a seleccionar el modelo que ofrece mejores resultados de entre todos los creados. Todo el trabajo intermedio necesario para configurar los autómatas y el intérprete de los sujetos mediante ensayo y error desaparece, evitando así la mayor carga de trabajo que supone el enfoque de Cronobiología.

4.2.1 Técnicas de aprendizaje supervisado

El aprendizaje consiste en un proceso a través del cual se van adquiriendo conocimientos para poder mejorar los resultados a la hora de realizar un determinado problema que se repite en el tiempo. La persona que aprende va cogiendo cierta experiencia cada vez que lleva a cabo una acción para resolver dicho problema que le permitirá hacerlo mejor en la siguiente ocasión. Este proceso de aprendizaje se puede trasladar a las máquinas, lo cual se conoce como Aprendizaje Computacional. Se dice que una máquina aprende de una experiencia E con respecto a una tarea T y alguna medida de rendimiento R , si su rendimiento sobre T , medido por R , mejora utilizando la experiencia E [65]. Existen dos tipos de Aprendizaje Computacional:

- Aprendizaje supervisado (a partir de ejemplos) [65]: los ejemplos de entrada tienen definida una clase. Esta clase es un atributo asociado a los ejemplos que determina la clasificación objetiva del aprendizaje.
- Aprendizaje no supervisado (por observación) [65]: se parte de un conjunto de hechos sin clasificar.

Este trabajo se centra en el aprendizaje supervisado, puesto que se supone la existencia de unos datos de sensores de comportamiento humano que se van a utilizar como ejemplos con resultados deseados.

El proceso de aprendizaje supervisado consta de al menos dos fases: la fase de entrenamiento consiste en extraer conclusiones del conjunto de ejemplos (datos de entrenamiento) y devolver un modelo capaz de mostrar lo aprendido. La fase de prueba estudia el modelo obtenido mediante la prueba de un subconjunto de los datos iniciales y estima un coeficiente de error, que da una idea de lo exacto que es el modelo derivado del aprendizaje. Una vez se dispone de un modelo del sistema entrenado y probado, es posible predecir el valor de salida del modelo a partir de un vector de datos de entrada.

A día de hoy, son ampliamente numerosas las aplicaciones que hacen uso del Aprendizaje Computacional para efectuar ciertas tareas de aprendizaje con éxito, desde un videojuego que aprende a jugar al ajedrez a gran nivel hasta una aplicación capaz de aprender a reconocer caracteres escritos a mano. Por supuesto gran cantidad de estas aplicaciones han intentado a lo largo de la historia aprender a comportarse como un ser humano. Si bien este tipo de modelos son extremadamente complejos y resulta casi imposible a día de hoy asegurar que una máquina se pueda comportar como si fuera un humano en todos los aspectos, hay algunas con resultados parciales muy satisfactorios pero que no dejan de ser modelos de un ser humano para tareas muy concretas. En este trabajo por tanto, y como ya se ha comentado previamente, sólo interesa simular determinados aspectos de los seres humanos y para ello se hace uso del Aprendizaje Computacional.

4.2.2 Creación y aplicación de los modelos

El proceso de creación consiste en seleccionar una técnica de aprendizaje supervisado y realizar una configuración adecuada de sus parámetros durante las fases de aprendizaje y prueba. Como técnica de aprendizaje, se propone un modelo de regresión capaz de tomar valores en R^n y generar valores en R^m siendo R el dominio de los números reales. Los valores de entrada estarán formados por los datos obtenidos de sensores, por ejemplo, la localización actual del usuario y la hora, mientras que el vector de salida es el que determina el comportamiento del usuario, por ejemplo, a qué lugar se desplaza y a qué hora.

El proceso de aprendizaje de este modelo de regresión multivariable consiste en una fase de entrenamiento con los datos originales de los sensores como entradas y el comportamiento del usuario real como salida, y otra fase de prueba para validar que el modelo aprendido es suficientemente bueno en función del coeficiente de error obtenido. Con el modelo ya entrenado y probado, se produce un proceso de inferencia tal que dada una entrada de datos, por ejemplo la localización actual del sujeto a una hora determinada, el modelo es capaz de predecir salidas tales como cuál será su propio desplazamiento y cuánto tiempo pasará hasta entonces. Cuando el sujeto simulado se desplace a esa nueva localización, se utilizará dicha localización y la hora del simulador como nuevas entradas del proceso de inferencia, de esta forma iterativa, se va creando un nuevo registro de comportamiento simulado.

Según lo visto, el área de aplicación de estos modelos computacionales son escenarios donde es posible obtener datos de comportamiento provenientes de sensores, como en la rama CHROMUBE de Cronobiología. Sin embargo, esta extensión basada en Aprendizaje Computacional resulta más adecuada de manera proporcional al número de sujetos a modelar, debido a que se ahorra gran parte del trabajo manual de creación de los CMHB.

4.2.3 Validación

Para la validación de los modelos de comportamiento basados en Aprendizaje Computacional, es posible generar también unos registros de datos de comportamiento simulado. Por lo tanto, el proceso de validación es el mismo que en la rama de Cronobiología previamente estudiada. En este caso, la robustez de CHROMUBE también se basa en la aplicación de diversos tests estadísticos tales como ANOVA y test-t; y funciones de error como RMSE; que aseguran que las muestras de las poblaciones reales y los usuarios simulados son similares con alta significación estadística.

4.3 La metodología CHROMUBE: obteniendo datos de expertos

No siempre es posible obtener datos de sensores en experiencias piloto del mundo real. En ocasiones, los empresarios no pretenden únicamente validar si el funcionamiento de un servicio o aplicación es el adecuado. También se puede dar la circunstancia de que quieran comprobar mediante simulaciones si el servicio o aplicación les sería de utilidad antes de realizar cualquier mínima inversión en infraestructura o despliegue. Y no sólo por el factor económico, sino también por la dificultad que supone realizar determinados despliegues en algunos entornos, como una planta de quirófanos. En este caso, se puede desplegar un entorno de simulación completo de la planta de quirófanos con el servicio a validar funcionando y en el que unos modelos de simulación realistas de usuarios interactúan con el entorno y se comportan como se espera se comporte el equipo médico y pacientes reales. De esta forma, se puede comprobar la efectividad del sistema en un entorno simulado para aceptar el despliegue real de infraestructuras y perfilar los requisitos del sistema.

La duda en este punto es, ¿cómo se pueden crear esos modelos sin datos de sensores? Para ello, CHROMUBE propone una serie de técnicas de Adquisición de Conocimiento [64] que permiten extraer conocimiento de otras fuentes que no sean sensores, y más específicamente, de expertos. Esta extensión queda también reflejada en la figura 1.1.

4.3.1 Técnicas de Adquisición de Conocimiento

La Adquisición de Conocimiento es un campo científico cuyo principal objetivo es la construcción de una base de conocimiento [80]. Para crear dicha base de conocimiento, es imprescindible obtener el conocimiento que albergan determinadas personas denominadas expertos. Un experto es una persona que tiene mucha experiencia en un campo o dominio determinado. Dicha experiencia le confiere determinadas habilidades para realizar un trabajo de forma efectiva y eficiente, además de para enfrentarse a situaciones complejas en su día a día.

En el campo de la Adquisición de Conocimiento existen diversas metodologías, algunas de las más conocidas son CommonKADS [80] y MOKA [89]. En estas metodologías

se definen una serie de técnicas que se deben aplicar a lo largo de diferentes etapas del proceso metodológico. Algunas de estas técnicas pretenden capturar la experiencia de las personas o de otras fuentes para crear una base o almacén de conocimiento que permita ayudar a una organización en determinadas tareas. Una de las técnicas de Adquisición de Conocimiento más comunes y directas son las entrevistas. Existen varios tipos de entrevista según su estructura:

- Desestructuradas [64]: es una entrevista sin guión, se puede utilizar en fases previas de la adquisición de conocimiento para obtener algunos conceptos básicos pero es muy ineficiente.
- Semi-estructuradas [64]: es la técnica principal de adquisición de conocimiento. Partiendo de un guión de preguntas predefinido, también permite realizar cuestiones adicionales al experto para profundizar en cuestiones que puedan resultar de especial relevancia.
- Estructuradas [64]: sólo permite realizar un guión de preguntas predefinidas, sin cuestiones adicionales. En determinados casos puede resultar demasiado estricto.

Una vez el conocimiento ha sido obtenido, existen multitud de técnicas para su representación o modelado. El Modelado de Conocimiento [64] es parte esencial del proceso de adquisición de conocimiento porque permite generar una base de conocimiento. Algunas de las técnicas de Modelado de Conocimiento más comunes pueden ser: árboles, matrices, mapas, cronogramas o también ontologías. El uso de ontologías o de cualquier otra técnica de modelado que permita una codificación digital, va a facilitar la creación de modelos computacionales de conocimiento.

En este trabajo se pretende obtener mediante entrevistas el conocimiento suficiente para modelar comportamientos humanos, y mediante el uso de técnicas de modelado representar el conocimiento de forma computacional y utilizar estos modelos computacionales para generar modelos de comportamiento humano. Esta metodología se basa en la presentada por Milton [64], debido a su generalidad y sencillez.

4.3.2 Creación y aplicación de los modelos

El conocimiento obtenido tras realizar entrevistas con el grupo de expertos permite generar una base de conocimiento. Esta base de conocimiento se puede representar mediante diferentes técnicas, en este caso, se ha optado por utilizar una técnica combinada que permite simplificar el modelo de la base de conocimiento de forma que los propios expertos también puedan ayudar a revisarla.

Mediante una ontología [18] se puede crear el modelo del entorno físico, y mediante un cronograma [44] el modelo temporal de comportamientos. Si bien mediante el uso de una ontología más compleja es posible representar toda la base de conocimiento, ésto afectaría negativamente a la interpretabilidad de la representación. El objetivo de este trabajo es integrar al experto durante todo el proceso metodológico. Por lo tanto, la división de conceptos en dos modelos diferentes bastante más simples facilita dicha integración.

Esta base de conocimiento se utiliza para obtener información acerca de los comportamientos a implementar por el desarrollador. La dinámica de creación es la misma que en la rama cronobiológica de la metodología, existe un autómata jerárquico de comportamientos que se debe configurar. Aunque en este caso utilizando la información de la base de conocimiento en lugar de la obtenida a través del análisis cronobiológico y estadístico de los datos de sensores.

Algunos de los pasos de configuración son automáticos, como se ve en el artículo-sección 5.3.

4.3.3 Validación

En este caso, al no disponer de datos de sensores se hace imposible la validación por comparación entre los datos reales y los simulados. Por este motivo, se plantea una validación basada en comprobar que todos los sujetos se comportan de acuerdo a lo esperado por los expertos. Es necesario comprobar que los comportamientos se ejecutan según lo esperado (en la zona adecuada, modifican el entorno como se esperaba, etcétera) y también que se ejecutan de forma apropiada a lo largo del tiempo (no incumplen restricciones temporales). Para esta validación se emplea un conjunto de reglas de producción [45]. Con una regla para cada comportamiento se comprueba que se han cumplido los antecedentes y consecuente de cada uno. Por otro lado, las restricciones temporales se validan mediante un flujo de actividad con comprobaciones del tipo “hasta que no termine el comportamiento A no puede empezar B”.

El proceso de definición de las reglas de producción y el flujo de actividad se puede automatizar a partir de la base de conocimiento. Por ejemplo, existe un método algorítmico para crear un flujo de actividad de forma automática a partir de un cronograma.

Capítulo 5

Publicaciones presentadas a compendio en la tesis

5.1 Chronobiology Applied to the Development of Human Behavior Computational Models

Título	Chronobiology Applied to the Development of Human Behavior Computational Models
Autores	Campuzano, F. y Botia, J.A. y Villa, A.
Revista	Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments
Editorial	IOS Press
Volumen	4
Número	4/2012
Páginas	369-389
Año	2012
Mes	Julio
DOI	http://dx.doi.org/10.3233/AIS-2012-0159
URL	http://goo.gl/VVaSnL
Estado	Publicado

Detalles de la revista

Nombre: Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments
 Editores: Hamid Aghajan y Juan Carlos Augusto
 ISSN: 1876-1364 (versión impresa)
 ISSN: 1876-1372 (versión electrónica)
 Editorial: IOS Press
 Factor de impacto (2012): 1.298
 Web: <http://www.jaise-journal.org/>

Autores – Detalles personales

Nombre	Francisco José Campuzano Adán
Posición	Investigador predoctoral
Organización	Universidad de Murcia
Nombre	Dr. Juan Antonio Botia Blaya
Posición	Profesor titular
Organización	Universidad de Murcia
Nombre	Ana Villa
Posición	Desarrolladora software
Organización	Metaenlace Sistemas de Información S.L.

Contribución del doctorando

El estudiante de Doctorado en Informática, Francisco José Campuzano Adán, declara ser el autor principal y máximo contribuyente del artículo *Chronobiology Applied to the Development of Human Behavior Computational Models*

Abstract del artículo

This paper proposes CHROMUBE. It is a methodology for the creation of computational models of human behavior. That kind of simulated model has a number of applications in the smart environments and ubiquitous computing domains. For example, an interesting application is using these models for testing services and applications in smart environments (e.g. a fall detection service for elders living independently in their own house, based on sensors deployed at home). The methodology uses techniques from Chronobiology (i.e. actograms, plexograms and circadian rhythms detection) to analyze real data about the target subject's behavior. The analysis is intended to create a simulation model of the human starting from the result of such analysis. The effectiveness of the procedure is demonstrated with a running example: a real system that monitors elderly people at home. The application of CHROMUBE in such context had an influence on the pilot experience used to test the system. Thanks to CHROMUBE, its duration was reduced and the pilot more focused on the typical reliability and dependability aspects of a system that must work 24x7.

5.2 Generation of human computational models with machine learning

Título	Generation of human computational models with machine learning
Autores	Campuzano, F. y Garcia-Valverde, T. y Botia, J.A. y Serrano E.
Revista	Information Sciences
Editorial	Elsevier
Volumen	293
Páginas	97-114
Año	2015
Mes	Febrero
DOI	http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2014.09.008
URL	http://goo.gl/UhwHp6
Estado	Publicado

Detalles de la revista

Nombre: Information Sciences
 Editor: Witold Pedrycz
 ISSN: 0020-0255
 Editorial: Elsevier
 Factor de impacto (2013): 3.893
 Web: <http://www.journals.elsevier.com/information-sciences>

Autores – Detalles personales

Nombre	Francisco José Campuzano Adán
Posición	Investigador predoctoral
Organización	Universidad de Murcia
Nombre	Dra. María Teresa García Valverde
Posición	Profesor contratado doctor
Organización	Universidad Católica San Antonio Murcia
Nombre	Dr. Juan Antonio Botia Blaya
Posición	Profesor titular
Organización	Universidad de Murcia
Nombre	Dr. Emilio Serrano Fernández
Posición	Profesor ayudante doctor
Organización	Universidad Politécnica de Madrid

Contribución del doctorando

El estudiante de Doctorado en Informática, Francisco José Campuzano Adán, declara ser el autor principal y máximo contribuyente del artículo *Generation of human computational models with machine learning*

Abstract del artículo

Services in smart environments pursue to increase the quality of people's lives. The most important issues when developing this kind of environments is testing and validating such services. These tasks usually imply high costs and annoying or unfeasible real-world testing. In such cases, artificial societies may be used to simulate the smart environment (i.e. physical environment, equipment and humans). With this aim, the CHROMUBE methodology guides test engineers when modeling human beings. Such models reproduce behaviors which are highly similar to the real ones. Originally, these models are based on automata whose transitions are governed by random variables. Automaton's structure and the probability distribution functions of each random variable are determined by a manual test and error process. In this paper, it is presented an alternative extension of this methodology which avoids the said manual process. It is based on learning human behavior patterns automatically from sensor data by using machine learning techniques. The presented approach has been tested on a real scenario, where this extension has given highly accurate human behavior models.

5.3 Generation of human computational models with knowledge engineering

Título	Generation of human computational models with knowledge engineering
Autores	Campuzano, F. y Garcia-Valverde, T. y Serrano E. y Botia, J.A.
Revista	Engineering Applications of Artificial Intelligence
Editorial	Elsevier
Volumen	35
Páginas	259–276
Año	2014
Mes	Octubre
DOI	http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2014.06.027
URL	http://goo.gl/HtFhCA
Estado	Publicado

Detalles de la revista

Nombre: Engineering Applications of Artificial Intelligence
 Editor: Bernard Grabot
 ISSN: 0952-1976
 Editorial: Elsevier
 Factor de impacto (2013): 1.962
 Web: <http://goo.gl/emyaN9>

Autores – Detalles personales

Nombre	Francisco José Campuzano Adán
Posición	Investigador predoctoral
Organización	Universidad de Murcia
Nombre	Dra. María Teresa García Valverde
Posición	Profesor contratado doctor
Organización	Universidad Católica San Antonio Murcia
Nombre	Dr. Emilio Serrano Fernández
Posición	Profesor ayudante doctor
Organización	Universidad Politécnica de Madrid
Nombre	Dr. Juan Antonio Botia Blaya
Posición	Profesor titular
Organización	Universidad de Murcia

Contribución del doctorando

El estudiante de Doctorado en Informática, Francisco José Campuzano Adán, declara ser el autor principal y máximo contribuyente del artículo *Generation of human computational models with knowledge engineering*

Abstract del artículo

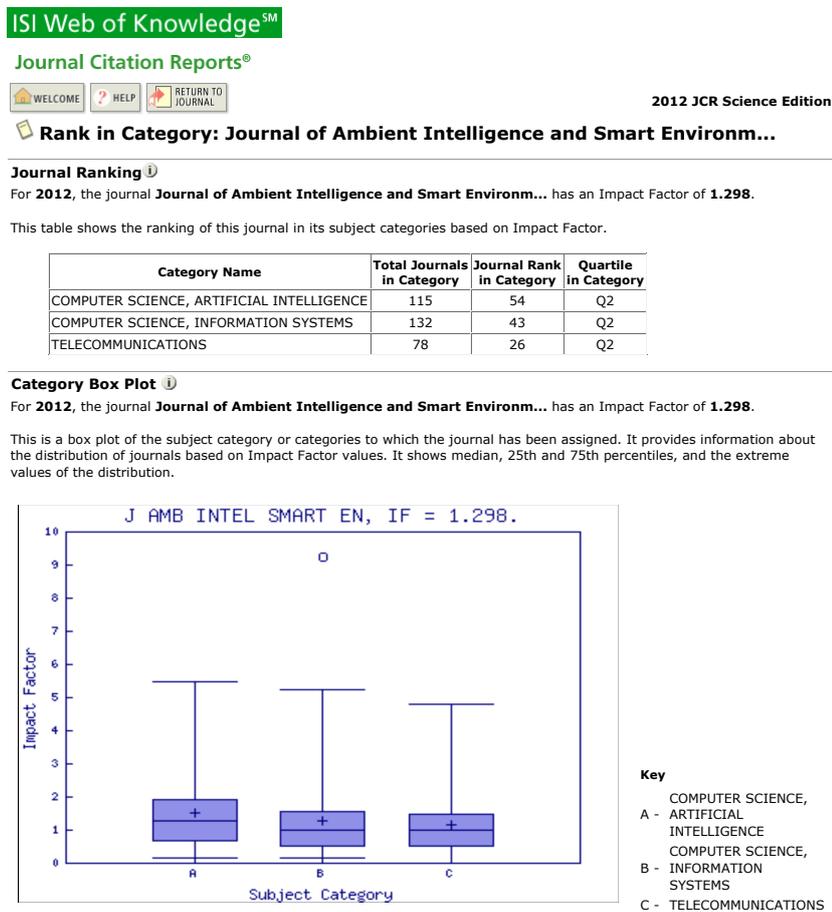
The Ambient Intelligence (AmI) paradigm envisions systems whose central entity is the user. AmI integrates technologies such as Artificial Intelligence, implicit Human Computer Interaction, and Ubiquitous Services. Each capability of AmI systems is oriented towards assistance of humans at work, in the classroom, or even at home. In consequence, the AmI development process usually incorporates the final user since the first stages. However, having users available during all this long process is not always possible. Agent-based social simulations where the users' role is played by simulated entities can be used to make the AmI development process faster and more effective. In this scenario, the modelling of CMHBs (Computational Models of Human Behaviour) is a major challenge. To address this issue, this paper proposes a methodology whose main contributions are: (1) the use of domain experts' knowledge to create CMHBs; (2) a common methodological framework to develop CMHBs by combining information obtained from sensors' perceptions and experts' experiences; and, (3) open source tools to support this development paradigm. The paper also presents a full case of study in a hospital which illustrates: the number of recommendations made by the methodology; the techniques proposed (mainly the use of ontologies and temporal reasoning); and, the potential of the methodology to model the personnel in a hospital.

Capítulo 6

Impacto de publicaciones

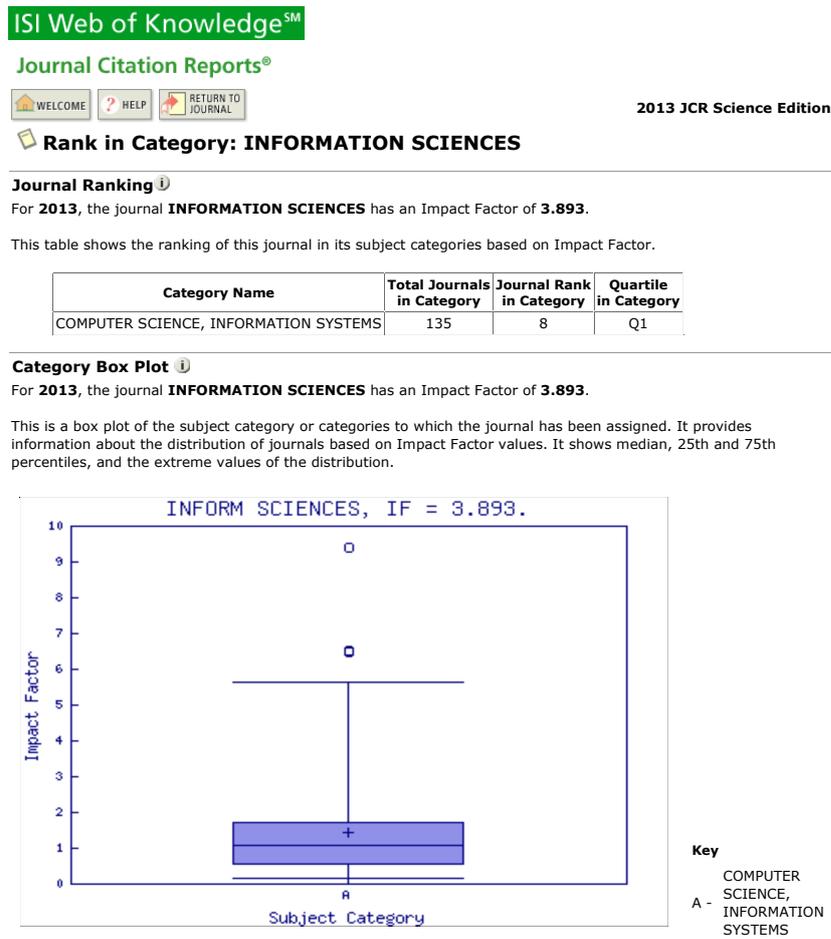
6.1 Chronobiology Applied to the Development of Human Behavior Computational Models

El artículo titulado ‘Chronobiology Applied to the Development of Human Behavior Computational Models’, ha sido publicado en la revista *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, cuya relevancia y factor de impacto se puede observar en la siguiente captura:



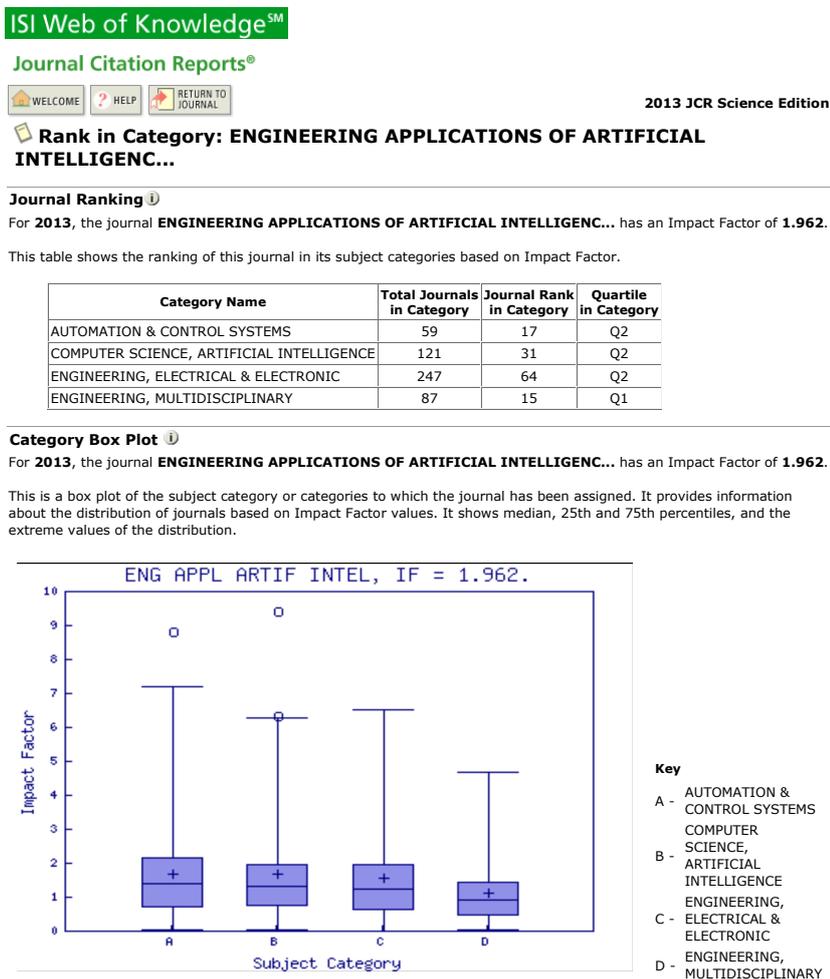
6.2 Generation of human computational models with machine learning

El artículo titulado ‘Generation of human computational models with machine learning’, ha sido publicado en la revista *Information Sciences*, cuya relevancia y factor de impacto se puede observar en la siguiente captura:



6.3 Generation of human computational models with knowledge engineering

El artículo titulado ‘Generation of human computational models with knowledge engineering’, ha sido publicado en la revista *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, cuya relevancia y factor de impacto se puede observar en la siguiente captura:



[Acceptable Use Policy](#)
 Copyright © 2014 Thomson Reuters.

Capítulo 7

Bibliografía relacionada

7.1 Referencias

- [1] Normativa Tesis por Compendio: Universidad de Murcia. <http://goo.gl/tcjzeD>. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [2] Open Agent Based Modelling Consortium. <http://www.openabm.org>. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [3] Oz Project Homepage: Carnegie Mellon University - School of Computer Science. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/oz/web/>. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [4] Proyecto Caduceo. <http://innovation.logica.com.es/es/web/caduceo>. Financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación (IPT-2011-1080-900000). Desde 01/09/2011 a 31/12/2013. Presupuesto 103.870 euros. Investigador principal: Juan A. Botía [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [5] Proyecto Cardinea. www.asi-soft.com/es/content/cardinea. Financiado por Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (TSI-020302-2008-78). Desde 01/01/2008 a 31/03/2009. Presupuesto 54.436 euros. Investigador principal: Juan A. Botía [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [6] Proyecto Caronte. <http://innovation.logica.com.es/es/web/caronte>. Financiado por Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (TSI-020302-2010-129). Desde 28/09/2010 a 31/03/2013. Presupuesto 80.395 euros. Investigador principal: Juan A. Botía [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [7] Proyecto DIA++. <http://necessity.net/>. Financiado por Ministerio de Ciencia e Innovación (IPT-2011-1080-900000). Desde 01/03/2010 a 31/09/2012. Presupuesto 165.770 euros. Investigador principal: Juan A. Botía [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].

- [8] Proyecto MSI. <http://www.ami2.net/subsecciones/msi.htm>. Financiado por Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (TSI-020302-2010-171). Desde 01/01/2010 a 31/12/2011. Presupuesto 11.880 euros. Investigador principal: Juan A. Botía [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [9] Proyecto SociAAL. <https://grasia.fdi.ucm.es/sociaal/>. Financiado por Ministerio de Economía y Competitividad (TIN2011-28335-C02-02). Desde 01/01/2012 a 31/12/2015. Presupuesto 23.500 euros. Investigador principal: Juan A. Botía [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [10] Web of Science: Ministerio de Economía y Competitividad - Gobierno de España. <https://www.accesowok.fecyt.es/>. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [11] O. S. G. Alliance. *OSGI service platform, release 3*. IOS Press, Inc., 2003.
- [12] G. Anastassakis, T. Panayiotopoulos, y T. Ritchings. Virtual agent societies with the mvital intelligent agent system. En *Intelligent Virtual Agents*, páginas 112–125. Springer, 2001.
- [13] J. R. Anderson. Act: A simple theory of complex cognition. *American Psychologist*, 51(4):355, 1996.
- [14] W. B. Arthur. On designing economic agents that behave like human agents. *Journal of Evolutionary Economics*, 3(1):1–22, 1993.
- [15] J. C. Augusto, V. Callaghan, D. Cook, A. Kameas, y I. Satoh. Intelligent environments: a manifesto. *Human-Centric Computing and Information Sciences*, 3(1):1–18, 2013.
- [16] J. Banks. Introduction to simulation. En *Winter Simulation Conference*, volumen 1, páginas 9–16. IEEE, 2000.
- [17] J. Barton y V. Vijayaraghavan. Ubiwise, a ubiquitous wireless infrastructure simulation environment. *HP Labs*, 2002.
- [18] P. Benjamin, M. Patki, y R. Mayer. Using ontologies for simulation modeling. En *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, páginas 1151–1159. Winter Simulation Conference, 2006.
- [19] P. A. Bernstein. Middleware: a model for distributed system services. *Communications of the ACM*, 39(2):86–98, 1996.
- [20] C. M. Bishop. *Pattern recognition and machine learning*, volumen 1. Springer New York, 2006.
- [21] Bluetooth Special Interest Group. Bluetooth specification version 4.0, 2010.

- [22] T. Bosse y C. Gerritsen. Comparing crime prevention strategies by agent-based simulation. En *Web Intelligence and Intelligent Agent Technologies, 2009. WI-IAT'09. IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on*, volumen 2, páginas 491–496. IET, 2009.
- [23] Botía, Juan A. and Campillo, Pablo and Campuzano, Francisco and Serrano, Emilio. UbikSim. <https://github.com/emilioserra/UbikSim/wiki>. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [24] A. Braun, S. R. Musse, L. P. L. de Oliveira, y B. E. Bodmann. Modeling individual behaviors in crowd simulation. En *Computer Animation and Social Agents, 2003. 16th International Conference on*, páginas 143–148. IEEE, 2003.
- [25] A. Caballero, J. Botía, y A. Gómez-Skarmeta. Using cognitive agents in social simulations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(7):1098 – 1109, 2011. Infrastructures and Tools for Multiagent Systems.
- [26] D. Carneiro, P. Novais, R. Costa, y J. Neves. Developing intelligent environments with OSGi and JADE. En *Artificial Intelligence in Theory and Practice III*, páginas 174–183. Springer, 2010.
- [27] L. Chittaro y M. Serra. Behavioral programming of autonomous characters based on probabilistic automata and personality. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 15(3-4):319–326, 2004.
- [28] N. Collier. Repast: An extensible framework for agent simulation. *The University of Chicago's Social Science Research*, 36, 2003.
- [29] J. S. Dahmann y K. L. Morse. High level architecture for simulation: An update. En *Distributed Interactive Simulation and Real-Time Applications, 1998. Proceedings. 2nd International Workshop on*, páginas 32–40. IEEE, 1998.
- [30] R. Davis. Knowledge-based systems. *Science*, 231(4741):957–963, 1986.
- [31] A. K. Dey. Understanding and using context. *Personal and ubiquitous computing*, 5(1):4–7, 2001.
- [32] A. Drogoul, D. Vanbergue, y T. Meurisse. Multi-agent based simulation: Where are the agents? En *Multi-agent-based simulation II*, páginas 1–15. Springer, 2003.
- [33] EA Maxis. Los sims. https://www.thesims.com/es_ES/. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [34] Eliane Alhadeff. Serious games market: Amplify disrupting serious games business development models. <http://www.seriousgamesmarket.com/2014/09/amplify-disrupting-serious-games.html>. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].

- [35] J. M. Fernández-de Alba, P. Campillo, R. Fuentes-Fernández, y J. Pavón. Opportunistic sensor interpretation in a virtual smart environment. En *Intelligent Data Engineering and Automated Learning-IDEAL 2012*, páginas 109–116. Springer, 2012.
- [36] J. M. Fernández-de Alba, P. Campillo, R. Fuentes-Fernández, y J. Pavón. Opportunistic control mechanisms for ambience intelligence worlds. *Expert Systems with Applications*, 41(4):1875–1884, 2014.
- [37] J. M. Fernández de Alba López de Pablo. *Arquitectura de pizarras distribuidas para sistemas de Inteligencia Ambiental*. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial, Universidad Complutense de Madrid, 2014.
- [38] O. Gabel, L. Litz, y M. Reif. Ncs testbed for ambient intelligence. En *Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on*, volumen 1, páginas 115–120. IEEE, 2005.
- [39] T. García-Valverde. *Formal Framework of the Capacity of Adaptation on Information Ubiquitous Systems Based on Ambient Intelligence*. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones. Universidad de Murcia, 2012.
- [40] T. Garcia-Valverde, A. Garcia-Sola, H. Hagraas, J. A. Dooley, V. Callaghan, y J. A. Botia. A fuzzy logic-based system for indoor localization using wifi in ambient intelligent environments. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 21(4):702–718, 2013.
- [41] T. García-Valverde, E. Serrano, y J. A. Botía. Combining the real world with simulations for a robust testing of ambient intelligence services. *Artificial Intelligence Review*, páginas 1–24, 2012.
- [42] N. Gilbert y K. Troitzsch. *Simulation for the social scientist*. McGraw-Hill International, 2005.
- [43] T. Gu, H. K. Pung, y D. Q. Zhang. Toward an OSGi-based infrastructure for context-aware applications. *Pervasive Computing, IEEE*, 3(4):66–74, 2004.
- [44] B. L. Harrison, R. Owen, y R. M. Baecker. Timelines: an interactive system for the collection and visualization of temporal data. En *Graphics Interface*, páginas 141–141. Citeseer, 1994.
- [45] F. Hayes-Roth. Rule-based systems. *Communications of the ACM*, 28(9):921–932, 1985.
- [46] Z. Huiliang y H. S. Ying. A parallel bdi agent architecture. En *Intelligent Agent Technology, IEEE/WIC/ACM International Conference on*, páginas 157–160. IEEE, 2005.

- [47] ID Software. Quake ii. <http://goo.gl/USpNzQ>. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [48] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE 90: IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*. 1990.
- [49] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE 24765-2010: Systems and software engineering - Vocabulary*. 2010.
- [50] W. G. Kennedy, M. Rouleau, y J. K. Bassett. Multiple levels of cognitive modeling within agent-based modeling. En *Proceedings of the 18th Conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation*. Sundance, UT, páginas 143–144, 2009.
- [51] C. D. Kidd, R. Orr, G. D. Abowd, C. G. Atkeson, I. A. Essa, B. MacIntyre, E. Mynatt, T. E. Starner, y W. Newstetter. The aware home: A living laboratory for ubiquitous computing research. En *Cooperative buildings. Integrating information, organizations, and architecture*, páginas 191–198. Springer, 1999.
- [52] J. E. Laird. Extending the soar cognitive architecture. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 171:224, 2008.
- [53] E. L. Lehmann y G. Casella. *Theory of point estimation*, volumen 31. Springer, 1998.
- [54] Y. Liu, M. J. O’Grady, y G. M. O’Hare. Scalable context simulation for mobile applications. En *On the Move to Meaningful Internet Systems 2006: OTM 2006 Workshops*, páginas 1391–1400. Springer, 2006.
- [55] F. Longo. Emergency simulation: state of the art and future research guidelines. *SCS M&S Magazine*, 1(4):2010–04, 2010.
- [56] M. Lozano, P. Morillo, J. M. Orduña, V. Cavero, y G. Viguera. A new system architecture for crowd simulation. *Journal of Network and Computer Applications*, 32(2):474–482, 2009.
- [57] S. Luke, C. Cioffi-Revilla, L. Panait, y K. Sullivan. Mason: A new multi-agent simulation toolkit. En *Proceedings of the 2004 SwarmFest Workshop*, volumen 8, 2004.
- [58] J. A. Madrid y Á. R. de Lama. *Cronobiología básica y clínica*. Editec@ red, 2006.
- [59] P. Maes, T. Darrell, B. Blumberg, y A. Pentland. The alive system: Full-body interaction with autonomous agents. En *Computer Animation’95., Proceedings.*, páginas 11–18. IEEE, 1995.
- [60] M. Martin y P. Nurmi. A generic large scale simulator for ubiquitous computing. En *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services, 2006 Third Annual International Conference on*, páginas 1–3. IEEE, 2006.

- [61] F. J. Massey Jr. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, 46(253):68–78, 1951.
- [62] S. McConnell. *Code Complete, Second Edition*. Microsoft Press, Redmond, WA, USA, 2004.
- [63] D. R. Michael y S. L. Chen. *Serious games: Games that educate, train, and inform*. Muska & Lipman/Premier-Trade, 2005.
- [64] N. R. Milton. *Knowledge acquisition in practice: a step-by-step guide*. Springer-verlag London Limited, 2007.
- [65] T. Mitchell. *Machine Learning (Mcgraw-Hill International Edit)*. McGraw Hill Higher Education, 1997.
- [66] Moore, D.S. *The Basic Practice of Statistics*. WH Freeman & Co. New York, NY, USA, 1999.
- [67] M. C. Mozer. The neural network house: An environment hat adapts to its inhabitants. En *Proc. AAAI Spring Symp. Intelligent Environments*, páginas 110–114, 1998.
- [68] A. Muñoz Ortega. *Enfoque de argumentación en sistemas multiagente basados en entornos de web semántica para la resolución de conflictos de conocimiento*. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones. Universidad de Murcia, 2011.
- [69] A. Muñoz, E. Serrano, A. Villa, M. Valdés, y J. A. Botía. An Approach for Representing Sensor Data to Validate Alerts in Ambient Assisted Living. *Sensors*, 12(5):6282–6306, 2012.
- [70] N. C. Narendra. Large scale testing of pervasive computing systems using multi-agent simulation. En *Intelligent Solutions in Embedded Systems, 2005. Third International Workshop on*, páginas 27–38. IEEE, 2005.
- [71] I. Nieto, J. Botía, y A. Gómez-Skarmeta. Information and hybrid architecture model of the OCP contextual information management system. *Journal of Universal Computer Science*, 12(3):357–366, 2006.
- [72] V. P. Niitamo, S. Kulkki, M. Eriksson, y K. A. Hribernik. State-of-the-art and good practice in the field of living labs. En *Proceedings of the 12th International Conference on Concurrent Enterprising: Innovative Products and Services through Collaborative Networks. Italia: Milán*, páginas 26–28, 2006.
- [73] H. Nishikawa, S. Yamamoto, M. Tamai, K. Nishigaki, T. Kitani, N. Shibata, K. Yasumoto, y M. Ito. Ubireal: Realistic smartspace simulator for systematic testing. En *UbiComp 2006: Ubiquitous Computing*, páginas 459–476. Springer, 2006.

-
- [74] H. Noser y D. Thalmann. Towards autonomous synthetic actors. En *Cyberworlds*, páginas 143–158. Springer, 1998.
- [75] E. O’Neill, M. Klepal, D. Lewis, T. O’Donnell, D. O’Sullivan, y D. Pesch. A test-bed for evaluating human interaction with ubiquitous computing environments. En *Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2005. Tridentcom 2005. First International Conference on*, páginas 60–69. IEEE, 2005.
- [76] N. Pelechano, K. O’Brien, B. Silverman, y N. Badler. Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication. Technical report, DTIC Document, 2005.
- [77] A. S. Pentland. *Honest Signals: How They Shape Our World*. The MIT Press, 2008.
- [78] S. Raupp Musse y D. Thalmann. Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 7(2):152–164, 2001.
- [79] V. Reynolds, V. Cahill, y A. Senart. Requirements for an ubiquitous computing simulation and emulation environment. En *Proceedings of the first international conference on Integrated internet ad hoc and sensor networks*, página 1. ACM, 2006.
- [80] G. Schreiber. *Knowledge engineering and management: the CommonKADS methodology*. the MIT Press, 2000.
- [81] P. Schreinemachers y T. Berger. An agent-based simulation model of human–environment interactions in agricultural systems. *Environmental Modelling & Software*, 26(7):845–859, 2011.
- [82] E. Serrano. *Advancing the state of the art in the analysis of multi-agent systems: Study and Development of Methods and Tools for Testing, Validation and Verification of Multi-Agent Systems*. Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones. Universidad de Murcia, 2011.
- [83] E. Serrano y J. Botía. Validating ambient intelligence based ubiquitous computing systems by means of artificial societies. *Information Sciences*, 222:3–24, 2013.
- [84] E. Serrano, J. Botía, y J. Cadenas. Ubik: a multi-agent based simulator for ubiquitous computing applications. *Journal of Physical Agents*, 3(2):39, 2009.
- [85] E. Serrano, P. Moncada, M. Garijo, y C. A. Iglesias. Evaluating social choice techniques into intelligent environments by agent based social simulation. *Information Sciences*, 286:102–124, 2014.

-
- [86] E. Serrano, G. Poveda, y M. Garijo. Towards a holistic framework for the evaluation of emergency plans in indoor environments. *Sensors*, 14(3):4513–4535, 2014.
- [87] R. Shannon. *Systems simulation: the art and science*. Prentice-Hall, 1975.
- [88] A. Steventon y S. Wright. *Intelligent spaces: The application of pervasive ICT*. Springer, 2010.
- [89] M. Stokes. *Managing Engineering Knowledge: MOKA - Methodology for Knowledge Based Engineering Applications*, volumen 3. Professional Engineering Publishing London, 2001.
- [90] R. Sun. *Cognition and multi-agent interaction: From cognitive modeling to social simulation*. Cambridge University Press, 2006.
- [91] Valve Corporation. Half-life. <http://goo.gl/rVNAN1>. [Online; último acceso 23 Septiembre 2014].
- [92] E. Vidal, F. Thollard, C. De La Higuera, F. Casacuberta, y R. C. Carrasco. Probabilistic finite-state machines. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 27(7):1013–1025, 2005.
- [93] S. Yildirim, G. L. Dam, y J. C. Houk. The mind agents in NetLogo 3.1. En *Proceedings of the 2007 spring simulation multiconference-Volume 2*, páginas 137–143. Society for Computer Simulation International, 2007.
- [94] Q. Zhao, G. Huang, J. Huang, X. Liu, H. Mei, Y. Li, y Y. Chen. A Web-Based Mashup Environment for On-the-Fly Service Composition. En *SOSE*, páginas 32–37, 2008.
- [95] Zigbee Alliance. Zigbee specification, 2006.

7.2 Publicaciones propias

- [96] F. Campuzano, J. A. Botía, y A. Villa. Chronobiology applied to the development of human behavior computational models. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 4(4):369–389, 2012.
- [97] F. Campuzano, I. Doumanis, S. Smith, y J. A. Botia. Intelligent environments simulations, towards a smart campus. En *2nd International Workshop on Smart University*, 2014.
- [98] F. Campuzano, T. García-Valverde, J. A. Botía, y E. Serrano. Generation of human computational models with machine learning. *Information Sciences*, 293:97–114, 2015.
- [99] F. Campuzano, T. García-Valverde, A. García-Sola, y J. A. Botía. Flexible simulation of ubiquitous computing environments. En *Ambient Intelligence-Software and Applications*, páginas 189–196. Springer, 2011.
- [100] F. Campuzano, T. García-Valverde, E. Serrano, y J. A. Botía. Generation of human computational models with knowledge engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 35:259–276, 2014.
- [101] F. Campuzano, E. Serrano, y J. A. Botía. Towards socio-chronobiological computational human models. En *Advances in Artificial Intelligence-IBERAMIA 2012*, páginas 392–401. Springer, 2012.
- [102] T. García-Valverde, F. Campuzano, E. Serrano, A. Villa, y J. A. Botía. Simulation of human behaviours for the validation of ambient intelligence services: A methodological approach. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 4(3):163–181, 2012.
- [103] J. J. Martínez, T. García-Valverde, F. Campuzano, P. Campillo-Sánchez, A. García-Sola, y J. A. Botía. Multi-agent based social simulation applied to validation of location services. En *Ambient Intelligence and Smart Environments: Volumen 12*, páginas 91–118. IOS Press, 2012.
- [104] I. Navarrete, J. A. Rubio, J. A. Botía, J. T. Palma, y F. J. Campuzano. Modeling a risk detection system for elderly’s home-care with a network of timed automata. En *Ambient Assisted Living and Home Care*, páginas 82–89. Springer, 2012.
- [105] F. Terroso-Sáenz, M. Valdés-Vela, F. Campuzano, J. A. Botía, y A. F. Skarmeta-Gómez. A complex event processing approach to perceive the vehicular context. *Information Fusion*, 21:187–209, 2015.

